

FLOTASYON MODELLERİ

Flotation Models

Saruhan SAKLARA
Salih ERSAYIN^
İrfan BAYRAKTAR^**)

Anahtar Sözcükler: Flotasyon Kinetiği, Flotasyon Modelleri, Flotasyon Hız Sabiti

ÖZET

Bu çalışmada flotasyon işleminin matematiksel modellenmesinde kullanılan çeşitli yaklaşımların tanıtılması amaçlanmıştır. Mevcut modellerle ilgili genel bir sınıflandırma sunulmuş ve her bir tipteki modellerin genel özellikleri anlatılmıştır. Özellikle kinetik modellerin tarihsel gelişimi irdelenmiş ve günümüzdeki konumu değerlendirilmiştir. Bu modellerin flotasyon işlemini tanımlayan parametresi olan hız sabitinin anlamı ve işlem değişkenleri ile olan ilişkisi incelenmiştir.

ABSTRACT

In this study, the aim is to present various approaches used in mathematical modeling of the flotation process. A general classification of the existing models is made and the general structure of each type is described. The historical background of kinetic models and their present status are reviewed. The practical use of rate constant, the kinetic parameter describing the flotation process, is presented and its relationship with the main process variables is outlined.

^m Arş.G.ör., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532-Beytepe, ANKARA

^{**)} Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532-Beytepe, ANKARA

^{***)} Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532-Beytepe, ANKARA

GİRİŞ

Matematiksel modeller, işlem koşulları verildiğinde, bir prosesten elde edilecek ürün özelliklerini tahmin etmeye yarayan bir dizi eşitlik olarak tanımlanmaktadır. Varolan flotasyon modelleri, bir ucu tamamen teorik diğer ucu tamamen ampirik olan geniş bir dağılım göstermektedir. Flotasyon modellerinin başlıca kullanım alanları proses simülasyonu, tasarımı ve optimizasyonu olmakla beraber, performansın değerlendirilmesi için de modeller kullanılmaktadır. Örneğin, tane boyu fraksiyonu bazındaki flotasyon davranımının flotasyon koşullarından nasıl etkilendiğinin incelenmesinde ve böylece performansı iyileştirmek için ne gibi önlemler alınabileceğinin analizinde flotasyon modelleri kullanılabilir. Ayrıca hidrofobik tane davranımının yamsıra, flotasyonda konsantreye gelmesi arzu edilmeyen hidrofilik tanelerin davranımının incelenmesinde ve

modelin kullanım alanına göre farklılıklar göstermektedir. Huber Panu vd. (1976) iyi bir flotasyon modelinin prosesin performansını etkileyebilecek cevher, flotasyon kimyasalları, flotasyondan önceki cevher hazırlama aşamaları, flotasyon makinesinin karıştırma ve havalandırma özellikleri gibi faktörlerdeki değişiklikleri tanımlayabilmesi gerektiğini belirtmektedir. Ancak bu alandaki çalışmalar, bu nihai hedefe henüz ulaşmış görünmemektedir. Prosesin çok karmaşık fiziksel ve kimyasal mekanizmalar içermesi nedeniyle, yapılan çok detaylı çalışmalar bile bu hedefe ulaşmada ancak sınırlı bir katkı oluşturmaktadır. Son 50 yılın üzerinde en çok çalışılan konularından biri olmasına karşın, tesis simülasyonunda güvenle kullanılacak bir modelin varlığından söz etmek zordur. Büyük ölçüde prosesin karmaşıklığından kaynaklanan bu başarısızlıkta, az da olsa etkisi olduğuna inanılan bir diğer faktör de değişik araştırma gruplarının farklı modeller kullanmasıdır.

Çizelge 1. Flotasyon İşlemi İçin Değişkenlerin Sınıflandırılması (Lynch vd., 1981)

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER		BAĞIMLI DEĞİŞKENLER	
KONTROL EDİLEMEYEN DEĞİŞKENLER	KONTROL EDİLEBİLEN DEĞİŞKENLER	ARA DEĞİŞKENLER (Kaba ve süpürme devresi konsantreleri için)	PERFORMANS DEĞİŞKENLERİ (Nihai konsantre için)
Besleme tenörü	Reaktif miktarı ve eklenme noktaları	Tenor	Tenor
Mineraloji	Palp seviyesi	Verim	Verim
*Palp yoğunluğu	Hava miktarı	Pulp yoğunluğu	Palp yoğunluğu
*Hacimsel akış miktarı	Konsantre toplama noktaları	Akış miktarı	Akış miktarı

*Bu değişkenler tesis işletme koşullarına göre kontrol edilebilir değişken sınıfına girebilmektedir.

otomatik kontrole geçiş öncesi proses üzerinde etkili olan parametrelerin belirlenmesinde de flotasyon modellerinden bir araç olarak faydalanılmaktadır.

Flotasyon işlemi için kullanılan matematiksel modellerin yapısı, modeli ortaya koyan araştırmacıların konuya yaklaşımına ve

Bu çalışmada önce mevcut modellerin genel olarak tanıtılması hedeflenmiş ve önemli

proses değişkenlerinin bu model yapısı ile nasıl ilişkilendirileceği literatürde yer alan çalışmalar değerlendirilerek anlatılmıştır. Ayrıca, flotasyon modellerinin gelişimi ve günümüzdeki konumu da irdelenmiştir.

2. FLOTASYON MODELLERİ

Flotasyon model parametreleri üzerinde işlem değişkenlerinin etkisinin belirlenmesinde, bu değişkenlerden bir kısmı sabit tutulup diğer bir veya bir kaç değişkenler değiştirilerek bunların etkisi incelendiğinden flotasyon işlem değişkenlerinin sınıflandırılması gereklidir. Lynch vd. (1981) flotasyon işlemi için değişkenleri bağımlı ve bağımsız değişkenler olmak üzere iki ana gruba ayırmıştır (Çizelge i).

Bağımlı değişkenler kontrol edilen ve kontrol edilemeyen, bağımsız değişkenler ise performans ve ara değişkenleri şeklinde iki ayrı alt gruba ayrılmaktadır. Herhangi bir modelde göz önüne alınacak değişken sayısı modelin kullanımı ile ilgilidir. Flotasyon modellerinin ana hedefi işletme koşullarına bağlı olarak, bir tek hücre, bir devre veya tüm tesisden elde edilecek % verim ve/veya tenorun önceden tahminidir. Bu açıdan bakıldığında modeller üç ana kategoriye ayrılabilirler (Lynch vd.,1981; Yuan vd., 1996)

- a) Ampirik modeller
- b) Olasılık modelleri
- c) Kinetik modeller

2.1. Ampirik Modeller

Ampirik modeller, oldukça geniş bir veri tabanı oluşturma çalışmasının ardından, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kurulan istatistiksel ilişkilerle elde edilmektedir. Kullanılan istatistiksel yöntemler, çoklu veya "spline" regresyon yöntemleridir (Whiten, 1971). Ampirik modellerin avantajı diğer model tiplerine göre kolay ve kullanışlı olmalarıdır. Ancak modelin uygulanabilirliği, veri tabanının elde edildiği cevher, akım şeması ve değişkenlerin değişim aralığı ile sınırlı kalmakta, bu da doğal olarak kullanım alanlarını daraltmaktadır. Özellikle otomatik kontrole geçiş öncesi bu tür

modellerin oluşturulması, optimum performansa ulaşmak için değeri sabit tutulacak ve otomatik olarak değiştirilecek değişkenlerin seçiminde faydalı olmaktadır. Bu tip bir modelin oluşturulmasında kullanılacak yöntemlerden biri Hollaway(1986) tarafından verilmiştir. Bu yöntemin bir uygulamasını Eşiyok ve Demirci (1988) Ergani bakır flotasyon tesisi için yapmıştır. Ampirik modellerle ilgili daha detaylı bilgiler Mular (1972) tarafından verilmektedir.

2.2. Olasılık Modelleri

Bu modellerde, flotasyon işleminde değerli minerallerin konsantreye gelene kadar karşılaştıkları olayların basan olasılıklarının flotasyon hızını (tanelerin köpük zonuna taşınmalarının zamanla değişimini) belirleyici bir faktör olduğu esas alınmaktadır. Ek (1991) bir tanenin konsantreye ulaşip ulaşmayacağını belirleyen olasılıkları aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır.

1. Mineral taneleri üzerine toplayıcının soğurum olasılığı,
2. .Toplayıcı ile kaplanan mineral tanelerinin hücrenin türbülanslı zonuna girme olasılıkları,
3. Bu akış ortamında mineral taneleri ve hava kabarcıklarının çarpışma olasılıkları,
4. Mineralin hava kabarcığına tutunma olasılığı,
5. Mineral-hava kabarcığı ikilisinin köpük fazına gitme olasılığı ve
6. Değerli mineralin köpükten alınabilme olasılığı.

Yukarıdaki olasılıkları, flotasyon hızının modellenmesinde kullanarak bu konuda öncülük eden Schuhmann (1942), flotasyon hücresindeki x boylu mineral tanelerinin toplam kazanım hızını, bu tanelerin konsantreye ulaşmadan önce flotasyon hücresinde karşılaşılabilecekleri olaylar serisindeki basan olasılığı (P_x) ile

ilişkilendirmiş ve aşağıdaki Eşitlik l'i geliştirmiştir.

$$P_x = P_c - P_a F[x]V \quad (D)$$

Burada;

P_c: Tane kabarcık çarpışma olasılığı

P_a: Tanenin kabarcığa tutunma olasılığı

F: Köpük duraylılık faktörü

V: Hücredeki palp hacmi

[x]: Palp içindeki x boylu tanelerin derişimi (kütle/hacim)

Tomlinson ve Fleming (1963), Eşitlik l'i geliştirerek aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$P = P_c P_a P_e P_f \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

P_e : Tanenin köpük fazının sınılanması sırasında konsantreye geçme olasılığı

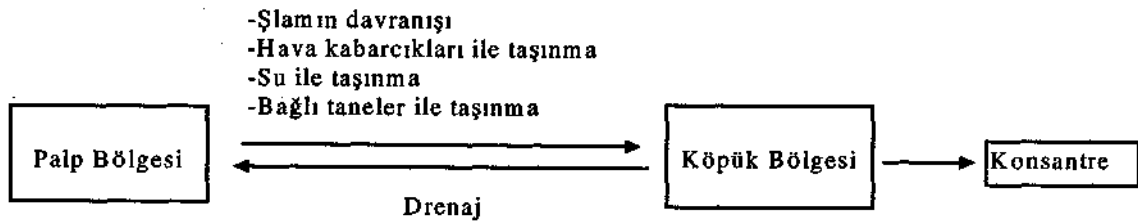
P_f : Kabarcığa yapışan tanenin hücre yüzeyindeki köpük zonuna taşınma olasılığı

Bu yaklaşım daha sonra birçok araştırmacı tarafından farklı boyutlardaki mineral tanelerin flotasyon hızları ve verimlerinin tane boyu ile değişiminin kuramsal olarak açıklanmasında kullanılmıştır. Örneğin -20 um gibi ince tanelerde flotasyon veriminin azalması, P_c ve P_a'nın düşük değerlere sahip olması ile açıklanmaktadır (Trahar, 1981; Lynch vd., 1981). Ancak bu modele dayanarak verim, tenor ve bunların zamanla değişimi üzerine

yorum yapabilmek için, flotasyon gibi fiziko-kimyasal bir işlemde gaz-katı-sıvı fazlarla ilgili bütün olayların ilgili parametrelerle tanımlanması gerekli olmaktadır. Bu ilişkilerin hesaplanması için geliştirilen eşitlikler ise ölçülmesi zor parametreler içermektedirler. Bu nedenlerden ötürü bu model, daha çok flotasyon işleminin kuramsal olarak anlaşılmasında veya sonuçların yorumlanmasında bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle teorik model olarak tanımlanmaktadır.

2.3. Kinetik Modeller

Kinetik model kimyasal reaksiyon kinetiği ile flotasyon mekanizması arasındaki benzerliğe dayanılarak geliştirilmiştir. Flotasyon hızının kimyasal reaksiyon hızı ile boyutsal olarak aynı olduğu düşünülmüştür. Başka bir deyişle molekül veya atomların çarpışmaları ile palp içindeki hidrofob taneler ile hava kabarcıklarının çarpışmaları arasındaki benzerlik esas alınmıştır. Ancak flotasyon prosesi bir taşınma işlemi ve fiziksel bir katı/katı ayırmadır. Tek bir mekanizmadan oluşan kimyasal bir reaksiyon değildir. Bu taşıma mekanizması içinde taneler köpük fazına gelip, buradan palpa geri dönebilir veya köpük fazından ayrılarak konsantreye geçebilirler. Bu durum Şekil l'de gösterilmiştir. Dolayısıyla flotasyon kinetiğine esas teşkil eden modeller, palptan köpüğe, köpükten palpa ve köpükten konsantreye



Şekil 1. Flotasyon hücresinde malzemenin palp ve köpük bölgeleri arasındaki transferi (Lynch vd., 1981)

malzeme transferini esas alan yaklaşımlarla şekillenmektedir.

Genel olarak flotasyon kinetiği kavramı, palptan köpüğe malzeme transferi yaklaşımı için kullanılmaktadır. Ancak bunun ölçülmesi oldukça zor olduğundan model parametrelerinin hesaplanması, doğrudan palptan konsantreye gelme hızına karşılık gelen verim-zaman verileri kullanılarak yapılmaktadır. Kinetik amaçlı bir flotasyon deneyinde, belirli zaman aralıklarında köpük sıyınarak toplanan konsantrelerin değerli mineral içerikleri tesbit edilmektedir. Böylece her bir zaman aralığı için verim ve kümülatif verim değerleri elde edilmektedir. Bu verilerden, doğrusal olmayan regresyon yöntemlerinden biri kullanılarak, kullanılan modelin parametreleri belirlenmektedir.

Son yıllarda flotasyon kinetiği, su kazanımı kullanılarak da modellenmektedir (Gülsoy ve Ersaym, 1996). Bu yaklaşıma göre flotasyon hızının belirlenmesinde kullanılabilir güvenilir parametrelerden birisi, konsantreye belli zaman aralıklarında hidrofob katı taneleri ile birlikte gelen su miktarıdır. Bu yöntemde, su kazanımı kullanılarak flotasyon zamanı düzeltilmesi de yapılabileceği önerilmektedir.

Kinetik modellerde işlem değişkenleri model parametreleri ile ilişkilendirilmekte, böylece tesis ölçekli simülasyon için gerekli yapının oluşturulması amaçlanmaktadır. Hem araştırma ve hem de simülasyona yönelik olarak bu tür modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Çıkış noktalarının kimyasal reaksiyon ile flotasyon arasındaki benzerliğe dayanmasına karşın, bu tür modellerin matematiksel yapısı özellikle laboratuvar ölçekli flotasyonun tanımlanmasında çeşitlilik göstermektedir (Fichera ve Chudacek, 1992).

Laboratuvar ve tesis ölçekli flotasyon işlemlerinin modellenmesinde kullanılan

eşitlikler, sistemlerden birinin yarı kesikli, diğerinin ise sürekli olması nedeniyle farklıdır. Belli bir ağırlıktaki besleme malzemesinin flotasyon hücresine konulup, yüzdürüldüğü laboratuvar flotasyon deneyi, konsantre akışının sürekli olmasına karşın, sürekli bir besleme olmaması nedeniyle yarı kesikli olarak tanımlanmaktadır. Fakat tesiste bütün akışlar sürekli ve sürekli proses olarak tanımlanmaktadır.

2.3.1. Yarı Kesikli Flotasyon İşleminin Tanımlanmasında Kullanılan Kinetik Modeller

Flotasyonun önemli kimyasal mekanizmaları da içeren kompleks bir proses olmasına karşın bir hız prosesi olarak tanımlanması nedeniyle, palptan konsantreye transferin en basit ve temel hız belirleyici adım olduğu kabul edilmektedir. Bu şekilde, hız belirleyici olabilecek kimyasal ve fiziksel mekanizmaların tümü, konsantrede toplanan mineral tanelerinin hızlarının bunların palp içerisindeki derişimleriyle orantılı olduğu düşünülerek tek bir adımda toplanmıştır. Bu düşünceden yola çıkarak ilk olarak Garcia (1935) yarı kesikli flotasyon işlemi için aşağıdaki Eşitlik 3'ü önermiştir (Harris ve Chakravarti, 1970).

$$C = \exp(-kt) \quad (3)$$

k : Flotasyon hız sabiti

c : Palpta benzer flotasyon özelliğine sahip tanelerin konsantrasyonu

t : Zaman

Bu eşitlik, özellikle Hallimond tüpünde, tümüyle yüzebilir ve tek boyut aralığında mineral kullanılarak yapılan flotasyon testlerinden elde edilen verim-zaman verilerine kabul edilebilir bir uyum vermiştir. Fakat daha karmaşık olan sistemlerden elde edilen verilere uymaması, flotasyon işleminin birinci dereceden kinetik bir eşitlikle

tanımlanamayacağı tartışmaların gündeme getirmiştir. Bu tartışmalardan yola çıkarak Arbiter ve Harris (1962), Eşitlik 3'te verilen modeli kimyasal kinetikle benzeterek, Eşitlik 4'teki hız eşitliğinin bilinen genel şeklini önermişlerdir.

$$\frac{-dC}{dt} = k_n \cdot C^n \quad (4)$$

Bu eşitlikteki flotasyon hız sabiti (k), aslında karmaşık bir fonksiyon olup, reaktif konsantrasyonu, tane ve kabarcık boyutu, indüksiyon zamanları (tane-kabarcık çarpışmasından sonra, tane ve kabarcık arasındaki ince su filminin bozulup temasın sağlanabilmesi için gerekli olan zaman), flotasyon hücre tasarımı, köpük akış hızı, palpa verilen enerji vb. parametreleri içerir. Ancak kontrollü bir deney sisteminde bütün bu değişkenler sabit tutulup, - sadece konsantrasyonun zamanla değişim hızı saptanabilir. Bu durumda, palp içindeki benzer flotasyon özelliğine sahip tanelerin ilk derişimi Co kabul edilirse, n=1 için Eşitlik 4 'ün integral! aşağıdaki gibi olacaktır:

$$C = Co \exp(-fct) \quad (5)$$

Eşitlik 4'te yer alan "n", kuramsal olarak kimyasal reaksiyonun derecesi (tamsayı) olarak tanımlanmaktadır. Fakat, flotasyon kinetiği açısından anlamı farklıdır. Bu yaklaşıma göre verim-zaman eğrisine olan uyuma bağlı olarak n değeri, dolayısıyla kinetik işlemin derecesi belirlenmektedir.

Zaman içinde flotasyon kinetiğinin derecesi (n) ile ilgili tartışmalar ortadan kalkmış ve flotasyon işleminin birinci dereceden bir kinetik eşitlikle tanımlanabileceği genel kabul görmüştür. Deneysel verilere olan uyumsuzluk ise bütün hidrofobik tanelerin eşdeğer flotasyon özelliklerine sahip olmaması ile açıklanmıştır. Bu nedenle palp içerisindeki bütün tanelerin benzer yüzebilirlik

özelliklerinde olamayacakları ve sürekli bir hız sabiti dağılım aralığına sahip oldukları düşünülmüş ve kesikli çalışan sistemler için Eşitlik 5, aşağıdaki Eşitlik 6 olarak düzenlenmiştir.

$$C = Co \cdot \int_0^{\infty} \exp(-fct) f(k,0) \cdot dk \quad (6)$$

Burada, f(k,0) flotasyon başlangıcındaki (sıfır anı) hız sabiti dağılımını tanımlayan fonksiyondur. Bu uzlaşılan ortak nokta bile farklı model yapılarının ortaya çıkmasına engel olamamıştır.

Bu farklılıklar, f(k,0) fonksiyonun tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla yukarıdaki eşitliğin getirdiği ana tartışma, hız sabiti dağılımlarını doğru bir şekilde tanımlayacak yapının geliştirilmesi olmuştur. Bu modellerin gelişim süreci içinde göz önüne alınan bir diğer nokta da hız sabiti dağılımlarının hem geniş bir boyut aralığındaki besleme malzemesinin ve hemde besleme içinde yer alan boyut fraksiyonlarının flotasyon davranımını tanımlayabilir olmalarıdır.

Flotasyon modellerinde hız sabiti, modelin yapısı ve oluşum felsefesine göre kesikli veya sürekli dağılımla tanımlanabilmektedir. Kesikli hız sabiti dağılımlarında, kullanılan modele göre iki veya daha fazla sayıda farklı anlamlar içeren hız sabitleri hesaplanmaktadır. Kesikli dağılıma, aşağıda Eşitlik 7'de verilen model örnek olarak verilebilir. Kelsall (1961), beslemede bulunabilecek farklı grupların varlığını göz önüne alarak flotasyon palpına beslenen cevher içerisindeki yüzebilir türlerin, hızlı ve yavaş yüzen gruplar olmak üzere ikiye ayrılmasının yeterli olacağını göstermiştir. Bu düşünceden yola çıkılarak uygulamada geniş kullanım alanı bulan Eşitlik 7 geliştirilmiştir.

$$C = Co \cdot [\exp(-fct) + (1 - 0) \cdot \exp(-Jct)] \quad (7)$$

k_s, k_f Sırasıyla yavaş ve hızlı yüzen hidrofob tanelerin flotasyon hız sabitleri
 $\langle j \rangle$: Yavaş yüzen hidrofob tanelerin beslemedeki yüzdesi

Sürekli hız sabiti dağılımlarında ise, flotasyon hızı, bir ya da birkaç parametre içeren sürekli bir fonksiyonla tanımlanmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kabul gören örneği, yüzebilir türlerin hız sabiti dağılımlarını dikdörtgensel (rectangular) olarak tanımlayan modeldir. Dikdörtgen dağılım, tek parametre ile (k) tanımlanmakta, bu fonksiyon Eşitlik 6'da yerine konulup integrali alındığında, Eşitlik 8 elde edilmektedir. Dikdörtgen dağılım ilk olarak Harris ve Chakravarti (1970) tarafından tanımlanmış, model ise Huber Panu vd. (1976) ve Klimpel (1980) ile adını duyurmuştur.

$$C = C_0 \cdot JJ(1 - \exp(-fc \cdot t)) \quad (8)$$

Dowling vd. (1985) bu modeli klasik birinci derece kinetik eşitlikle (Eşitlik 5) karşılaştırmıştır. Dikdörtgen dağılım modelinin hız sabitinin ulaşabileceği en büyük değeri almasını sağladığı ve modelin farklı cevher veya sistemlerde kullanılması durumunda esneklik gösterebildiği sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde sonuçlara Yuan vd. (1996) de varmış ve bu modelin özellikle sülfürlü cevherler için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Literatürde yer alan diğer kesikli ve sürekli dağılım modelleri geniş olarak Lynch vd. (1981); Dowling vd. (1985) ve Ek (1991) tarafından verilmiştir.

Bu modellerde yer alan konsantrasyon (C), flotasyon palpmındaki benzer yüzebilirlik özelliklerine sahip minerallerin konsantrasyonu şeklinde tanımlanmakla birlikte bu konuda tam netlik kazanmayan görüşler söz konusudur. Bu düşünce ayrılıkları hız sabitinin hesaplanmasında bir dizi probleme neden olabilmektedir. En genel şekliyle konsantrasyon Eşitlik 9'da belirtildiği gibi, birim hacme (V) düşen ağırlıktır (M).

$$C = \frac{M}{V} \quad (9)$$

Ancak M'in palptaki toplam katının veya sadece yüzebilir minerallerin ağırlığı, V'nin ise palpm, içindeki havayı içeren, içermeyen veya sadece suyun hacmi olarak alınmasında tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Bu nedenle modelin pratik kullanımını da kolaylaştırabilmek için konsantrasyonun yerine eşitliklerin verim cinsinden yazılabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla 0 indisi değişkenin ilk değerini, ∞ indisi flotasyonun sonsuz zaman sonunda ulaşacağı değeri gösterdiği kabul edildiğinde aşağıdaki 10 ve 11 eşitlikleri elde edilmektedir.

$$R = \frac{M_0 - M}{M_0} = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (10)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{M_0 - M}{M_0} \sim \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (11)$$

M sadece yüzebilir (hidrofob) mineralin ağırlığı olarak kabul edilirse $M_0 = C = 0$ ve $R_0 = 1$ olacaktır. Fakat pratikte sonsuz flotasyon zamanı sonunda bile artıka kalabilen değerli mineralin konsantrasyonu bu tanıma göre C_0 olduğu için gerçek veya düzeltilmiş konsantrasyon $C - C^*$ dur. Bu düşünce göz önüne alınıp, $C - C_0$ ifadesi verim cinsinden yazılarak Eşitlik 4'te C yerine konulmuş ve Eşitlik 12 şeklinde yeniden düzenlenmiştir.

$$dR = k C_0^n (R_0 - R) \quad (12)$$

Sıfır zaman için verimin de sıfır olduğu kabul edilip, $n=1$ için integral alınmasıyla Eşitlik 13'de verilen klasik birinci derece kinetik eşitlik elde edilmektedir.

$$R = R_0(1 - \exp(-k C_0 t)) \quad (13)$$

Dowling vd.(1985), C_0 ve C yerine R ve R_0 kullanılarak formüllenen kinetik eşitlikleri ayrıntılı olarak sunmuştur.

Kesikli laboratuvar deney sonuçlarının değerlendirilmesinde genellikle Eşitlik 7 (kesikli dağılım) veya Eşitlik 8 ile (sürekli dağılım) tanımlanan modellerden birisi kullanılmaktadır. Uygun hız sabiti dağılımının seçiminde (sürekli - veya kesikli dağılım) minimum sayıda parametre içeren dağılımlar önerilmektedir (Apling ve Ersayın, 1986). Verim-zaman verilerinin kullanılacak modele iyi bir uyum göstermesinin yamsıra, seçilen model parametrelerinin deneysel hatalara hassas olmamasının da model seçiminde önemli bir etken olduğu belirtilmektedir (Mazumdar, 1994). Modeldeki parametre sayısı arttıkça deneysel verilere daha iyi bir uyumun sağlanması beklenmekte ancak bu durumda model parametrelerinin hesaplanması, fiziksel ve kimyasal koşullarla ilişkilendirilmeleri zorlaşmaktadır. Uygun modelin seçiminden sonra kontrol edilebilen değişkenlerin etkisi deneysel olarak bulunarak, sonuçlar model parametrelerindeki değişim ile açıklanabilmektedir. Ancak kullanılan modelin ve parametrelerin hesaplanmasında kullanılan yöntemin, yapılan her flotasyon testi için tatmin edici bir uyum sağlaması gerekmektedir.

2.3.2. Sürekli Flotasyon İşleminde Kullanılan Kinetik Modeller

Buraya kadar değinilen flotasyon modelleri endüstriyel ölçekli,, sürekli çalışan flotasyon hücreleri için mineral tanelerinin yüzebilirliklerinin ifadesi için uygun değildir. Bu bakış açısına göre flotasyon işleminin modellenmesinde mineral tanelerinin flotasyon hücresi içerisinde kalış zamanlarının dağılımının ve bunun sonucu olarak da palp içindeki akış koşulları veya kanştırma sisteminin göz önüne alınmasının gerektiği vurgulanmaktadır (Lynch vd., 1981). Başka bir deyişle modelin şeklini belirleyen fonksiyon, sistemde alıkonma zamanının dağılımı, dolayısıyla kanştırma sisteminin tanımıdır. Genel olarak sürekli çalışan hücrelerde

kanşma işlemi için iki farklı koşul önerilmektedir. Birinci koşulda hücreyi artıkta terk eden tüm tanelerin hücrede kalma sürelerinin eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu durum farklı zamanda flotasyon hücresine girmiş fakat aynı anda flotasyon hücresinde bulunan tanelerin birbirleriyle kanşmayacakları ve bir pistonla itiliyormuş gibi hücre içinde aynı yolu takip edip, hücreyi terk edecekleri anlamına gelmektedir. Bu tip akış koşulu tapalı akış (plug flow) olarak tanımlanmaktadır. Bu koşulda yan kesikli sistemlerdekine benzer bir durum oluşmaktadır. Diğer akış koşulu ise farklı zamanlarda flotasyon hücresine girmiş tüm tanelerin hücreyi artıkta terk etme olasılıklarının eşit olduğu varsayımına dayanan mükemmel kanştırma (perfect mixing) yaklaşımıdır. Mükemmel kanştırmada aynı anda flotasyon hücresine giren tanelerin flotasyon hücresinde kalma süreleri birbirinden farklı olup, ortalama kalış süresine bağlı bir eksponansiyel dağılım ile tanımlanmaktadır. Bu kalma süresi dağılımı eşitliği kullanıldığında, sürekli çalışan bir flotasyon hücresi için aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$R = \frac{K \cdot T}{1 + K \cdot T}$$

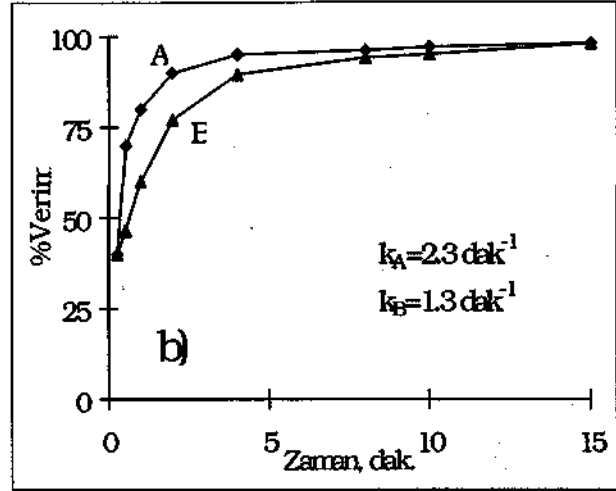
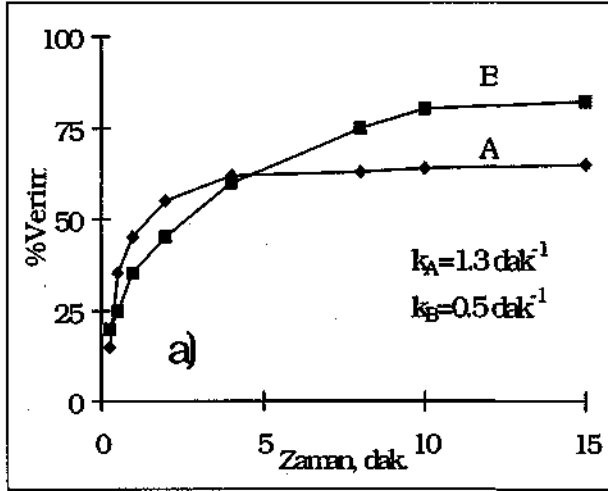
K: Hız sabiti (1/zaman)

T : Palpm hücrede alıkonma zamanı

Deneysel çalışmalar endüstriyel ölçekli flotasyon hücresinin büyük bir kısmının mükemmel kanştırmalı geri kalan kısmının ise tapalı akış olarak tanımlanmasının daha gerçekçi olacağını göstermiştir. Bu nedenle hücrenin içerisinde mükemmel kanştırmam olduğu ve olmadığı kısımlar için alıkonma zamanları da farklıdır. Dolayısıyla bu durumlar göz önüne alındığında kullanılacak model ve hesap edilecek verim değerleri de farklı olmaktadır. Ancak laboratuvar ölçekli flotasyon kinetiği çalışmalarında kullanılan

modeller, Bölüm 2.3.l'de özetlenen kinetik modellerdir. Tesis ölçekli simülasyon çalışmalarında ise flotasyon hücresinde büyük ölçüde mükemmel karıştırma olduğundan Eşitlik 14 ile tanımlanan kinetik modeller kullanılmaktadır.

olabilmektedir. Böylesine bir durum Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil-2a göz önüne alındığında, iki farklı koşulu karşılaştırmak için belirli bir süre sonundaki verim değerlerinin kullanılacağını varsayarsak seçilecek flotasyon süresine bağlı olarak üç farklı sonucun ortaya



Şekil 2. Farklı verim-zaman eğrileri için flotasyon hızının değerlendirilmesi

3. FLOTASYONDA FİZİK SABİTİNİN ANLAM VE ÖNEMİ

Endüstriyel veya laboratuvar ölçekli uygulamalarda kullanılan farklı kinetik modellerin en önemli parametresi hız sabitidir. Genellikle mineral tanelerinin yüzebilirliklerinin veya hidrofobluklarının tane boyu ile değişiminin anlaşılmasında kullanılan parametre verim olmakla birlikte (Trahar, 1981; Senior vd., 1994) doğrudan flotasyon hızı da bu amaçla kullanılabilir (Suwanasing ve Salman, 1970; Mehrotra ve Padnamabhan, 1990). Aslında flotasyon modelleri düşünüldüğünde, herhangi bir proses için nihai verim ve flotasyon hızının birlikte ele alınmasının gerektiği söylenebilir.

Seçilen bir cevherin iki farklı koşuldaki flotasyon performansını karşılaştırmak için, sadece belli bir flotasyon süresi sonunda elde edilen verim değerlerinin kullanılması yanıltıcı

çıkması söz konusudur. İki eğrinin birbirini kestiği noktaya karşılık gelen zaman flotasyon süresi olarak seçildiğinde, iki koşul arasında farkın olmadığı sonucu elde edilirken, bundan daha kısa flotasyon sürelerinde A koşulu, daha uzun flotasyon sürelerinde ise B koşulu "daha yüksek verim vermektedir" sonucu elde edilecektir. Nihai verimlerin aynı fakat hız sabitlerinin farklı olduğu bir başka durum ise Şekil-2b'de görülmektedir. Burada ise sadece nihai verimin baz alınıp, iki koşulun birine eşdeğer sayılması özellikle tesis tasarımı açısından yanıltıcıdır. A koşulunda 5 dakikalık flotasyon süresi yeterli iken, B koşulu için flotasyon süresi 10 dakikaya çıkmaktadır. Bu da iki misli büyüklükte flotasyon hücresi hacmine karşılık gelmektedir.

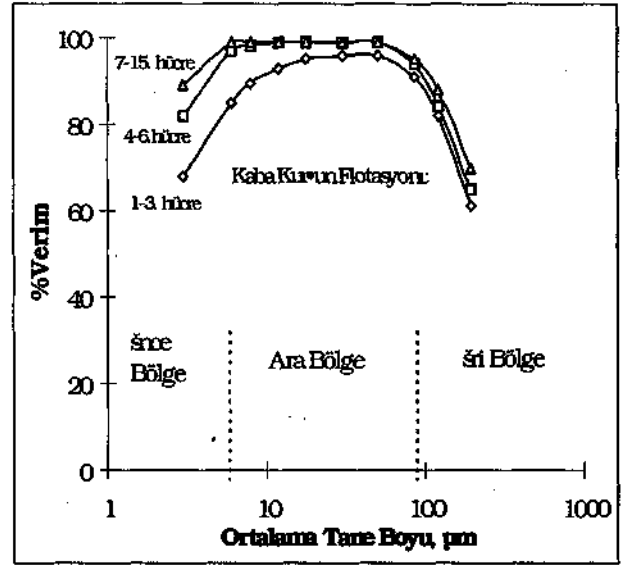
Dolayısıyla bir flotasyon işleminde, yüzebilirlik veya hidrofobluk üzerine yorum yapabilmek için hız ve verim değişiminin birlikte ele alınması gerektir.

4. VERİM TANE BOYU İLİŞKİSİ

Tane boyu ile verim arasındaki ilişki ilk olarak Gaudin vd. (1931) tarafından farklı konsantratörlerin performanslarını karşılaştırmak amacıyla araştırılmıştır (Trahar ve Warren, 1976). Benzer çalışmalar Lynch vd. (1981); Trahar (1981) ve Senior vd. (1994) tarafından sürdürülmüştür. Bu çalışmalarda farklı tane boylarının flotasyon davranımlarının tanımlanmasında, dar tane boyut fraksiyonlarına karşılık gelen ortalama tane boylan ile bunların verimleri kullanılmaktadır. Verim-ortalama tane boyu eğrisinin karakteristik bir şeklinin olduğu (Şekil 3) belirtilmektedir. Bu eğrilerde tane boyu aralıkları, tane boylarının ulaştıkları verim değerlerine göre ince, orta ve iri tane bölgesi şeklinde üç genel kısma ayrılmaktadır. İnce tane bölgesi 5-10 um boyutlu ve düşük verimli, ara bölge 10-100 um arasındaki maksimum verimli, iri bölge 100 um'dan daha iri ve daha düşük verim değerlerine ulaşabilen taneleri içermektedir.

Ancak farklı minerallerin ulaşabilecekleri maksimum verimin sınırları, flotasyon sistemi ve cevher özelliklerinin değişebilmesinden dolayı aynı tane boyu aralığına girmemektedir. Bu durum aynı mineral için bile geçerli olabilir. Örneğin Trahar ve Warren (1976), pirit için maksimum verim aralığını 20-150 um olarak tanımlarken, hnaizumi ve fcıoue (1963) 30-150 uni, Morris (1952) ise 20-180 um olarak belirtmişlerdir.

Tane boyu ile minerallerin kazanımı arasındaki ilişki, mineral tanelerinin kabarcıklara tutunarak köpük fazına yükselmesi ile konsantreye gitme ve su ile taşınarak konsantreye gitme şeklinde iki ana mekanizmaya dayandırılmaktadır (Trahar ve Warren, 1976; Trahar, 1981). Mineralin hidrofob veya hidrofil olması da bu mekanizmalarda etkili olmakta ve hidrofob minerallerin orta ve iri boylu tanelerinin



Şekil 3. Galenitin kaba flotasyonunda verimin ortalama tane boyu ile değişimi (Trahar, 1981)

kazanımı birinci mekanizmayla açıklanırken, hidrofıl mineraller ve bazı durumlarda hidrofoblann inceleri için su ile taşınmada, kazanım mekanizması olarak gösterilmektedir.

5. HIZ SABİTİ VE TANE BOYU İLİŞKİSİ

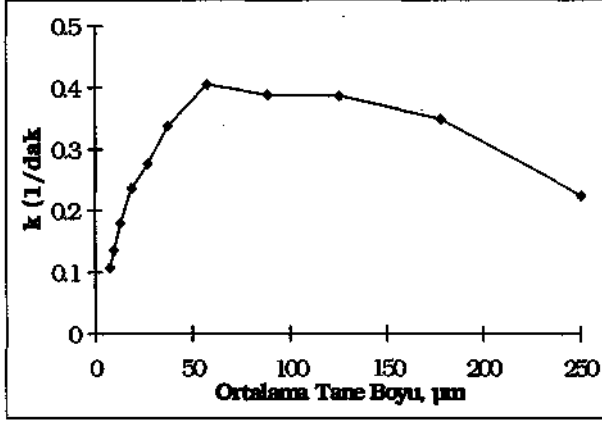
Flotasyon sistemleri için verimin tane boyu ile değişimi, flotasyon hız sabiti değişimi ile paralel olarak düşünülebilir. Genel olarak yüksek verimle kazanılan orta boylu tanelerin hızlı yüzdüğü, düşük verimle kazanılan ince ve iri tanelerin yavaş yüzdüğü gözlenmektedir.

Morris (1952)'in kaba flotasyon devresinden temin ettiği pirit numunesini kullanarak yaptığı kesikli flotasyon deneyleri ile elde ettiği hız sabiti değişimi Şekil 4'te verilmektedir.

Flotasyon hız sabiti, maksimum değerini orta ve iri tane bölgesine yakın aralıklarda almakta ve ince tanelerde keskin bir düşüş eğilimi görülmektedir. Hız sabitinin tane boyu ile birlikte bu şekilde değişimi farklı araştırmacılar tarafından da elde edilmiştir

(Suwanasing ve Salman, 1970; Ersaym, 1986; Gülsoy, 1995; Saklar 1997).

Flotasyon hızı-ortalama tane boyu eğrisi de, verim-tane boyu eğrisi gibi flotasyon sistemi ve cevhere bağlı olarak aynı mineral için değişiklikler gösterebilmektedir.



Şekil 4. Pirit için flotasyon hız sabitinin ortalama tane boyu ile değişimi, (Morris, 1952)

Ulaşılan maksimum hızın altındaki tane boylarında, flotasyon hızı ve tane boyu arasında Tomlinson ve Fleming (1963) birinci derece kinetik eşitliği kullanarak hesaplanan hız sabiti için Eşitlik 15'i önermişlerdir.

$$k = q \cdot d^n \quad (15)$$

d : Tane çapı

k : Flotasyon hız sabiti

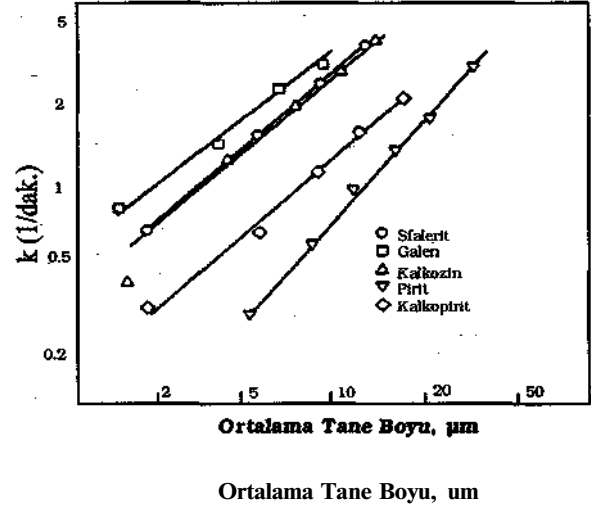
q: Minerale özgü sabit

n: 20-200 um tane boyu aralığı için minerale göre 1-2 arasında değişen bir sayı

Cameron vd. (1971), gerçek flotasyon sistemleri için hız sabitinin Eşitlik 15'deki gibi boyutla birlikte bu kadar hızlı düşmeyeceğini belirtmiştir. Fakat kesikli flotasyon deneyleri ile yapılan son çalışmalar (Trahar, 1981), tane boyu ile hız sabiti arasında doğrusala yakın bir

ilişkinin varlığını, Tomlinson ve Fleming'in eşitliğini $k \ll d^n$ şeklinde genelleştirerek kabul etmektedir (Şekil 5).

Bunun dışında endüstriyel flotasyon işleminin modellenmesinde hız sabiti ve tane boyunu ilişkilendiren eşitlikler de bulunmaktadır (King, 1973; Sutherland, 1977). Bu eşitlikler simülasyon paketlerinde hız sabiti ve tane boyu tahmini için kullanılmaktadır.



Şekil 5. Maksimum hızın altındaki ince tane boyları için hız sabitinin ortalama tane boyu ile değişimi (Trahar, 1981)

6. FLOTASYON KİNETİĞİNİ ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER

Bir flotasyon sistemi için prosesin kinetiğini etkileyebilecek değişkenler, yüzdürülen mineralin cinsinden, palp pH'sına ve hatta kullanılan flotasyon makinasının tipine kadar geniş bir kapsam içine alınabileceği gibi, genel olarak bu değişkenler verilen basit bir sistem için toplayıcı dozajı, köpürtücü dozajı, hava miktarı, palp yoğunluğu ve kabarcık boyutu olarak sıralanabilir.

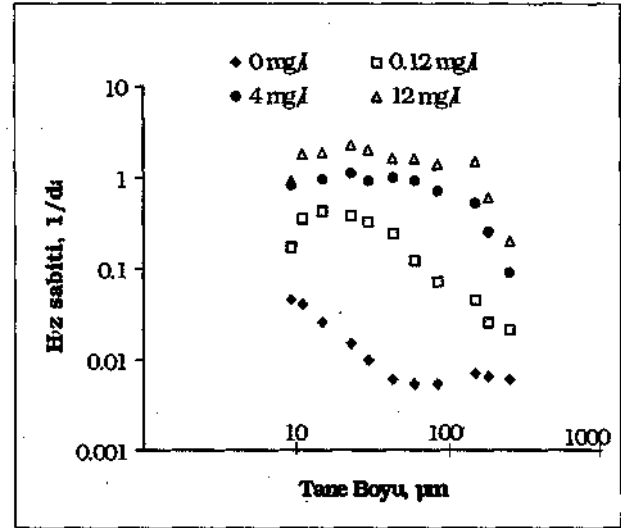
6.1. Toplayıcının Etkisi

Palptaki toplayıcı konsantrasyonunun, mineral yüzeyinde kabarcıkla maksimum temas açısını

oluşturabilmesi için gerekli olan zamanı belirlediği bilinmektedir (Lynch vd., 1981). Toplayıcı konsantrasyonu arttıkça bu işlem daha hızlı olmakta ve maksimum temas açısının kurulması daha kısa bir zaman aralığında gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarakta flotasyon hızı artmaktadır. Fakat hızdaki bu artış, ince tanelere oranla, iri tanelerde daha etkili bir şekilde görülmektedir. Özellikle toplayıcı dozajındaki artışın -10 um gibi çok ince fraksiyonlarda fazla bir etkisi olmamaktadır. Farklı mineraller için yapılan pekçok kesikli laboratuvar deneyinde bu durumu doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir (Imaizumi ve ftoue, 1963; Suwanasing ve Salman, 1970; Mehrotra ve Padmanabhan, 1990; Senior vd., 1994), (Şekil 6).

Endüstriyel olarak da özellikle sülfürlü cevher flotasyonu tesislerinde ana kontrol değişkenlerinden birisi de kaba flotasyon devresine toplayıcı besleme miktarıdır. Broken Hill konsantratöründe yapılan çalışmalarda, toplayıcı dozajının artırılması ile kurşun ve bakır flotasyonunda yüksek verim değerlerine daha kısa zaman aralıklarında ulaşıldığı bulunmuştur. Özellikle artan toplayıcı dozajının +150 um'luk galen tanelerinin flotasyon hızı üzerindeki etkisi, 150 um'un altındaki fraksiyonlara göre çok daha fazla olmaktadır (Lynch vd., 1981).

Kullanılan toplayıcı miktarının hız ve verim üzerindeki etkisi bir noktadan sonra ters yönde olabilmektedir. Plaskin vd., (1957) sisteme sürekli toplayıcı ilavesi sonucunda tane yüzeyinin tek bir tabaka yerine birden fazla toplayıcı tabakası ile kaplanabileceğini, böylece toplayıcı molekülünün polar olmayan kısmının çözeltiliye doğru yönlenebilmesi nedeniyle tanenin hidrofobluğunun azalabileceğini belirtmiştir. Buna alternatif olarak yüksek toplayıcı dozajlanın, köpükteki kabarcıkların birleşme olasılıklarını artırması ve hava kabarcıklarına tutunmuş mineral tanelerinin palpa geri dönmesi ile flotasyon



Şekil 6. Kuvars için flotasyon hızının artan toplayıcı dozajlarında tane boyu ile değişimi (Imaizumi ve Inoue, 1963)

hızının düşmesi şeklinde açıklamalar da yapılmaktadır. Bu nedenlerle toplayıcı dozajının hız ve verim için optimum bir değerinin olduğu kabul edilmiştir.

6.2* Köpürtücünün Etkisi

Flotasyonda köpürtücünün fonksiyonu, sıvı-gaz ara yüzeyine yerleşerek yüzey gerilimini düşürmesi sayesinde sürekli ve duraylı bir köpük tabakası oluşturmaktır. Ayrıca palpta heterojen bir boyut dağılımına sahip olan hava kabarcıklarının, daha küçük çaplı ve homojen bir yapıya sahip olmalarına da neden olmaktadır (Laplante vd., 1983). Düşük köpürtücü dozajlarında, köpük tabakası kolay bir şekilde bozulur, köpükteki minerallerin konsantreye alınmaları zorlaşır ve palpa geri dönmeye başlarlar.

Köpürtücü dozajının flotasyon hızı üzerindeki etkisi, toplayıcıda olduğu gibi artan dozajla birlikte, flotasyon hızının artışı ve optimum bir dozajdan sonra düşmesi şeklindedir (Mehrotra ve Padmanabhan, 1990). Kullanılan köpürtücünün türü de flotasyon hızını

etkilemektedir. Hoşten ve Tezcan (1990), üç farklı köpürtücü türü ile bakır cevheri flotasyonunda kinetik değişimini araştırmıştır. Köpürtücü türünün ayırım verimi üzerinde önemli bir etkinliğinin olmamasına karşın, flotasyon hızının köpürtücü türünden etkilendiği bulunmuştur.

Leja ve Schulman (1954) köpürtücü dozaj ındaki değişimin temas açısının derecesini etkilemediği bulgusunu göz önüne alarak, flotasyon hızındaki artışı, tane etrafındaki sıvı filminin kalınlığının azalması sonucunda tanelerin kabarcıklarla tutunma olasılıklarının artması ile açıklamıştır. Köpürtücü olarak çamyacı (a-terpineol) kullanarak bakır cevheri flotasyonu için artan köpürtücü dozajının etkisini araştıran Lekki ve Laskowski (1971), flotasyon hızındaki artışın nedenlerini farklı açılardan incelemiştir. Bu çalışmada artan köpürtücü dozaj ıyla, indüksiyon zamanının ve tane yüzeyindeki sıvı filminin kalınlığının azaldığı ayrıca mineral yüzeyine soğrulan toplayıcı miktarının arttığı bulunmuştur.

Artan köpürtücü dozaj mm flotasyon hızını artırması ile ilgili olarak yukarıda yapılan açıklamalara, köpürtücünün duraylılık ve homojen kabarcık boyut dağılımını sağlaması gibi fonksiyonları da eklenebilir. Çünkü, artan köpürtücü dozaj ıyla (optimum bir noktaya kadar) bu fonksiyonlar daha kolay çalışacak ve daha duraylı, homojen bir köpük oluşacaktır. Bu şekilde, tanelerin palptan köpük fazına transferlerinin daha kolay sağlandığı ve köpükteki tanelerin palpa geri dönme olasılıklarının azaldığı düşünülürse, doğal olarak flotasyon hızı da artacaktır.

6.3. Palp Yoğunluğunun Etkisi

Tomlinson ve Fleming (1963), flotasyon işleminin serbest ve engelli (inhibited) olmak üzere iki farklı şekilde oluşabileceğini göstermişlerdir. Serbest flotasyon, flotasyonun

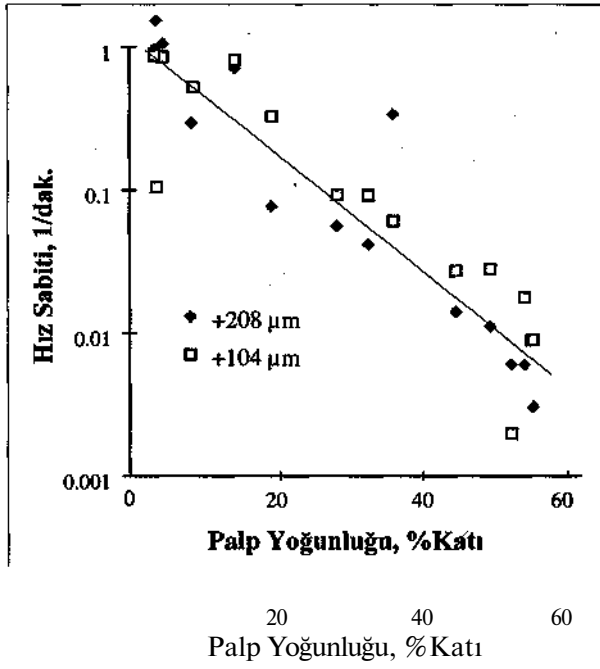
en hızlı olduğu başlangıç anında bile, hava kabarcıklarının mineral taneleri ile seyrek bir şekilde kaplanmalarını belirtir. Genellikle düşük palp yoğunluğunda flotasyon işlemi bu şekilde meydana gelmektedir. Engelli flotasyon, flotasyon hızının hava kabarcıklarının taşıma kapasitesi ile sınırlandığı durumu tanımlamaktadır. Böyle bir durum genellikle palp yoğunluğunun yüksek olduğu flotasyon işlemlerinde ortaya çıkabilmektedir. Ülkemizdeki flotasyon tesislerinde bu durum, "sıkı köpük" veya "köpük sıkması" olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda seçimlilik azalmaktadır. Düşük palp yoğunluklarında flotasyon hızının arttığı, yüksek palp yoğunluğunda ise flotasyon hızının azaldığı, kesikli laboratuvar çalışmalarından bilinmektedir (Imaizumi ve Inoue, 1963; Mehrotra ve Kapur, 1974).

Frew (1982), çinko temizleme devresinde farklı palp yoğunlukları için flotasyon hızının değişimini araştırmış (Şekil 7), palp yoğunluğunun hız üzerindeki etkisinin mineralin türünden daha çok tane boyu üzerinde etkili olduğunu ve bunun iri boyutlarda ince boyutlara göre daha belirgin bir şekilde gerçekleştiğini belirtmiştir.

Genel olarak artan palp yoğunluğu ile flotasyon hızındaki düşüş iki farklı nedenden kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi serbest flotasyondan engelli flotasyon koşuluna geçmedir. Diğer ise hava akışının değişen palp yoğunluğundan dolayı hücre içindeki dağılımının değişmesi ve serbest kabarcık yüzeyinin azalmasıdır.

6.4. Hava Miktarının Etkisi

Hava miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi, oluşturulan kabarcıkların yüzey alanları ve çarpışma olasılığı ile ilişkilendirilmektedir. Artan hava miktarının flotasyon hızında artışa neden olduğu bilinmekle birlikte, (Mehrotra ve Kapur, 1974), flotasyon kinetiğinin kontrol



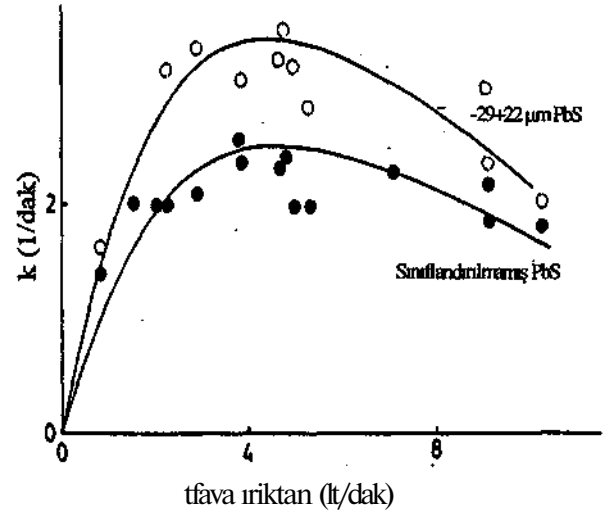
Şekil 7. Farklı palp yoğunlukları ile tane boyu fraksiyonlarının flotasyon hızlarının değişimi (Frew, 1982)

mekanizması henüz netlik kazanmamış bir konudur.

Laplante vd. (1983) malzemenin palptan köpüğe transferini hız belirleyici adım olarak esas aldıkları çalışmada, galen ve kuvars için, hava miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisini kabarcık yüzey alanı ve kabarcık çaplarını ölçerek incelemişlerdir (Şekil 8). Flotasyon hızındaki belli bir hava miktarına kadar gözlenen artış, artan hava miktarına paralel olarak toplam kabarcık yüzey alanındaki artışla açıklanmıştır. Optimum bir değerden sonra flotasyon hızının düşmesi ise, bu hava hızından sonra oluşan kabarcık boyutunun artışı ile ilişkilendirilmiştir.

Hava miktarındaki artışın flotasyon performansı üzerindeki olumsuz etkisi için farklı açıklamalar da mevcuttur (Lynch vd., 1981).

Buna göre sabit hızda çalışan karıştırıcının, hücrede havayı homojen bir şekilde karıştırması sonucu çarpışma olasılığının azalacağı ve palpin içinde türbülans akış



Şekil 8. Galen için flotasyon hızının hava miktarıyla değişimi (Laplante vd., 1983)

koşulunun oluşması ile kabarcığa bağlı tanelerin ayrılacakları belirtilmektedir.

6.5. Kabarcık Boyutunun Etkisi

Anfrus ve Kitchener (1977) kuvarsla yaptıkları çalışmada, hava kabarcıklarının yukarı doğru yükselme hızlarının boyutlarının artması ile arttığını ancak boyutlarının küçülmesi ile mineral taneleri ile çarpışma verimlerinin yükseldiğini göstermişlerdir. Flotasyon hücresindeki hava kabarcıkları boyutlarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi, palpin akış koşullarından bağımsız olarak Ahmed ve Jameson (1985) tarafından incelenmiştir. Kabarcık boyutunun karıştırıcı hızı ile ayarlanabildiği bir düzenekte kuvars ve zirkon mineralleri ile -50 µm tane boyunda yapılan bu çalışmada, kabarcık boyutunun 655 µm'dan 75 µm'a indirilmesi ile flotasyon hızının 100 kat kadar arttığı bulunmuştur.

Kabarcık boyutu ile flotasyon hücresindeki türbülans akış koşullarının hız üzerindeki etkisini birlikte araştıran Spears ve Jordan (1989), -40 µm gibi ince boyutlu galen tanelerinin flotasyonunda esas belirleyici

faktörün, tane boyu ve türbülans olduğunu bulmuştur.

Ayrıca türbülansın, çarpışma olasılığı ve flotasyon hızı üzerindeki etkisinin kabarcık boyutunun etkisine göre çok daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir.

75-142 (xm gibi iri tane boylarında da kabarcık boyutunun hız üzerindeki etkisinin oldukça düşük olduğu belirtilmektedir. Tane-kabarcık çarpışmasının sayısı ve tanelerin kabarcıklara tutunma olasılıklarının (çarpışma veriminin) artması ile flotasyon hızının artışı, tane boyunun artışı ile ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte hücredeki türbülans artışının, taneler ve kabarcıkların palp içerisindeki hızlarını artırdığı ve bunun da çarpışma sayısının artışı şeklinde kendini gösterdiği ve sonuç olarak, daha fazla miktarda mineral tanesinin kabarcıklara tutunması ile flotasyon hızının arttığı belirtilmektedir.

7. SİMÜLASYON

Flotasyon işleminin modellenmesindeki nihai amaç, işletme koşullarına ve akım şemasına bağlı olarak bir flotasyon tesisinden elde edilecek konsantre tenor ve veriminin önceden tahmin edilebilmesidir. Bu işlem ise simülasyon olarak adlandırılmaktadır. Dünyada yaygın olarak kullanımı olan JKSimFloat, MODSIM (veya Microsim) ve USTJVI-PAC gibi cevher hazırlama tesis simülatörleri bünyesinde, flotasyon işleminin simülasyonunda kullanılan modeller bulunmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi, (işlem değişkenleri ya da akım şeması değiştirildiğinde) bunların uygulamada elde edilen gerçek verim ve tenor değerlerini tahmin edebilme yetenekleri sınırlıdır. Ancak göreceli olarak (iyileşme/kötüleşme) doğru tahminler yapabildikleri söylenmektedir.

Yukarıda adı geçen üç simülasyon paketinde

kullanılan modelleme tekniği benzerlik göstermektedir. Temel olarak mükemmel karışım olduğu varsayımına dayalı olarak geliştirilen Eşitlik 14 kullanılmaktadır. Herbir boyut fraksiyonunun flotasyon davranımı yavaş ve hızlı yüzen şeklinde veya benzer bir yapıyla ilişkilendirilmiş birkaç adet flotasyon hız sabiti ile tanımlanmaktadır. Herbir fraksiyonun bu model parametrelerinin flotasyon beslemesinin boyut dağılımındaki değişiminden etkilenmediği kabulü yapılmaktadır. Böylece boyut dağılımındaki değişimin flotasyona olan etkisinin simülasyonu yapılabilmektedir.

Tenor tahmini yapılabilmesi için hidrofobik mineral veriminin yanısıra, hidrofilik tanelerin de ne kadarının konsantreye geleceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bazı simülatörlerde gang (hidrofilik) minerallerin davranımı da kinetik eşitlikle tanımlanmaktadır. Diğerlerinde ise gang minerallerinin su ile taşındığı (entrainment) varsayılarak, kazanılacak su miktarı ile ilişkilendirilmiş bir matematiksel yapı kullanılmaktadır.

Bu alanda yapılan güncel çalışmalar ise flotasyon kinetiğinin, flotasyon hücresinin birim alanından birim zamanda geçen hava kabarcığı yüzey alanı ile ilişkilendirilebileceği üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla flotasyon hücresinde oluşan hava kabarcıklarının boyut dağılımlarını ölçmek amacıyla University of Cape Town'da bir cihaz geliştirilmiştir. Bu ölçümler sayesinde ölçek büyütmenin kolaylıkla yapılabileceği, kinetik parametrelerin daha güvenilir şekilde tahmin edilebileceği ileri sürülmektedir (JKMRC, 1998; Alexander ve Morrison, 1998).

8. SONUÇ

Flotasyon işleminin modellenmesinde genel olarak üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır.

Bunlar; olasılık, ampirik ve kinetik modellerdir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları kinetik model olup, özellikle yan kesikli flotasyon işleminin modellenmesinde kullanılan çok sayıda farklı matematiksel yapı bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanları flotasyon beslemesindeki hidrofob tanelerin, biri hızlı diğeri yavaş yüzen iki farklı fraksiyondan oluştuğu varsayımı üzerine kurulmuş yapı ile hız sabitlerinin dikdörtgenel dağılıma sahip olduğunu varsayan modeldir.

Hız sabitleri ile işlem değişkenleri arasında matematiksel bir yapı oluşturmayı hedefleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına karşın, elde edilen sonuçlar herhangi bir parametredeki değişimin hız sabiti üzerindeki etkisini göreceli olarak tanımlayabilmektedir.

Kinetik testler, belirli bir flotasyon süresi sonundaki verim ve tenorun belirlendiği standart laboratuvar testleri ile karşılaştırıldığında daha detaylı bilgiler üretmekte ve hız sabiti, farklı koşullardaki yüzebilirlik ya da hidrofobluğun tanımlanmasında daha güvenilir bir parametre olmaktadır.

KAYNAKLAR

Ahmed, N. ve Jameson, G.J., 1985; "The Effect of Bubble Size on The Rate of Flotation of Fine Particles", Int. J. Min. Proc, 14, s. 195-215.

Alexander D.J., Mornson R.D., 1998; "Rapid Estimation of Flotability Components in industrial Flotation Plants", Minerals Engng, 11, No: 2, s. 133-143.

Anfruns, J.F. ve Kitchener, J.A., 1977; "Rate of Capture of Small Particles in Flotation", Trans. I.M.M., Sec.C, 86, C9-C15.

Apling, A.C. ve Ersaym, S., 1986; "Reproducibility of Semi-Batch Flotation Test Work with The Leeds Open-Top Cell and of Derived Kinetic Parameters", Trans. I.M.M., Sec.C, 95, C83-88.

Arbiter, N. ve Harris, C.C., 1962; "Flotation Kinetics, Froth Flotaion", 50th Anniversary Volume, A.I.M:E. (Ed. D.W. Fuerstaneu), s. 215-246.

Cameron, A.W., Kelsall, D.F., Restarick, C.J. ve Stewart, P.S.B., 1971; "A Detailed Assessment of Concentrator Performance at Broken Hill South Ltd.", Proc.Aust.LM.M., 240, s.53-68.

Dowling, E.G., Klimpel, R.R. ve Apian F.F., 1985; "Model Discrimination in the Flotation of a Porphyry Copper Ore", Minerals and Metallurgical Processing, 2, s. 87-101.

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

Ersaym, S., 1986; "Flotation Kinetics of Santiago Copper Ore", Ph.D.Thesis, The University of Leeds.

Eşiyok, A. ve Demirci, A., 1988; "Optimization of Ergani Copper Flotation Plant On Computer", II. Int. Min.Proc. Symp., İzmir, Ed: Aytakin, Y., s.473-481.

Frew, J.A., 1982; "Variation of Flotation Rate Coefficients in Zinc Cleaning Circuits", Int. J. Min. Proc, 9, s. 173-189.

Gülsoy, Ö. Y., 1995; "Hidrofobik ve Hidrofilik Mineral Flotasyonu Üzerinde Su Kazanımının Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.

Gülsoy, Ö. Y. ve Ersaym, S., 1996; "A New

Approach to Kinetic Characterization of Semi Batch Flotation Tests, Changing Scopes In Min. Proc", 6th Min. Proc. Symp., Eds: Kemal M., Arslan, V., Akar, A., Canbazoglu, M., s. 629-634.

Fichera M.A. ve Chudacek M.W., 1992; "Batch Cell Flotation Models- A Review", Minerals Engng, 5, No: 1, s.41-55.

Harris, C.C. ve Chakravarti, A., 1970; "Semi-Batch Froth Flotation Kinetics: Species Distribution Analysis", Trans. A.I.M.E., 247, s. 162-172.

Hollaway, J., 1986; "Optimizing Mineral Processing Operations", Mining Magazine, Vol 153, No 10, s. 382-387.

Hoşten, Ç. ve Tezcan, A., 1990; "The Influence of Frother Type on the Flotation Kinetics of a Massive Copper Sulphide Ore", Minerals Engng., 3, No: 6, s.637-640.

Huber-Panu, I., Ene-Danalache, E., ve Cojocariu, D.G., 1976; "Mathematical Models of Batch and Continuous Flotation", Flotation, A.M. Gaudin Memorial Volume, Eds: M.C. Fuerstenau, Aime, Newyork, Vol 2, Chapter 5, s. 675-724.

Imaizumi, T., ve Inoue, T., 1963; Kinetic Consideration of Froth Flotation, In: A. Roberts(ed), Proc.Int. Min.Process. Congr., 6th, Cannes, Pergamon,1965, s. 581-589.

Jkmrc, 1998; "Big Bubbles No Trouble", Media Release, The University of Queensland, web Site: www.jkmrc.uq.edu.au

Kelsall, D.F., 1961; "Application of Probability in the Assessment of Flotation Systems", Trans. I.M.M.,Sec.C, 70, s. 191-204.

King, R.P., 1973; "Model for the Design and Control of Flotation Plants", Eds: Salamon

M.D.G. ve Lancaster F.J., 10th Int. Apcom Symp., S. Afr.Inst.Min.Metall., s.341-350.

Klimpel, R.R., 1980; "Selection of Chemical Reagents for Flotation", Mineral Proc. Plant Design, 2nd Ed. Eds: Mular,A.L., ' Bhappu, R.B.,Chapter 45, Aime, New York, s. 907-934.

Laplante, A.R.,Toguri, J.M. ve Smith, H.W., 1983; "The Effect of Air Flow Rate on the Kinetics of Flotation", Part 1: The Transfer of Material From the Slurry to the Froth, Int. J. Min. Proc.,11,s.203-219.

Leja, J. ve Schulman, J.H., 1954; "Flotation Theory: Molecular Interactions Between Frothers and Collectors at Solid-Liquid-Air Interfaces", Trans. A.I.M.E., 16, s.221-228.

Lekki, J., Laskowski, J.,1971; "On the Dynamic Effect of Frother Collector Joint Action in Flotation", Trans. I.M.M., Sec.C, 80, P. C174-180.

Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V. ve Thome, C.G., 1981; "Mineral and Coal Flotation Circuits-Their Simulation and Control", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Mazumdar, M., 1994; "Statistical Discrimination of Flotation Models Based on Batch Flotation Data", Int. J. Min. Proc, 42, s. 53-73.

Mehrotra, S. P., ve Kapur, P. C, 1974; "The Effects of Aeration Rate, Particle Size and Pulp Density on the Flotation Rate Distributions", Powder Technology, 9, s. 213-219.

Mehrotra, S. P., Padmanabhan, ve P.H., 1990; "Analysis of Flotation Kinetics of Malanjhand Copper Ore, India, in Terms of Distributed Flotation Rate Constant", Trans I.M.M., Sec C, 99, s. C32-42.

Morris, T.M., 1952; "Measurement and Evaluation of the Rate of Flotation as a Function of Particle Size", Trans. A.I.M.E., 193, s. 794-798.

Mular, A.L., 1972; "Empirical Modelling and Optimization of Mineral Processes", Minerals Sci. Engng., Vol 4, No 3, s. 30-42

Plaskin, I.N., Zaitseva, S.P, Myasnikova, G. A., Starchik, L.P., Turnikova, V.I., Khazhiszkaya, G.M. ve Shaepevev, R.S., 1957; "Microradiographic Study of the Action of Flotation Reagents", Trans. I.M.M., 67, s. 1-7.

Saklar, S., 1997; "Pirit Flotasyonunda Tane Boyu Dağılımı ile Flotasyon Kinetik Parametreleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.

Schuhmann, R., 1942; "Flotation Kinetics, 1.Methods for Steady State Study of Flotation Problems", J. Phys. Chem. 46, s. 891-902.

Senior, G.D., Shannon, L.K. ve Trahar, W.J., 1994; "The Flotation of Pentlandite from Pyrrhotite with Particular Reference to the Effects of Particle Size", Int. J. Min. Proa, 42, s. 169-190.

Spears, D.R., ve Jordan, C.E., 1989; "The Effect of Turbulance on the Flotation Rate of Galena When Using Fine Bubbles, in Advances in Coal and Mineral Processing Using Flotation", S. Chander ve R.R. Klimpel (eds), SME, Littleton, s. 77-84.

Sutherland, D.N., 1977; "An Appreciation of Galena Concentration Using a Steady State Flotation Model", Int. J. Min. Proa, 4, s.149-162.

Suwanasing, P. ve Salman. T., 1970; "Particle Size in Flotation Studies", Can. Min. Jour., 91, 12, s. 55-62.

Tomlinson, H. S. ve Fleming, M.G., 1963; "Flotation Rate Studies", In A. Roberts (editor), Proa 6th Int. Miner. Process. Congr., Cannes, Pergamon, 1965, s. 563-579.

Trahar, W.J., 1981; "A Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation", Int. J. Min. Proa, 8, s. 289-327.

Trahar, W.J., Warren, L.J., 1976; "The Flotability of Very Fine Particles-A Review", Int. J. Min. Proa, 3, s. 103-131.

Whiten, W.J., 1971, "The Use of Multi Dimensional Cubic Spline Functions for Regression and Smoothing", The Aust. Computer Journal, 3, s. 81-87.

Yuan, X. M., Palsson, B.I. ve Forssberg, K.S.E., 1996; "Statistical Interpretation of Flotation Kinetics for a Complex Sulphide Ore", Minerals Engng., 9, No: 4, s. 429-442.