

**FLOTASYON KOLONLARI-BÖLÜM 1  
TEMEL ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE AYIRMA İŞLEMİNE ETKİ EDEN  
PARAMETRELER**

Flotation Columns-Part 1  
Basic Operation Principles and Parameters Affecting the Separation

Bahadır AKSANI<sup>(\*)</sup>

Anahtar Sözcük: Flotasyon Kolonları

**ÖZET**

Flotasyon kolonları cevher hazırlama endüstrisinde yıllardır standart olarak kullanılan mekanik flotasyon hücrelerinden farklı özelliklere sahiptirler ve son yıllarda birçok endüstriyel uygulama alanı da bulmuşlardır. İki bölümden oluşan bu çalışmanın ilk bölümünde flotasyon kolonlarının tarihsel gelişimi ile avantajları, zenginleştirme işlemi ve fiziksel temelleri ile zenginleştirme işlemine etki eden parametreler hakkında bilgi verilerek yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

**ABSTRACT**

Flotation columns have different features from mechanical flotation machines which are used as standard flotation machines in mineral processing industry for years and have found numerous industrial application in recent years. In the first part of this study the advantages of flotation columns and their historical evaluation, and the physical principles that are affecting separation were presented.

<sup>(\*)</sup> Dr. Maden Yük.Müh., MTA Genel Müdürlüğü, MAT Dairesi, Ankara

## 1. GİRİŞ

Flotasyon ince tane boyundaki minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir ve dünyada yaklaşık 2 milyar ton cevher flotasyon ile zenginleştirilmektedir (Klimpel, 1993). Son otuz yılda işlenen cevher yataklarının tenörlerinin düşmesi, ince tane boyunda serbestleşen, kompleks ve seçicilik problemi olan cevherleri işleme zorunluluğu, artan enerji ve yatırım maliyetleri flotasyon teknolojisinde yeni arayışların doğmasına yol açmıştır. Flotasyon teknolojisindeki en önemli gelişme ise yeni bir tasarım olan flotasyon kolonlarının endüstriyel uygulama alanı bulmaları olmuştur. Böylece farklı tasarım özelliklerine sahip flotasyon kolonları, yıllarca standart flotasyon hücresi olarak kullanılan mekanik hücelere alternatif olarak görülmüştür. Flotasyon kolonlarının endüstriyel uygulamalarında elde edilen basan, kolonların çalışma ilkelerine bağlı kalınarak daha etkin çalışmaları (örn., Microcel, Turbo Kolon) ya da flotasyon kolonu tasarımının dezavantajlarının ortadan kaldırılmasına yönelik (örn., Jameson hücresi) yeni tasarımların geliştirilmesine de neden olmuştur.

Tüm bu yeniliklere paralel olarak mekanik flotasyon hücresi üreticileri de hücre tasarımlarını geliştirmişlerdir. Özellikle öğütme ekipmanlarının kapasitelerinin artmasına bağlı olarak mekanik flotasyon hücrelerinin hacimleri 100 m<sup>3</sup>'e kadar yükselmiş ve flotasyon devrelerinin farklı noktalarında kullanılacak özelliklere sahip mekanik hücreler de (örn., Outokumpu Skim Air, High Grade-HG- hücreleri vb.) geliştirilmiştir (Kallioinen, vd., 1995).

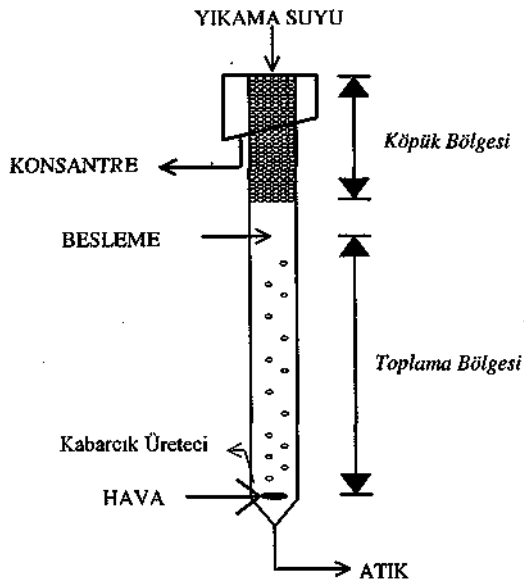
Bu çalışmada flotasyon kolonları ile zenginleştirme işlemi ve fiziksel temelleri, zenginleştirme işlemine etki eden parametreler hakkında bilgi verilmektedir.

## 2. FLOTASYON KOLONLARI

Flotasyon kolonları 1960 yılında Kanada'da Boutin ve Tremblay tarafından patentlenmiştir (Kanada patentleri, 680.576 ve 694.547) ve bu tip kolonlara 'Kanada Kolonları' ya da 'Konvansiyonel Kolonlar' denilmektedir (Dobby, 1990). Flotasyon kolonlarının fikir babası olan Pierre Boutin, mekanik flotasyon hücrelerindeki türbülansın, ince gang tanelerinin konsantreye kaçmasına neden olarak, konsantreyi kirlettiği sonucundan yola çıkmış, tanelerin türbülansın olmadığı bir ortamda asılıta kalmaları için ince, uzun ve yüksek bir hücreye yukarıdan beslenmesi gerektiğini düşünmüştür (....., 1965). Hava ise hücrenin tabanından verilerek, kabarcıklar ve tanelerin zıt akımlı olarak karşılaşabilmesi sağlanacak, böylece araürünler ve gang taneleri için bu akış fiziksel bastırma işlevini görecek, iri gang mineralleri ise yüksek çökelme hızları nedeniyle hücreden hızlı bir şekilde ayrılacaktır. Kabarcıklar izleyen ince gang mineralleri ise hücredeki kalın köpük tabakasında yıkama suyunun da etkisi ile geri yıkanabilecek ve böylece yüksek tenörlü konsantre elde edilebilecektir. Boutin ve Wheeler (1967) o dönemde yapılan çalışmalarda karşılaşılan kabarcık üreticinin çok çabuk tıkanması ya da fiziksel hasar görmesi nedeniyle sık sık değiştirilmesi sorununa, kolon durdurulmadan kabarcık üreticinin değiştirilebileceği bir mekanizma geliştirerek çözüm bulmuşlardır.

İlk çalışmalar Opemiska Tesisi'nde (Kanada) yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (....., 1965; Wheeler, 1966; Boutin ve Wheeler, 1967). O dönemde flotasyon kolonları ile ilgili çalışmaların yalnızca Kanada ile sınırlı kalmadığı, Çin'de de flotasyon kolonlarının kullanımının 1961 yılında dayandığı (Hu ve Liu, 1988) ve eski SSCB'de farklı tasarımlarda flotasyon kolonlarının kullanıldığı da belirtilmiştir (Reddy vd., 1988).

Şekil 1'de tipik bir flotasyon kolonunun şematik görünümü verilmektedir. Flotasyon kolonları temel olarak iki bölgeye ayrılabilir (Finch ve Dobby, 1990). Birinci bölge hava kabarcıklarının kabarcık üretici sistemi (sparger) yardımıyla kolona verildiği ve tanelerin hava kabarcıkları ile karşılaştığı toplama bölgesidir (collection zone). Besleme genellikle kolon yüksekliğinin yaklaşık 2/3'sünden yapılır. Besleme noktasının üzerinde kalan kısmın tamamı köpükten meydana gelmez. Köpük/palp arayüzeyi ile besleme noktası arasında tane yüklenmiş kabarcıklar, köpükten geri düşen taneler ve kabarcıklardan meydana gelen bir ara bölge bulunmaktadır. Beslemedeki taneler hem çökme hızları hem de kolonun tabanındaki atık akış hızına bağlı olarak aşağı doğru süzülürler. Hava, kolonun atık çıkış noktasının hemen üzerindeki bir kabarcık üreticiden (sparger) kabarcıklar halinde kolona verilmektedir. Besleme ile kabarcıklar zıt akımlı olarak (countercurrent) toplama bölgesinde karşılaşırlar ve burada taneler hava kabarcıkları ile çarpışarak bağlanırlar. Kolonda mineral kazanımı toplama bölgesinde meydana gelmektedir.



Şekil 1. Flotasyon kolonu

İkinci bölge ise, besleme noktasının üst bölümünde, tane yüklü hava kabarcıklarının meydana getirdiği köpük bölgesidir (froth zone). Köpük bölgesi kalınlığı endüstriyel uygulamalarda 1,5 m kadar olabilmektedir. Köpük, kolonun konsantre taşma seviyesinin üzerinden veya içinden su ile yıkanarak kararlı ve kalın olması sağlanmaktadır. Köpükten aşağı doğru süzülen yıkama suyu ile yükselen köpüğün zıt akımlı olarak karşılaşması, köpük içerisine su ile taşınmış gang minerallerinin toplama bölgesine geri dönebilmesini, böylece yüksek tenörlü konsantre elde edilebilmesini sağlamaktadır. Bu iki bölge dışında toplama ve köpük bölgeleri arasında bulunan, köpükten geri düşen taneler ve tane yüklenmiş yükselen kabarcıkların bulunduğu ara bölge de bulunmaktadır.

Flotasyon kolonunu mekanik hücrelerden ayıran üç temel tasarım özelliği vardır (Yianatos, 1990);

1. Köpük bölgesine verilen yıkama suyu,
2. Mekanik karıştırmanın olmaması,
3. Kabarcık üretici bir sistemin olması.

Flotasyon kolonlarının yükseklik/çap oranı mekanik flotasyon hücrelerinden daha büyüktür ( $L/D > 10$ ) ve kare, dikdörtgen ya da dairesel kesitlidirler. Günümüzde 4 metre çapında dairesel veya kesit alanı 16 m<sup>2</sup> (2 m eninde 8 m boyunda) dikdörtgen kesit alanlı flotasyon kolonları endüstriyel olarak kullanılmaktadır (Scheno ve Casali, 1994).

Flotasyon kolonlarının avantajları ise şunlardır (Brewis, 1991; Yianatos, 1990; Hail, 1990; Yoon, 1994);

1. Mekanik flotasyon hücrelerinden daha iyi performans elde edilebilmektedir.
2. Düşük yatırım maliyeti; kolonlar genellikle tesis olanakları ile inşaa edilebilmekte ve yalnızca kabarcık üretici ile otomatik kontrol birimlerinin üreticilerden satın

alınması tercih edilmektedir.

3. Düşük işletme maliyeti; enerji, reaktif harcaması ve hava yerine azot kullanıldığında azot harcamasının azaldığı belirtilmiştir. Hareketli birimlerinin olmaması nedeniyle mekanik flotasyon hücrelerindeki gibi karıştırıcının bakım ve değiştirme maliyeti ile kanştırma gücüne ihtiyaç yoktur.
4. Tek bir biriminden oluşması ve çalışma sisteminin basitliği nedeniyle kararlı ve düzenli kontrol ve çalışma imkanına sahiptir.
5. İşlem aşamasında azalma ve daha az alan işgal etmesi nedeniyle tesislerde yer kazanımına olanak sağlayabilirler.
6. İnce tanelerin zenginleştirilebilmesinde önemli bir avantaj olan sakin akış koşullarında küçük kabarcıkların kullanılması, kalın köpük yapısı ve köpüğün su ile yıkanması nedeniyle yüksek tenörlü konsantre elde edebilebilmesi; mekanik flotasyon hücrelerinde çeşitli nedenlerle [Palp/köpük arayüzeyindeki türbülans, ince tanelerin yükselen kabarcıkların türbülanslı dümensuyuna kapılmasıyla köpüğe taşınmaları, şlam boyundaki mineral tanelerinin konsantreye besleme suyu ile birlikte taşınması, (Young, 1982)] kirlenen konsantre, palp seyreltilerek tekrar tekrar temizlenmesi ile yükseltilir. Bu da ekipman maliyeti, güç, reaktif harcaması anlamına gelen çok aşamalı flotasyon işlemi demektir. Flotasyon kolonları bu sorunların ortadan kalkmasına olanak sağlayabilecek özelliklere sahiptirler.

Flotasyon kolonlarının dezavantajları ise şunlardır (Yianatos, 1990);

1. Tesislerde, yüksekliğinin sorun olması,
2. Kabarcık üretici bakımı,
3. Yıkama suyu maliyeti,
4. Artığın seyrelmesi,
5. Kalma süresinin fazla olması nedeniyle hızlı oksidasyon özelliği olan cevherler için

uygun olmaması.

### 3. FLOTASYON KOLONLARINDA ZENGİNLEŞTİRMEİNİN TEMEL İLKELERİ

Bu bölümde, flotasyon kolonlarında kullanılan bazı özel kavramlar tanıtıldıktan sonra, toplama ve köpük bölgesinde zenginleştirmeyi açıklamaya yönelik yaklaşımlar ve matematiksel ifadeler özetlenmiştir.

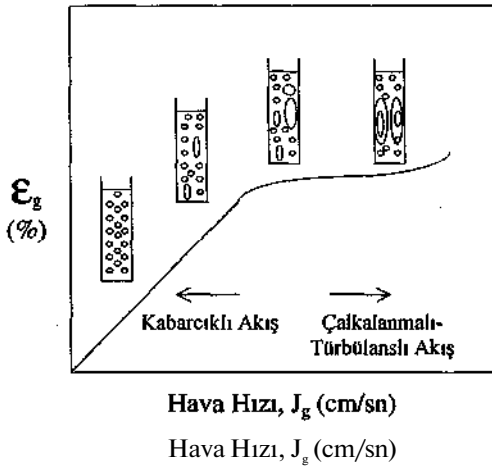
#### 3.1. Flotasyon Kolonlarında Kullanılan Terminoloji

Flotasyon kolonunun çalışma mekanizmasının mekanik flotasyon hücresinden oldukça farklı olması, kolonlardaki işlem parametrelerini ifade eden yeni bir terminoloji kullanımını zorunlu kılmıştır. Bunlar;

- a) Hacimsel hava miktar (Air hold-up-8h),
- b) Akış hızları;
  - Hava hızı (Superficial air rate-jj),
  - Besleme hızı (Superficial feed rate-jb),
  - Artık hızı (Superficial tailing rate-j<sub>a</sub>),
  - Bias hızı (Superficial bias rate-js),
  - Yıkama suyu hızı (Superficial wash water rate-j<sub>ys</sub>),
- c) Taşıma kapasitesi (Carrying rate-C), 'dir.

- a) Hacimsel Hava Miktarı (air hold-up):
  - Flotasyon kolonunun herhangi bir noktasında hacimsel olarak havanın kapladığı miktar olarak tanımlanmakta ve hava hızı, palp akış hızı, kabarcık çapı, tane/kabarcık agregalanmış yoğunluğu ile palp yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Tipik bir flotasyon kolonunun toplama bölgesinde hacimsel hava miktarı % 5-30 arasındayken, köpük bölgesinde % 80'e kadar çıkmaktadır. Şekil 2'de hava hızı ile kolondaki hacimsel hava miktarı arasındaki ilişki görülmektedir (Shah vd., 1982). Şekilde görüldüğü gibi,

hava hızı ile hacimsel hava miktarı arasında doğrusal ilişkinin bulunduğu bölümde homojen çaplı kabarcıkların aynı hızda yükseldiği kabarcıklı akış (bubbly flow) koşulu oluşmakta ve flotasyon kolonlarının da bu akış koşullarında çalışması istenmektedir (Finch ve Dobby, 1990). Hava hızında bunun ötesinde bir artış olduğunda hacimsel hava miktarı kararsız olmakta ve kabarcıkların birleşerek büyümeleri sonucu hızla yükseldikleri heterojen akış meydana gelmektedir. Bu akışa çalkalanmalı-türbülans akış (churn-turbulent flow) koşulu denir. Hava hızındaki artışın devam etmesi ile küçük çaplı kolonlarda (<10 cm) kabarcıklar kolon kesitini tamamen kaplamakta, bu akış koşuluna ise salyangoz akış (slug flow) koşulu adı verilmektedir.



Şekil 2. Kolonlarda hava hızı ve hacimsel hava miktarı arasındaki ilişki (Shah, vd., 1982)

b) Akış Hızları: Birim kolon kesit alanındaki hacimsel akış hızıdır.

$$J_x = \frac{Q_x}{A_c} = \frac{\text{cm}^3/\text{sn}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{cm}}{\text{sn}} \quad (1)$$

(x; besleme, artık, bias ve yıkama suyu)

Burada  $j_x$ , akış hızı;  $Q_x$ , debi;  $A_c$ , ise kolon kesit alanıdır. Akışların bu şekilde verilmesinin nedeni farklı çaplardaki kolonların karşılaştırılabilmesine olanak sağlamaktır. Uygulamada akışlar şu aralıklarda değişmektedir (Yianatos, 1990);

$$\begin{aligned} j_h &= 1-3 \text{ cm/sn,} \\ j_b &= 0-1,5 \text{ cm/sn,} \\ j_{y_s} &= 0-1,5 \text{ cm/sn,} \end{aligned}$$

Bias hızı flotasyon kolonlarının en önemli özelliklerinden birisidir ve köpükten aşağı doğru süzülen net su akışı ya da buna denk olan artık ve besleme akışları arasındaki net su akış farkı olarak tanımlanmaktadır (Finch ve Dobby, 1990);

$$JB - J_a - J_b \quad (2)$$

Flotasyon kolonlarında bias hızı genellikle pozitif olmaktadır. Mekanik flotasyon hücrelerinde ise negatif bias, yani yukarı yönde akış söz konusudur. Negatif biasla çahşınlan flotasyon kolonu uygulamaları da vardır ve özellikle iri tanelerin flotasyonunda başanlı sonuçlar elde edilmiştir (Soto, 1988; Soto ve Barbery, 1991a, 1991b). Artık su içeriği akış hızının, besleme su içeriğinin akış hızından daha büyük olması sonucunda doğan fark, kolonun köpük bölgesinden verilen yıkama suyu ile fazlasıyla karşılanmaktadır. Böylece yıkama suyunun bir kısmı pozitif biası karşılayarak kolon içinden aşağı doğru akarken, diğer kısmı konsantre çıkışından alınmaktadır. Yıkama suyunun biası karşılayarak aşağı yönde akan kısmı köpüğü yıkayarak besleme suyu ile gang minerallerinin konsantreye kaçmasına (entrainment) engel olmaktadır (Dobby ve Finch, 1985; Yianatos vd., 1987; Maachar ve Dobby, 1992).

c) Taşıma Kapasitesi (Carrying rate): Flotasyon kolonunda birim zamanda birim

kesit alanında yüzen mineral ağırlığı olarak tanımlanmaktadır ( $\text{g/cm}^2/\text{sn}$  veya  $\text{ton/m}^2/\text{saat}$ ). Bu parametre bir anlamda kolonda kazanılabilecek maksimum katı miktarını, diğer bir ifadeyle kabarcık yüzeylerinin maksimum miktarda tane ile kaplanmasını ve tane toplama sürecinin üst limitini ifade eder. Kuramsal olarak taşıma kapasitesi aşağıdaki ifade ile verilir (Yoon, 1993);

$$C = a - Q_h \cdot d_r \cdot p / d_k \quad (3)$$

Eşitlikte C, taşıma kapasitesi; a, bir sabit;  $Q_h$ , hacimsel hava akış hızı;  $d_r$ , tane çapı;  $r_t$ , tanenin özgül ağırlığı;  $p$  tanelerin kabarcık yüzeyine yapışarak yüzeyde birikmesi sonucu meydana gelen paketlenmeyi tanımlayan bir parametre ve  $d_k$ , köpükteki kabarcık çapıdır. Eşitlikten görüldüğü gibi C hava hızının artışı ve köpükteki kabarcık çapının küçülmesi ile yükselmektedir. Hava hızının artışı ile taşıma kapasitesi yükselerek maksimum taşıma kapasitesine erişir. Maksimum taşıma kapasitesi değerinde çalışan bir kolonun kapasitesi yalnızca  $d_r$ ,  $r$  ve  $p$ 'nin fonksiyonudur. Literatürdeki verilerden yararlanılarak taşıma kapasitesi için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir (Espinoza-Gomez vd., 1988a);

$$C = a - d_{so} - p_t \quad (4)$$

Burada a, bir sabit (0,068);  $d_{so}$ , konsantrenin % 80'inin geçtiği tane boyu;  $r_t$ , konsantrenin yoğunluğudur. Eşitlik 4'ün yalnızca verilerin elde edildiği aralık için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Taşıma kapasitesi tanımındaki kolondan kazanılan maksimum katı miktarı, toplam kabarcık yüzey alanından bağımsız olarak ele alınmıştır. Gerçekte, konsantre miktarı tanelerle kaplanacak kabarcık yüzey alanı ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle de gerçek değer deneysel olarak belirlenen taşıma kapasitesi değerinden daha yüksek

olabilir (del Villar vd., 1993). Flotasyon kolonu tasarımı amaçlandığında taşıma kapasitesinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir (del Villar vd., 1992). Taşıma kapasitesi deneysel olarak, sabit besleme hızında besleme palp katı içeriğinin artırılması ile yapılan ve en yüksek konsantre akış hızına erişilmesi hedeflenen bir seri deney ile belirlenir (Espinoza-Gomez vd., 1988b).

### 3.2. Toplama Bölgesi

Flotasyon kolonunun toplama bölgesinde mineral kazanımı meydana gelmektedir. Toplama bölgesinde tane/kabarcık etkileşiminin hidrodinamiğini açıklamaya yönelik çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Flotasyon işleminde tane-kabarcık bağlanma mekanizmasını açıklamak için iki kuram ileri sürülmüştür. Bunlardan ilkinine göre tane/kabarcık bağlanmasının çarpışma ile meydana geldiği (collision theory), diğer kurama göre ise susevmez bir tane yüzeyi üzerine hava kabarcığı çökmesi (precipitation theory) ile tane/kabarcık bağlanmasının meydana geldiği iddia edilmektedir (Flint, 1973; Barbery, 1982). Çarpışma kuramı, flotasyon kolonları gibi hava kabarcıklarının karıştırma ile elde edilmediği ve akış koşullarının sakin olduğu flotasyon hücrelerinde geçerli olmaktadır.

Aşağıda verilen eşitlikler ve bunların elde edildiği deneysel çalışmalar türbülansın olmadığı sistemler için geçerli olmakta ve tane/kabarcık bağlanma işleminin çarpışma ile meydana geldiği varsayımına dayanmaktadır. Bu eşitlikler, flotasyon kolonlarındaki mikro süreçlerin anlaşılmasında, ölçek büyütme ve modelleme çalışmaları açısından oldukça yararlı olmaktadır.

Yükselen bir hava kabarcığının tane tarafından yakalanma süreci flotasyonun en önemli adımıdır. Bir flotasyon kolonunda

tane/kabarcık bağlanma olasılığı şu şekilde ifade edilmektedir (Finch ve Dobby, 1990; Yoon, 1993,1994);

$$P = P_c \cdot P_j \cdot (1 - P_t) \quad (5)$$

Burada  $P_c$ , tane/kabarcık bağlanma olasılığı;  $P_j$ , tane/kabarcık çarpışma olasılığı;  $P_t$ , tane/kabarcık yapışma olasılığı;  $P_k$ , tane/kabarcık kopma olasılığıdır. Küçük tanelerde (<100 um) tane/kabarcık kopma olasılığı tanelerin ataletinin az olması nedeni ile ihmal edilebileceği belirtilmiştir (Dobby ve Finch, 1987). Bu durumda eşitlik;

$$P = P_c \cdot P_j \quad (6)$$

biçimine dönüşmektedir. Eşitlikte  $P_c$  tane boyu, kabarcık çapı ve sistemdeki türbülansın doğrudan etkilediği hidrodinamik koşulları ifade eden bir terimdir.  $P_j$  ise yine hidrodinamik koşullarla ilgili olmakla birlikte, daha çok yüzey kimyasının bir fonksiyonudur. Yapılan çalışmalarla  $P_c$  ve  $P_j$ 'nin hesaplanabilmesi için eşitlikler türetilmiştir. Çarpışma olasılığı için genel olarak şu eşitlik verilebilir (Yoon, 1993);

$$P_c = A \cdot f d A^n \quad (7)$$

Bu eşitlikte  $d_t$  tane boyunu,  $d_k$  kabarcık çapını göstermektedir.  $A$  ve  $n$  değerleri akış koşullarına bağlı olarak tanımlanmıştır (Çizelge 1).

Flotasyon kolonlarında hava kabarcıklarının Reynolds sayısı ara bölgeye düşmektedir. Bu durumda çarpışma olasılığı için ara bölgede verilen iki eşitlik kullanılabilir.

Yapışma olasılığı ise şu eşitlik ile verilmektedir (Yoon, 1993);

Çizelge 1. Farklı Akış Koşulları İçin  $P_c$ 'ni Belirlemek İçin Kullanılan  $A$  ve  $n$  Değerleri (Yoon, 1994)

Akış Rejimi	A	n
Stokes (Gaudin, 1957)	3/2	2
Ara bölge (Weber and Paddock, 1983)	$\frac{3}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(3/16) \cdot Re}{1 + 0.249 \cdot Re^{0.56}} \right]$	2
Ara bölge (Yoon and Luttrell, 1988)	$\frac{3}{2} + \frac{4 \cdot Re^{0.72}}{15}$	2
Potansiyel (Sutherland, 1948)	3	1

$$P_j = \sin' 2 \arctan \exp \frac{\cdot (45 + 8 Re^{0.72} - u_k - t_k)}{15 d_k (d_k^2 + 1)} \quad (8)$$

Eşitlikte  $t_j$  tane ile kabarcık arasındaki su filminin inceliği, kmlması ve üç fazın temas haline gelmesi için gereken zamanı (induction time),  $U_k$  ise kabarcık yükselme hızını göstermektedir. Bu eşitlik de ara bölgedeki akış koşulları için geçerli olmaktadır.

Tane toplama olasılığı ( $P$ ) bilindiğinde, tanelerin birinci dereceden flotasyon hız sabiti ( $k$ ) Eşitlik 9 ile verilmektedir (Jameson vd., 1977; Dobby ve Finch, 1986; Yoon, 1993);

$$2 \quad d, \quad (9)$$

Eşitlikte  $J_h$  hava hızını (birim kesit alandaki hacimsel akış,  $cmVs_n/cm^2$ ) ifade etmektedir. Hız sabiti eşitliğindeki toplama olasılığı ( $P$ ) teriminin bileşenleri ( $P_j$ ,  $P_c$ ) yerlerine konulduğunda hız sabitinin hava hızı ile doğru ( $k \propto J_h$ ), kabarcık çapının kübü ile ters orantılı ( $k \propto 1/d_k^3$ ) olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmalar küçük kabarcıkların tanelerin flotasyon hız sabitine etkisinin sakin akış koşullarında  $k \ll \epsilon \quad i/d_k^3$  ilişkisini koruduğunu göstermiştir (Ahmed ve Jameson,

1985; Yoon, 1993; 1994). Küçük kabarcıklar türbülanslı koşullarda da flotasyon hız sabitinin yükselmesine neden olmaktadır. Ancak flotasyon hız sabitine kabarcık çapının etkisi sakin koşullarında daha belirgindir (Yoon, 1993; 1994). Örneğin, türbülanslı koşullar için türetilen eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda ( $dk \gg d_c$ ) çarpışma olasılığının  $dk^{0.61}$ , hız sabitinin ise  $dk^{1.61}$  ile değişeceği görülür (Yoon, 1993). Türbülanslı akış koşullarında küçük kabarcıklar ile tanelerin meydana getirdikleri agregaların bozulma olasılığı, küçük kabarcıkların girdap akımlarından daha fazla etkilenmesi nedeniyle yüksek olacağı, küçük kabarcıklarla türbülanslı koşullarda yüksek hız sabitleri elde edilemeyeceği belirtilmiştir (Ahmed ve Jameson, 1985). Bu nedenle de, sakin akış koşullarına sahip flotasyon kolonlarının küçük kabarcıklarla yüksek flotasyon hız sabitinin elde edilebilmesi için en uygun flotasyon hücresi olduğu söylenebilir.

Yukarıdaki ilişkilerden, bir sistemdeki tanelerin flotasyon hız sabitlerinin artırılması için ya hava hızını artırmanın ya da kabarcık çapını küçültmenin gerekli olduğu görülmektedir. Ancak hız sabitinin kabarcık çapının kübü ile ters orantılı olarak değişmesi nedeniyle, kabarcık çapının etkisi daha şiddetli olmaktadır. Fakat kabarcık çapının küçülmesi tanelerin flotasyon hız sabitlerini artırmakla birlikte seçimliliğin de düşmesine neden olabilmektedir (Finch ve Dobby, 1990; Yoon, 1994). Diaz-Penafiel ve Dobby (1994) yaptıkları çalışmada kabarcık çapının azalması ile tanelerin flotasyon hız sabitlerinin arttığını deneysel olarak göstermişlerdir. Özellikle iri tane boylarında flotasyon hız sabitinde önemli artış sağlanmış, ince tane boylarında (<5 mm) kabarcık çapının azalmasının flotasyon hız sabitine önemli bir etkisi olmamıştır. İnce tane boylarında incelenen tüm kabarcık çapı aralıklarında hesaplanan toplama olasılıkları düşük ve birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Bu sonuçların ışığı altında daha küçük kabarcıklar

kullanılmasının kolon performansına etkisinin her zaman olumlu olmayacağı, özellikle serbestleşmemiş tanelerin çok olduğu koşullarda, küçük kabarcıkların bu taneleri toplayarak konsantreye gelmelerine ve konsantrenin kirlenmesine neden olacağı söylenebilir (Espinoza-Gomez ve Johnson, 1991).

Flotasyon kolonlarında tane toplama sürecinde önemli rolü olan hava hızı ile kabarcık çapı arasındaki ilişkinin toplama bölgesi için aşağıda verilen eşitlikle ifade edilebileceği belirtilmiştir (Dobby ve Finch, 1986);

$$C = c - Jd \quad (10)$$

Burada  $d^*$ , kabarcık çapı;  $j$ , hava hızı;  $C$  ve  $n$  sabitlerdir. Dobby ve Finch (1986) yaptıkları çalışmada  $n$  değerini 0,25 olarak bulmuşlardır.

Flotasyon kolonlarında tanelerin toplanması toplama bölgesindeki kabarcıkların yüzey alanları ile sınırlıdır. Bu, kolonun kapasitesini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Kabarcıkların taneleri toplayabileceği yüzey alanı kavramını açıklayabilmek için kabarcık yüzey alan hızı (superficial bubble surface rate,  $S_k$ ) kullanılmaktadır (Finch ve Dobby, 1990; Yoon, 1994);

$$S_k = 6 - \sim \quad (11)$$

Burada  $j$ , hava hızını;  $dk$ , kabarcık çapını göstermektedir. Görüldüğü gibi kabarcık yüzey alanı hızı, hava hızı ile doğru, kabarcık çapı ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Hava hızı ve kabarcık çapı flotasyon kolonundaki hacimsel hava miktarını da belirlemektedir. Kolondaki hacimsel hava miktarı, hava hızının artışı ile doğrusal olarak artar. Ancak belirli bir akış hızı değeri aşıldığında, kolondaki kabarcıklı akış koşulları bozularak büyük kabarcıkların meydana



getirdiği türbülanslı akış oluşmaktadır (Şekil 2). Bu durum flotasyon kolonlarında arzu edilmemekte ve hava akış hızı nadiren 3 cm/sn değerini aşmaktadır (Ityokumbul, 1993). Sabit köpürtücü dozajında hava hızının artışı, kabarcık çapının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle optimum tane toplama olasılığı, yani flotasyon hız sabitinin maksimum olduğu özgül bir hava hızı değerinin bulunduğu belirtilmiştir (Dobby ve Finch, 1986).

Sabit hava hızı değerinde sisteme eklenen köpürtücü miktarının artması, kabarcık çapını küçülterek toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarının yükselmesine neden olmaktadır (Finch ve Dobby, 1990; Goodall ve O'Connor, 1991b). Bu artışın nedeninin, hava kabarcıklarının küçülerek yükselme hızlarının azalması olduğu belirtilmiştir (Gaudin, 1957; Glembotski vd., 1963). Köpürtücü dozajının kabarcık çapına etkisi yaklaşık 20 ppm köpürtücü dozajına kadar belirgin olup, bu dozajın üzerinde etki azalmaktadır (Klassen ve Makrousov, 1963). Flotasyon kolonunda kabarcık çapı ile köpürtücü dozajı arasındaki ilişki, kabarcık üretici tipinden bağımsız olarak aynı davranımı göstermektedir (Flint vd., 1988).

Toplama bölgesinde taneler ya palpta ya da kabarcığa bağlı olarak bulunurlar. Kabarcık yüzeyine bağlı taneler, kabarcıkların yoğunluğunu artırarak kabarcık yükselme hızının düşmesine, sonuç olarak da toplama bölgesinde hacimsel hava miktarının yükselmesine neden olmaktadır (Yianatos ve Levy, 1989; Finch ve Dobby, 1990). Besleme palpın katı içeriğindeki artışa bağlı olarak toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarındaki artış, kabarcık çapının büyümesi ve köpüğün bozulmasına neden olabilmektedir (Kosick vd., 1988).

Tanelerin toplama bölgesinde kalma süreleri artık akış hızına, tanelerin çökme hızlarına ve toplama bölgesinin yüksekliğine bağlıdır.

Bununla birlikte palpm kolonda aşağı yönde hareketi ve hava kabarcıklarının yükselmesi, tane ve kabarcıkların bağıl hızı (slip velocity) nedeniyle tanelerin kalma süresine etki etmektedir (Dobby ve Finch, 1985). Flotasyon kolonunda tanelerin toplama bölgesindeki ortalama kalma süresi, kolon performansına doğrudan etki etmektedir. Palpm toplama bölgesinde ortalama kalma süresi şu eşitlikle hesaplanabilir;

$$I = \frac{A \cdot H}{T} \quad (i2)$$

Eşitlikte  $A$ , kolonun kesit alanı;  $H$ , toplama bölgesinin yüksekliği;  $T$ , artık akış hızını göstermektedir. Dobby ve Finch (1985) yaptıkları kuramsal çalışmada 1,5 cm/sn akış hızında, yoğunluğu 4 gr/cm<sup>3</sup> olan çeşitli tane boyları taneler için tane kalma süresi ile palp kalma süresi arasındaki ilişkiyi incelemişler, tane boyu incelidikçe tane ve palp yaklaşık aynı kalma süresine sahip olduğu sonucunu bulmuşlardır. Kalma süreleri arasındaki bu oran palp akış hızı düştükçe azalmaktadır. Aynı eğilimi Yianatos ve Bergh (1992), endüstriyel bir flotasyon kolonunda kalma süresini radyoaktif izleme tekniği ile belirleyerek yaptıkları çalışmada da gözlemişlerdir.

Kolonların toplama bölgesindeki akış koşullarının kolon performansına önemli etkisi vardır. Levenspiel (1972), bir reaktördeki karışma (mixing) için iki ideal durum olduğunu belirtmiştir. Bunlardan biri tapalı akış (plug flow), diğeri ise mükemmel karıştırılmalı akıştır (perfect mixing flow). Bu iki akış koşulu için verim eşitlikleri sırasıyla şu şekildedir (Finch ve Dobby, 1990);

$$\eta = 1 - \exp(-k \cdot i) \quad (13)$$

$$R_k = 1 - (1 + k \cdot T)^{-1} \quad (14)$$

Kolonlardaki akış koşullarına bağlı olarak verilen verim ifadeleri dikkate alındığında, tapalı akış koşulunda çalışan flotasyon kolonundan daha yüksek verim elde edilebileceği görülür. Örneğin,  $k=0,5 \text{ dak}^{-1}$ ,  $t=x=5$  dakika alındığında tapalı akış koşulunu veren 13. eşitlikten verim % 91, karışmalı akış koşulunu veren 14. eşitlikten ise verim % 71 olarak hesaplanabilir. Kolondaki akış koşulu, kolon geometrisi ile ilişkilidir ve kolon çapının artması akış koşulunun mükemmel karışmalı akışa yaklaşmasına yol açacaktır. Büyük çaplı endüstriyel flotasyon kolonlarının mükemmel karışmalı akış koşulunda çalışmaması için kolon içerisine bölücü levhalar (baffle) yerleştirilerek kolon küçük çaplı kolonlara bölünmektedir. Böylece kolon çapı ne olursa olsun tapalı akış koşulunun geçerli olması sağlanabilmektedir (Moys vd., 1993).

### 3.3. Köpük Bölgesi

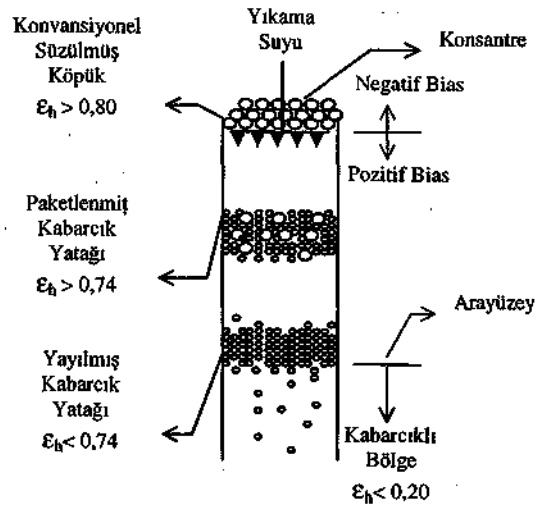
Flotasyon kolonunda köpük, besleme noktasının hemen üzerinde bulunmakta ve endüstriyel uygulamalarda kalınlığı 1,5 metre kadar olabilmektedir. Yapısı ise eski Callow havalı (pnömatik) flotasyon hücresindeki köpüğe benzemektedir (Taggart, 1945). Flotasyon kolonlarındaki köpüğün konvansiyonel hücrelerdekinden kalınlığı dışındaki en önemli farkı, yıkama suyu ile yıkanmasıdır. Köpüğün yıkanmasının iki önemli nedeni vardır; bunlardan biri besleme suyu ile gang 'minerallerinin taşınmasını önlemek, diğeri ise köpüğün kararlı olmasını sağlamaktır.

Pozitif biasla çalışan kolonlarda yıkama suyunun bir bölümü bias suyunu karşılamak için kolon içine süzülürken, diğeri bölümü konsantrenin taşınımını sağlamaktadır. Yıkama suyunun biası karşılayan bölümü taneler olsun ya da olmasın köpüğün kalınlığını 10-100 cm kadar artırdığı belirtilmiştir (Yianatos vd., 1986).

İki faz (su/hava) içeren flotasyon kolonu ile

yapılan çalışmalarda, köpük yapısının Şekil 3'de gösterilen bileşenlerden meydana geldiği belirlenmiştir (Yianatos vd., 1986);

- 1 Arayüzeyin hemen üzerinde yayılmış kabarcık yatağı (expanded bubble bed) vardır ve buradaki hava miktarı ( $\epsilon_h$ ) % 74'den azdır. Toplama bölgesinden yükselen kabarcıklar palp/köpük arayüzeyine çarptıktan sonra yayılmış kabarcık yatağına girerler. Kabarcıklar bu bölgeye girdiklerinde bağlı olarak homojen, küçük ve küreseldirler. Arayüzeyde kabarcıkların çarpmasının meydana getirdiği şok dalgaları tüm yayılmış kabarcık yatağı boyunca etki ederek kabarcıkların büyümesine neden olduğu belirtilmiştir (Falutsu, 1994).



Şekil 3. İki faz (su/hava) içeren kolonda köpük yapısı (Yianatos vd., 1986)

Yayılmış kabarcık yatağının hemen üzerinde başlayan ve yıkama suyu ekleme noktasına kadar uzanan bölüm paketlenmiş kabarcık yatağıdır (packed bubble bed) ve hava miktarı ( $\epsilon_h$ ) % 74'den fazladır. Burada kabarcıklar daha büyüktür ve yıkama suyunun da etkisiyle tapalı akışla (Plug Flow) yükselmektedir. Paketlenmiş

kabarcık yatağında kabarcık büyüme hızı bağıl olarak düşüktür ve genellikle kabarcıklar hızla yükselen büyük kabarcıkların çarpması ile birleşerek büyümektedir.

3. Yıkama suyu ekleme noktasının üzerinde ise konvansiyonel süzölmüş köpük (drained froth) tabakası vardır ve buradaki hava miktarı ise (%) % 80'den fazladır. Süzölmüş köpük tabakasında bias negatifdir ve bölgenin ana işlevi düşey yöndeki hareketi yatay yöne çevirerek konsantre oluşuna akışı sağlamaktır (Finch vd., 1989; Finch ve Dobby, 1990).

Mekanik flotasyon hücrelerinde su ile taşımının (entrainment) konsantre kirlenmesinin en önemli nedenlerinden biri olduğu belirtilmiştir (Trahar, 1981). Buna karşılık flotasyon kolonlarında tanelerin su ile taşımınının, köpüğün kalın olması, yıkama suyu ile köpüğün yıkanması ve pozitif biasla çalışmaları (mekanik flotasyon hücreleri negatif biasla çalışırlar) nedeniyle engellendiği belirtilmiştir (Dobby ve Finch, 1985; Yianatos vd., 1987; Luttrell vd., 1991; Maachar ve Dobby, 1992; Choung vd., 1993).

Kaim köpük tabakası içindeki kabarcıkların büyümesi nedeniyle (özgül yüzey azalmakta), kabarcık yüzeylerindeki tanelerin kopma/tekrar bağlanma ile konumlan değişebilmektedir. Bu durum flotasyon kolonlarında köpük seçimliliğinin olumlu yönde artmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda köpükte mineral profillerinin oluştuğu gözlenmiş, özellikle arayüzey üzerindeki 10 cm'lik derinlikte hızlı bir tenor yükselmesinin meydana geldiği bulunmuştur (Yianatos vd., 1988^, Falutsu ve Dobby, 1992; Choung vd., 1993; Aksam ve Demirel, 1996). Bu çalışmalar köpükte seçimliliğin sözkonusu olduğu ve tanelerin bir kısmının köpükte kalarak konsantre olarak alındığı, diğer tanelerin ise köpük bölgesinden toplama

bölgesine geri düştüğü (drop-back) sonucunu ortaya koymaktadır.

Köpüğe giren, köpükten geri düşen ve alman konsantredeki taneler dikkate alındığında köpük bölgesinin veriminden söz edilebilir. Bu nedenle flotasyon kolonunun performansı, toplama ve köpük bölgelerinin performanslarına bağlı olmaktadır. Flotasyon kolonu için toplam verim şu eşitlikle verilmektedir (Finch ve Dobby, 1990);

$$3^* - * . * + ! - * \quad (15)$$

Bu eşitlikte R<sub>fk</sub>, R<sub>t</sub>, R<sub>k</sub> sırasıyla flotasyon kolonunun, toplama bölgesinin ve köpük bölgesinin verimini göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, köpük bölgesinin veriminin yaklaşık % 60 civarında olduğu belirlenmiştir (Contini vd., 1988; Falutsu ve Dobby, 1988; 1989).

Köpük bölgesinin verimi, köpüğün mineral taşıma kapasitesi (carrying rate) ile sınırlanmaktadır. Taşıma kapasitesi, tane toplama hızı ile birlikte kolon kapasitesini sınırlayan iki faktörden biridir ve bu nedenle de ölçek büyütme işleminde oldukça önemli olduğu belirtilmiştir (Dobby ve Finch, 1986). Taşıma kapasitesi, kolonda beslenen malzeme miktarının büyük kısmının yüzdüğü koşullarda hız belirleyici olmaktadır (Moon ve Sirois, 1987; 1988; Yoon, 1994).

#### 4. KABARCIK ÜRETEÇLERİ

Flotasyon kolonlanm mekanik hücrelerden ayıran en önemli özelliklerden biri, havanın kolona kabarcık üretici (sparger) ile verilmesidir. Mekanik flotasyon hücrelerinde ise hava kabarcıkların kanştmcınm meydana getirdiği kavitasyon (cavitation) ile oluşmaktadır (Grainger-Ailen, 1970).

Kabarcık üretiminin amacı, orta ve yüksek


hava hızlarında küçük çaplı kabarcıklar elde etmektedir. Gerek flotasyon kolonlarında ve gerekse diğer tipteki flotasyon hücrelerinde çok çeşitli ve ülkeden ülkeye değişen kabarcık üretici tasarımlar kullanılmasına karşın (Hu ve Liu, 1988; Dobby, 1990; Dobby ve Finch, 1991), flotasyon kolonlarında yaygın olarak iki tip kabarcık üretici sistem kullanılmaktadır (Finch ve "Dobby, 1990). Bunlar sırasıyla;

1. Havanın kauçuk veya filtre bezi kaplanmış delikli bir boru ya da yalnızca delikli çelik boru yardımıyla kolona verildiği kabarcık üreteçleri (internal spargers),
2. Kolon dışında, havanın köpürtücü içeren su veya palpla karıştırılarak kolona verildiği kabarcık üreteçleri (external spargers)dir, Bu tip üreteçlere USBM (turbo air) kabarcık üretici (McKay vd., 1988), Cominco kabarcık üretici (....., 1991; Murdock ve Wyslouzil, 1991), Deister kabarcık üretici (Zipperian ve Svensson, 1988), Microcel kabarcık üretici (Yoon, 1993) örnek verilebilir. USBM kabarcık üreticinde basınçlı hava ve su, içinde cam bilyaların olduğu bir odacıkta karıştırılırken, Deister kabarcık üreticinde gözenekli ventüri içeren bir borudan su hızla geçirilerek, havanın dışarıdan çekilmesi ile kabarcıklar oluşturulmaktadır. Cominco kabarcık üretici USBM tasarıma benzemekle birlikte basınçlı hava ve su bir odacık yerine 'T' boru yardımı ile karıştırılmaktadır. Microcel kabarcık üreticinde ise kolonun içinden palpın bir kısmı pompa ile çekilerek kimya endüstrisinde de karıştırma amacıyla kullanılan bir statik karıştırıcıda (Sinnott, 1983) hava ile karıştırılarak kolona verilmektedir. Bu tür üreteçlerin en önemli özellikleri kolon çalışırken kolay ve hızlı bir şekilde değiştirilebilmeleri ve kabarcık çapının daha iyi kontrol edilmesine (hava/su oranları ve basıncıları ayrı ayrı ayarlanarak) olanak sağlamalarıdır.

Yukarıda belirtilen kabarcık üretici tipleri, kabarcık oluşum noktalarında sıvının makaslama hızının artışı dikkate alınarak tasarlanmıştır (Yoon, 1993). Küçük kabarcıklar makaslama hızının artması ya da sisteme köpürtücü eklenerek yüzey geriliminin düşürülmesi ile elde edilebilir. Fakat, köpürtücü derişiminin artırılması seçimliliğin bozulmasına yol açabilmekte, makaslama hızının artırılması ile kabarcık çapının küçültülmesinin ise enerji harcaması açısından maliyeti söz konusu olabilmektedir.

Yoon (1994) çeşitli kabarcık üreteçlerinden farklı çaplarda kabarcık elde edildiğini belirtmiştir (Çizelge 2). Ancak bu çalışmada ölçümlerin yapıldığı koşullar hakkında (hava hızı, köpürtücü dozajı vb.) bilgi verilmemiştir.

Çizelge 2. Farklı Kabarcık Üreteçlerinden Elde Edilen Kabarcık Çapları (Yoon, 1994)

Kabarcık çapı (mm)	Mekanik Hücre	Kumaş Kaplı Üreteç		USBM Üreteci	Microcel
D80	1,5	2,7	3,0	2,5	0,96
D50	1,2	2,1	2,5	1,7	0,64

Xu ve Finch (1989) çeşitli kabarcık üreteçleri ile yaptıkları çalışmalarda toplama bölgesindeki hava miktarının (dolayısıyla kabarcık çapının) kolon kesit alanı ile kabarcık üretici yüzey alanı arasındaki orana ( $R_s = A_c/A_s$ ) bağlı olarak değiştiği sonucunu elde etmişlerdir. Bu oran arttıkça toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarı azalmaktadır. Elde ettikleri sonuçlardan kabarcık çapı ile hava hızı ve  $R_s$  oranı arasındaki şu deneysel eşitliği bulmuşlardır;

$$d_k = C(R_s - J_h)^n \quad (R_s < 1) \quad (16)$$

Bu eşitlik her iki kabarcık üretici grubu için ölçek büyütme amacıyla kullanılmaktadır.

Ölçek büyütme işleminde laboratuvar ya da pilot kolonundaki  $R_s-V$  çarpımının endüstriyel kolonla aynı olması gerekmektedir (Yoon, 1994).

Kabarcık üretici tipinin kabarcık çapına ve kolon performansına etkisini belirlemek için pek çok çalışma yapılmış, ancak birbirleri ile çelişen sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalara aşağıda kısaca değinilmiştir.

Xu ve Finch (1989) kabarcık çapının, üreticinin yapıldığı malzemeye önemli ölçüde bağlı olmadığını göstermişlerdir. Aynı gözlem Clingan ve McGregor (1987) tarafından da yapılmış, üreticinin kauçuk, kumaş ya da seramik olmasından çok üreticinin yüzey alanının önemli olduğu belirtilmiştir. Kabarcık üreticinin üzerindeki delik sayısının da elde edilen kabarcık çapına etkisinin olmadığını belirlenmiştir (Finch ve Dobby, 1990).

Huls vd. (1991) kumaş kaplı kabarcık üretici ve USBM kabarcık üretici ile yaptıkları çalışmada USBM kabarcık üreticinin daha küçük kabarcık ürettiğini, ancak bunun kolon performansına belirli bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir.

Grosso ve Parekh (1993b), gözenekli metal tüp ile Cominco ve Deister kabarcık üreteçlerine benzer tipte üç farklı kabarcık üretici kullanarak yaptıkları karşılaştırmalı çalışmalarında, köpürtücü türüne bağlı olarak üreteç tipinin flotasyon kolonunun kömür temizleme performansına önemli etkisinin olmadığını göstermişlerdir.

Toro vd. (1993) 0,41 m çaplı kolonda yaptıkları çalışmalarında, USBM kabarcık üretici ve kumaş kaplı kabarcık üretici ile elde edilen performans değerlerini karşılaştırmışlar. Araştırmacılar USBM kabarcık üretici ile çok daha yüksek bakır verimi elde edildiğini belirtmişlerdir (örneğin, 2,1 cm/sn hava hızında bakır verimi USBM kabarcık

üreticinde % 92 iken filtre bezi kaplı kabarcık üreticinde % 31 olarak bulunmuştur). Aynı araştırmacılar bu iki kabarcık üreticini 0,9 m çaplı flotasyon kolonunda da karşılaştırmışlar ve USBM kabarcık üretici ile bakır veriminde % 5, tenöründe ise % 0,7 artış sağlandığını belirtmiş, ancak kabarcık çapları hakkında bilgi vermemişlerdir.

Flotasyon kolonunun performansına hem kabarcık çapının hem de hava hızının etkisinin olması nedeniyle herhangi bir kabarcık üreticiden, diğer üreteçlere göre daha küçük kabarcıklar elde edilebiliyor olmasının çok önemli olmadığı belirtilmiştir (Finch ve Dobby, 1990; Dobby ve Finch, 1991). Bu nedenle kabarcık çapının büyük olması sonucu bozulan performansın hava hızının artırılması ile düzeltilebileceği belirtilmiştir.

Kabarcık üreticinin yapıldığı malzemenin üreteçten elde edilen kabarcık çapına etkisinden çok, kullanım süresine etkisi daha büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel kullanımlarda palpın aşındırıcı etkisi, pH ayarlamak için kullanılan kireç ya da tesis suyunun sertliğini belirleyen iyonlar üreticinin aşınmasına, tıkanmasına, kabarcık çapının değişmesine neden olarak kolon performansına olumsuz etki edebilmektedir. Kullanılan kabarcık üreticinin seçiminde bakımının kolay olması, kolon çalışırken değiştirilebilmesi, ucuz olması ve kolaylıkla bulunabilmesi önem taşımaktadır.

## 5. FLOTASYON KOLONLARININ PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELER

Kolon performansını etkileyen parametreler iki grupta düşünülebilir:

- Baştan tasarlanan ve işlem sırasında değiştirilemeyen parametreler; kolon çapı, toplama bölgesi yüksekliği, kabarcık

üreticinin tipi ve yıkama suyu besleme sistemi,

- b) İşlem parametreleri; besleme, hava ve yıkama suyu hızı, köpük kalınlığı, palpa yoğunluğu, reaktif miktarları.

Bunun dışında, kabarcık çapı ve dağılımı, hacimsel hava miktarı ve besleme tenörü gibi sistem içinde değerleri bağımsız olarak değiştirilemeyen diğer parametrelerin de kolon performansını etkilediği bilinmektedir (Finch ve Dobby, 1990; Yoon, 1993; Goodall ve O'Connor, 1991b; Diaz-Penafiel ve Dobby, 1994).

Bir flotasyon kolonun performansını etkileyen parametreler dikkate alındığında kapasiteyi sınırlayan iki önemli faktör vardır (Espinoza-Gomez, vd., 1988a; Yoon, 1994);

1. Tane toplama hızı (k, hız sabiti),
2. Konsantre alma hızı (C, taşıma kapasitesi).

Kolon kapasitesi taşıma kapasitesinin (C) çok altında ise kolon hız sınırlayıcı koşulda çalışmaktadır. Bu hız sabitinin (k) optimum değerinin altında olduğu koşullarda meydana gelir. Kolonun hız sınırlı koşulda çalıştığı belirlenirse bu durum; 1- kabarcık çapı, 2- toplayıcı miktarı veya 3- hava hızı parametrelerden biri ile iyileştirilebilir.

Bu parametreler, arasında kabarcık çapı kontrolünün hız sabitini artırmada en etkin yöntem olduğu söylenebilir. Hız sabiti yeterince yüksekse kolon kapasitesi 'Maksimum Taşıma Kapasitesi' ile ifade edilir ve bu durumda kolon performansı taşıma kapasitesi ile sınırlanmıştır. Bazı koşullarda flotasyon kolonunun maksimum taşıma kapasitesi üzerinde, yüksek bir hız sabitine sahip olarak çalışması uygun olabilir. Böylece daha az susevmez taneler köpükten palpa geri dönerek (drop-back) konsantre tenorunun yükselmesi sağlanabilir (Luttrell ve Yoon, 1991).

## 5.1. Tasarım Parametrelerinin Etkisi

Kolon çapı: Kolon çapının performansa etkisi yeterince incelenmemiş olmasına karşın bu konuda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kuramsal olarak kolon çapının büyümesinin, akış koşulunun tapalı akıştan mükemmel karışmaya geçişine bağlı olarak verimde düşmeye neden olacağı belirtilmektedir (Yoon, 1994). Finch ve Dobby (1990), Flint vd. (1992) kolon çapının büyümesi ile kolon performansının bozulduğunu göstermişlerdir. Ancak, literatürde bunun tersine sonuçlarla da karşılaşılmaktadır (Espinoza-Gomez vd., 1989; Espinoza-Gomez ve Johnson, 1991). Bu zıt sonuçların elde edilmesindeki nedenlerden biri, çalışmaların aynı zamanda yapılmaması, 'diğeri ise besleme, hava hızı, köpük kalınlığı v.b. gibi işlem parametrelerin farklı değerlere sahip olmasıdır (Tuteja vd., 1995). Bunların yamsıra artan kolon çapı ile kabarcıkların ve beslemenin kolonda homojen olarak dağıtılması kolon performansı açısından önem taşımaktadır.

Toplama bölgesi yüksekliği: Toplama bölgesi yüksekliğinin artması kalma süresini artırdığından verim yükselmekte, konsantre tenörü ise çoğu kez düşmektedir (Yianatos, vd., 1988b; Ynchausti vd., 1988; Peterson vd., 1990; Finch ve Dobby, 1990; Aliğa ve Soto, 1993). Kolon, taşıma kapasitesine yakın çalıştığında ve beslemenin hızlı yüzen minerallerden oluştuğu koşullarda, toplama yüksekliğinin verim üzerine etkisi maskelenebilmektedir.

Yıkama suyu dağıtıcı sistem ve konumu: Yıkama suyu dağıtma sisteminin performansa etkisi yeterince incelenmemiştir. En ayrıntılı çalışma Jameson ve diğ. (Tuteja vd., 1995) tarafından yapılmıştır. Duş tipi ve jet tipi dağıtma sistemlerini karşılaştırdıkları çalışmada, köpüğün üzerinden su verildiğinde jet tipinin duş tipine oranla köpüğe su ile taşınan gang miktarını azalttığını

göstermişlerdir. Ayrıca, köpüğün içerisinde yapılan yıkamanın daha etkin olduğu da gösterilmiştir. Finch ve Dobby (1990) ve Kosick vd., (1988) köpük taşıma noktasından 7,5-10 cm daha aşağıdan su verilmesinin optimum olduğunu belirtmişlerdir.

Köpük bölgesinin mekaniği tam olarak çözümlenemediği için, kuramsal temellerden yola çıkarak yıkama suyu dağıtım sistemi ve konumunun belirlenmesi mümkün görünmemekte ve her cevher için deneysel çalışmalarla belirlenmesi gerekmektedir (Tüteja vd., 1995).

## 5.2. İşlem Parametrelerinin Etkisi

**Hava hızı:** Hava hızının performansa etkisi konusunda yapılan çalışmalar genellikle uyum içindedir. Çok sayıda araştırmacı (Clingan ve McGregor, 1987; Finch ve Dobby, 1990; Kho ve Shon, 1989; Groppo ve Parekh, 1990, 1993a; del Villar vd., 1993; Abdel-Khalek ve Stachurski, 1993; Mavros vd., 1993; Goodall ve O'Connor, 1991a ve b, 1992), artan hava hızı ile verimin bir maksimum verecek şekilde arttığını ve bu noktadan sonra ise azaldığını vurgulamıştır. Tenor ise bunun tersine bir eğilim göstermekte ve yaklaşık olarak verimin maksimum olduğu bölgede minimum değer almaktadır.

**Besleme hızı:** Literatürde besleme hızının etkisiyle ilgili olarak farklı sonuçlar bulunmaktadır. Çok sayıda araştırmacı besleme hızının azalması ile verimin arttığı konusunda birleşmektedir (Finch ve Dobby, 1990; Kosick vd., 1988; Luttrell vd., 1988; Mavros vd., 1993). Bu araştırmacıların ortak görüşü, besleme hızının azalmasıyla kalma süresinin arttığı ve buna bağlı olarak verimin yükseldiği şeklindedir. Diğer taraftan Goodall ve O'Connor (1992) bir açıklama getirilmemekle birlikte besleme hızının artışıyla verimin arttığını deneysel olarak göstermişlerdir.

**Köpük kalınlığı:** Köpük kalınlığının

performansa etkisi konusunda yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır (Clingan ve McGregor, 1987; Amelunxen vd., 1988; Parekh, vd., 1988; Huls vd., 1988; Ynchausti vd., 1988; Peterson vd., 1990; Goodall ve O'Connor, 1992). Köpük kalınlığının artışıyla konsantre tenörü önemli ölçüde artarken, verimde önemli bir düşüş gözlenmemiştir. Bunun en önemli nedeni, köpük kalınlığının artması sonucunda tanelerin köpükte kalma süresi artmakta, köpükte yükselen su miktarının azalmasına bağlı olarak su ile taşman gang minerallerinin konsantreye gelmeden geri yıkanma olasılığı yükselmektedir. Bununla birlikte köpük içindeki mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için ek çalışmaların yapılması gerekmektedir.

**Yıkama suyu hızı:** Yıkama suyu köpüğe, konsantreye su ile taşman gang minerallerinin palp içine geri yıkanarak, tenorun yükseltilmesi ve kararlı köpük elde etmek için verilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda yıkama suyu artışı ile tenor yükselirken verim düşmüş, bazılarında ise tersine bir durumla karşılaşmış, tenorun yükselmediği çalışmalar da olmuştur (Kosick vd., 1988; Ynchausti vd., 1988; Peterson vd., 1990; Finch ve Dobby, 1990; Groppo ve Parekh, 1990; Goodall ve O'Connor, 1992; Abdel-Khalek ve Stachurski, 1993; Ghiani vd., 1995). Yapılan çalışmalarda, yıkama suyunun gangı geri yıkamanın yamsıra toplama bölgesinde tanelerin kalma süresinin azalmasına neden olduğu belirtilmektedir. Bunun yanında, bias hızı sıfırdan büyük bir değerde tutulduğunda, yıkama suyunun ayarlanması ile performansın çok fazla değiştirilemeyeceği iddia edilmiştir (Clingan ve McGregor, 1987; Finch ve Dobby, 1990). Aşın yıkama suyu artan su tüketimi, köpüğün seyrelmesi ve işleyen aşamalarda sorunlar yaratabileceği için istenmemektedir.

**Besleme palp yoğunluğu (% Katı Oranı):** Pek çok araştırmacı, palp yoğunluğunun artışı ile

verimin yükseldiğini belirtmiştir (Finch ve Dobby, 1990; Tuteja vd., 1995; Goodall ve O'Connor, 1991b; 1992). Artışın nedeninin, yüksek palp yoğunluğunun toplama bölgesindeki engelli çökeltme koşullarını düzenleyerek tanelerin kalma süresinin artışına bağlı olduğu ileri sürülmüştür. Alışılmış flotasyon hücrelerinin tersine, yüksek palp yoğunluğunda verim-tenör eğrisinin korunabilmesi kapasite açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Tuteja vd., 1995).

**Köpürtücü miktarı:** Flotasyon kolonlarında toplayıcı miktarının etkisi mekanik hücrelere benzer olurken, köpürtücü miktarı kabarcık boyunu değiştirerek performans üzerinde önemli ölçüde etkili olabilmektedir. Genellikle verimin maksimum olduğu bir köpürtücü miktarının bulunduğu belirtilmiştir (Flint vd., 1988; Goodall ve O'Connor, 1991b, 1992; Tuteja vd., 1995).

## 5. SONUÇ

Flotasyon performansı dikkate alındığında flotasyon kolonlarının iki farklı özelliği göze çarpmaktadır. Bunlardan ilki sakin akış koşullarının geçerli olması diğer bir ifade ile, taneleri askıda tutmak ve tane/kabarcık çarpışması için mekanik karıştırmanın kullanılmamasıdır. Böylece hem küçük kabarcıklarla yüksek flotasyon hız sabitinin elde edilebildiği en uygun akış koşulu sağlanmış, hem de karıştırma için gerekli güç harcaması ve aşınma sorunu ortadan kalkmıştır. Kabarcık çapının kontrol edilebilmesine olanak tanıyan çeşitli kabarcık üretici tasarımlarının da geliştirilmesi önemli bir avantaj olmaktadır.

Sakin akış koşullarının sağladığı bir diğer avantaj ise modellenmesinin kolay olmasıdır. Bu nedenle başarılı flotasyon kolonu modelleri geliştirilmiştir.

Diğer özellik ise kaim ve su ile yıkanan köpük tabakasıdır. Bu özellik yüksek tenörlü konsantre elde edilmesine olanak tanımakta ve flotasyon kolonlarının özellikle temizleme devrelerinde kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Flotasyon kolonlarının performansına etki eden parametreler hakkında ise literatürde genellikle birbirleri ile uyumlu bilgiler bulunmaktadır. Ancak köpük bölgesini araştıran çalışmalar yetersizdir. Köpük bölgesinin zenginleştirme işlemine katkısı, köpük yıkama işleminin daha etkin yapılabilmesi, köpükte susever/susevmez mineral davranımı ve modellenmesini araştıran çalışmalar flotasyon kolonlarının etkin kullanımına önemli katkılar sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

....., 1965; "Flotation Column Due for Mill Scale Tests in Canada", Engineering & Mining Journal, Vol.166, No.1, s.76-83

....., 1991; "Information Manual - Column Flotation Technology", Cominco. Engineering Services LTD, Column Cell Technology Division

Abdel-Khalek, N.A. ve Stachurski, J., 1993; "Beneficiation of Sulfur Ore by Conventional and Column Flotation", Minerals & Metallurgical Processing, Aug., s.135-138

Ahmed, N. ve Jameson, G.J., 1985; "The Effects of Bubble Size on the Rate of Flotation of Fine Particles", Int. J. Miner. Process., Vol.14, s. 195-215

Aksarı, B. ve Demirel, H., 1996; "Parameters Affecting Mineral Behavior in the Froth Zone of a Laboratory Flotation Column, Changing Scopes in Mineral Processing", M. Kemal, V. Arslan, A. Akar ve M. Canbazoglu (Eds.), s.337-342, Balkema



- Aliğa, W. ve Soto, H., 1993; "Application of Column Cells to Potash Flotation in Brines", *Trans. MM*, 102, S.C70-73
- Amelunxen, R.L., Llerena, R., Dunstan, P., ve Huls, B.J., 1988; "Mechanics of Column Flotation Operation", *Column Flotation'88*, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 16, AIME, s. 149-155, NY
- Barbery, G., 1982; "Engineering Aspects of Flotation in the Minerals Industry: Flotation Machines, Circuits and Their Simulation", NATO ASI, Cambridge, UK, July s.5-16
- Boutin, P. ve Wheeler, D.A., 1967; "Column Flotation Development - using an 18 in. pilot unit". *Canadian Mining Journal*, March, s.94-101
- Brewis, T., 1991; "Flotation Cells", *Mining Magazine*, June, s.383-393
- Choung, J.W., Luttrell, G.H. ve Yoon, R.-H., 1993; "Characterization of Operating Parameters in the Cleaning Zone of Microbubble Column Flotation", *Int. J. Miner. Process.*, Vol.39, s.31-40
- Clingan, B.V. ve McGregor, D.R., 1987; "Column Flotation Experience at Magma Copper Co.", *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol.3, No.3, s. 121-125
- Contini, N.J., Wilson, S.W. ve Dobby, G.S., 1988; "Measurement of Rate Data in Flotation Columns", *Column Flotation'88*, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 10, AIME, s.81-89, NY
- del Villar, R., Finch, J.A., Gomez, C.O. ve Espinoza-Gomez, R., 1992; "Flotation Column Amenability and Scale-up Parameter Estimation Tests", *Minerals Engineering*, Vol.5 No.2, s.169-182
- del Villar, R., Soto, H. ve Lacombe, P., 1993; "Column Flotation Circuit Design at Les Mines Selbaie", *CM Bulletin*, May, s.35-40
- Diaz-Penafiel, P. ve Dobby, G.S., 1994; "Kinetic Studies in Flotation Columns: Bubble Size Effect", *Minerals Engineering*, Vol.7, No.4, s.465-478
- Dobby, G.S., 1990; "Froth Flotation Systems," *Course Notes*
- Dobby, G.S. ve Finch, J.A., 1985; "Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns, *Chemical Engineering Science*", Vol.40, No.7, s. 1061-1068
- Dobby, G.S. ve Finch, J.A., 1986; "Particle Collection in Columns-Gas Rate and Bubble Size Effects", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol.25, No.1, s.9-13
- Dobby, G.S. ve Finch, J.A., 1991; *Column Flotation: A Selected Review, Part II, Minerals Engineering*, Vol.4, Nos.7-11, s.911-923
- Espinoza-Gomez, R., ve Johnson, N.W., 1991; "Technical Experiences with Conventional Columns at Mount Isa Mines Ltd.", *Column Flotation'91*, G.E. Agar, B.J. Huls, D.B. Hyma, (Eds.) Vol.2, *CJM*, s.511-523, Halifax
- Espinoza-Gomez, R., Yianatos, J.B., Finch, J.A., ve Johnson, N.W., 1988a; "Carrying Capacity Limitations in Flotation Columns," *Column Flotation'88*, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 15, AIME, s. 143-148, NY
- Espinoza-Gomez, R., Finch, J.A., Yianatos, J.B. ve Dobby, G.S., 1988b; *Column Carrying Capacity: Particle Size and Density Effects*, *Minerals Engineering*, 1(1), s.77-79
- Espinoza-Gomez, R., Finch, J.A., ve Johnson, N.W., 1989; "Evaluation of Flotation Column Scale-up at Mount Isa Mines Ltd.", *Minerals Engineering*, 2(3), s.369-375
- Falutsu, M., 1994; "Column Flotation Froth Characteristics-Stability of Bubble-Particle System", *Int. J. Miner. Processing*, Vol.40, s.225-243
- Falutsu, M. ve Dobby, G.S., 1988; "Direct Measurement of Froth Zone Performance in a Laboratory Flotation Column", *Processing of Complex Ores*, G.S. Dobby ve S.R. Rao (Eds.), *CM*, s.335-347
- Falutsu, M. ve Dobby, G.S., 1989; "Direct Measurement of Froth Drop-back and Collection Zone Recovery in a Laboratory Flotation Column", *Minerals Engineering*, Vol.2, No.3, s.377-386

- Falutsu, M. ve Dobby, G.S., 1992; "Froth Performance in Commercial Sized Flotation Columns", Minerals Engineering, Vol.5, Nos. 10-12, s. 1207-1223
- Finch, J.A. ve Dobby, G.S., 1990; "Column Flotation", Pergamon Press
- Finch, J.A., Yianantos, J.B. ve Dobby, G.S., 1989; "Column Froths, Minerals ve Extractive Metallurgy Review", Vol.5, s.281-305
- Flint, L.R., 1973; "Factors Influencing the Design of Flotation Equipment", Mineral Science & Engineering, Vol.5, No.3, s.232-241
- Flint, I.M., MacPhail, P. ve Dobby, G.S., 1988; "Aerosol Frother Addition in Column Flotation", CM Bulletin, Vol.81, No.913, s.81-84
- Flint, I.M., Wyslouzil, H.E., de Lima Verade, V.L. ve Murdock, D.J., 1992; "Column Flotation of Iron Ore", Minerals Engineering, Vol.5, Nos. 10-12, s. 1185-1194
- Gaudin, A.M., 1957; Flotation, McGraw-Hill, New York
- Ghiani, M., Peretti, R. ve Zucca, A., 1995; "Application of Column Flotation Technique to Ba-yte and Fluorspar Ores Beneficiation", Proceedings of the XIX IMPC, AME, Chapter 36, San Francisco
- Glembotski, V.A., Klassen, V.I. ve Plaksin, I.N., 1963; Flotation, Translated by Primary Sources, New York.
- Goodall, C.M. ve O'Connor, C.T., 1991a; "Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column. Part 1- The Modelling of Residence Distributions Interactions in a Laboratory Column Flotation Cell", Int. J. Miner. Process., Vol.31, s.97-113
- Goodall, C.M. ve O'Connor, C.T., 1991b; "Pulp-Froth Interactions, in a Laboratory Flotation Column Cell", Minerals Engineering, Vol.4 Nos.7-11,s.951-958
- Goodall, C.M. ve O'Connor, C.T., 1992; "Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column. Part 1- The Relationship Between Solids Residence Time Distribution ve Metallurgical Performance", Int. J. Miner. Process., Vol.36, s.219-228
- Grainger-Allen, T.J.N., 1970; "Bubble Generation in Froth Flotation Machines", Trans. M.M., Vol.79, s.C 15-22
- Groppo, J.G. ve Parekh, B.K., 1990; "Continuous Pilot Scale Testing of Column Flotation for Andry Fine Coal from Refuse", Minerals & Metallurgical Processing, February, s.9-12
- Groppo, J.G. ve Parekh, B.K., 1993a; "Column Flotation Studies of Alabama Oil Shale", Minerals & Metallurgical Processing, November, s. 191 -194
- Groppo, J.G. ve Parekh, B.K., 1993b; "Comparison of Bubble Generating Devices for Column Flotation of Fine Coal", Mining Engineering, October, s. 1189-1990
- Hall, S.T., 1990; "The Treatment of Industrial Minerals by Column Flotation", Industrial Minerals Processing Supplement, s.30-36
- Hu, W. ve Liu, G., 1988; "Design ve Operating Experiences with Flotation Columns in China", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 6, AME, s.35-42, NY
- Huis, B.J., Lachance, C.D. ve Dobby, G.S., 1988; "Gas Rate ve Froth Depth Effects on Performance of Cu/Ni Separation Flotation Column", Processing of Complex Ores, G.S. Dobby ve S.R. Rao (Eds.), CM, s.3 11-323
- Huis, B.J., Lachance, C.D. ve Dobby, G.S., 1991; "Bubble Generation Assessment for an Industrial Flotation Column", Minerals Engineering, Vol.4, No. 1, s.37-42
- Ityokumbul, M.T., 1993; "Maximum Gas Velocity in Column Flotation-Technical Note", Minerals Engineering, Vol.6, No. 12, s. 1279-1286
- Jameson, G.J., Nam, S. ve Moo Young, M., 1977; "Physical Factors Affecting Recovery Rates in Flotation", Mineral Science & Engineering, Vol.9, No.3, s. 103-118
- Kallioinen, J. Heiskanen, K. ve Garrett, C., 1995; "Large Flotation Cell Tests Succesfull in

- Chile", Mining Engineering, October, s.913-915
- Kho, C.J. ve Sohn, H.J., 1989; "Column Flotation of Talc", Int. J. Miner. Process., Vol.27, s. 157-167
- Klassen, V.L ve Makrousov, V.A., 1963; An Introduction to the theory of Flotation, Butterworths, London, Chapter 5
- Klimpel, R.R., 1993; "Froth Flotation-An Old Process with a New Outlook", Mining Magazine, May, s.268-276
- Kosick, G.A., Freberg, M. ve Kuehn, L.A., 1988; "Column Flotation of Galena at Polaris Concentrator", CIM Bulletin, Vol.81, No.920, s.54-60
- Levenspiel, O., 1972; Chemical Reaction Engineering, Chapter 9, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, NY
- Luttrell, G.H. ve Yoon, R.-H., 1991; "A Flotation Column Simulator Based on Hydrodynamic Principles", Int. J. Miner. Process., Vol.33, s.355-368
- Luttrell, G.H., Tao, D.P. ve Yoon, R.-H., 1991; "Effects of Froth Behavior on the Column Flotation of Fine Coal", SME Annual Meeting, Denver, Colorado, February, 25-28
- Luttrell, G.H., Weber, A.T., Adel, G.T., ve Yoon, R.-H., 1988; "Microbubble Flotation of Fine Coal, Column Flotation'88", K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 21, AIME, s.205-211, NY
- Maachar, A. ve Dobby, G.S., 1992; "Measurement of Feed Water Recovery ve Entrainment Solids Recovery in Flotation Columns", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.31, No.3, s. 167-172
- Mavros, P., Kydros, K.A., ve Matis, K.A., 1993; "Arsenopyrite Enrichment by Column Flotation", Minerals Engineering, Vol.6, s. 1265-1277
- McKay, J.D., Foot, D.G. ve Shirts, 1988; "Column Flotation and Bubble Generation Studies at the Bureau of Mines", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 18, AIME, s. 173-186, NY
- Moon, K.S. ve Sirois, L.L., 1987; "Theory and Application of Column Flotation", Canmet Report, Mo.87-7E
- Moon, K.S. ve Sirois, L.L., 1988; "Theory and Application of Column Flotation in Canada", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 11, AIME, s.91-102, NY
- Moys, M.H., Engelbrecht, J.A. ve Terblanche, A.N., 1993; "The Design of Baffles to Reduce Axial Mixing in Flotation Columns", CM Bulletin, March, Vol.86, s. 138-143
- Murdock, D.J. ve Wyslouzil, H.E., 1991; "Large-Diameter Column Flotation Cells Take Hold", Engineering & Mining Journal, August
- Parekh, B.K., Groppo, J.G., Stotts, W.F., ve Bland, A.E., 1988; "Recovery of Fine Coal from Preparation Plant Refuse Using Column Flotation", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 24, AIME, s.227-233, NY
- Peterson, M.R., Duchene, L.J. ve Shirts, M.B., 1990; "Column Flotation of Multiple Products from a Fluorite Ore", USBM Report of Investigations, RI9309
- Reddy, P.S.R., Kumar, S.G., Bhattacharyya, K.K., Sastri, S.R.S. ve Narasimhan, K.S., 1988; "Flotation Column for Fine Coal Beneficiation", Int. J. Miner. Process., Vol.24, s.161-172
- Schena, G. ve Casali, A., 1994; "Column Flotation Circuits in Chilean Copper Concentrators", Minerals Engineering, Vol.7, No.12, s.1473-1486
- Shah, Y.T., Kelkar, B.G., Goodbole, S.P. ve Deckwer, W.D., 1982; "Design Parameter Estimations for Bubble Column Reactors", AIChE Journal, 28(3), s.353-379
- Sinnott, R.K., 1983; "An Introduction to Chemical Engineering Design", Chemical Engineering, Vol.6, Pergamon Press, NY, p.369
- Soto, H., 1988; "Column Flotation with Negative Bias", Processing of Complex Ores,

- G.S. Dobby ve S.R. Rao (Eds.), CM, s.379-385
- Soto, H. ve Barbery, G., 1991a; "Flotation of Coarse Particles in A Counter Current Column Cell", Minerals & Metallurgical Processing, Feb., s. 16-21
- Soto, H. ve Barbery, G., 1991b; "A Counter Current Column for Flash or Unit Flotation", Column'91, Agar, Huls, Hyma (Eds.), Vol.2, s.185-197
- Taggart, A.F.,1945; Hvebook of Ore Dressing, Wiley, Chapter 12, New York
- Toro, H., Lee, K.Y. ve Ğebhardt, J.E., 1993; "Column Flotation: A Technical Analysis of Sparger Systems", Flotation Plants. Are They Optimized?, D. Malhotra, (Ed.), Chapter 12, AIME, s.69-75, NY
- Trahar, W.J., 1981; "The Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation", Int. J. Miner. Process., Vol.8, s.289-327
- Tuteja, R.K., Spottiswood, D.J ve Misra, V.N., 1994; "Mathematical Models of the Column Flotation Process-A Review", Minerals Engineering, Vol.7, No. 12, s. 1459-1472
- Tuteja, R.K., Spottiswood, D.J ve Misra, V.N., 1995; "Recent Progress in the Understveing of Column Flotation -A Review", The AusMM Proceedings, No.2, s.25-31
- Wheeler, D.A., 1966; "Big Flotation Column Mill Tested", Engineering & Mining Journal, 167(11), s.98-193'
- Xu, M. ve Finch, J.A., 1989; "Effect of Sparger Surface Area on Bubble Diameter in Flotation Columns", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.28, No.1, s.1-6
- Yianatos, J.B., 1990; "Column Flotation-Modelling and Technology", The International Colloquium, "Developments in Froth Flotation" Organized by South African EVIM, Cape Town, South Africa, August
- Yianatos, J.B ve Bergh, L.G., 1992; "RTD Studies in an Industrial Flotation Column: Use of Radioactive Tracer Technique", Int. J. Miner. Process., Vol.36, s.81-92
- Yianatos, J.B ve Levy, A.R., 1989; "Estimation of Gas Hold-up, Diameter and Apparent Density of Mineralized Bubbles in Industrial Flotation Columns, International Colloquium", "Developments in Froth Flotation" Organized by South African MM, Cape Town, South Africa, August 3-4
- Yianatos, J.B, Finch, J.A. ve Laplante, A.R., 1986; "Holdup Profile and Bubble Size Distribution of Flotation Column Froths", Canadian Metallurgical Quarterly, 25(1), s.23-29
- Yianatos, J.B, Finch, J.A. ve Laplante, A.R., 1987; "Cleaning Action in Column Flotation Froths", Trans. JMM, 96, s.099-205
- Yianatos, J.B", Finch, J.A. ve Laplante, A.R., 1988a; "Selectivity in Column Flotation Froths", Int. J. Miner. Process., Vol.23, s.279-292
- Yianatos, J.B, Espinoza-Gomez, R., Finch, J.A., Laplante, A.R. ve Dobby, G.S., 1988b; "Effect of Column Height on Flotation Column Performance", Minerals & Metallurgical Processing, 4(1), s. 11-14
- Ynchausti, R.A., McKay, J.D. ve Foot, D.G., 1988; "Column Flotation Parameters-Their Effects", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 17, AIME, s. 157-172, NY
- Yoon, R.H., 1993; "Microbubble Flotation", Minerals Engineering, Vol.6, No.6, s.619-630
- Yoon, R.H., 1994; "Theory of Column Flotation and Its Application in Coal and Minerals Industries", İTÜ Maden Müh.Böl. Meslekte Yenilenme Semineri, 30 Mayıs-1 Haziran, İstanbul
- Young, P., 1982; "Flotation Machines", Mining Magazine, January, s.35-59
- Zipperian, D.E. ve Svensson, U., 1988; "Plant Practice of Flotaire Column Flotation Machine for Metallic and Coal Flotation", Column Flotation'88, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 7, AIME, s.43-54, NY