

KÖPÜK GÖRÜNTÜSÜ VE FLOTASYON PERFORMANSI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN GÖRÜNTÜ ANALİZ SİSTEMİ İLE İNCELENMESİ

Analysis of the Relationship between Froth Appearance and Flotation Performance by Machine Vision System

Zafir EKMEKÇİ^(*)
Ayşe Nihan ŞAHİN^(**)

ÖZET

Flotasyonda köpük yüzeyinin görüntüsü ile performansı arasındaki ilişkilerin proses kontrolünde deneyimli operatörler tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Son yıllarda dijital kamera ve yüksek kapasiteli bilgisayarların gelişmesine bağlı olarak, görüntü analiz sistemlerinin flotasyonda hücre bazlı otomatik kontrol sistemi olarak kullanılmalarına yönelik araştırmalar yoğun olarak yapılmaktadır. Bu çalışmada, Küre bakır cevheri flotasyonunda hava hızı, köpürtücü dozajı ve köpük yüksekliği gibi bazı işletme değişkenlerinin flotasyon performansına ve köpük görüntüsüne (kabarcık hızı ve alanı) etkileri araştırılmış ve köpük görüntüsü ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar hava hızı artmasıyla konsantrenin Cu veriminin arttığını, tenörün düştüğünü, kabarcık alanı ve hızının arttığını göstermiştir. Köpük yüksekliğinin artmasına bağlı olarak konsantrenin Cu verimi azalmakta, tenörü artmakta, kabarcık hızı azalırken, kabarcık alanı artmaktadır. Köpürtücü dozajı arttıkça Cu verimi artmakta, tenörü düşmekte, kabarcık alanı azalırken kabarcık hızı artmaktadır. Kabarcık hızı ile flotasyon performansı arasında uyumlu ilişkiler belirlenmiş, ancak kabarcık alanı ile incelenen sınırlar içinde anlamlı ilişkiler belirlenmemiştir.

Anahtar Sözcükler: Flotasyon, Sülfürlü Cevherler, Görüntü Analiz Sistemi, Proses Kontrolü

ABSTRACT

The relationship between appearance of the froth surface and flotation performance has been used by experienced operators for very long time. In recent years, in connection with the development of digital camera and high capacity computers, many research works have been performed to use machine vision systems for cell basis automatic control. In this study, the effects of some operating parameters such as air flow rate, frother dosage and froth height on flotation performance and froth appearance (bubble velocity and area) in Küre copper ore flotation were investigated and the relationship between froth appearance and flotation performance was established. The results revealed that increasing the air flow rate led to higher Cu recovery, bubble size and velocity but lower Cu grade. When the froth height was increased, Cu recovery and bubble velocity decreased while Cu grade and bubble size increased. Higher frother dosages increased both Cu recovery and bubble velocity, but decreased Cu grade and bubble size. The flotation performance could be related to the changes with the bubble velocity with high correlation but not with the bubble area under the experimental conditions applied in this work.

Keywords: Flotation, Sulphide Ores, Machine Vision System, Process Control

^(*) Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532, Ankara, zafir@hacettepe.edu.tr

^(**) Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532, Ankara

1. GİRİŞ

Flotasyon özellikle ince tane boylarında serbestleşen cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın zenginleştirme yöntemidir. Flotasyonun uygulanmaya başlandığı 1911 yılından günümüze kadar geçen süre içinde, minerallerin flotasyon davranımlarının incelenmesine yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların bir bölümünde flotasyon işleminin performansını iyileştirmek için hidrofobik tanelerin yanı sıra konsantreye gelmesi arzu edilmeyen hidrofilik gang tanelerin davranımları, hava kabarcıklarının boyu, hızı, tane ile çarpışma olasılıkları ve tutunma verimliliği incelenmiştir (Dobby ve Finch, 1986; Ahmed ve Jameson, 1985; Pryor, 1965).

Bir mineral tanesinin konsantreye ulaşmasını etkileyen faktörler;

- toplayıcının mineral yüzeyine soğurum olasılığı,
- toplayıcı ile kaplanan mineral tanelerinin hücrenin türbülanslı zonuna girme olasılıkları,
- bu akış ortamında mineral taneleri ve hava kabarcıklarının çarpışma olasılıkları,
- mineralin hava kabarcığına tutunma olasılığı,
- mineral-hava kabarcığı ikilisinin köpük fazına gitme olasılığı
- değerli mineralin köpükten alınabilme olasılığı

şeklinde sıralanmaktadır (Ek, 1991).

Böylece devrede yapılacak bazı düzenlemelerle ve kullanılacak bazı yardımcı cihazlarla (basınç algılayıcıları, iletkenlik problemleri, ultra ses ekipmanları, kamera, bilgisayar, vb.) bu olasılıklar daha iyi kontrol edilebilir ve buna bağlı olarak konsantrenin verimi ve tenörü istenilen değerlerde tutulabilir, reaktif tüketimi en aza indirilip, işletme maliyeti azaltılarak, kâr artırılabilir.

1.1 Otomatik Kontrol Sistemleri

Flotasyonun kontrolünde kullanılan otomatik kontrol sistemlerinde beslemeye göre ve artığa göre olmak üzere iki farklı sistem mevcuttur (Lynch vd, 1981). Beslemeye göre olan kontrol sistemi cevher yapısındaki değişikliklere uyum

sağlayabilse de reaktif gereksinimi konusundaki değişikliklere hızlı cevap verememektedir. Diğer taraftan artığa göre yapılan kontrol sisteminde ise gereken müdahalenin yapılabilmesi için flotasyon devresinde döngünün tamamlanması gerektiğinden devreye hızlı müdahale yapılamamaktadır. Ayrıca bu sistemlerin verim ve tenör değerleri için sürekli kimyasal analizlere ihtiyaç duyması sebebiyle de tepki verme süresi uzamaktadır. Köpürtücü dozajının kontrolünde ölçülen değişkenle, kontrol değişkeninin (köpürtücü dozajı) ayarlanması arasında geçen sürenin uzun olması özellikle temizleme devrelerinde kötü etkiler yaratmaktadır.

Palp seviyesinin kontrolü sırasında kullanılan ekipmanların da bazı dezavantajları vardır:

- yüzey ekipmanlarının palp yoğunluğundaki değişikliklere karşı aşırı hassas olması (Huls vd, 1990),
- elektrotlu algılayıcı sistemlerinin uzun zamanda cevap verebilmesi (Kitzinger vd, 1979),
- konsantre ve artık ayar noktalarının belirlenmesindeki problemler,
- basınç algılayıcıları, iletkenlik problemleri, ultra ses ekipmanlarının hepsinin temasla ölçüm yapan ekipmanlar olması nedeniyle palp ve köpük fazının fiziksel değişimlerinden etkilenmesi (Moolman vd, 1996).

1.2 Görüntü Analiz Sistemi ve Uygulamaları

Görüntü analiz sisteminde palpa temasla ölçüm yapılmadığı için köpük fazının fiziksel görünümünden etkilenmeden proses kontrolü yapılabilmektedir. Köpüğün taşıdığı mineral miktarını (köpük yükünü) görüntülediği için, atık numunesini temel alan klasik sisteme göre daha kısa sürede cevap verir. Ekonomik ya da teknik nedenlerle numune almanın bazı akışlarda olanaksız olması ve cevher karakterindeki değişimlerin köpük yapısındaki değişimler ile izlenebilmesi gibi nedenlerden dolayı görüntü analiz sistemi daha avantajlı olmaktadır. Kullanımı kolaydır, güvenilir bir alıcıdır ve daha az bakım masrafı gerektirmektedir (Moolman vd, 1996).

Flotasyon işleminde en uygun performansın elde edilmesinde otomatik olarak kontrolü sağlayan görüntü analiz sistemi, operatörün tecrübesine

ve becerisine bağlı kalmak yerine daha hassas, güvenilir, hızlı ve verimli bir şekilde kontrolü gerçekleştirir. Bu sayede yapılan performans değerlendirmesi ile karşılaşılan problemlere karşı eş zamanlı bir müdahaleyi mümkün kılar.

Köpük fazının eş zamanlı görüntülenmesi fikrini ilk olarak Woodburn ortaya atmıştır. Woodburn optimum köpük yapısının görsel olarak anlaşılabilirliğini ve bunun nicel olarak görüntü analiz teknikleriyle ortaya konulabileceğini ileri sürmüştür. Görüntü analiz sistemi üzerinde Cape Town Üniversite'sinin geliştirdiği SmartFroth™ yazılım programından başka Şili Katolik Üniversitesi Aceflot'u, Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkezi (JKMRC) JKFrothCam'i ve Outokumpu Frothmaster'ı geliştirmiştir.

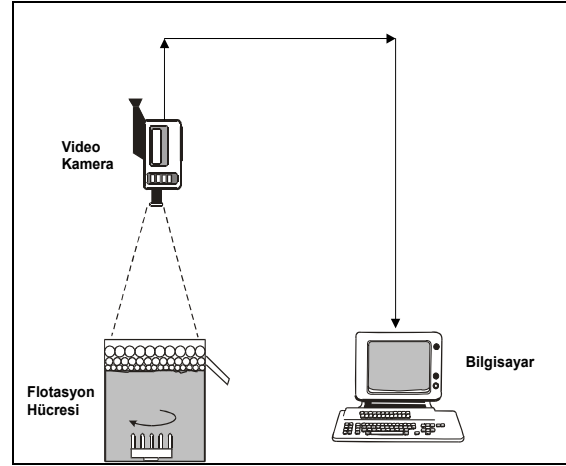
Görüntü analiz sistemlerinin uygulanabilirliği genellikle kömür, sülfürlü cevherler ve platin grubu elementlerin bulunduğu cevherlerde çalışılmıştır. Köpüğün rengi, yapısı, kabarcık hızı, alanı ve duraylılığı gibi parametreler ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır (Kordek ve Kulig, 1997; Moolman vd, 1994-1995; Aldrich vd, 1997; Hargrave vd, 1996; Banford vd, 1998; Guarini vd, 1995; Hatfield, D., 2004)

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada Küre bakır cevheri kullanılarak köpük yapısı ve flotasyon performansı arasındaki ilişkiler laboratuvar ölçekli kesikli flotasyon deneyleri ile belirlenmiştir. Flotasyon hücresinin üzerine yerleştirilen video kameradan alınan görüntüler, Cape Town Üniversitesi, Cevher Zenginleştirme Birimi (MPRU) tarafından geliştirilen SmartFroth™ adlı program kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 1). Bu çalışmada köpük yüzeyindeki kabarcıkların hızı ve alanı kullanılarak köpük yapısındaki değişimler incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan Küre bakır cevherinin bakır içeriği % 0,79 olarak belirlenmiştir. Flotasyonda kullanılan cevher Outokumpu bilyalı değirmen kullanılarak % 60 ağırlıkça katı palp yoğunluğunda % 80'i 75µm'un altına geçecek şekilde öğütülmüştür. Palpın pH'sını 11,5 değerine ayarlamak için 10 gram kireç ve toplayıcı (Hostaflo X231) değirmene eklenmiştir. Flotasyon işleminde ise görüntü alımına uygun olarak tasarlanmış Leeds tipi 3 lt hacimli pleksiglas flotasyon hücresi kullanılmıştır. Flotasyon işlemi % 30 ağırlıkça katı palp

yoğunluğunda ve 1200 d/d pervane hızında gerçekleşmiştir. Kullanılan reaktifler halen Küre Bakır İşletmesi flotasyon devresinde kullanılan reaktiflerden alınmıştır. Flotasyon işleminde dört konsantr 0,5, 1,5, 3,5 ve 8,5 dakika sürelerinde alınmış ve Cu, Fe analizleri AAS ile yapılmıştır.



Şekil 1. Kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi.

Köpük yapısı ve dolayısıyla flotasyon performansı arasındaki ilişkiler hava hızı, köpük yüksekliği ve köpürtücü (Dowfroth 250) dozajı değiştirilerek üç farklı dozajda incelenmiştir (Çizelge 1). Kullanılan dozajlar (yüksek, standart, düşük) proje kapsamında yapılan ön deneyler sonucunda belirlenmiştir.

Çizelge 1. İşlem Parametreleri

Hava Hızı (lt/dak)(cm)	Köpük Yüksekliği (gr/t)	Köpürtücü Dozajı
3	1	5
4	2	10
5	3	20

Çizelge 2. Tekrarlanabilirlik Deney Sonuçları

	Ortalama	Standart Hata*
Küm. Kütle (gr)	34,35	2,56
Küm. Su (gr)	44,48	0,32
Küm. Cu Verim (%)	49,46	1,86
Küm. Cu Tenör (%)	13,03	0,46
Küm. Pirit Verim (%)	2,42	0,15
Kabarcık Hızı (mm/sn)	8,07	0,71
Kabarcık Alanı (mm ²)	51,81	2,80

*%90 güven aralığında

Tekrarlanabilirlik deneyleri ise standart koşul olarak belirlenen orta dozajda 3 defa uygulanmıştır (Çizelge 2). Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler %90 güven aralığında deneylerin tekrarlanabilirliğinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermiştir.

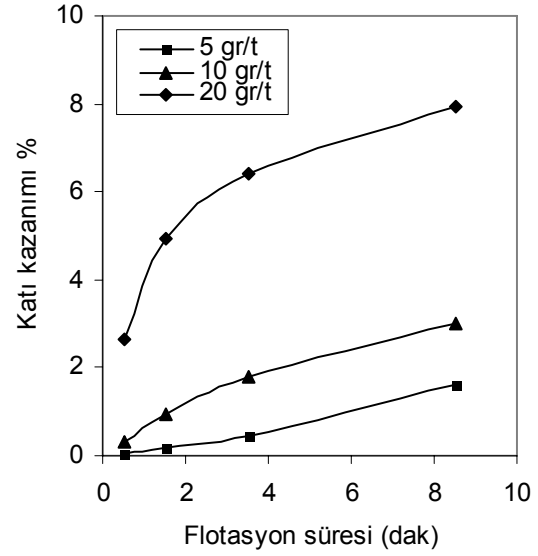
Flotasyon işlemi sırasında hücrenin yaklaşık 1,5 metre üzerine yerleştirilen bir ışık kaynağıyla (spot lamba) homojen bir aydınlatma sağlanmıştır (Şekil 1). Köpük yüzeyinde oluşan kabarcıkların alanı elde edilen görüntüde hızlı su bölümü çizgisi dönüştürücüsünün (Fast Watershed Transform) kullanılması ile hesaplanmıştır. Bu algoritma, köpük görüntüsünü her bir kabarcığı görece şekilde bölümlere ayırmakta ve piksel cinsinden kabarcıkların alanlarını belirlemektedir (Wright, B. A., 1999). Kabarcıkların hızı ise ardışık iki görüntü karesindeki kabarcıklar kümesinin hedef alınması ve yatay olarak birim zamandaki yer değişimleri ile tespit edilmiştir.

3. İŞLEM PARAMETRELERİNİN FLOTASYON PERFORMANSINA ETKİSİ

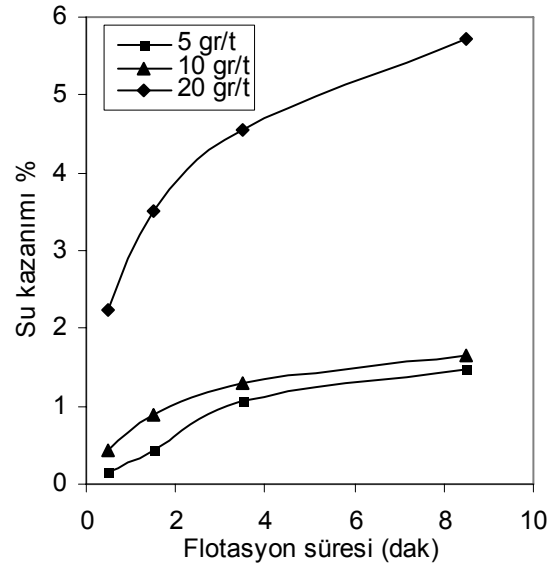
Flotasyon performansının değerlendirilmesinde konsantrenin bakır (Cu) ve pirit (gang minerali) tenör ve verimlerinin yanı sıra katı ve su kazanımları da gösterge olarak kullanılmıştır. Pirit miktarı kimyasal analizler sonucunda elde edilen toplam Fe miktarından kalkopiritten gelen Fe miktarının çıkarılması sonucunda bulunmuştur. Bu hesaplamalarda kalkopirit ve piritin kimyasal formülleri sırasıyla $CuFeS_2$ ve FeS_2 olarak kabul edilmiştir. Katı verimi köpüğün ne kadar yüklü olduğunu, duraylılığını; su kazanımı da aynı şekilde köpük duraylılığını ve tanelerin su ile taşınma derecesini ifade eder.

3.1 Katı ve Su Kazanımı

Köpürtücü dozajının katı ve su kazanımlarına etkileri Şekil 2 ve 3'de flotasyon süresinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar köpürtücü dozajındaki artışa bağlı olarak su ve katı verimlerinin arttığını göstermektedir. Köpürtücü dozajının artırılması köpük fazının duraylılığını arttırmakta ve buna bağlı olarak su verimi ve katı verimi artmaktadır. Ancak, köpürtücü dozajının 10 gr/t dan 20 gr/t değerine artırılması su verimini ve buna bağlı olarak katı verimini aşırı ölçüde arttırmıştır.

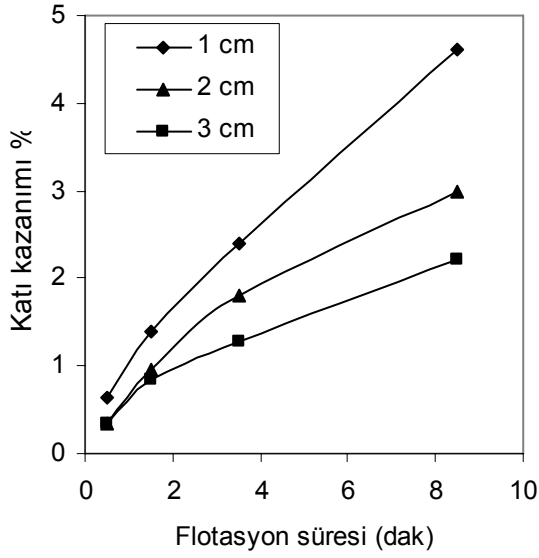


Şekil 2. Farklı köpürtücü dozajlarında katı kazanımı.

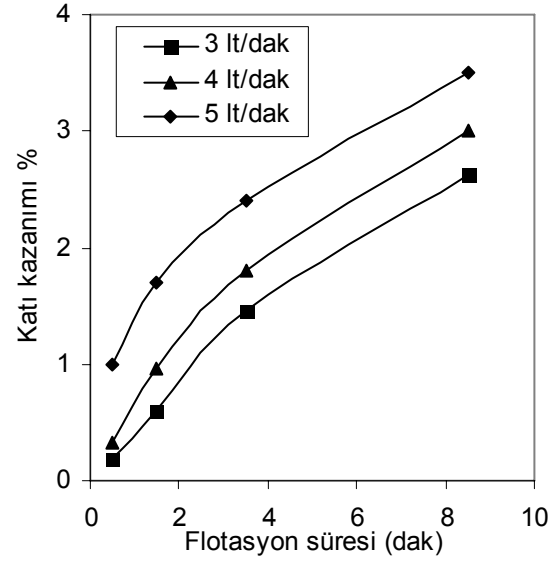


Şekil 3. Farklı köpürtücü dozajlarında su kazanımı.

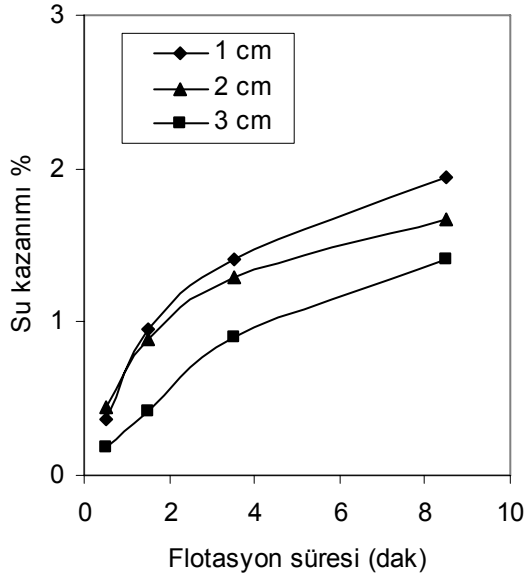
Köpük yüksekliği değişiminde ise köpük yüksekliği arttıkça tanelerin köpükte kalma süresi artmakta ve köpük fazında yükselen katı ve su miktarı köpükteki drenaj nedeniyle azalmaktadır. Böylece katı ve su kazanımı köpük yüksekliğindeki artışa bağlı olarak azalmaktadır (Şekil 4-5).



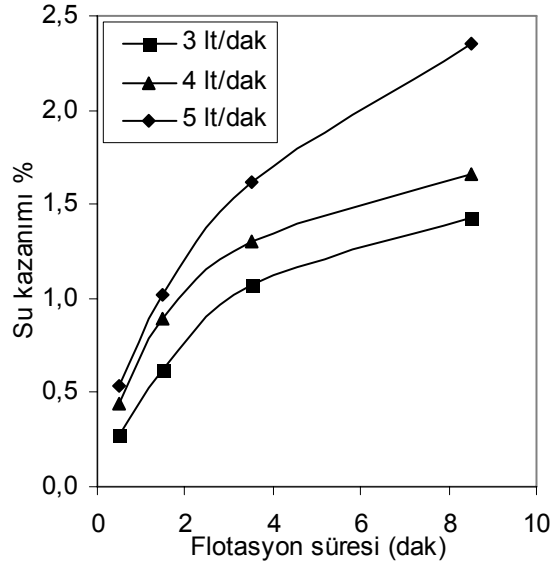
Şekil 4. Farklı köpük yüksekliklerinde katı kazanımı.



Şekil 6. Farklı hava hızlarında katı kazanımı.



Şekil 5. Farklı köpük yüksekliklerinde su kazanımı.



Şekil 7. Farklı hava hızlarında su kazanımı.

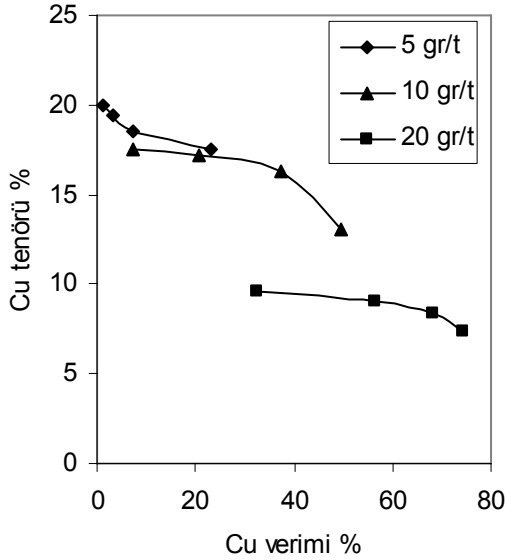
Katı ve su kazanımının hava hızına bağlı değişimleri Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Hava hızının artırılmasıyla hem su verimi hem de katı verimi artmıştır. Bu durum hava hızının artmasına bağlı olarak kabarcık-mineral çarpışma olasılığının artmasına ve uygun köpürtücü dozajında köpük fazında yeniden oluşan kabarcık sayısının patlayan kabarcık sayısından daha fazla olmasına bağlanmıştır.

3.2 Cu Verim ve Tenörü

Küre bakır cevherinin flotasyon ile zenginleştirilmesinin amacı kalkopiritin pirit ve diğer gang minerallerinden seçimli olarak ayrılmasıdır. Bu çalışmadaki işlem değişkenlerinin Cu verim ve tenörüne etkileri Şekil 8 ve 10'da verilmiştir.

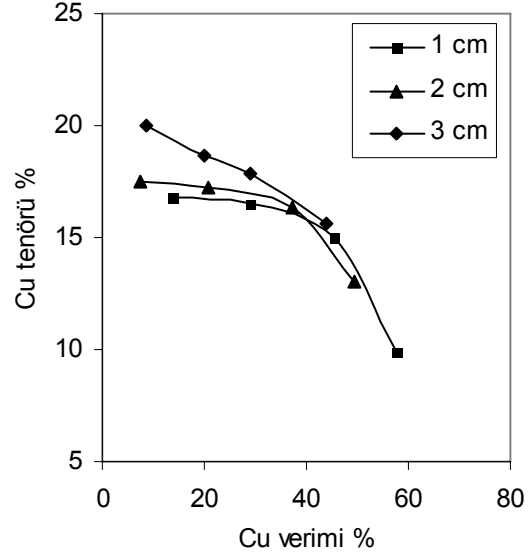
Köpürtücü dozajının Cu verim ve tenörüne etkisi Şekil 8'de verilmiştir. Köpürtücü dozajının

artırılmasına bağlı olarak Cu verimi artmış ancak buna karşılık tenör azalmıştır. 20 gr/t ve 10 gr/t dozajında yapılan deneyler karşılaştırıldığında, aynı verim değerinde bile 20 gr/t deneyinde elde edilen tenörün 10 gr/t deneyine kıyasla çok düşük olduğu görülmüştür. Bu durum yüksek köpürtücü dozajında çok duraylı ve hızlı bir köpük yapısının oluşmasına ve buna bağlı olarak gang minerallerinin su ile konsantreye taşınmasına bağlanmıştır. Düşük köpürtücü dozajında ise göreceli olarak daha kırılabilir bir köpük yapısı elde edilir. Diğer bir değişle köpükteki kabarcıkların birleşme olasılıkları ve daha sonra patlayarak hava kabarcıklarına tutunmuş mineral tanelerinin palpa geri dönme olasılıkları artar. Böylece düşük köpürtücü dozajında Cu veriminde azalma gözlenirken, su ile taşınım mekanizmasının daha az olması nedeniyle Cu tenöründe artış gözlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı köpürtücü dozajlarında Cu verim ve tenör ilişkisi.

Köpük yüksekliğinin artırılmasıyla konsantre tenörü önemli ölçüde artarken, verimde düşüş görülmüştür (Şekil 9). Bunun en önemli nedeni, köpük yüksekliğinin artmasıyla köpükteki drenajın artması ve bunun sonucunda yüksek hidrofob özelliğe sahip serbest kalkopirit tanelerinin konsantreye gelmesi ve diğerlerinin palpa geri dönmesidir.

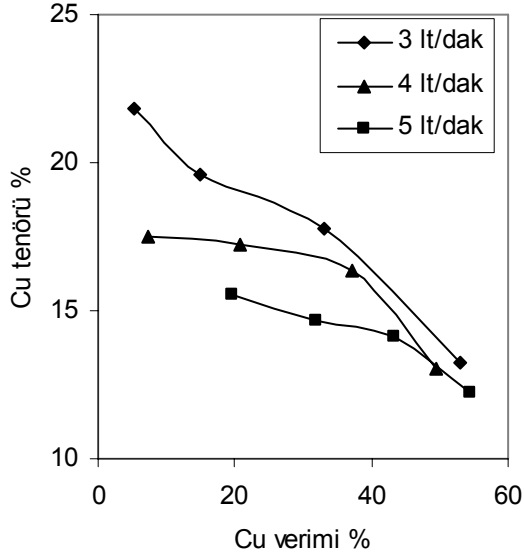


Şekil 9. Farklı köpük yüksekliklerinde Cu verim ve tenör ilişkisi.

Köpürtücü dozajı ve köpük yüksekliğinden farklı olarak hava hızının etkisi ilk üç konsantrede belirgin bir şekilde gözlenmiş, ancak nihai konsantre değerleri her üç hava hızında da birbirlerine yakın olmuştur (Şekil 10). Hava hızının artışıyla Cu verimi artarken, Cu tenörü azalmaktadır. Elde edilen veriler hava hızının daha çok flotasyon hızını önemli derecede etkilediğini göstermiştir. Hava akış hızının artmasıyla hücrede birim zamanda oluşan kabarcık sayısı da artmaktadır. Buna bağlı olarak tanelerin kabarcıklar ile çarpışma olasılığı ve dolayısıyla flotasyon hızları artmaktadır. Ancak, hava hızının artması belli bir oranda su kazanımını da arttırmakta ve buna bağlı olarak hidrofobik ince gang taneleri su ile taşınarak konsantre tenörünün azalmasına neden olmaktadır.

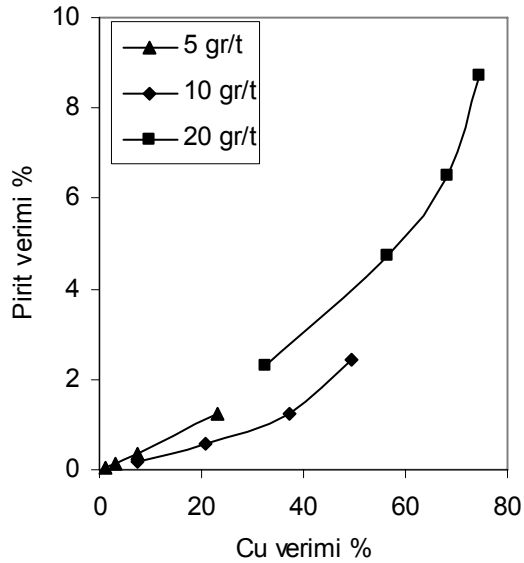
3.3 İşlem Parametrelerinin Seçimliliğe Etkisi

İşlem parametrelerinin pirit flotasyonuna etkileri seçimliliği gösteren grafikler ile değerlendirilmiştir. Gang minerali olan piritin konsantreye gelmesini önlemek amacıyla pH 11,5-12 civarında tutulmuştur. Buna rağmen, özellikle ince pirit taneleri su ile taşınma mekanizmasıyla konsantreye gelmekte ve konsantrenin Cu tenörünü düşürmektedir.



Şekil 10. Farklı hava hızlarında Cu verim ve tenör ilişkisi.

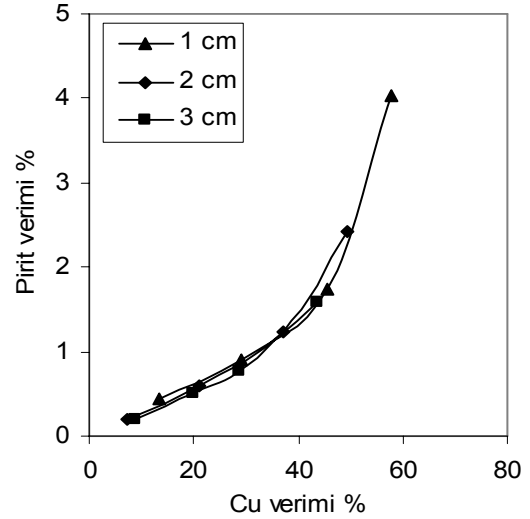
Köpürtücü dozajı artırıldığında Cu ve pirit verimlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum, daha duraylı bir köpük yapısının oluşmasıyla, yeterli düzeyde drenajın gerçekleşmemesine ve dolayısıyla piritin daha fazla miktarda su ile taşınarak konsantreye gelmesine bağlanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Farklı köpürtücü dozajlarında Cu ve pirit verimi ilişkisi.

Bir diğer işlem parametresi olan köpük yüksekliğinin etkisi incelendiğinde ise Cu ve pirit verimlerinin köpük yüksekliği ile ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür (Şekil 12). Yani köpük yüksekliği arttırıldığında su ile taşınım mekanizması azalırken, drenaj arttığı için hem Cu hem de pirit verimi azalmıştır. Buna göre köpük yüksekliği 1 cm'den 3 cm'ye arttırıldığında, Cu ve pirit verimleri sırasıyla % 57,76'dan % 43,81'e ve % 4,02'den % 1,58'e düşmüştür.

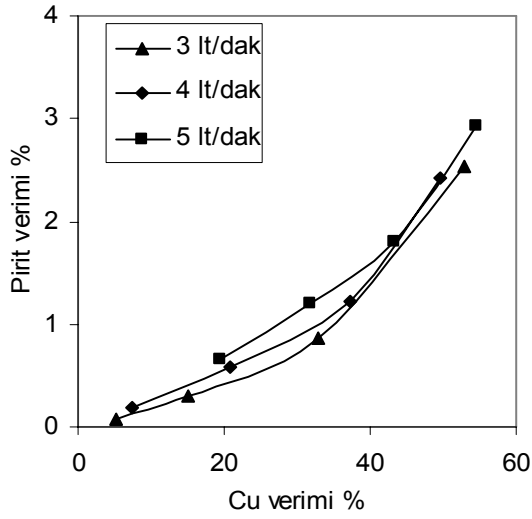
Cu ve pirit verimleri hava hızı değişiminden doğru orantılı olarak etkilenmiştir. Hava hızı azaltıldığı zaman köpüğe gelen su miktarı azalmaktadır (Şekil 7). Ancak, toplam pirit ve Cu verimleri dikkate alındığında hava hızındaki değişimin seçimliliğe etkisi köpürtücü dozajı ve köpük yüksekliği kadar büyük olmadığı görülmüştür (Şekil13).



Şekil 12. Farklı köpük yüksekliklerinde Cu ve pirit verimi ilişkisi.

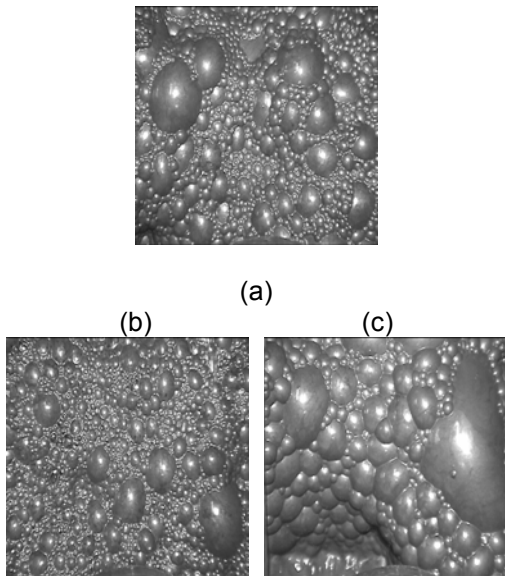
4. İŞLEM PARAMETRELERİNİN KÖPÜK GÖRÜNTÜSÜNE ETKİSİ

Flotasyon işleminin performansı önemli ölçüde köpük yüzeyinde oluşan kabarcıkların boyuna ve hızına bağlıdır. Özellikle mineral ve hava kabarcığının çarpışma olasılıkları ve çarpışma verimleri (mineralin hava kabarcığına tutunması) küçük boydaki hava kabarcıklarında daha etkilidir (Dobby ve Finch, 1986; Ahmed ve Jameson, 1985; Pryor, 1965).



Şekil 13. Farklı hava hızlarında Cu ve pirit verimi ilişkisi.

Standart koşul olarak kabul edilen 10gr/t köpürtücü dozajı, 2 cm köpük yüksekliği ve 4 lt/dak. koşullarında yapılan deneyden elde edilen köpük görüntüsü ile en düşük ve en yüksek köpürtücü dozajlarında elde edilen görüntüler Şekil 14'de karşılaştırma amacıyla örnek olarak verilmiştir.



Şekil 14. a) 10 gr/t, b) 20 gr/t c) 5 gr/t köpürtücü dozajında köpük görüntüsü.

Standard koşula göre kıyaslandığında, düşük köpürtücü dozajında kabarcıkların birleşmesi (coalescence) nedeniyle daha büyük kabarcıklar, yüksek köpürtücü dozajında ise küçük kabarcıklar elde edilmiştir. Köpürtücü dozajı düşük seviyede (5 gr/t) kullanıldığında kabarcık alanı büyük, köpürtücü dozajı üst seviyede (20 gr/t) kullanıldığında ise kabarcık alanı küçük bir görünüm sergilemiştir.

4.1. Hava Kabarcığı Hızı ve Alanının İşlem Parametreleri ile Değişimi

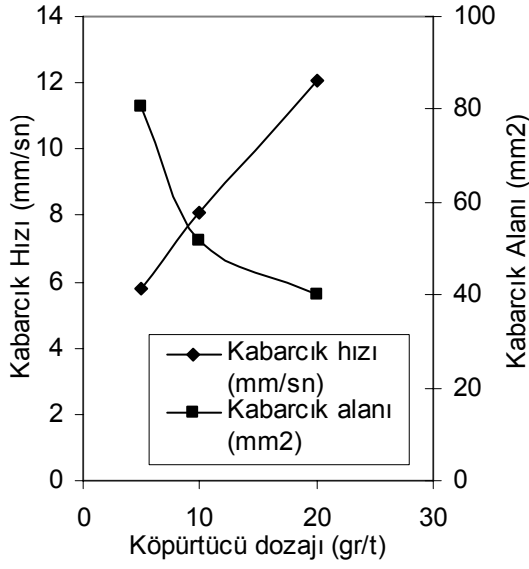
Flotasyonda köpürtücünün fonksiyonu, sıvı-gaz ara yüzeyinde yüzey gerilimini düşürerek sürekli ve duraylı bir köpük tabakası oluşturmaktır. Ayrıca palta heterojen bir boyut dağılımına sahip olan hava kabarcıklarının, daha küçük çaplı ve homojen bir yapıya sahip olmalarını da sağlamaktadır (Laplante vd, 1983). Bu nedenlerden dolayı, köpürtücü dozajı artırıldığında kabarcık hızı artarken, kabarcık alanı azalmıştır (Şekil 15).

Köpük yüksekliği artırıldığında ise kabarcık hızı azalırken, ortalama kabarcık alanı artmıştır (Şekil 16). Köpük yüksekliğinin artması tanelerin köpükte kalma süresinin artmasına ve dolayısıyla köpükteki kabarcıkların birleşerek daha büyük kabarcıklar oluşturmasına neden olmuştur.

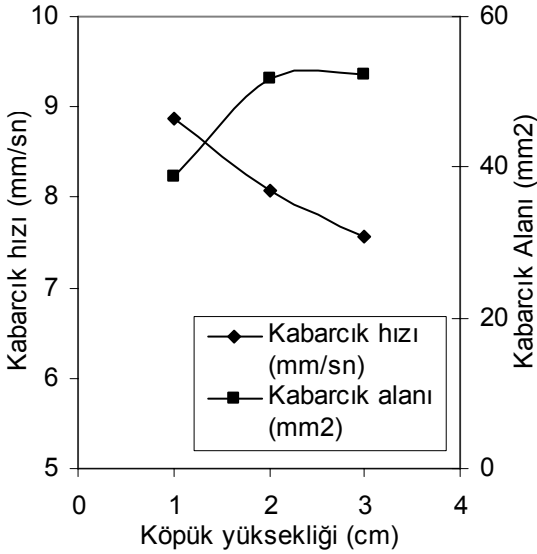
Hava hızının kabarcık boyu ve hızı üzerindeki etkisi Şekil 17'de verilmiştir. Hava hızının artmasıyla köpük hareketliliği, diğer bir değişle kabarcık hızı ve uygun köpürtücü dozajında kabarcık alanı artmaktadır. Hava hızının artması flotasyon hücresinde birim hacimde oluşan kabarcık sayısını artırarak köpük yapısının daha akışkan olmasını sağlamaktadır. Kabarcıkların duraylı olduğu (yeterli köpürtücü dozajının olduğu koşullarda) koşullarda köpükteki hava miktarının daha fazla olması kabarcıkların birleşerek daha büyük kabarcıkların oluşmasına neden olmaktadır.

5. KÖPÜK GÖRÜNTÜSÜ İLE FLOTASYON PERFORMANSI ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Bu aşamaya kadar bu çalışmada işlem değişkenleri olarak kullanılan hava hızı, köpük yüksekliği ve köpürtücü dozajının flotasyon performansına ve köpük görüntüsüne etkisi tartışılmıştır. Bu bölümde, kabarcık alanının ve



Şekil 15. Köpürtücü dozajının kabarcık hızı ve alanı üzerindeki etkisi.

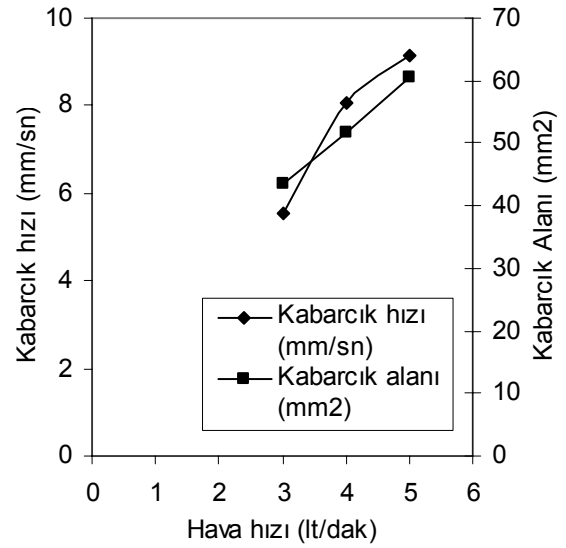


Şekil 16. Köpük yüksekliğinin kabarcık hızı ve alanı üzerindeki etkisi.

kabarcık hızının flotasyon performansının kontrolünde gösterge olarak kullanımı tartışılmıştır.

Laboratuvar ölçekli flotasyon deneylerinde flotasyon sırasında köpük genellikle periyodik olarak sıyrılarak konsantreye alınır. Ancak, bu durum köpük hızının ölçülmesini

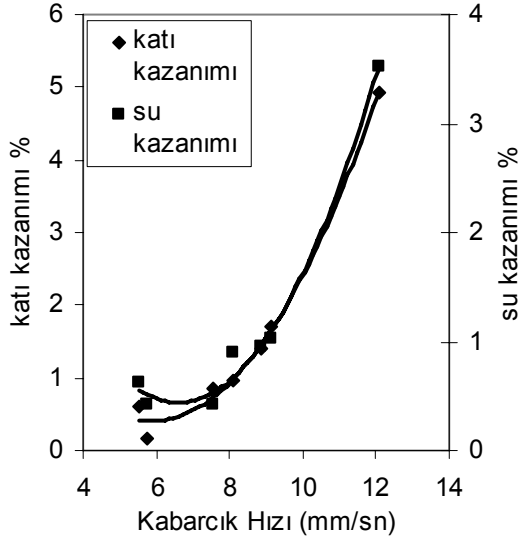
imkansızlaştırmakta ve kabarcık alanının sağlıklı olarak ölçülmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, flotasyon başlangıcından itibaren ilk iki konsantre (0,5 ve 1,5 dakika sürelerinde alınan konsantreler) herhangi bir köpük sıyırma işlemi yapılmadan, kendi hızıyla akarak elde edilmiştir. Bu nedenle, kabarcık hızı ve alanı ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiler ilk iki konsantre baz alınarak değerlendirilmiştir.



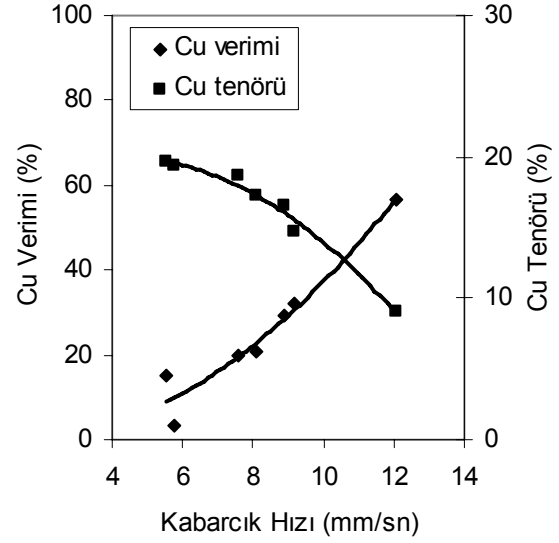
Şekil 17. Hava hızının kabarcık hızı ve alanı üzerindeki etkisi.

Kabarcık hızı ile katı ve su kazanımları arasındaki ilişkiler Şekil 18'de gösterilmiştir. Kabarcık hızındaki artışa bağlı olarak katı ve su kazanımlarının arttığı gözlenmiştir. Kabarcık hızı 8 mm/sn değeri ve üzerinde bu ilişkinin doğrusal olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar kabarcık hızı kullanılarak hem su hem de katı veriminin sağlıklı olarak tahmin edilebileceğini göstermektedir.

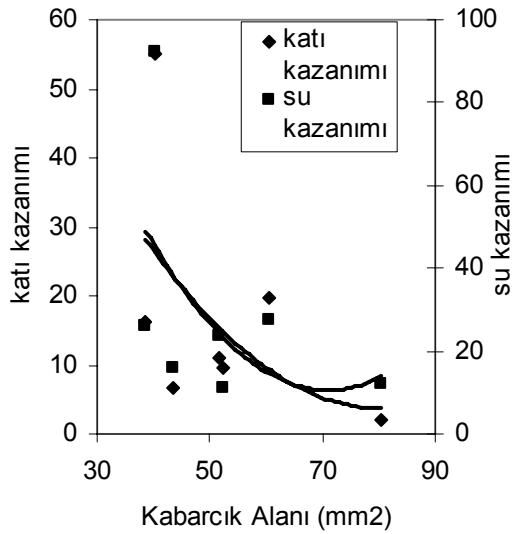
Kabarcık alanı ile su ve katı kazanımları arasında anlamlı bir ilişki gözlenememiştir (Şekil 19). Bu durumun kabarcık alanı olarak ifade edilen değerlerin 1,5 dakika flotasyon süresi içinde elde edilen değerlerin ortalama değeri olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kesikli flotasyon deneylerinde flotasyon işleminin başlangıcındaki köpük koşulları ile ikinci konsantrenin sonundaki koşullar aynı değildir. Bu durumun kabarcık alanını büyük oranda etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 18. Kabarcık hızı değişimi ile katı-su kazanımı.



Şekil 20. Kabarcık hızı ile Cu verim ve tenör ilişkisi.



Şekil 19. Kabarcık alanı değişimi ile katı-su kazanımı.

Konsantreye gelen bakır verimi ve tenörü ile kabarcık hızı arasındaki değişimler Şekil 20'de verilmiştir. Beklendiği gibi kabarcık hızı arttığında Cu verimi artmış ve Cu tenörü azalmıştır. Bakır verim ve tenöründeki değişimler incelenen sınırlar içinde yüksek bir doğruluk katsayısı ile belirlenebilmektedir. Bu veriler, kabarcık hızını kullanarak konsantrenin Cu verimini ve tenörünü tahmin etmenin mümkün olduğunu göstermektedir.

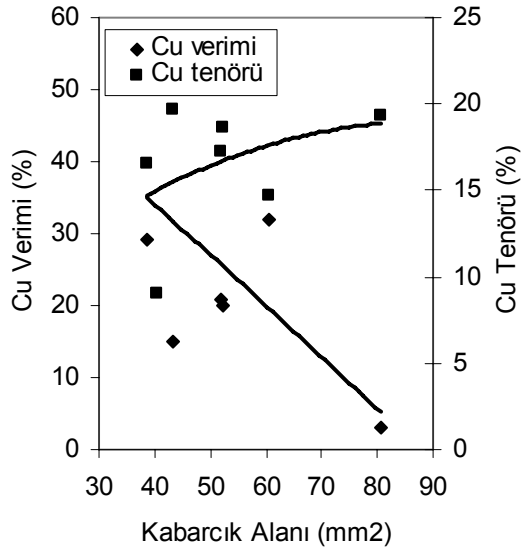
Kabarcık alanının Cu verim ve tenörüne etkisi incelendiğinde saçınımlı bir ilişkinin olduğu görülmüştür (Şekil 21). Bu nedenle bakır verimi ve tenörü ile kabarcık alanı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve kabarcık alanını bir kontrol parametresi olarak kullanmak mümkün olmamıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında hava hızı, köpük yüksekliği ve köpürtücü dozajının Küre bakır cevherinin flotasyon performansına etkileri ve köpük görüntüsü ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Hava hızının artırılmasıyla konsantrenin Cu verimi artmış, ancak tenörü düşmüştür. Hava hızı hem kabarcık hızı ve hem de alanını arttırmıştır. Köpük yüksekliği arttıkça köpük fazındaki drenajın artmasına bağlı olarak konsantrenin Cu verimi azalmakta, tenörü artmakta, kabarcık hızı azalırken, kabarcık alanı artmaktadır. Köpürtücü dozajındaki artış ise daha hareketli bir köpük yapısı oluşturduğundan Cu verimi artmakta, tenörü düşmekte, kabarcık alanı azalırken kabarcık hızı artmaktadır.

Kabarcık hızı ile flotasyon performansı arasında uyumlu bir ilişki belirlenmiş, ancak kabarcık alanı ile flotasyon performansı arasındaki ilişkiler saçınımlı olmuştur. Buna bağlı olarak Küre bakır cevherinin flotasyonunda kabarcık hızının bir kontrol parametresi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. İşlem parametreleri ile (hava hızı,



Şekil 21. Kabarcık alanı ile Cu verim ve tenör ilişkisi.

köpük yüksekliği, köpürtücü dozajı) kabarcık hızı optimum değerinde tutularak flotasyon performansı kontrol edilebilecektir.

Elde edilen sonuçlar, görüntü analiz sisteminin bir otomatik kontrol sistemi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu çalışmaların tesis ölçeğinde yapılarak, flotasyon performansı ile köpük görüntüsü arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve görüntü analiz sisteminin uygulanabilirliğinin araştırılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Cevherin ve flotasyon reaktiflerinin temin edilmesindeki yardımlarından dolayı Eti Bakır A.Ş'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Ahmed, N. ve Jameson, G. S., 1985; "The Effect of Bubble Size on the Rate of Flotation of Fine Particles", *Int. J. Miner. Process*, **14**, 195-213.

Aldrich, C., Moolman, D. W., Bunkell, S. J., Haris, M. C. and Theron, D. A., 1997; "Relationship between Surface Froth Features and the Process Conditions in the Batch Flotation of a Sulphine Ore", *Min. Eng.*, **110**, (11), 1207-1218.

Banford, A. W., Aktaş, Z. ve Woodburn, E. T., 1998; "Interpretation of the Effect of Froth

Structure on the Performance of Froth Flotation using Image Analysis", *Powder Tech.*, **98**, 61-73.

Dobby, G. S. ve Finch, J. A., 1986; "Particle Collection in Columns-Gas Rate and Bubble Size Effects", *Metallurg.Q.*, **27**, (1), 9-13.

Ek, C., 1991; "Flotation Kinetics, Innovations in Flotation Technology", Ed: Mavros P, Matis, K.A., Nato ASI Series, Applied Science, **208**, 183-210.

Guarini, M., Cipriano, A., Soto, A. ve Guesalaga, A., 1995; "Using Image Processing Techniques to Evaluate the Quality of Mineral Flotation Process", *Proceeding of the International Conference of Signal Processing, Applications and Technology*, 1227-1231.

Hargrave, J. M., Miles, N. J. ve Hall, S. T., 1996; "The use Grey Level Measurement in Predicting Coal Flotation Performance", *Min. Eng.*, **9**, (6), 667-674.

Hatfield, D., 2004, "The Implications of Froth Structure and Stability for Flotation Performance", *Abstracts of the MPRU Student Reserach Day, University of Cape Town*.

Huls, B. J., Gornez, C. O., Uribe-Salas, A. ve Finch, J. A., 1990; "Level Detection in Flotation Columns at Falcon Bridge", In: *Control '90: Mineral and Metallurgical Processing*, Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, CO.

Kitzinger, F., Rosenblum, F. ve Spire, P., 1979; "Continuous Modelling and Control of Froth Level and Pulp Density", *Min. Eng.*, **31**, 390-395.

Kordek, J. ve Kulig, J., 1997; "Analysis of Diffraction Patterns of Flotation Froths as the Basis of Estimating the Content of the Useful Component", *Proceeding of the XX IMPC-Aachen*, 457-464.

Laplante, A. R., Toguri, J. M. ve Smith, H. W., 1983; "The Effect of Air Flow Rate on the Kinetics of Flotation", Part1: The Transfer of Material From the Slurry to the Froth, *Int. J. Min. Proc.*, **11**, 203-219.

Lynch, A. J., Johnson, N. W., Manlapig, E. V. ve Thorne, C. G., 1981; "Mineral and Coal Flotation Circuits", Elsevier Scientific Publishing Company, **3**, 291-292.

Moolman, D. W., Aldrich, C., van Deventer, J. S. J. ve Stange, W. W., 1994; "Digital Image

Processing as a Tool for on-line Monitoring of Froth in Flotation Plants”, *Min. Eng.*, **7**, (9), 1149-1164.

Moolman, D. W., Aldrich, C., van Deventer, J. S. J. ve Stange, W. W., 1995; “The Monitoring of Froth Surfaces on Industrial Flotation Plants using Connectionist Image Processing Techniques”, *Min. Eng.*, **8**, (1-2), 23-30.

Moolman, D. W., Eksteen, J. J, Aldrich, C., Deventer, J. S. J, 1996; “The Significance of Flotation Froth Appearance for Machine Vision Control”, *Int. J. of Miner. Process*, **48**, 135-155.

Pryor, E. J., 1965; *Mineral Processing*, Elsevier, Amsterdam, 3rd ed., 501-503.

Wright, B. A., 1999; “The Development of vision-based froth analysis system”, M. Sc. Thesis, University of Cape Town.