

## FLOTASYON TESİSİ TASARIMI VE OPTİMİZASYONU AMACIYLA GELİŞTİRİLEN YENİ MODELLEME YAKLAŞIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Evaluation of a New Modelling Approach Developed for Flotation Plant Design and Optimization

Ş.Levent ERGÜN<sup>o</sup>  
Özcan Y.GÜLSOY<sup>n</sup>  
Namık AYDOĞAN<sup>m</sup>

### ÖZET

Bu yazıda, Avustralya'da Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkezi ve Güney Afrika'da Cape Town Üniversitesi'nin ortak araştırmasıyla geliştirilmiş, flotasyon hücresi hidrodinamiğini yansıtan kabarcık yüzey alanı akısı (bubble surface area flux) ile flotasyon hız sabiti arasında kurulan ilişkiyi temel alan modelleme yaklaşımı tartışılmaktadır. Bu ilişkinin, flotasyon makinalarının endüstride kullanılan çalışma koşullarını tümüyle kapsayan geniş çalışma aralığında dağıtıcı-karıştırıcı tasarımından bağımsız ve doğrusal olduğu bulunmuştur. Yeni yaklaşım kapsamında konsantreye mekanik taşınan malzeme miktarının ve köpük verim faktörünün tahmini, mekanik flotasyon hücrelerinde hidrodinamik ölçümler için geliştirilen teknikler hakkında da bilgiler verilmektedir.

Yeni yöntemin mevcut yaklaşımlara oranla, özellikle ölçek büyütme ve devre tasarımında daha duyarlı sonuçlar verebileceği, çalışan devrelerin optimizasyonu için ise daha fazla deneysel veri ile doğrulamaya gereksinim duyulduğu düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Flotasyon, Hidrodinamik, Modelleme, Kabarcık Yüzey Alanı Akışı.

### ABSTRACT

In this paper, the modelling approach based on the relationship between bubble surface area flux which is a measure of cell hydrodynamics and flotation rate constant developed by a joint research between Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC)-Australia and University of Cape Town (UCT)-South Africa is discussed. This relationship has been found to be linear and independent from rotor-strator design for the whole operating range of the industrial flotation cells. In this context, estimation of entrainment and froth recovery factor and experimental techniques developed for measuring cell hydrodynamics in mechanical cells are also discussed.

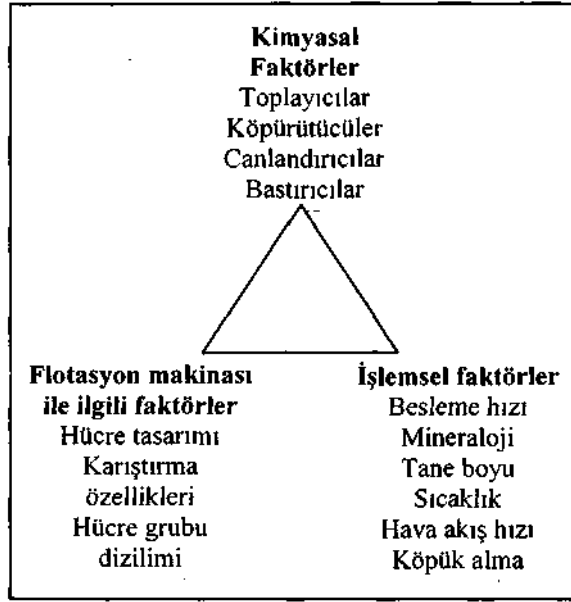
It is concluded that the new method described in this paper may improve scale up and circuit design significantly in comparison to available approaches, however, needs to be verified with more experimental data for use in optimization of existing flotation circuits.

Keywords: Flotation, Hydrodynamic, Modelling, Bubble Surface Area Flux.

Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA, e-mail: [lergun@hacettepe.edu.tr](mailto:lergun@hacettepe.edu.tr)  
Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA  
'Araş Gör., Hacettepe Üniversitesi, Maden Müh. Bölümü, Beytepe, ANKARA

## 1. GİRİŞ

Flotasyonda tesis tasarımı ve optimizasyonunda endüstriyel ortamda kendini kanıtlamış, güvenle kullanılabilir bir modelleme yaklaşımı geliştirilememiştir. Bunun en önemli nedeni, sürecin matematiksel olarak tanımlanabilmesi için çok karmaşık olmasıdır. Öyle ki, kimyasal faktörler, flotasyon makinasının hidrodinamiği ve işlem değişkenlerinin süreç üzerindeki karmaşık etkisi matematiksel modelleme işini son derece zorlaştırmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Etkileşimli flotasyon sistemi (Dowling vd., 1986)

Tesis tasarımında ekipman seçimi ve tasarlanan tesisin performansının tahmini genelde kalma zamanının belirlenmesi ve üretici firma kataloglarına bağlı olarak yapılmaktadır. Bu yaklaşım temel olarak, gerekli kalma zamanı laboratuvar yada pilot ölçekte belirlendikten sonra % 100 ile 300 arasında değişen bir güvenlik faktörü kullanılarak ölçek büyütme işleminin yapılmasına dayanmaktadır (Mular ve Bhappu, 1980).

Mevcut bir tesisin optimizasyonunda ise, laboratuvarda elde edilen kaba flotasyon sonuçlarını flotasyon devresine aktarmak bile pek çok durumda mümkün olmamaktadır. Çeşitli adımlardan oluşan temizleme ve süpürme

aşamaları ve geri dönen akışlar düşünüldüğünde bu çalışmalar daha da karmaşıklaşmaktadır.

Flotasyon verilerinin analizinde kinetik yaklaşım üzerine 50 yıldan uzun bir süredir çalışmalar yürütülmesine ve laboratuvar sonuçlarını tahminde başarıyla kullanılabilen çok sayıda modelleme yaklaşımı olmasına karşın, endüstriyel flotasyon devrelerinin modelleme ve simülasyon yardımıyla tasarımı ve optimizasyonu hiçbir zaman öğütme ve sınıflandırmada erişilen noktaya gelmemiştir.

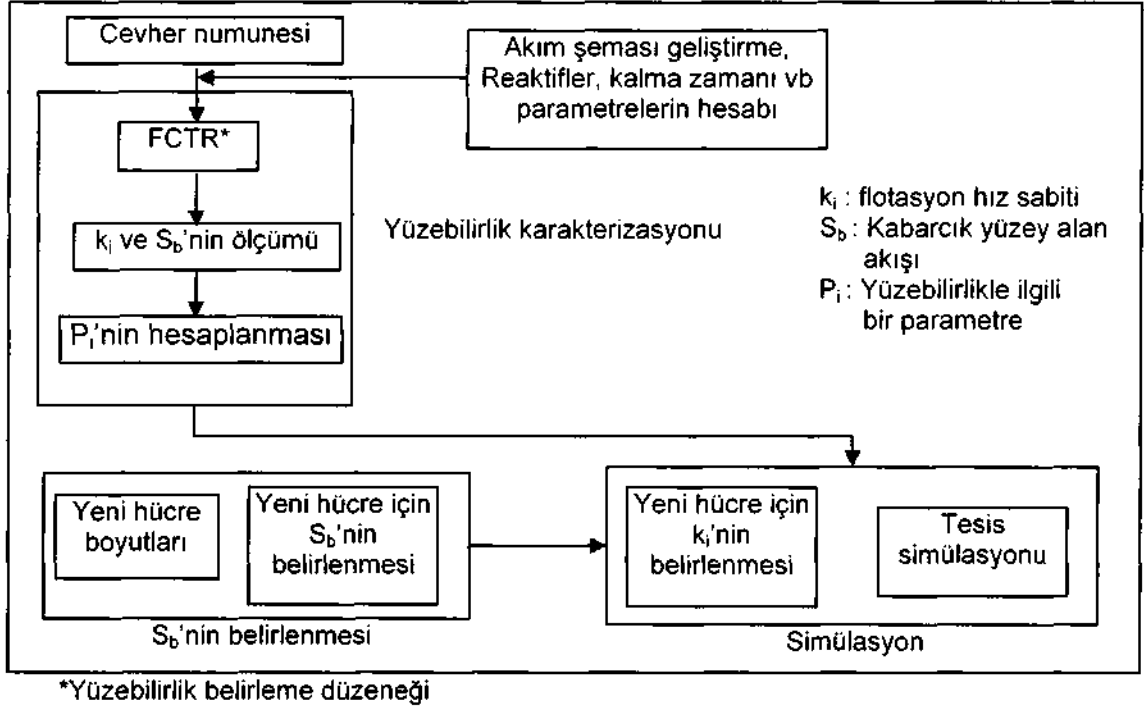
Bu sorunun çözümüne yönelik önemli çalışmalarından birisi, madencilik firmaları ve flotasyon makinası üreticilerinin sağladığı maddi destek ile JKMRC ve UCT ortak araştırması ile başlamış ve daha sonra Kanada'dan McGill Üniversitesi'nin de araştırmaya dahil olmasıyla halen sürmektedir. Araştırmada kullanılan temel yaklaşım Şekil 2'de sunulmaktadır.

Yaklaşım ölçülen hidrodinamik koşullar altında yüzebilirliğin karakterize edilmesine ve hidrodinamik koşulların da sayısal bir parametre ile tanımlanmasına dayanmaktadır.

Yöntem temelde üç ana unsura sahiptir. Bunlar;

Üzerinde çalışılmakta olan akışın ya da cevherin flotasyon davranımını değerlendirmek amacıyla kullanılacak olan yüzebilirlik karakterizasyon düzeneği, Mevcut flotasyon makinalarının performansını tahmin etmek amacıyla kullanılabilir ölçek büyütme birimi, Çalışmakta olan bir tesisin performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilir bir simülasyon bölümü,

Bu yazıda, flotasyon hız sabiti ve flotasyon hidrodinamiği arasında çok sayıda tesis verisi ile desteklenerek ortaya konan ilişkiyi temel alan, özellikle ölçek büyütme ve devre tasarımında büyük yenilikler getirebileceği düşünülen yukarıda genel hatlarıyla tanımlanan yaklaşım tartışılmaktadır. Ayrıca, bu alanda geliştirilen model yaklaşımlarına ve yeni ölçme tekniklerine de değinilmektedir. Aynı zamanda, orijinal yazıdan alınan veriler kullanılarak, yaklaşım hakkında var olan tartışmalar da değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Büyük ölçekli flotasyon devrelerinin performansını belirlemek için geliştirilmiş olan yöntem (Manlapig vd, 1997)

Model yapısı göz önüne alındığında bu yaklaşımın;

- Var olan bir flotasyon devresinin performansının optimizasyonu,
- Var olan bir tesiste yeni bir cevherin işlenebilirliğinin belirlenmesi, Geliştirilmiş veya yeni flotasyon makinaları eklenerek genişletilmiş bir flotasyon devresinin performansının tahmin edilmesi, Yeni bir flotasyon devresinin tasarlanması ve performansının tahmin edilmesi,

amacıyla kullanılabileceği ileri sürülmektedir (Manlapig vd., 1997).

## 2. FLOTASYON HIZ SABİTİ (k) - KABARCİK YÜZEY ALANI AKIŞI (S<sub>b</sub>) İLİŞKİSİ

Flotasyon, kimyasal ortamın, işlem koşullarının ve makina özelliklerinin birlikte rol oynadığı çok karmaşık bir zenginleştirme yöntemidir. Bu nedenle flotasyon sisteminde modelleme yapmak amacıyla bu üç etkinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Flotasyonda taneciklerin bu karmaşık sistemdeki

davranımı bir kimyasal tepkime sonucu hücrede azalan bir türün davranışına benzetilerek birinci dereceden basit bir modelle ifade edilebilmektedir (Arbiter ve Harris 1962). Bu yaklaşıma göre, herhangi bir mineral türünün hücre içinden uzaklaşma hızının, o türün hücre içindeki derişimi ile orantılı olduğu bilinmektedir (Eşitlik 1).

$$-\frac{dC}{dt} = kC \quad (D)$$

C Hücredeki türün derişimi (mol/litre)  
k O tür için birinci dereceden hız sabiti (1/dak.)

Bu noktadan hareketle, sürekli bir sistem göz önüne alındığı ve bu sisteminde mükemmel karışım olduğu kabul edilirse, hız sabiti (k) aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$k = -\frac{R}{(1-R)} \quad (2)$$

k Flotasyon hız sabiti (1/dak)  
R Yüzen türün verimi  
τ Kalma zamanı (1/dak.)

Eşitlik 2'nin flotasyonda herhangi bir türün kazanımını hesaplamak amacıyla kullanılabilirliği bilinmektedir. Bu durumda, flotasyon hız sabiti (k), ekipmanın ve malzemenin ayırım üzerindeki toplam etkisini tanımlamakta kullanılan bir parametre olmaktadır. Oysa, pervane tasarımı, güç sarfiyatı, gaz dağılımı, köpük yüksekliği gibi ekipman özellikleri ile mineraloji, serbestleşme, tane boyu ve reaktif gereksinimi gibi malzemeye ilişkin bir çok değişkenin k'nın üzerindeki etkileri oldukça karmaşıktır (Şekil 1). Bu nedenle, yeni yaklaşımda önerilen tasarım parametresi ile yüzebilirliğin ilişkilendirilmesi flotasyonda ölçek büyütme amacıyla gerçek anlamda kolaylıklar sağlayacaktır. Bu amaçla, Gorain vd (1995a, 1995b, 1996) özel olarak tasarlanmış 2.8 m<sup>3</sup>lük bir flotasyon hücresinde farklı makina üreticilerinin karıştırma ve hava dağıtma mekanizmalarını kullanarak geniş işlem koşulları için çinko temizleme devresi beslemesi ile deneyler yapmışlardır. Deneylerde hücre hidrodinamiği ve performansı üzerine önemli etkileri olduğu bilinen kabarcık çapı, hücre içindeki hacimsel hava oranı (air hold-up, s<sub>g</sub>) ve çizgisel gaz hızı (superficial gas velocity, J<sub>g</sub>, gaz debisinin hücre kesit alanına oranı) özel düzenekler kullanılarak ölçülmüştür. Diğer taraftan da herbir koşul için flotasyon hız sabiti belirlenmiştir. Böylece, bu parametreler ile flotasyon hız sabiti arasındaki ilişki detaylı olarak ortaya konulmuştur.

Flotasyon kolonları için gaz dağılımının bir ölçüsü olarak tanımlanan kabarcık yüzey alan akısı (S<sub>b</sub>) (Finch ve Dobby 1990), bir hücrenin herhangi bir yatay kesitinin birim alanından birim zamanda geçen toplam kabarcık yüzey alanını göstermektedir.

$$6J_r \quad (3)$$

S<sub>b</sub> Kabarcık yüzey alanı akısı (m / m s)  
Çizgisel gaz hızı (m/s)  
d<sub>3,2</sub> Sauter ortalama kabarcık çapı (m)

Sauter ortalama kabarcık çapı (d<sub>3,2</sub>);

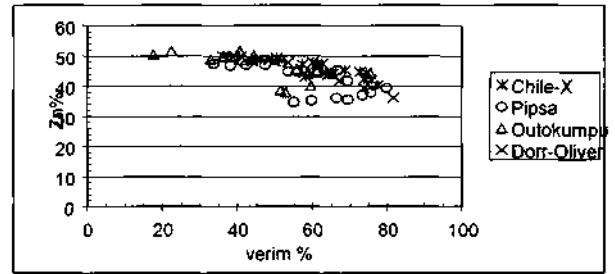
I\*

$$i \quad (4)$$

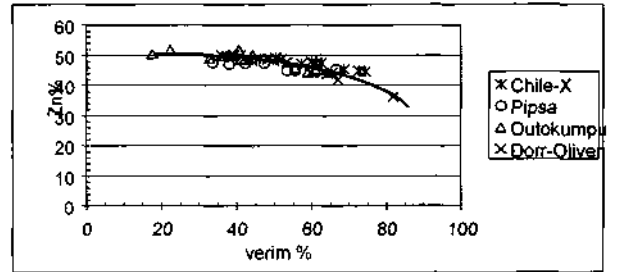
d. Küresel eşdeğer kabarcık çapı (m)  
n Ölçüm sayısı

Görüldüğü gibi burada S<sub>b</sub>, çizgisel gaz akış hızı (J<sub>g</sub>) ve kabarcık çapı (d<sub>3,2</sub>) ile ilişkilendirilmektedir. Böylece, Gorain bu ilişkileri kullanarak, kendi deneylerinde ölçtüğü flotasyon hız sabitiyle (k) bir hidrodinamik parametre olan S<sub>b</sub>'nin ilişkilendirilmesini sağlamıştır.

Gorain vd. (1997) bu ilişkinin tanımlanması amacıyla orijinal çalışmada, dört farklı flotasyon makinasına ait karıştırma ve dağıtma mekanizması için elde edilen tüm değerleri kullanmışlardır. Bununla birlikte, yapmış oldukları çalışmada, aşırı hava hızı koşullarında flotasyon performansının bozulduğu rapor edilmektedir. Bu çalışmada, orijinal çalışmadaki tüm veriler kullanılarak oluşturulan verim-tenör ilişkisi Şekil 3a'da koşulların bozulduğu belirtilen deney sonuçları çıkarılarak oluşturulan eğri ise Şekil 3b'de sunulmaktadır.



(a)



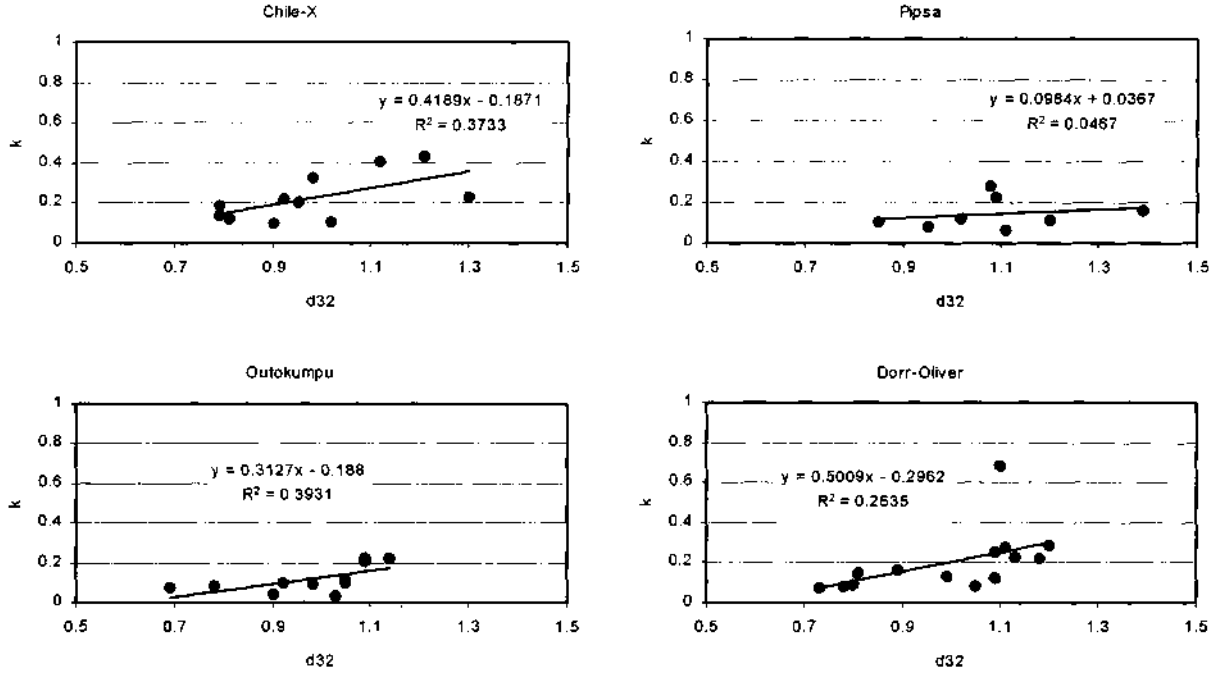
(b)

Şekil 3. Gorain'in yaklaşımına temel oluşturan deneysel çalışmaların verim-tenör değerleri (a) tüm veriler (b) aşırı hava hızı nedeniyle bozulan hidrodinamik koşullarda elde edilen veriler çıkarıldıktan sonra.

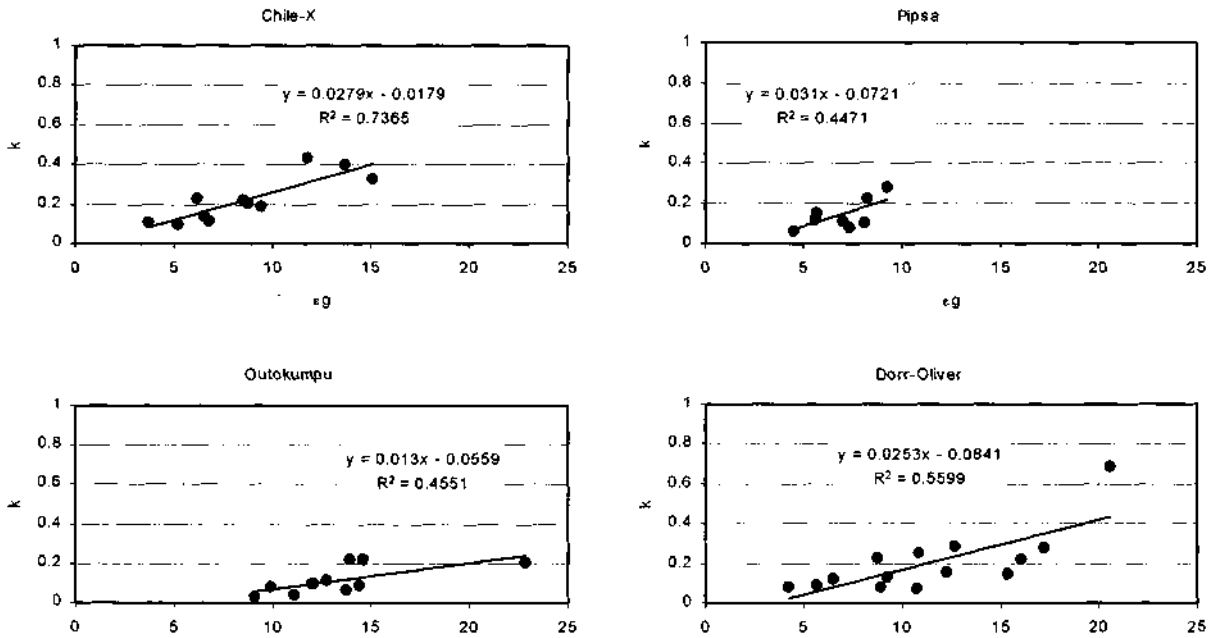
Şekil 3b'den de görüleceği gibi aşırı hava hızları nedeniyle koşulların bozulduğu deneyler çıkarıldığında noktaların aynı verim-tenör eğrisi üzerinde kabul edilebilecekleri sonucuna

varılmıştır. Dört farklı flotasyon makinası karıştırma ve dağıtma mekanizması için, aşırı hava hızı nedeniyle bozulan hidrodinamik koşullarda elde edilen veriler çıkarıldıktan sonra,

çizilen  $(d_{32})-(k)$ ,  $(e_g)-(k)$  ve  $(J_g)-(k)$  ilişkileri sırasıyla Şekil 4, 5 ve 6'da sunulmaktadır (veriler Gorain vd., 1997'den alınmıştır).



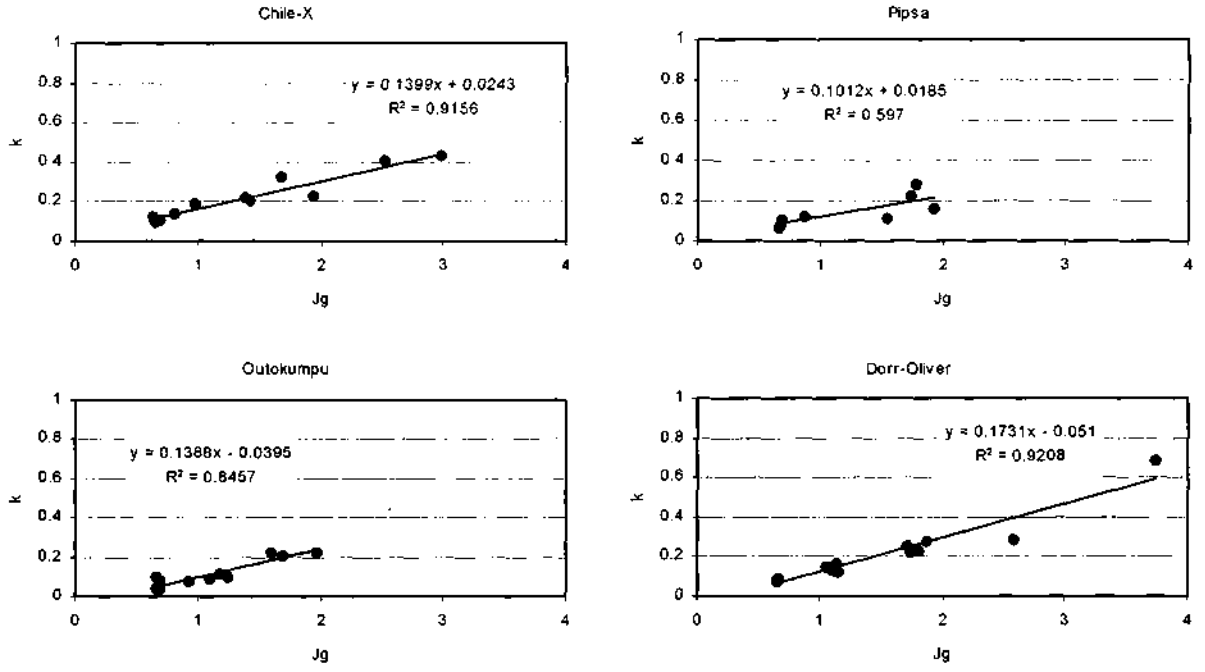
Şekil 4. Farklı karıştırıcı-dağıtıcı tasarımları için elde edilen  $d_{32}$ - $k$  ilişkisi



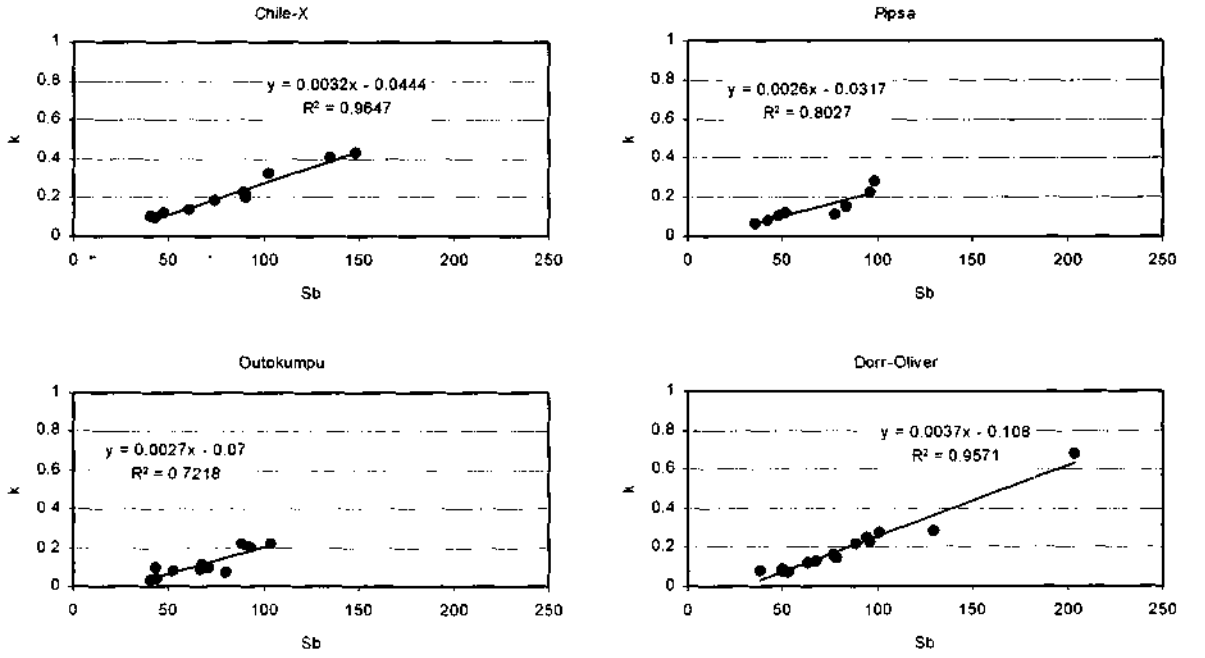
Şekil 5. Farklı karıştırıcı-dağıtıcı tasarımları için elde edilen  $(e_g)-(k)$  ilişkisi

Sb'nin hesaplanmasında kullanılan  $d_{32}$ , ve  $J_g$  ile Eg gibi hidrodinamik parametrelerin k ile ilişkileri incelendiğinde genel olarak, belirli doğrusal ilişkilerden söz etmek mümkündür. Fakat ilişkiyi tanımlamakta kullanılan verilerin saçınımlı göz

ardı edilemez. Diğer taraftan aynı makinalar için, aşırı hava hızı nedeniyle bozulan hidrodinamik koşullarda elde edilen veriler çıkarıldıktan sonra, elde edilen  $(S_b)$ -(k) ilişkisi Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 6. Farklı karıştırıcı-dağıtıcı tasarımları için elde edilen  $(J_g)$ -(k) ilişkisi



Şekil 7. Farklı karıştırıcı-dağıtıcı tasarımları için elde edilen  $(S_b)$ -(k) ilişkisi

Şekil 4-7'deki grafikler incelendiğinde flotasyon hız sabitiyle en yüksek korelasyonu  $S_b$ 'nin verdiği görülebilmektedir.

Şekil 7'deki verilerin tümü aynı grafiğe çizildiğinde ise  $(S_b)-(k)$  ilişkisinin karıştırıcı-dağıtıcı tasarımından bağımsız olduğu görülmektedir (Şekil 8). Öte yandan, yapılan çalışmalar aynı beslemeyi işleyen farklı hacimli hücrelerde de ilişkinin korunduğunu göstermiştir (Manlapig vd 1997; Alexander vd 2000).

Elde edilen bu sonuçlara bağlı olarak, Gorain vd (1997) Şekil 8'deki ilişkiyi aşağıdaki eşitlikle tanımlamışlardır.

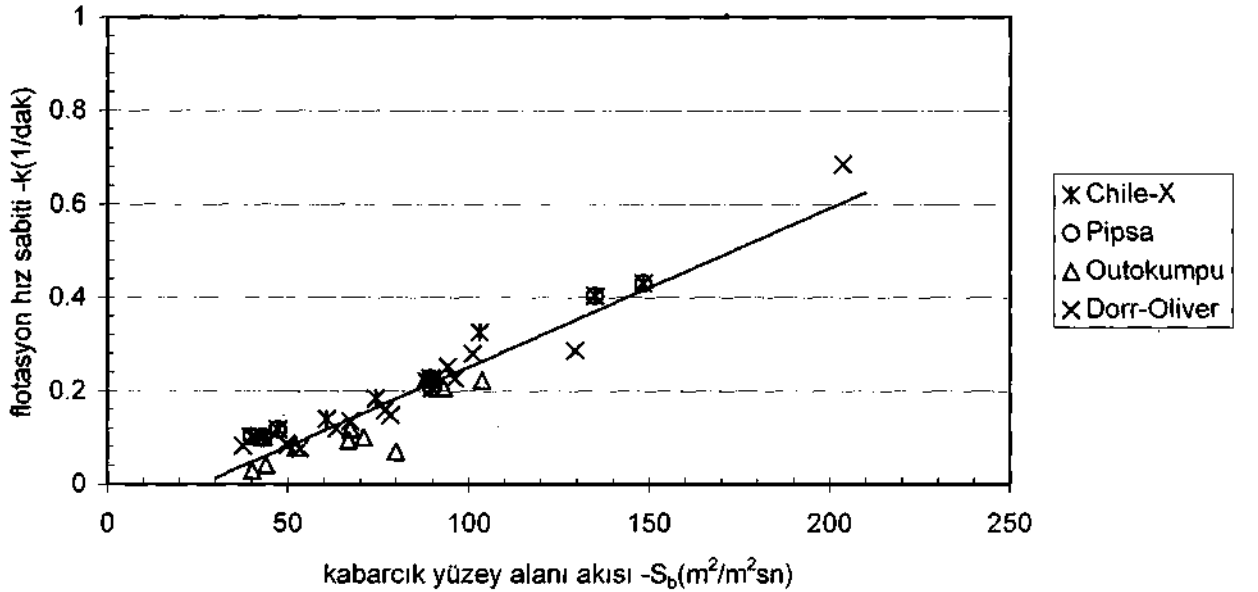
$$k = P \times S_b \quad (5)$$

k Flotasyon hız sabiti (1/dak)  
 $S_b$  Kabarcık yüzey alanı akısı ( $m^2/m^2s$ )  
P Malzemenin yüzeyliliği ile ilgili  $b_j$  parametre

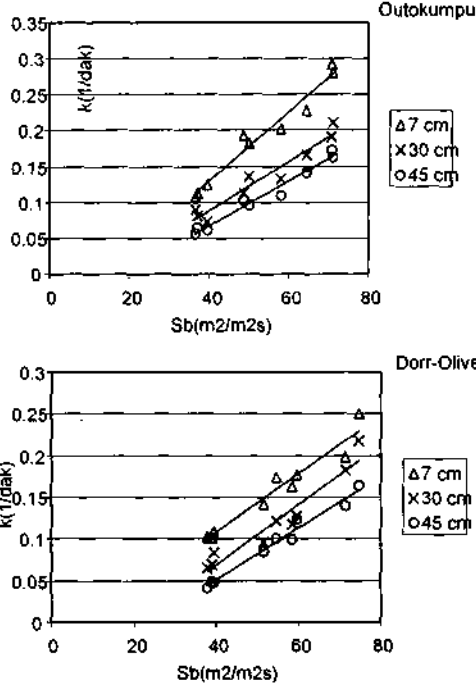
## 2.1. Köpük Yüksekliğinin $S_b$ -k İlişkisine Etkisi

Gorain vd. (1998), köpük yüksekliğinin etkisini incelemek üzere üç farklı flotasyon makinası karıştırıcı-dağıtıcı sistemini kullanarak farklı hava hızı ve pervane dönüş hızları için 7, 30 ve 45 cm köpük yüksekliğinde deneyler yapmışlardır. İki farklı flotasyon karıştırıcı-dağıtıcı mekanizması için farklı köpük yüksekliğinde elde edilen sonuçlar Şekil 9'da sunulmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi flotasyon hız sabiti düşük köpük yüksekliğinde daha yüksek olmaktadır. Tüm veriler için yapılan istatistiksel analiz sonucunda  $S_b$ -k ilişkisinin eğiminin köpük yüksekliğinden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Laplane vd. (1989) çok yüksek hava akış hızlarında ve sığ köpük yüksekliklerinde köpüğe gelen tanelerin büyük bölümünün yüzen ürüne alınacağını, bununla birlikte artan köpük yüksekliklerinde, kabarcığa bağlanan tanelerin bir bölümünün palpa geri süzüleceği ve flotasyon hız sabitinin kabarcık tane bağlanmasının gerçekleştiği toplama bölgesi (collection zone) hız sabiti ( $k_c$ ) ve köpükten alınan ürünle belirlenen toplam (overall) hız sabiti (k) olarak tanımlanabileceğini belirtmektedir.



Şekil 8.  $S_b$ -k ilişkisi



Şekil 9. Farklı köpük yükseklikleri için  $(S_b)$ -( $k$ ) ilişkisi

Buradan yola çıkılarak köpük verim faktörü,  $R_f$ ,

$$R_f = \frac{k}{S_b} \quad (6)$$

olarak tanımlanmaktadır (Finch ve Dobby, 1990).

Gorain vd (1998), yukarıdaki çalışmaya atıfta bulunarak, hız sabitinin siğ köpük yüksekliklerinde toplanma bölgesi hız sabiti  $k_c$ 'ye eşit olacağı kabulüyle genel eşitliği Eşitlik 7'deki şekliyle tanımlamışlardır.

$$k = P \times S_b \times R_f \quad (7)$$

## 2.2. $S_b$ 'nin Tasarım ve İşlem Değişkenleri İle İlişkisi

Vera vd (1999), endüstriyel olarak kullanılan mekanik flotasyon hücrelerinde  $S_b$ 'nin  $50-120 \text{ s}^{-1}$ , kolonlarda  $20-60 \text{ s}^{-1}$  ve laboratuvar ölçekli flotasyon makinalarında  $0-30 \text{ s}^{-1}$  arasında değiştiğini belirtmektedir.

Power ve Franzidis (2000), çalışmakta olan 3-

150 m hacimli flotasyon hücrelerinde yapılan ölçümlerde  $S_b$ 'nin  $27-97 \text{ s}^{-1}$  arasında ve ortalamasının ise  $59 \text{ s}^{-1}$  olduğunu bulmuşlardır.

$(S_b)$ -( $k$ ) ilişkisinin ölçek büyütme ve optimizasyon amacıyla kullanılabilmesi için laboratuvar ve pilot ölçekli makinalarında bu ilişkinin kurulması gereklidir. Diğer taraftan, tasarım amaçlı simülasyon çalışmaları için  $S_b$ 'nin kolay ölçülebilen işlem değişkenleri ile de ilişkilendirilmesi zorunludur.

Manlapig vd (1997) yapmış oldukları çalışmada  $S_b$  ile pervane dönüş hızı ( $T_s$ ), havalandırma oranı ( $Q$ ), pervane uzunluk oranı ( $A_s$ ) ve beslemenin tane boyu ( $P_{80}$ ) arasında ampirik bir eşitlik tanımlamıştır.

$$S_b = C \times Q^a \times T_s^b \times A_s^c \times P_{80}^e \quad (8)$$

Burada, C, a, b, c ve d ampirik model sabitleridir.

Aynı çalışma kapsamında, hava akış sayısı (air flow number), güç sayısı (power number), Froude sayısı, Reynolds sayısı gibi özellikle kimyasal reaktörlerin tasarımında kullanılan hidrodinamik parametrelerin flotasyon kinetiği ile doğrudan ilişkilendirilmesinin mümkün olmadığı gözlemlenmiştir (Gorain vd, 1999). Bunun yerine, araştırmacılar bağımsız değişkenlerin model yapısı içinde doğrudan kullanımının daha uygun olduğunu ileri sürmektedirler. Buna göre pervane devri (N) yerine çevresel pervane hızı ( $N_s$ ), hava debisi (Q) yerine birim alan başına düşen hava debisi ( $Q/A$ ) gibi değişkenlerin kullanımı ile doğrudan hücre geometrisiyle ilgili olmayan parametrelerin tasarımda getireceği zorlukların önüne geçildiği ileri sürülmektedir, örneğin, güç sayısı ve Reynolds sayısı gibi parametrelerin hesaplanmasında kullanılan pervane devir sayısı (N) yerine, çevresel pervane hızının ( $N_s$ ) kullanılmasının daha uygun olduğu belirtilmektedir. Farklı hacimli makinalarda pervane devir sayısı değişmesine karşın çevresel hız aynı kalabilmektedir.

Buna göre, Gorain vd (1999)  $S_b$ 'nin ekipman parametreleri ile ilişkisini aşağıdaki gibi tanımlamaktadır.

$$S_b = a N_s^b \times (Q/A)^c \times A_s^d \times P_{80}^e \quad (9)$$

a, b, c, d ve e ampirik model sabitleridir.



Geliştirilen eşitlik, 8 ile 100 m<sup>3</sup>'lük geniş bir aralıkta endüstriyel ölçekli makinalardan toplanan farklı 100 veri seti için sınınmıştır. Bu çalışma sonunda, normal çalışma koşulları için Eşitlik 10'un S<sub>b</sub>'nin hesaplanmasında başarı ile kullanılabileceği belirtilmektedir.

$$S_b = 134.75 N_s^0 - 29 g_j^{0.73} A^{0.07} P_8 - o^{0.36} \quad (10)$$

Bu ilişkinin geliştirilmesi sırasında araştırmacılar, N<sub>s</sub> m/s, (Q/A) cm/s, A<sub>s</sub> birimsiz, P<sub>8</sub>o'i ise um olarak almışlar, 60 litre ile 3 m<sup>3</sup> arasında pilot flotasyon makinaları, kaba, süpürme ve temizleme devrelerinde kullanılan 3 ile 100 m<sup>3</sup>'lük endüstriyel makinalardan veriler toplamışlardır. Veriler çoğunlukla 20-150 um arasında sülfür cevheri kullanılan devrelerden toplanmıştır. Bu da modelin gerçekte çok geniş bir çalışma aralığında sınındığını göstermektedir.

### 3. CEVHERİN YÜZEBİLİRLİĞİNİN TANIMLANMASI (P)

Ortaya konan ilişkinin en önemli yanı karıştırıcı-dağıtıcı mekanizması tipi ve hücre hacminden bağımsız olmasıdır. Diğer önemli bir nokta da ilişkinin endüstriyel ölçekte alınan verilerle ortaya konmuş olmasıdır. Sürekli çalışan bir sistem için hız sabiti bilinirse, Eşitlik 2 kullanılarak verim hesaplanabilir. Laboratuvarında gerçekleştirilecek deneylerden elde edilecek k-S<sub>b</sub> ilişkisi (Şekil 8) kullanılarak büyük ölçekteki S<sub>b</sub> için k değeri belirlenebilir ve sağlıklı bir ölçek büyütme yapılabilir.

Böylece herhangi bir cevher için laboratuvarında veya pilot ölçekte k ve S<sub>b</sub> arasındaki ilişki kurulduktan sonra Eşitlik 5 kullanılarak P'nin hesaplanması mümkündür. Daha sonra elde edilecek P gerçek ölçekte ulaşmak istenen k değeri için S<sub>b</sub>'nin hesaplanmasında kullanılabileceği gibi hesaplama sonunda da S<sub>b</sub> ile ekipman parametreleri arasındaki ilişki kullanılarak (Eşitlik 10) yeni bir ekipmanın tasarlanması mümkün olabilir.

P herhangi bir tür için yüzebilirlik ve malzemeyi karakterize eden bir parametre olarak tanımlandığından büyük önem taşımaktadır. Herhangi bir flotasyon işleminde serbestleşme, tane boyu, yüzey özellikleri vb etkiler nedeniyle yüzebilirliğin tek bir hız sabitiyle ifadesi yetersiz

kalabilmektedir. Bu durumda, farklı yüzebilirlikte kısımlar için farklı hız sabitleri tanımlanmasının duyarlılığı artıracağı belirtilmektedir (Alexander, 2000).

Bu düşünceyle, Eşitlik 2 ile verilen birinci derece hız ifadesi, Eşitlik 7 ile birleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$R = \frac{y_{m_i} \times P^{i S_b R i T}}{1 + P(S_b F V)} \quad (11)$$

R : Verim (%)  
n Farklı yüzebilirlikte bileşenlerin sayısı  
m<sub>i</sub> i. yüzebilirlik bileşeninin oranı  
P, i. bileşenin yüzebilirliği

Bu durumda, bir hücre veya bank etrafındaki akışlarda farklı yüzebilirlikteki bileşenlerin toplamının beslemedeki o yüzebilirlikteki bileşene eşit olduğu varsayımı yapılmaktadır (Runge vd., 1999). Farklı yüzebilirliklerin hesaplanması için doğrusal olmayan optimizasyon tekniği kullanılmaktadır.

Rahal -vd (2000) tarafından yüzebilirliğin çok geniş aralıklarda ölçülmesi amacıyla bir pilot düzenek tasarlanmıştır (FCTR flotability characterisation test rig). Düzenek 7 adet 0.06 m<sup>3</sup> lük özel tasarlanmış hücreden oluşan bir kaba devre ve 0.065 m<sup>3</sup> yüksek S<sub>b</sub> değerine ulaşabilen 2 adet temizleme flotasyon hücresinden oluşmaktadır. Bu düzenek kullanılarak her bir hücre için k-S<sub>b</sub> ilişkileri kurulmakta buradan da P değerleri hesaplandığında malzemenin yüzebilirliğinin ortaya konulduğu ileri sürülmektedir.

### 4. KONSANTREYE MEKANİK OLARAK TAŞINIM (ENTRAINMENT)

Tanelerin köpüğe, kabarcığa bağlanmadan su ile taşınması veya kabarcık-tane kümeleri arasına sıkışarak gelmesi uzun süredir bilinen bir mekanizmadır (Jowett, 1966; Johnson vd, 1974). Savassi vd (1998) mekanik olarak konsantreye taşınma derecesinin (ENT) tane boyuyla ilişkisinin aşağıdaki eşitlikle ifade edilebileceğini belirtmektedir.

$$e^{(2.292(d_i/\xi)^{0.8})} \cdot e^{(-2.292(di/4))}$$

$$adj = 1 + \frac{\ln(\delta)}{e^{(d_i/\xi)}}$$

konsantreye mekanik olarak  
gelen katı miktarı  
1 konsantreye gelen su miktarı

di Tane boyu (µm)  
Mekanik olarak taşınım parametresi,  
mekanik taşınım derecesinin %20 olduğu  
tane boyu (µm)  
5 İri tanelerin köpükten tercihli olarak  
süzülmesiyle ilgili bir parametre  
(boyutsuz)

Sonuç olarak, Eşitlik 11 ile 12 birleştirilerek su ile taşınımın da model yapısı içine alınması mümkün olabilir (Savassi vd, 1998).

$$R_{M+b} = \frac{P_{i,j} \cdot b \cdot S_b \cdot f \cdot iO - R_w}{(1 + P_{u_b} \cdot S_b \cdot TR_{fi})} + ENT_i R_w$$

Burada,

R<sub>ij</sub>.b İncelenen türün toplam flotasyon verimi  
R<sub>w</sub> Konsantrede su kazanımı

## 5. J<sub>g</sub> ve d<sub>b</sub> ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Geliştirilmiş olan yeni yöntemde bazı parametrelerin ölçülmesi gerekmektedir. Bu parametreler laboratuvarında ölçülebileceği gibi, tesis ölçekli optimizasyon çalışmaları sırasında tesiste de ölçülebilir. Bu ölçümler için ayrı ölçüm düzenekleri geliştirilmiş olup, bu ölçüm cihazlarına mutlak gereksinim duyulmaktadır.

### 5.1. Çizgisel Gaz Hızı (J<sub>g</sub>) Ölçümü

Bu amaçla J<sub>g</sub> sondası adı verilen, altında hava sıkıştırılmalı bir vananın, üst kısmında ise hava ve su bağlantılarının bulunduğu, uzunluğu 1.5 m ve iç çapı 50 mm olan ölçeklendirilmiş şeffaf bir tüpten oluşan ekipman kullanılmaktadır.

J<sub>g</sub> sondası ile ölçüm yapılırken (Gorain vd. 1996) ekipman alt vanası kapalı olarak hücre içine sokulmakta ve sondanın içi su doldurulmaktadır. Daha sonra ekipmanın alt vanası açılarak hücre hücre içinde yükselmekte olan hava kabarcıklarının girmesi sağlanmaktadır. Bu sırada sondanın içine dolan hava nedeniyle içerdeki su aşağı doğru itilmeye başlamaktadır. Sonda içindeki hava-su arayüzeyinin aşağı

yöndeki hızı zaman tutularak ölçülmektedir. Bu işlemin en az üç kez tekrarlanması ölçüm hatalarını en aza indirmek için yazarlar tarafından önemle belirtilen bir noktadır.

Bu ölçümden sonra J<sub>g</sub> şu şekilde hesaplanır:

$$J_g = L/t \text{ cm/sn} \quad (14)$$

L : ara yüzeyin hareket ettiği iki nokta arasındaki mesafe (cm)  
t : ara yüzeyin iki noktayı kat ettiği süre (sn)

### 5.2. Hacimsel Hava Oranı (e<sub>g</sub>) Ölçümü

Hacimsel hava oranı ölçümü hücrenin farklı noktalarından hava girişi açıkken palpın örneklemeyle gerçekleştirilir, ölçüm aleti her iki ucunda sıkıştırılmalı vanalarla kapatılabilen lastik hortumlar takılmış bir tüpten oluşmuştur. Alet hücre içine vanalar açık olacak şekilde dik olarak yerleştirilip içine palp ve hava dolması sağlanmaktadır. Daha sonra sıkıştırılmalı vanalar kapatılarak hava ve palp karışımı örneklenmiş olmaktadır (Power ve Franzidis, 2000).

Böylece hacimsel hava oranını belirlemek için havalandırılmış palp hacmi toplam tüp hacmine oranlanarak hesaplama yapılır.

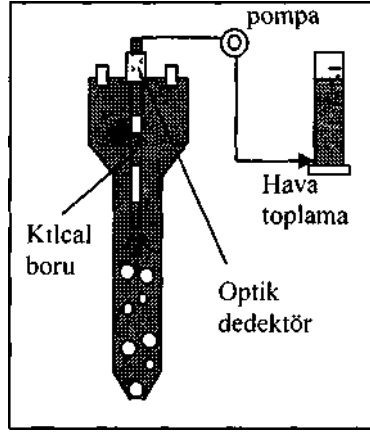
$$e_g = (1 - V_A/V_0) \times 100\%$$

Burada, V<sub>A</sub> havalandırılmış palp hacmi ve V<sub>0</sub> iki vana arasındaki toplam tüp hacmidir.

### 5.3. Ortalama Kabarcık Çapı Ölçümü (d<sub>32</sub>)

Bu yaklaşımda S<sub>b</sub>'nin hesaplanmasında Sauter ortalama kabarcık çapı (d<sub>32</sub>) olarak tanımlanan bir parametre kullanılmaktadır. d<sub>32</sub>'nin belirlenebilmesi amacıyla özel bir düzeneğe gereksinim duyulmuş, bu da Tucker vd (1994) tarafından geliştirilmiş olan ölçüm yönteminin kullanılmasıyla aşılmıştır. Bu ölçüm sistemi Falutsu ve Dobby (1992) tarafından flotasyon kolonlarındaki kabarcık yükünü ölçmek amacıyla geliştirmiş olan yöntemle dayanmaktadır. Ekipman Şekil 10'da şematik olarak verilmektedir.

Şekilde görülen prob içine çok az köpürtücü eklenmiş su doldurulduktan sonra bütün giriş delikleri kapalı olacak şekilde flotasyon hücresi içine daldırılır. Altta bulunan küçük giriş deliği açılarak hava kabarcıklarının içeri girişi sağlanır. Probin içindeki su sayesinde kabarcıklar yüzeylerindeki taneciklerden de bir miktar



Şekil 10. Ortalama kabarcık çapı ölçüm cihazı şematik görünümü

arınarak yükselmeye devam ederler. Bu sırada kılcal boru emiş yapacak şekilde pompa çalıştırılır ve bu emişle prob içinde yükselmekte olan hava kabarcıkları kılcal boru içinden geçerken bu kılcal boru üzerinde bulunan bir dedektör ile belli yaklaşımlar kullanılarak çapları ölçülür. Numune alma işlemi sırasında emilen hava ölçülü bir kab içinde toplandığı için ölçüm yapılan kabarcıkların taşıdığı havanın hacmi de ölçülmüş olur. Bazı durumlarda daha uzun prob kullanılabilir. Fakat yükselmekte olan hava kabarcıklarının birleşerek büyüme olasılığı olduğundan gereğinden fazla uzun proplar tercih edilmemelidir. Ölçümler yapıldıktan sonra aşağıdaki eşitlik kullanılarak  $d_{32}$  hesaplanır:

$$d_{32} = 6V_b / A \quad (16)$$

$V_b$ : Toplanan kabarcıkların toplam hacmi ( $m^3$ )

$A$ : Toplanan kabarcıkların toplam yüzey alanı ( $m^2$ )

## 6. MODEL YAKLAŞIMI ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Önerilen model küçük ölçekten büyük ölçekte gerçekleşecek performansın tahmini veya mevcut bir devre için işlem değişkenleri değiştirildiğinde devrede nasıl bir değişikliğin olabileceğini gözlemlemek için önemli bir araç olarak görünmekle birlikte bazı araştırmacılar tarafından modele ciddi eleştiriler getirilmektedir. Deglon vd (1999) önerilen yaklaşımın flotasyon literatürü ile uyummadığını ve literatürdeki kabarcık boyutu ile  $k$  arasındaki ciddi ilişkinin bu

model yapısında daha zayıf vurgulandığını belirterek, bunun da modelin zayıflığı olduğunu ileri sürmektedir. Ayrıca, önerilen modelin  $(S_b)-(k)$  ilişkisinin doğrusal değil geniş bir aralık için büküldüğünü belirten Deglon, önerilen modelde  $(S_b)-(k)$  ilişkisindeki doğrusala yakın bölgenin kullanıldığını belirtmektedir. Yapmış olduğu incelemede,  $(S_b)-(k)$  arasındaki ilişkinin doğrusala yakın olduğu kısmında ise endüstriyel ölçekli makinalarda elde edilen  $S_b$  değerlerinin ölçülmesinin çok ilginç bir durum olduğunu söylemektedir.

Heiskanen (1999) önerilen yöntemde çizgisel gaz hızı ölçümü ve kabarcık boyutu ölçümünün endüstriyel ölçekte elde edilen değerlerden farklılık gösterdiğini ileri sürmektedir. Yaklaşımda nispeten kötü bir karıştırmanın olduğu hücreler için çok yüksek  $S_b$  değerleri hesaplandığı, buna rağmen büyük kabarcıklar ve düzgün olmayan karıştırmada dahi iyi flotasyon değerlerine ulaşıldığını belirtmektedir. Yapmış olduğu inceleme sonunda yaklaşımın çok değişik cevher tipleri için de sınanması ve oldukça ciddi düzeltmeler için daha detaylı olarak araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca iri tanelerin flotasyon hızları çok yüksek çizgisel gaz hızlarında yavaşlamakta ince taneler için ise daha yüksek çizgisel gaz akış hızlarına gereksinim duyulduğuna göre modelin bu açıdan da yeniden gözden geçirilmesi gerektiği ileri sürülmektedir.

Finch vd (2000)  $S_b$  yerine hücre hava oranının ( $8g$ ) kullanılmasının daha uygun olacağını belirtmektedir. Yapmış olduğu çalışmada hücre hava oranı ile  $S_b$  arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu ortaya koymuş ve hücre hava oranının kullanılması durumunda ölçümünün kabarcık boyutu ölçümü gerektirmediği için daha kolay olacağını belirtmiştir. Fakat, bu makale kapsamında yapılan değerlendirme çalışması sırasında, orjinal çalışmaya ait veriler kullanılarak  $(S_b)-(k)$  ve  $(k)-(e_p)$  ilişkileri yeniden çizilmiştir. Özellikle flotasyonun bozulduğu yüksek hava hızında elde edilen veriler atıldığında  $(S_b)-(k)$  ilişkisinin  $(k)-(s_p)$  ilişkisine oranla daha yüksek korelasyon verdiği belirlenmiştir.

## 7. SONUÇ

Flotasyonda uzun süre benzer temellerden yola çıkan çok sayıda modelleme yaklaşımlarından sonra son on yılda önemli gelişmeler yaşanmıştır.

Fiyotasyon kolonlariyla hiz kazanan hücre hidrodinamiği temel alan yaklaşımlar mekanik hücreler için de belirli bir noktaya taşınmiştır.

Kabarık yüzey alanı akısı ile fiyotasyon hiz sabiti arasında ortaya konan ilişki, literatürdeki bazı olumsuz eleştirilere karşın laboratuvar ve pilot ölçekli verilerden ölçek büyütme ve özellikle devre ve tesis tasarımında önemli yenilikler getirmektedir. Köpük verim faktörü ve yüzebilirlik parametresinin aynı tesiste uzun süre izlenmesinin yaklaşımı daha duyarlı hale getirebileceği düşünölmektedir. Mevcut devrelerin optimizasyonu için önerilen model yaklaşımları, cevheri farklı yüzebilirlik sınıflarına ayırma ve mekanik olarak konsantreye taşınımı da içermesine karşın sınırlı sayıda veri ile oluşturulmuştur.

Bunun yanısıra, fiyotasyon makinalarında hidrodinamik parametrelerin ölçümü için deneysel teknikler geliştirilmiştir. Bunlardan bir bölümü prototip olarak kabul edilebilecek düzeydedir ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

Köpük fazını ve yeni fiyotasyon makinası tasarımı da inceleyen çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu makalenin kapsamına alınmamıştır.

Fiyotasyon modellemesi konusunda ortaya çıkan pek çok yeni kavram ve araştırma çalışmaları önümüzdeki yıllarda endüstriyel ortamda geçerliliği olan güvenilir modeller geliştirilmesi konusunda umut verici görünmektedir.

## KAYNAKLAR

Alexander, D.J., Runge, K.C., Franzidis, J.-P., ve Manlapig, E.V., 2000; "The Application of Multi-Component Floatability Models to Full-Scale Flotation Circuits" Seventh Mill Operators' Conference, Kalgoorlie, 12-14 October, s. 167

Arbiter, N. ve Harris, M.C., 1962; "Flotation Kinetics in froth flotation", 50<sup>th</sup> anniversary volume (ed. D.W. Fuerstenau) Rocky Mountain Fund Series s. 215-246.

Deglon, D.A., Sawyerr, F. Ve O'Connor, C.T., 1999; " A Model to Relate the Flotation Rate Constant and the Bubble Surface Area Flux in Mechanical Flotation Cells ", Minerals Engineering, Cilt 12, Sayı 6, s. 599.

Dowling, E., Kumpel, R.R., Aplan, F.F., 1986; "Model Discrimination for the Flotation of Base

Metal Sulfide Ores - Circuitry and Reagent Variations", Chapter 37 in Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits, A.L. Mular, M.A.Anderson. Editors, SME, s. 570-587.

Falutsu, M. ve Dobby, G.S., 1992; " Froth Performance in Commercial Sized Flotation Columns", Minerals Engineering, Cilt 5 (10-12), s. 1207.

Finch, J.A. ve Dobby, G.S., 1990; "Column Flotation", Pergamon Press.

Finch, J.A., Xiao, F., Hardie, C. ve Gomez, C.O., 2000; " Gas Dispersion Properties: Bubble Surface Area Flux and Gas Hold Up", Minerals Engineering, Cilt 13, Sayı 4, s. 365.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1995 a; "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell. Part 2: Effect on Gas Holdup", Minerals Engineering, Cilt 8, Sayı 12, s. 1557.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1995 b; "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell. Part 1: Effect on Bubble Size Distribution", Minerals Engineering, Cilt 8, Sayı 6, s. 615.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1996; "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell. Part 3: Effect on Superficial Gas Velocity", Minerals Engineering, Cilt 9, Sayı 6, s. 639.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1997; "Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell. Part 4: Effect on Bubble Surface Area Flux on Flotation Performance", Minerals Engineering, Cilt 10, Sayı 4, s. 367.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1999; "The Empirical Prediction of Bubble Surface Area Flux in Mechanical Flotation Cells From Cell Design and Operating Data", Minerals Engineering, Cilt 12, Sayı 3, s. 309.

Gorain, B.K., Napier-Munn, T.J., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1998; " Studies on Impeller Type, Impeller Speed and Air Flow Rate in an Industrial Scale Flotation Cell. Part 5: Validation of k-S<sub>0</sub> Relationship and Effect of Froth Depth", Minerals Engineering, Cilt 11, Sayı 7, s. 615.

Heiskanen, K., 1999; " On the Relationships Between Flotation Rate and Bubble Surface

Area Flux ", Minerals Engineering, Cilt 13, Sayı 2, s. 141.

Johnson, N.W., Mc Kee, DJ., Lynch, A.J., 1974; "Flotation Rates of Non-Sulphide Minerals in Calcopryrite Processes", Trans. Am. Ins. Min. Metall. Pet. Eng., 256:204226.

Jowett, A., 1966; "Gangue Mineral Contamination of Froth", Brit. Chem. Eng. Cilt 11, No 5, s. 330-333.

Laplante, A.R., Kaya, M. ve Smith, H.W., 1989; "The Effect of Froth on Flotation Kinetics - A Mass Transfer Approach", Mineral Processing and Extr. Met. Rev., Cilt 5, s. 147.

Manlapig, E.V., Gorain, B.K., Harris, M.C. ve Franzidis J.-P., 1997; "Designing Flotation Plants in the 21<sup>th</sup> Century", Proceeding of the XX IMPC, Aachen, 21-26 September, s. 235.

Mular, L.A. ve Bhappu, R.B., 1980; "Mineral Processing Plant Design", Chapter 44, Selection and sizing of flotation machines, AI EM, NewYork.

Power, A. ve Franzidis, J.-P., 2000; "The Characterisation of Hydrodynamic Condition in Industrial Flotation Cells", AusIMM Seventh Mill Operators' Conference, Kalgoorlie.

Rahal, K.R., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 2000; "The Application of the Flotability Characterisation Test Rig (FCTR) in Flotation Research", Seventh Mill Operators' Conference, Kalgoorlie, 12-14 October, s. 227.

Runge, K.C., Harris, M.C, Frew, J.A. ve Manlapig E.V., 1999; "Floatability of Streams Around the Cominco Red Dog Lead Cleaning Circuit", Sixth Mill Operators' Conference, Madang, 6-8 October, s. 157-163.

Savassi, O.N., Alexander, D.J., Franzidis, J.-P. ve Manlapig, E.V., 1998; "An Empirical Model for Entrainment in Industrial Flotation Plants", Minerals Engineering, Cilt 11, Sayı 3, s. 243.

Tucker, J.P., Deglon, D.A., Franzidis, J.-P., Harris, M.C. ve O'Connor, CT., 1994; "An Evaluation of a Direct Method of Bubble Size Distribution Measurement in a Laboratory Batch Flotation Cell, Minerals Engineering, Cilt 7, Sayı 5, s. 667.

Vera, M.A., Franzidis, J.-P., ve Manlapig, E.V., 1999; "The JKMRC High Bubble Surface Area Flux Flotation Cell", Minerals Engineering, Cilt 12, Sayı 5, s. 477.

TMMOB  
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI  
ZONGULDAK ŞUBESİ

## TÜRKİYE 14. KÖMÜR KONGRESİ

2-4 HAZİRAN 2004  
ZONGULDAK

**YAZIŞMA ADRESİ:**  
Türkiye 14. Kömür Kongresi Sekreterliği  
TMMOB Maden Mühendisleri Odası  
Zonguldak Şubesi  
Liman Cad.No:9  
67020 ZONGULDAK

TMMOB  
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI  
İZMİR ŞUBESİ

## 5.ENDÜSTRİYEL HAMMADDELER SEMPOZYUMU

13-14 MAYIS 2004  
İZMİR

**YAZIŞMA ADRESİ:**  
TMMOB Maden Mühendisleri Odası  
İzmir Şubesi  
154.Sok.No:6/1 Ufuk Apt.  
35040 Bornova/İZMİR

II.

23-25 EYLÜL 2004  
ULUSLARARASI

## BOR SEMPOZYUMU

ESKİŞEHİR



OSMANGAZI  
ÜNİVERSİTESİ



TMMOB  
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI



ETI  
HOLDİNG A.Ş.

**YAZIŞMA ADRESİ:**  
II.ULUSLARARASI BOR SEMPOZYUMU  
OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ  
MEŞELİK YERLEŞKESİ  
26480 ESKİŞEHİR

TEL: 0222 239 37 50/3433  
FAXS: 0222 229 05 35  
WEB: www.maden.org.tr/bor2004  
E-Posta: bor2004@maden.org.tr