

**FLOTASYONDA SU İLE TAŞINIM MODELLEME YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

An Evaluation of the Entrainment Modelling Approaches in Flotation

Özcan Y. GÜLSOY<sup>(\*)</sup>

Anahtar Sözcükler: Su ile Taşınım, Flotasyon, Modelleme

**ÖZET**

Flotasyonda, malzemelerin konsantreye taşınmalarında önemli iki mekanizma mevcuttur: Gerçek flotasyon ve su ile taşınım. Gerçek flotasyon sadece hidrofobik tanelerin kazamıyla ilgilidir. Fakat su ile taşınım hem hidrofilik hem de hidrofobik minerallerin kazanımdan üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Hidrofilik minerallerin konsantreye taşınmaları konsantrede kazanılan su miktarı ile doğrudan ilişkilendirilerek modellenebilmektedir. Fakat, hidrofobik minerallerin ne kadarının su ile taşındığının ölçülmesi mümkün değildir. Hidrofobik minerallerin su ile taşınımının belirlenmesi için farklı yaklaşımlar kullanılarak çeşitli modeller geliştirilmiştir.

Bu makalede su ile taşınım modelleri ve ilgili yaklaşımlar sunulmuştur. Warren (1985), Ross (1990) ve Gülsoy (1995) tarafından önerilen modeller kullanılarak bir grup yarı kesikli flotasyon test verisi için su ile taşınım hesaplanmış ve bunların birbirleriyle kıyaslamaları yapılmıştır.

**ABSTRACT**

There are two important mechanisms for the recovery of particles in flotation: True flotation and entrainment. True flotation deals with only hydrophobic mineral recovery. Entrainment has an effective role on the recovery of not only hydrophilic but also hydrophobic mineral recoveries.

Hydrophilic entrainment could be modelled by relating water recovery with solids recovery. However, direct measurement of the hydrophobic entrainment is not possible. By using different approaches, several mathematical models were developed for the determination of hydrophobic entrainment.

In this paper, entrainment models and related approaches were presented. Amounts of entrainment were calculated from Warren's (1985), Ross's (1990) and Gülsoy's (1995) entrainment models by using a set of semi batch flotation test results and these were compared with each other.

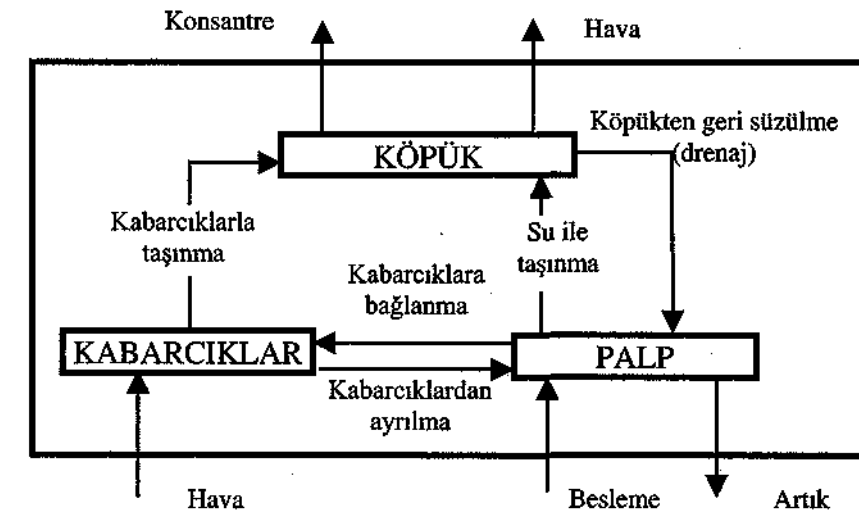
\*) Yrd. Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

## 1. GİRİŞ

Flotasyon sistemlerinde hidrofobik malzemelerin konsantreye taşınmaları, gerçek flotasyon olarak tanımlanan, hava kabarcıklarına yapışarak konsantreye taşınma ve hava kabarcıkları arasındaki su ile taşınma olmak üzere temel iki yolla gerçekleşmektedir. İdeal flotasyon süreçlerinde konsantreye ulaşmaması gereken serbest hidrofilik malzemeler için konsantreye taşınmada gerçek flotasyon olarak tanımlanan hava kabarcıklarına bağlanma sözkonusu değildir. Serbest hidrofilik malzemelerin konsantreye taşınmalarında ise su ile taşınımın en önemli mekanizma olduğu kabul edilmektedir. Taşıyıcı flotasyon, şlam kaplanması ve buna benzer sistem ve mekanizmalar ise üzerinde yeterli incelemeler yapılmamış ve tam olarak tamamlanmamışlardır. Flotasyonda önemli etkisi olan malzeme taşınma mekanizmaları Şekil 1 'de şematik olarak verilmektedir.

Flotasyon sistemlerinde malzeme davranımını tanımlamak amacı ile günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından farklı yaklaşımlar içeren model ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Özellikle hidrofobik mineral kazanımını

tanımlamak amacıyla oluşturulmuş modellerde katı kazanımının zamanla değişimi tanımlanmaya çalışılmış ve bu değişimler belli hız eşitlikleri şeklinde ifade edilmişlerdir. Bu çalışmalar, hidrofobik malzemelerin kabarcıklara bağlanarak konsantreye taşınmaları, yani gerçek flotasyonla taşınmaları (hava kabarcıklarına yapışarak) temeline dayanmaktadır. Bu tür modellerde sistemdeki önemli değişkenlerden biri olan, konsantreye gerçek flotasyonla taşınımı da etkilediği tahmin edilen, konsantredeki su kazanımı ise genelde göz ardı edilmektedir. Hidrofilik tanelerin flotasyon davranımı da, hidrofobik tanelere benzer hız eşitlikleri kullanılarak modellenmiş ise de bu tanelerin konsantreye büyük ölçüde su ile taşınarak geldikleri ve bunların su ile taşınım modelleri ile açıklanması gerektiği bilinmektedir. Bu duruma bağlı olarak hidrofilik taneler için su ile taşınım modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, genel olarak su kazanımı ile katı kazanımı arasında doğrusal bir ilişki kurulması ve bu ilişkinin boyuta bağlı olarak değişmesi temeline dayanmaktadır. Bazı durumlarda bu modeller belli düzeltmelerle hidrofobik minerallerin su ile taşınımını tanımlamak için de kullanılmışlardır.



Şekil 1. Flotasyonda malzeme taşınım yolları (Flint, 1973)

Bu çalışmada, flotasyonda su ile taşınan malzemelerin tanımlanması için geliştirilmiş olan modeller sunulmuş ve bu modellerin oluşturulması sırasında araştırmacılar tarafından göz önünde bulundurulmuş olan varsayımlar tartışılmıştır. Bununla birlikte laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan yarı kesikli flotasyon test verileri için üç farklı model (Warren, 1975; Ross, 1990 ve Gülsoy, 1995) kullanılarak hidrofobik minerallerin su ile taşınmaları hesaplanmış ve bunlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Böylece hidrofobik minerallerin su ile taşınımının tanımlanmasındaki güçlükler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

## 2. SU İLE TAŞINIM) ve FLOTASYON SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ÖNEMİ

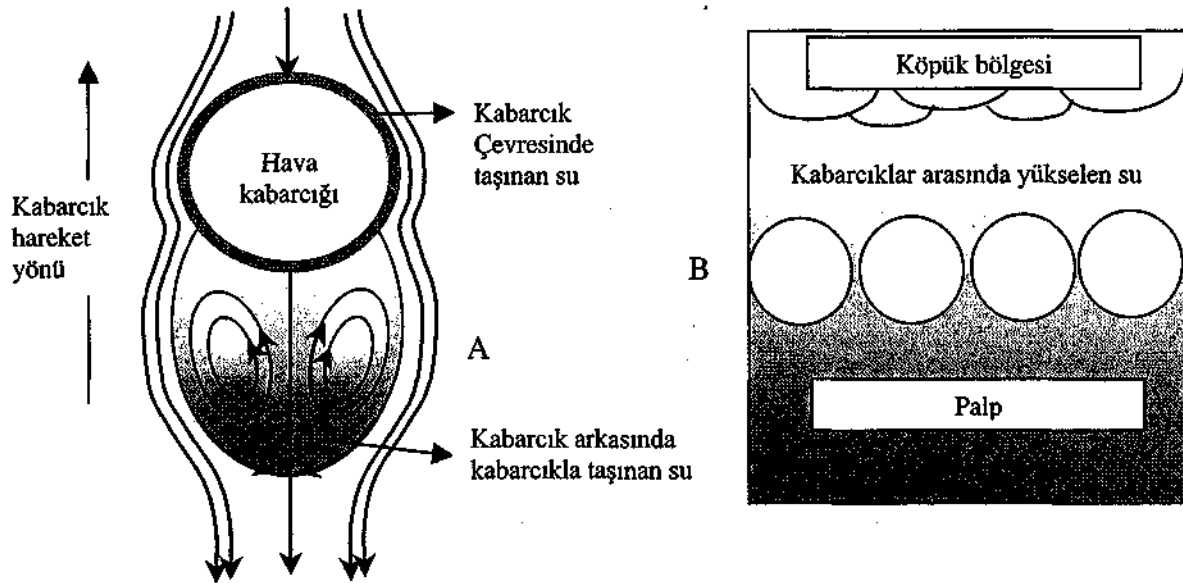
Flotasyonda genellikle ihmal edilen fakat, tenor ve verim için çok önemli olan su ile taşınım, köpüğe bağlanmadan su ile konsantreye taşınan malzemeyi ifade etmektedir. Bu şekilde tanelerin köpük fazı içine taşınmaları yukarı yönde yükselen hava kabarcığının arkasında veya çevresinde sürüklenen su ile ya da köpük palp ara yüzeyinde yukarı yükselen kabarcıklar

tarafından itilen su ile taşınma şeklinde gerçekleşmektedir. Su taşınım mekanizmaları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Su ile taşınım konsantreye gelen suyun taşıma gücüyle ilgili olduğu için özellikle ince taneler için geçerli olan bir mekanizmadır. İnce tanelerin su ile sürüklenmelerinin kolay olması, buna karşın köpük fazından geri süzülmesinin iri ve ağır tanelere oranla daha yavaş olması nedeniyle kabarcıklar arasındaki su filmi ile hidrolik olarak konsantreye daha etkili bir şekilde taşınabildikleri söylenebilir. Hidrofilik taneler için kabarcık ile tane yapışması söz konusu olmadığı ve diğer mekanizmaların etkisinin çok sınırlı olması nedeniyle bu tanelerin konsantreye taşınmaları genelde su ile taşınma mekanizmasıyla gerçekleşmektedir.

Su ile taşınım olayı genel olarak hidrofilik taneler için kullanılmakla birlikte ince hidrofobik tanelerin de konsantreye su ile taşınmaları söz konusudur.

Hidrofobik malzemelerin gerçek flotasyonla kazanımı ile ilgili önemli parametrelerden birisi de tane boyudur. Günümüze kadar



Şekil 2. A) Kabarcıkla su taşınımı (Smith, 1989), B) Kabarcıklar arasında su taşınımı

yapılmış bir çok araştırma sonucunda yaklaşık olarak 10-100 um tane boyu aralığı flotasyonda maksimum kazanımın sağlandığı bir aralık olarak tanımlanmaktadır. (Trahar, 1976) Kabarcık tane bağlanmasında, kabarcık tane ile çarpışmakta ve bunun sonucunda sıvı filmi kırılarak üç faz teması oluşmaktadır.

Bu olay çarpışma olasılığının dışında, taneler için bir takım çok iyi bilinen yüzey özelliklerine de bağlı bulunmaktadır. Oysa ince tanelerin (-10um) çarpışma veriminin ve flotasyonla kazanım hızlarının irilere göre düşük olduğu bir çok çalışma ile ortaya konulmuştur. Bu nedenle gerçek flotasyonla kazanım verimleri düşük olan ince hidrofobik taneler için de su ile taşınım mekanizması etkili bir kazanım mekanizması olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Flotasyon, tanelerin hidrofobikliği ile ilişkili iken, su ile taşımında kazanılan su miktarı önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle su kazanımı üzerinde etkili olan köpürtücü miktarı, toplayıcı miktarı, havalandırma hızı, karıştırma hızı, palp katı derişimi, malzeme özgül ağırlığı, köpük tabakası kalınlığı, köpük sıyrma derinliği gibi parametreler su ile taşımımın açıklanması ile ilgili çalışmalar yapılırken dikkate alınması gereken değişkenler olarak belirtilebilir.

Su ile taşımında hidrofobik ve hidrofilik mineraller arasında seçimlilik sözkonusu değildir. Su ile taşınabilecek özelliklere sahip, yani ince ve hafif hidrofobik veya hidrofilik taneler, aynı anda konsantreye bu mekanizma ile taşınabilirler. Bu da flotasyon işlemleri için önemli bir problem olmaktadır. Genelde hem tesis ölçeğinde hem de kesikli testlerde su ile taşınım ve gerçek flotasyonla kazanım birbirinden ayrı olarak düşünülemez. Özellikle sistemde ince tanelerin oranı yüksekse su ile taşımının toplam kazanım üzerine olan etkisi büyük olmaktadır. Bu da hem verim hem de tenor üzerinde etkili olmaktadır.

Su ile taşımımın flotasyon üzerindeki önemi Smith ve Warren (1989) tarafından verilmiş olan hipotetik bir örnekle vurgulanmaya çalışılmıştır. Buna göre, %1 hidrofobik mineral (değerli) ve %99 gang mineralinden oluşan bir cevherde gangm, %20'sinin 5 jnm ve %79'unun 40 jtm olmak üzere sadece iki fraksiyondan oluştuğu kabul edilerek bir inceleme yapılmıştır. Flotasyon koşulunun değerli mineralin tümünün yüzebileceği şekilde ayarlanmış olması durumunda su ile taşınacak malzemeler nedeni ile maksimum tenor yükseltme oranının ne olabileceği hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu durumda su ile taşımımı açıklamak için geliştirilmiş bazı modeller kullanılarak maksimum ulaşılacak tenor %16,8 değerli mineral olarak hesaplanmaktadır. Değerli mineral kazanımı %50 azalırsa ulaşılacak tenor yükseltme 9,2 olmaktadır. Bu hesaplama yöntemi ve varsayımlar doğru kabul edildiği takdirde su ile kazanılan malzemenin ürün üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Olayı açıklamak için kullanılan yaklaşımların bir takım hatalar içermesine karşın genel eğilimi göstermesi açısından bu durum çarpıcı bir örnek teşkil etmektedir.

### 3. SU İLE TAŞINIMI AÇIKLAYAN YAKLAŞIM ve MODELLER

#### 3.1. Hidrofilik Minerallerin Su ile Taşımımını Açıklayan Modeller

Hidrofilik ince tanelerin konsantreye gelmesinde önemli rol oynayan su ile taşımımın kantitatif doğası ilk olarak Jowett (1966), tarafından incelenmiştir. Waksmundzki vd. (1972) sülfür flotasyonunda kalsit şlamlarının taşınması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada hidrofilik kalsit minerallerinin hava kabarcığı çevresindeki su ile taşındığı belirtilmektedir. Buna göre konsantreye gelen hidrofilik mineral miktarı ile hava kabarcığı çevresindeki su filmi kalınlığı arasında

doğrudan bir ilişki olduğu ileri sürülmektedir. Johnson vd. (1974), endüstriyel ölçekte kalkopirit kullanarak yapmış oldukları çalışmalarda konsantrede kazanılan gangın serbest gang olduğunu kabul ederek, su ve hidrofilik katı kazanımı arasında direkt bir ilişki olduğunu belirtmektedirler. Bu çalışmadaki ilginç noktalardan birisi ise, literatürde daha sonraki tarihlerde karşılaştığımız su ile katı kazanımı arasında tammlanan doğrusal ilişki yerine pilot tesis ölçekli bir çalışmadan elde edilen verilere göre parabolik bir ilişki gözlemlendiğinin belirtilmesidir. Johnson, su kazanımı ve katı kazanımı arasındaki ilişkinin yalnızca palp yoğunluğuna değil aynı zamanda tane boyuna göre de değiştiğini belirterek aşağıdaki sınıflanma fonksiyonunu tanımlamıştır.

$$CF = \frac{\text{(konsantredeki birim su kütlesindeki serbest gang)}}{\text{(palptaki birim su kütlesindeki serbest gang)}} \quad (1)$$

Johnson tarafından gerçekleştirilmiş olan pilot ve tesis ölçekli çalışmalarda; köpürütücü dozajı, palp seviyesi ve havalandırma hızının su kazanımı üzerinde çok etkili olduğu ve bu değişkenlerin su ile taşınım üzerindeki önemini vurgulanmıştır. Bu çalışmalarda da sunulan sonuçlar incelendiğinde su kazanımı ve katı kazanımı arasındaki ilişkinin parabolik olduğu görülmektedir.

Lynch vd. (1974), hidrofilik gang kazanımı için sınıflanma fonksiyonunun kullanıldığı bir model oluşturmuşlardır:

$$RRFG = RRW^{CF}, MFGUW_j \quad (2)$$

Buna bağlı olarak endüstriyel bir sistem için su ile taşınım aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir. Su ile kazanılan "i" boyutlu malzeme miktarı:

RRW<sub>x</sub>CE<sub>x</sub>MPGR

MWATP

Burada;

RRFG : serbest gang kazanım hızı

RRW :su kazanım hızı

MFGPj : palptaki 'i' boyutlu hidrofilik mineral miktarı

MW ATP : palptaki su miktarı

MFGUWPj : palptaki birim su kütlesi başına serbest gang miktarı

Bu yaklaşımda, bütün tane boyutlarının sistem içinde mükemmel karıştığı kabul edilmiştir. Normal su kazanım hızı sınırları için, CE/ nin değerleri yaklaşık olarak sabit tutulmuştur, fakat bu değerlerin özgül ağırlığa bağlı olduğu belirtilmektedir.

Thorne vd. (1976), su ile taşman malzeme miktarı ile hücre derişimi arasında sıkı bir ilişki olduğunu ve hücre derişiminin artmasına bağlı olarak su ile taşman malzeme miktarında da önemli ölçüde artış olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca, minerallerin özgül ağırlığına bağlı olarak su ile taşman malzeme miktarının da değiştiğini ve ağır minerallerin su ile daha zor taşındıklarını söylemektedirler. Thorne çok ince taneler için su kazanımı ve su ile taşman malzeme arasında doğrusal ilişki gözlenmesine rağmen, farklı su ile taşınım hızlarına sahip olan iri ve ince hidrofobik taneler için genel ilişkinin aslında doğrusal değil parabolik olduğunu ileri sürmektedir. Köpükte durma zamanının artmasının da su ile taşınım azalttığı yine bu çalışmada vurgulanan diğer bir konudur.

Konu ile ilgili diğer bir incelemede ise Bishop ve White (1976), kazanılan su ile katı arasında parabolik ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, CE/nin, tanelerin köpükte durma zamanları ile ilişkili olduğu ileri sürülmektedir. Buna göre;

$$CF_i = \frac{C_i}{C_w X_i} = \frac{1 + \alpha r}{1 + \beta_i r} \quad (4)$$

- a : köpükten suyun süzülmesi ile ilgili hız sabiti  
 |3 : köpükten tanenin süzülmesi ile ilgili hız sabiti  
 C<sub>w</sub> : konsanrede su akış hızı  
 X<sub>j</sub> : "i" boyutlu malzeme oranı  
 C<sub>j</sub> : konsanrede "i" boyutlu malzemenin akış hızı  
 r : köpük durma zamanı
- eşitliği ortaya konmuştur.

Lynch vd. (1981), çalışan bir tesis için bir hücredeki palptan numune almadaki zorlukları da göz önünde bulundurarak CF<sub>j</sub>' nin yerine,

$$CFM_i = \frac{(\text{"i" boyutlu gang kazanım hızı})}{(\text{"i" boyutlu gang besleme hızı} * \text{su kazanım hızı})} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanan bir parametre kullanılmasının uygulamada kolaylık sağlayacağını belirtmektedirler. Fakat, bu yaklaşımın olumsuzluğu, sınıflanma fonksiyonunun su ve katı kazanımına bağlı olarak sabit kalmamasıdır.

Farklı bir yaklaşım geliştiren Kirjavainen (1988;1989) çeşitli hidrofobik mineraller kullanarak yaptığı çalışmada bir transfer faktörü tanımlamış ve buna göre bir model önermiştir. Bu çalışmada, tane kütesine bağlı olan transfer faktörü şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$P = 1 - D * \log_j(m) \quad (6)$$

- D : sabit (%2-20 ağırlıkça katı içeren palp için 0,17 civarında),  
 m : dar bir boyut aralığındaki tanelerin ortalama kütesi (nanogram)

Buna göre, Kirjavainen, su kazanımı ve hidrofilik tanelerin su ile taşınımları arasındaki

ilişkinin doğrusal olmayacağı varsayımı ile aşağıdaki eşitlikle ifade edilebileceğini belirtmektedir.

$$R^{1 - e x p H^{-1}} \quad (7)$$

- R<sub>i</sub> : "i" boyutlu hidrofilik malzemenin su ile taşınımı,  
 P<sub>i</sub> : "i" boyutlu tane için kazanım faktörü,  
 x : kazanılan su miktarı,  
 V : palptaki su miktarı.

Benzer bir çalışmada, Warren (1985), kasiterit ve kömür kullanarak yaptığı çalışmalarda su kazanımı ile hidrofilik katı kazanımı arasındaki ilişkiyi, sabit bir flotasyon zamanı için aşağıdaki şekilde tanımlamaktadır.

$$R_g = e_g R_w \quad (8)$$

- R<sub>gy</sub> : su kazanımı,  
 R<sub>g</sub> : su ile ince gang kazanımı,  
 e<sub>g</sub> : verilen tane boyu ve özgül ağırlık için sabit (su ile taşınım derecesi).

Sınıflanma fonksiyonunun yerine aynı niteliği taşıyan su ile taşınım derecesinin kullanıldığı bu çalışmada, önceden belirlenmiş olan bir "t" zamanı için çeşitli flotasyon parametreleri değiştirilerek elde edilen su ve katı kazanımlardan yararlanılarak, katı kazanımın su kazanımına karşı çizilen grafiğinden elde edilen doğrunun eğimi, e<sub>g</sub>, su ile taşınım derecesi olarak tanımlanmaktadır. Yapılan incelemelerde hidrofilik taneler için çizilen doğru orijinden geçerken, hidrofobik taneler için katı kazanım eksenini su kazanımın sıfır olduğu anda kestiği belirtilmektedir. Doğrunun katı kazanım eksenini kestiği bu nokta gerçek flotasyonla kazanım olarak kabul edilmektedir. Subrahmanyam vd, (1988a) aynı yaklaşımı kullanarak farklı mineraller için elde ettikleri su ile taşınım derecesi değerlerini toplu halde

sunmuşlardır. Subrahmanyam vd (1988b) yine aynı yaklaşımı kullanarak kurşun-çinko cevheri için farklı köpürtücülerin suyla taşınım üzerine etkisini incelemiştir.

Engelbrecht ve Woodburn (1975) yapmış oldukları bir çalışmada su kazanımına karşı çizilen katı kazanımı grafiklerinden elde edilen doğrunun özellikle iri taneler için su kazanımı eksenini kestiğini belirtmektedirler. Çünkü, her bir tanenin su ile taşınması için su kazanımının belli bir değerin üstünde olması gerekmektedir. Bu değerden düşük su kazanım hızlarında o tanenin su ile taşınması mümkün değildir. Bu da o irilikteki tanenin su ile taşınabilmesi için gerekli minimum su kazanım değeri olarak ifade edilmektedir.

Bu noktadan hareketle su ve katı kazanımı arasındaki ilişki Engelbrecht ve Woodburn (1975) tarafından yapılmış olan inceleme sonuçları kullanılarak;

$$R^{\wedge} = 4(R_w - R_{w0}) \quad (9)$$

şeklinde tanımlanmıştır (Smith ve Warren 1989).

- $\hat{e}_g$  : "i" tanesi için doğrusal kısmın eğimi (su ile taşım derecesi)
- $R_i$  : konsantredeki "i" boyutlu tane miktarı/beslemedeki i boyutlu tane miktarı
- $R^{\wedge}$  : konsantredeki su miktarı/ beslemedeki su miktarı
- $R^{\wedge}$  : katı kazanımı başlangıcında konsantredeki su miktarı / beslemedeki su miktarı

Çok ince taneler için  $R^{\wedge} = 0$  dir. Bu nedenle Eşitlik (9) ;

$$R^{\wedge} = R_j \quad (10)$$

şekline dönüşmektedir.

Bu yaklaşımlara alternatif olarak Lynch(1974) tarafından hidrofilik minerallerin su ile

taşınması ile ilgili olarak önerilen modele benzer bir model düşünülmüştür. Bu yaklaşımda, yarı kesikli flotasyon testlerinde hücredeki derişimin zamanla değiştiği göz önüne alınmış ve çok kısa zaman aralıklarında hücre derişimi kazanılan su miktarı ve özel bir sınıflanma fonksiyonu kullanılarak su ile taşımın tanımlanabileceği öngörülmüştür (Ersaym, 1986; Gülsoy, 1995). Buna göre hidrofilik minerallerin su ile taşımını aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir.

$$R_{t+At} = C_i R_{t+At} d_{t+At} \quad (11)$$

- $R_{t+At}$  : i'boyutlu tanenin kısa bir süre içinde su ile taşımını,
- $R_j^{\wedge}$  : kısa bir zaman aralığında su kazanımı,
- $d_{t+At}$  : i'boyutlu tanenin kazanımın olduğu kısa süre içinde hücrede ortalama derişim,
- $C_j$  : i'boyutlu tanenin su ile taşım faktörü.

Lapante vd (1989), Eşitlik (5)'de tanımlanmış olan sınıflanma fonksiyonunu kullanarak su ile taşımın aşağıdaki şekilde tanımlanabileceğini belirtmişlerdir:

$$R = \frac{\hat{e}_g}{1 + R_w(Z, -l)} \quad (12)$$

burada;  $Z_i = CF_i$ dir.

Bu çalışmada su kazanımına karşı çizilen katı kazanımı grafiği incelendiğinde su kazanımı ile hidrofilik katı kazanımı ilişkisinin doğrusal olduğu ve sıfır su kazanımı değerinde katı kazanımı eksenini kestiği görülmektedir. Doğrunun katı kazanımını kestiği nokta ise tuzaklanma (*entrapment*) ile taşım miktarı olarak tanımlanmaktadır.

Kirjavainen (1996), kararlı durumda sürekli çalışan bir sistem için su ile taşımın aşağıdaki şekilde ifade edilebileceğini ileri sürmektedir.

$$R_i = P_i R_w \quad (13)$$

Burada,  $P_i$ , tane boyu ve sürece bağlı bir olasılık faktörüdür.

Kirjavainen bu yaklaşımın yine kendisi tarafından 1989 da ileri sürülen kesikli sistemler için kullanılan aşağıdaki yaklaşımla uyumlu olduğunu belirtmektedir.

$$R \wedge 1 - \exp C - P_j R_j \quad (14)$$

Kirjavainen  $P_i$ 'nin su kazanım hızı, palp viskozitesi, tane kütlesi ve şekli ile ilgili olduğunu vurgulamaktadır. Bu eşitlikte  $P$  aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$P = \frac{w^{0,7}}{w^{0,7} + b \psi \eta^{-0,5} m^{0,5} \psi^{-0,4}}$$

Burada;

- w :su kazanım hızı,  $kg/m^2$ ,
- m :tane kütlesi, pg
- $i/j$  :palp viskozitesi, mPa s,
- \*F :dinamik şekil faktörü
- b :bir sabit, 0,00694

Tuteja (1995), flotasyon kolonu ile yapmış olduğu bir çalışmada hava akış hızının su ile taşımında en önemli faktör olduğunu vurgulamaktadır.

Elzivir (1997), su ile taşımın ölçmek amacıyla ilginç bir yaklaşım kullanmıştır. Buna göre 70  $\mu m$ ' dan büyük hidrofobik taneler ile 50  $\mu m$ 'dan küçük hidrofilik tanelerden oluşan iki minerali ( $CaF_2$  ve  $SiO_2$ ) karıştırarak flotasyon deneyleri yapmış ve topladığı konsantreleri 50 /ım'luk elekten eleyerek konsantreye su ile taşman malzeme miktarlarını belirlemiştir.

### 3.2. Hidrofobik Minerallerin Su ile Taşımın Açıklayan Modeller

Hidrofobik minerallerin su ile taşımın üzerinde yapılmış olan ilk çalışmada, Lynch vd. (1974), suyun hidrofobik mineral kazanımı üzerindeki etkisi ile kinetik parametreleri bir

modelde birleştirmeye çalışmışlardır.

$$RRV = (k_f + k_{f_w}) M_f + (k_s + k_{s_w}) M_s \quad (16)$$

Hidrofobik mineral kazanımı için tanımlanmış oldukları bu modelde  $k_f$  ve  $k_g$  sırasıyla hızlı ve yavaş yüzen malzemeler için kinetik parametrelerdir. Bu parametreler teorik olarak düşünülebilen minimum su kazanımına karşılık gelen değerlerdir.  $k_{f_w}$  ve  $k^{\wedge}$  su ile taşımın hızlı ve yavaş yüzen mineraller üzerine katkısını ifade eden parametreler olarak tanımlanmaktadır.  $M_f$  ve  $M_s$  hızlı ve yavaş yüzen malzeme miktarlarını ifade etmektedir. Buna göre, Lynch tarafından hidrofilik mineraller için tanımlanmış olan su ile taşımın yaklaşımına benzer olarak, su ile taşman ve gerçek flotasyonla kazanılan toplam malzemenin aşağıdaki eşitlikle tanımlanabileceğini belirtilmektedir.

$$RRW \wedge + \left( \frac{RRW}{MWAT} \right) S_i C F_i Y_i M_s \quad (17)$$

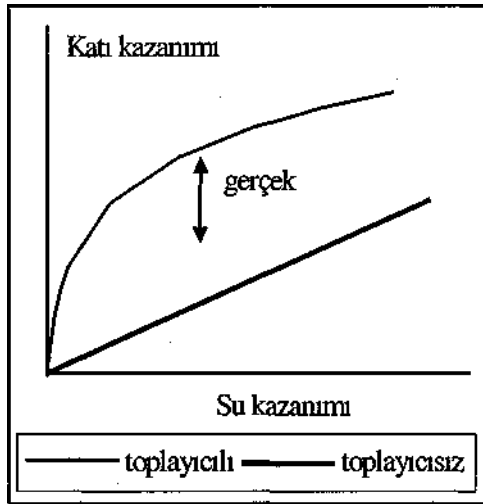
- $i$  ve  $g$  : sırasıyla hızlı ve yavaş yüzen malzemeler için kinetik parametreler,
- $k^{\wedge}$  ve  $k^{\wedge}$  :su ile taşımın hızlı ve yavaş yüzen mineraller üzerine katkısını ifade eden parametreler,
- $M_f$  ve  $M_s$  :hızlı ve yavaş yüzen malzeme miktarları,
- RRW :su kazanım hızı,
- MWAT :palptaki su miktarı,
- $X_i$  ve  $Y_i$  : boyutlu malzeme için hızlı ve yavaş yüzenlerin oranı,

Daha sonra Thorne vd. (1976), bu modelden yola çıkarak su ile taşımın parametrelerini hesaplayacak bir yöntem geliştirmişlerdir.

Aynı koşulda toplayıcı ve toplayıcısız yapılan iki flotasyon deneyindeki farktan yola çıkarak,



Trahar vd. (1976), Trahar (1981), tarafından geliştirilmiş olan yaklaşım, hidrofobik minerallerin su ile taşımını açıklamak amacıyla kullanılan diğer önemli bir yaklaşımdır. Trahar, toplayıcı bulunmayan, sadece köpürtücü kullanılarak yapılan flotasyon deneyleri ile konsantreye gelecek hidrofobik tanelerin su ile kazanıldığını öne sürmüştür ve aynı malzeme için toplayıcı kullanılarak yapılan flotasyon sonucu elde edilen konsantre miktarlarından bu değerlerin çıkarılması ile gerçek flotasyon değerlerinin hesaplanabileceğini ileri sürmüştür. Bu yöntem Subrahmanyam vd. (1988) tarafından da kullanılmıştır. Bu tanımlamanın şematik gösterimi Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Toplayıcı ve toplayıcı olmayan flotasyon testleri kullanılarak su ile taşımının belirlenmesi

Warren (1985) tarafından hidrofobik tanelerin su ile taşımını açıklamak için geliştirilen yöntemde yine kendisi tarafından hidrofobik taneler için oluşturulan yaklaşımdan yola çıkılmıştır. Bu çalışmada flotasyon deney koşulları değiştirilerek sabit flotasyon süresi sonunda kazanılan su miktarı ve katı miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Her bir örnek için palp seviyesi, köpük uzaklaştırma hızı, köpük alma derinliği, köpük oluşumu, için

gerekli yüzey alanı ve hücre ağız yüksekliği gibi parametreler değiştirilerek bir seri flotasyon testi yapılmaktadır. Bu koşulların değiştirilmesi ile malzemenin hidrofobiklik derecesinin değişmediği varsayılmış ve bu nedenle sabit flotasyon süresi sonunda oluşan hidrofobik tane kazanımları arasındaki farklılığın su ile taşımından kaynaklanmış olduğu öne sürülmüştür. Bu yaklaşımda hidrofobik minerallerin su ile taşımını;

$$R_t = B_b + e_g R_w \quad (18)$$

$R^{\wedge}$  :su kazanımı

$R_h$  :gerçek flotasyonla ince hidrofobik mineral kazanımı

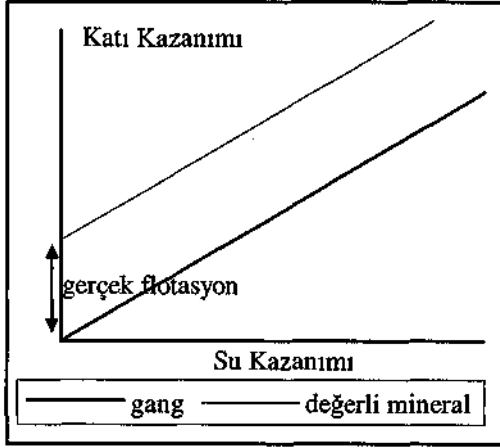
$R_j$  :toplam ince hidrofobik mineral kazanımı

$R_g$  :  $e_g R_w$  , su ile taşım

$e_g$  :su ile taşım derecesi (verilen tane boyutlu ve özgül ağırlık için sabit)

şeklinde ifade edilmektedir. Bu yaklaşımın en önemli dezavantajlarından birisi, flotasyon deneyleri için sabit bir zaman belirlenmesi ve bütün deneylerin bu sürede yapılmasıdır.

Bu yaklaşıma göre aynı malzeme için köpürtücü tipi ve dozajı gibi parametrelerle oynanarak sabit bir t zamanında su kazanımının değiştirilmesi sonucu kazanılan hidrofobik malzeme miktarındaki değişimin doğrudan su kazanımını gösterdiği ileri sürülmektedir. Bu, diğer bir ifade ile, flotasyon koşulları değiştirilerek sabit bir zamanda elde edilen su miktarı kazanılan katı ile doğrudan ilişkilidir ve bu da su kazanımı olarak ifade edilebilir anlamına gelmektedir. Bu olay şematik olarak Şekil 4'de verilmiştir. Orijinden geçen doğru hidrofobik malzemelerin su ile taşımını ifade etmektedir. Doğruların eğimi,  $e_g$ , su ile taşım derecesidir. Kesikli çizginin "Katı Kazanımı" eksenini kestiği nokta, t zaman sonunda hidrofobik tanelerin ne kadarının gerçek flotasyonla kazanıldığını ifade etmektedir.



Şekil 4. Flotasyon koşulları değiştirilerek su ile taşınımın belirlenmesi

Ersaym (1986), su ile hidrofobik tanelerin taşınımını için, sistemdeki derişimin zamanla değişiminin de modelde yer alması gerektiğini ileri sürmüş ve bu olguyu yansıtan bir yaklaşım önermiştir. Buna göre çok kısa bir flotasyon anında su ile taşınan hidrofobik mineral miktarı aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

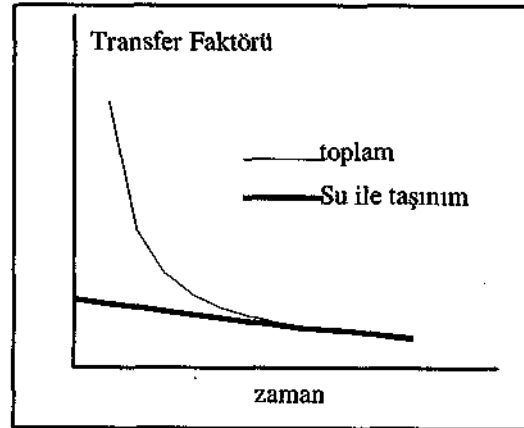
$$RDE_{t,\Delta t} = \frac{F_t + F_{(t+\Delta t)}}{2} (W_{(t+\Delta t)} - W_t) CF_t \quad (19)$$

$F_t, F_{(t+\Delta t)}$  : hücredeki hidrofobik mineralin t anında ve çok kısa bir süre sonraki derişimi,  
 $W_{t+\Delta t}, W_t$  : t+Δt ve t anındaki su kazanımı değerleri.

Ross (1990) tarafından farklı bir yaklaşım getirilmiştir. Ross uzun bir flotasyon işleminin sonunda flotasyon süresinin sonlarına doğru artık kazanılan malzemelerin gerçek flotasyonla değil sadece su ile taşınım mekanizmasıyla kazanılabileceğini ileri sürmektedir. Ross bu olayı ifade etmek amacıyla transfer faktörü olarak tanımladığı, sınıflanma fonksiyonuna benzeyen, konsantredeki (katı / sıvı)'nın palptaki (katı /

sıvı)'ya oramının, zamanla değişim eğrisine, eğrinin sonunda teğet çizerek belirlediği bir parametre kullanmaktadır. Bu eğrinin son kısımlarının artık gerçek flotasyonla kazanılan malzemeyi değil su ile taşınan malzemeyi ifade ettiğini kabul ederek buradan çizilen bir teğetin bütün flotasyon zamanı boyunca su ile taşınan malzeme için transfer faktörünü verdiğini ifade etmektedir. Bu tanımlama şematik olarak Şekil 5'de sunulmuştur.

Şekil 5 incelendiğinde toplam transfer faktörünün (ince çizgi), zamana (t) karşı çizilen eğrisi görülmektedir. Burada, Nflotasyon işleminin sonunda kazanılanların tümü su ile kazanılır yaklaşımı dikkate alınarak, bu eğriye uzun bir t süresinde çizilen teğet (kaim çizgi) su ile taşınan malzeme miktarını vermektedir.



Şekil 5. Ross tarafından önerilen yöntemle gerçek flotasyon ve su ile taşınım miktarlarının hesaplanması

Bu yöntem kullanılarak sadece tek bir yarı kesikli test yapıldığında su ile taşınımın belirlenebileceği ileri sürülmektedir. Burada su ve katı kazanımları, su ile taşınan malzemeler için transfer faktörünün  $X_t$ , hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ross tarafından tanımlanan su ile taşınan malzemeler için transfer faktörü;

$$X_t = \frac{E_t C_t}{W_t C_{m,t}} \quad (20)$$

yüzen ve su ile taşınan malzemelerin tümü için;

$$Y_t = \frac{R_t C_{w,t}}{W_t C_{m,t}}$$

olmaktadır. Burada,

$Y_t$  : yüzen ve su ile taşınan malzemeler için transfer faktörü,

$E_t$  : su ile taşınan katı miktarı,

$W_t$  : konsantreye gelen su miktarı,

$R_t$  : yüzen ve su ile kazanılan toplam katı miktarı,

$C_{w,t}, C_{m,t}$  : su ve katı derişimidir.

Mileva ve Nishkov (1992); küçük cam bilyacıklar kullanarak yapmış oldukları bir çalışmada konsantreye akan su ile köpükte çökelme eğiliminde olan tanelerin çökelme hızlarından yararlanılarak köpüğe bağlanmayan malzemeler için su ile taşınım olayını açıklayacak matematiksel ilişkiler ortaya koymaya çalışmışlardır. Fakat, bu çalışmada Reynolds sayısının kullanılması flotasyon gibi karmaşık sistemlerde önemli ölçüm hatalarına yol açabileceği için yaklaşımın ancak çok kontrollü özel sistemlerde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Su ile taşınım JKMRC (1993), tarafından hazırlanmış olan benzetişim paketinde ise herhangi bir kinetik model içine su ile taşınımın ilave edilmesiyle açıklanmış ve bu haliyle kullanılmaktadır. Buna göre su ile taşınım kazanılan kümülatif su miktarı, tane boyutu ve bir su ile taşınım faktörünün fonksiyonu olarak kümülatif bazda ifade edilmektedir. Bu benzetişim paketinde farklı kinetik model seçenekleri mevcuttur. Burada örnek olarak bu paket içinde kullanılmış olan tapalı akış modeli verilmektedir.

$$R = 1 - \exp(-KT_E) + R_w \exp(-E_T d_{pi}) \quad (22)$$

Burada;

$K$  : hız sabiti,

$TE$  : durma zamanı,

$ET$  : su ile taşınım faktörü,

$d_{pi}$  :  $i$ ' tanesinin tane boyutudur.

Bu modelin artıdan önceki birinci kısmı gerçek flotasyonla yüzerek gelen hidrofobik tanelerin kazammını tanımlamakta ikinci kısım ise su ile taşınan malzemelerin kazammını tanımlamaktadır. Bu yaklaşım tane boyutunun doğrudan model içine konulması nedeniyle önem taşımaktadır.

Gülsoy (1995) hidrofilik minerallerin su ile taşınımı için önerdiği modelin bir kinetik modele ilave edilerek hidrofilik mineraller için de kullanılabileceğini önermektedir. Bu amaçla su ile taşınım faktörü ( $C_j$ )=1 kabul edilerek su ile taşınacak hidrofobik malzemeler için eşitlik 11'den  $R_{t+A}$  değerleri bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak kümülatif  $Re$  değerleri hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda, bir flotasyon sistemi için sonsuz zamanda kazanılacak malzeme miktarı sistemde su ile taşınım varsa mutlaka %100'e ulaşacaktır, varsayımını yaparak, birinci dereceden bir kinetik modelin aşağıdaki gibi ifade edilmesi ile su ile taşınım da içinde yer alacağı bir toplam kazanım modeli ^ kurulabileceği önerilmektedir.

$$R_t = R_w \exp(-fe) + (1 - R_w) R_e \quad (23)$$

$R_t$  : toplam katı kazanımı

$Re$  : su ile taşınım

$R_{oo}$  : sonsuz zamandaki kazanım

$T$  : süre

$K$  : flotasyon sabiti

Bu modelden hesaplanan değerler ve kesikli flotasyon testinden ölçülen veriler kullanılarak bir regresyon programı yardımıyla  $R_e$ 'nin alabileceği değer ve böylece model aracılığıyla hidrofobik mineraller için su ile taşınım değerlerinin bulunabileceği ifade edilmektedir.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Deney Numuneleri ve Deneysel Yöntem

Test koşullarının mümkün olduğu kadar sıkı kontrol edilebilmesi ve numuneden kaynaklanabilecek hataları minimize etmek amacıyla deneylerde sadece konsantre pirit kullanılmıştır. Numune Etibank Küre Bakirli Pirit İşletmesi'nden konsantre pirit olarak temin edilmiştir. Pirit konsantresi 90 mikronluk elekten elenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan numunenin genel bileşenleri Çizelge 1'de ve boyut dağılımı ise Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 1. Test Numunesi Genel Bileşenleri

Bileşen	%
Fe	%42,8
S	%48,91
SiO <sub>2</sub>	% 6,95
Cu	% 0,39

Çizelge 2. Test Numunesi Boyut Dağılımı

Fraksiyon (jtim)	%
+63	18,26
-63+32	34,26
-32+20	17,55
-20+11	14,73
-11	15,20
Toplam	100,00

Deneysel hücre içine yerleştirilmiş otomatik palp seviye kontrol, hava akış hızı ölçme ve düzenli konsantre toplama sistemleri kullanılarak deney koşulları kontrol altında tutulmuştur. Hücrelere, palp seviyesi kontrol sınırlarının altına düştüğünde flotasyon hücresi içine eşdeğer köpürtücü içeren aynı pH değerindeki su otomatik olarak beslenmiştir. Her deneyde kinetik testlerdeki gibi 8 farklı zaman aralığında yüzen ürünler ayrı ayrı toplanarak her bir zaman aralığı için toplanan yaş ve kuru konsantre ağırlıkları belirlenmiş ve konsantreye gelen su miktarları

hesaplanmıştır. Deneyler aynı koşullarda 5'er kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin ortalamaları ile alınarak test verisi olarak kullanılmıştır. Deneyler arasındaki tekrarlanabilirlik standart sapmalara bakılarak değerlendirilmiş ve sonuçların yüksek tekrarlanabilirlik verdiği görülmüştür. Her zaman aralığı için alınan konsantreler tane boyutu analizine tabi tutulmuş ve fraksiyonel bazdaki kazanımlar hesaplanmıştır. Deney koşulları Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 3. Test Koşulları

Test Makinası	Denver
Hücre hacmi (İt)	2
pH	5,5
Pervane hızı, (koş., flot, rpm)	1700,1500
Toplayıcı tipi	KAX
Toplayıcı dozajı (g/t)	70
Köpürtücü tipi	PPG
Köpürtücü dozajı (g/t)	20, 50, 100
Katı derişimi (%)	35
Hidrofobik mineral içeriği (%)	100
Hava akış hızı (l/d)	6

KAX:potasyum amil ksantat, PPG: Polipropilenglikol

### 4.2. Deney Sonuçları

Deneysel veriler Çizelge 4'de verilmektedir. Su kazanımı değerleri hücre başlangıç su hacminin yüzdesi olarak her bir adımda kümülatif kazanım şeklinde hesaplanmıştır. Sonuçlar bir kütle denkliği programı kullanılarak veriler dengeye getirildikten sonra hesaplanmıştır.

Deneysel olarak elde edilen veriler için Warren (1975), Ross (1990) ve Gülsoy (1995) tarafından önerilen su ile taşınım modelleri kullanılarak su ile taşınım değerleri hesaplanmıştır.

## 5. SONUÇLARIN DEĞELENDİRİLMESİ

Deneysel çalışmada kolaylık sağlaması amacıyla sadece hidrofobik mineral kullanılmıştır. Kullanılan ürün bir flotasyon konsantresi olarak daha önce yüzmüş olması

Çizelge 4. Deneyleerde Elde Edilen Fraksiyonel Bazda Kümülatif Su ve Katı Kazanımı Değerleri

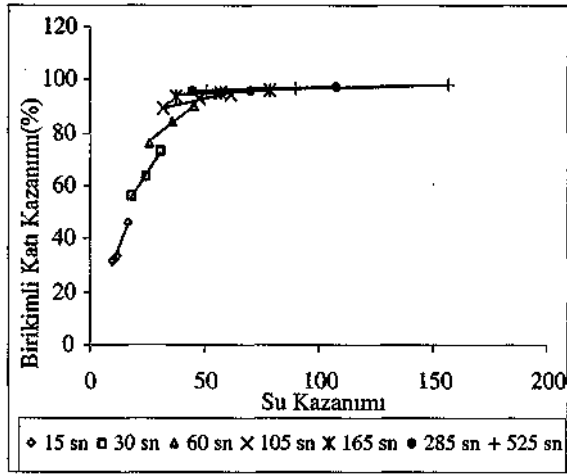
Zaman sn	Su %	% Birikimli Katı Kazanımı				
		+63 <i>fin</i>	-63+32/ım	-32+20/xm	-20+1 ljum	-11jum
		100 g/t köpürtücü				
15	17,09	39,28	44,86	45,94	39,48	36,58
30	30,54	57,95	72,43	73,25	65,54	60,09
60	45,55	77,74	90,79	89,95	81,75	74,96
105	61,53	89,99	96,26	94,69	88,55	81,78
165	78,51	93,42	97,67	96,13	91,36	84,87
285	107,80	95,24	98,37	97,07	93,70	87,92
525	157,26	96,23	98,81	97,80	95,63	90,70
		50 g/t köpürtücü				
15	12,30	29,74	34,24	33,36	31,87	28,94
30	24,91	53,81	63,02	63,42	57,62	51,76
60	36,48	72,82	84,27	84,31	78,29	70,93
105	47,40	87,94	94,11	93,19	87,19	79,39
165	57,03	92,54	96,47	95,25	90,27	82,45
285	69,89	94,58	97,58	96,22	92,31	84,85
525	89,66	95,58	98,27	96,92	93,67	86,71
		20 g/t köpürtücü				
15	9,66	31,94	31,52	31,47	25,30	22,69
30	18,66	53,23	56,39	56,43	47,85	42,46
60	26,12	71,46	76,62	76,38	67,29	59,31
105	32,35	82,49	89,91	89,03	81,12	71,89
165	37,84	89,47	95,45	93,96	87,32	77,73
285	44,31	93,63	97,05	95,58	90,16	80,66
525	51,04	95,93	97,70	96,09	91,69	82,28

nedeniyle herhangi bir yüzebilirlik sorunu çıkarmaması için tercih edilmiştir. Bu tür bir deneysel tasarım hesaplamalarda ve ölçümlerde oldukça kolaylık sağlamaktadır. Numune beklemiş olmasına rağmen yapılan ön deneyler numunenin çok hızlı bir şekilde yüzdüğünü ve oksitlenmenin yüzebilirlik sorunu oluşturmadığını ortaya koymuştur.

Su ile taşınım özellikle pirit gibi ağır bir mineral için çok ince boyutlarda etkili olacağından hesaplamalarda -20+11 um ve -11 um fraksiyonları kullanılmıştır. İri boyutlarda yapılan hesaplamalarda su ile taşınım genel olarak sıfıra yaklaşmaktadır. Warren (1975) tarafından önerilen yaklaşımda

farklı deney koşullarında herhangi bir flotasyon zamanı için su kazanımına karşı çizilen katı kazanımı doğrusunun eğimi su ile taşınım derecesi ( $e_g$ ) olarak ifade edilmektedir (Eşitlik 18). Yapılan deneysel çalışmada 100, 50 ve 20 gr/t köpürtücü kullanılarak deneyler tekrarlandığı için bu çalışmada elde edilmiş olan verilerin Warren'm yaklaşımına uygun olarak elde edilmiş olduğu kabul edilmiş ve kinetik bazlı veriler toplanması nedeniyle de her bir zaman aralığı için Warren tarafından önerilen katı kazanımına karşı su kazanımı grafiği çizilebilmiştir. Bu şekilde çizilen bütün grafikler Şekil 6'da verilmektedir. Bu grafiklerde her bir zaman aralığı için çizilen doğrunun eğimi su ile taşınım derecesini ve y-

eksenini kestiği nokta ise flotasyonla gerçek kazanım miktarını vermektedir.

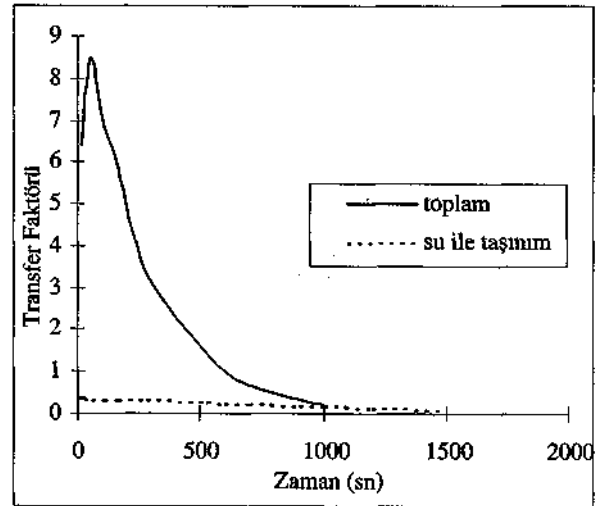


Şekil 6. Warren yaklaşımı kullanılarak farklı flotasyon zamanları için çizilen katı kazanımı su kazanımı grafikleri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi her bir zaman aralığı için farklı eğimler elde edilmiştir. Bu durumda Warren tarafından önerilen yaklaşım kullanılarak bulunan su ile taşınım değerleri seçilen flotasyon süresine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle bu yaklaşımın uygulanması için belirlenecek olan flotasyon süresi çok önemlidir.

Yine aynı veriler için Ross (1990) tarafından önerilen model (Eşitlik 20 ve 21) kullanılarak su ile taşınım değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla Ross'un önerdiği toplam transfer faktörü (Eşitlik 20) değerleri flotasyon zamanına göre hesaplanmış ve zamana karşı grafiği çizilmiştir (Şekil 7, düz çizgi). Daha sonra toplam transfer faktörü eğrisine çok uzun flotasyon süresi sonunda bir teğet çizilmiş ve bunun da su ile taşınım malzeme için transfer faktörü olduğu kabul edilmiştir (Şekil 7, kesikli çizgi). Bu doğru kullanılarak da Eşitlik 21'den su ile taşınım değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilmiş olan



Şekil 7. Ross tarafından önerilen toplam transfer faktörü ve su ile taşınım malzemeler için transfer faktörü grafikleri

deneysel veriler Ross'un yaklaşımına uyarlandığında özellikle flotasyonun başlangıç anlarında tüm veriler için beklenen eğilime (Şekil 5) ters yönde bir davranım elde edilmiş ve bir maksimum oluşmuştur. Daha sonra zamana bağlı olarak beklenen eğilim elde edilmiştir. Değerlendirmeler de eğrinin bu son kısmı kullanılarak yapılmıştır.

Üçüncü olarak Gülsoy (1995) tarafından önerilen Eşitlik 11'de  $Q = 1$  alınarak aynı veriler için her bir zaman aralığında ön su ile taşınım değerleri hesaplanmıştır.  $Q$ 'nin gerçekte 1 olması mümkün değildir. Bu değer ancak çok ince ve hafif taneler için 1'e yaklaşabilir. Burada bu değer su ile taşınım eğiliminin belirlenmesi ve daha sonra su ile taşınım hesaplamak amacıyla kullanılacak model için ham verilerin oluşturulması nedeniyle 1 kabul edilmiştir. Bu hesaplardan elde edilen veriler kullanılarak, gerçek flotasyonla kazanımı tanımlamak amacıyla önerilen bir model (Eşitlik 23) yardımıyla su ile taşınım değerleri hesaplanmıştır.

## 6. SONUÇ

Warren tarafından önerilen yaklaşım kullanıldığında herhangi bir flotasyon süresi seçilmemiş ve her bir flotasyon süresi için ayrı su ile taşınım ve gerçek taşınım ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde bu yaklaşımdan elde edilen su ile taşınım miktarı flotasyon zamanı kısa tutulursa büyük olmakta, flotasyon süresi uzadıkça su ile taşınım miktarının da azaldığı görülmektedir. Bu durumun fiziksel olarak tanımlanması mümkün değildir. Bu nedenle su ile taşınımı hesaplamak amacıyla hangi flotasyon süresinin kullanılacağı açık değildir.

Ross'un modelinde ise çizilen toplam taşınım faktörü eğrisinin şekli nedeniyle, su ile taşınım faktörünü hesaplamak amacıyla bu eğriye çizilecek teğetin hangi noktadan çizileceği sonuçların hesaplanması açısından çok büyük önem taşımaktadır. Eğer çizilen

teğet toplam taşınım faktörünün eğimine bağlı olarak yeterince uzun bir flotasyon süresinde çizilmezse, su ile taşınım değerleri çok yüksek olmakta ve bu durumun da fiziksel olarak açıklanması mümkün olmamaktadır.

Gülsoy tarafından önerilen yaklaşımda ise hesaplamalar yarı ampirik bazlı bir model yardımıyla açıklanmaktadır. Her ne kadar olayın doğası bu yaklaşımda fiziksel olarak tanımlanmış olsa da, nihai hesaplamaların bir kinetik modele bağlanarak yapılması olayın ampirik yanını ortaya koymaktadır.

Bu üç yaklaşım için de hesaplanmış olan su ile taşınım değerleri Çizelge 5'de verilmektedir.

Görüldüğü gibi üç yaklaşımla aynı veriler için farklı değerler elde edilmiştir. Özellikle hidrofobik mineraller için kesin olarak ölçümü mümkün olmayan su ile taşınımın belirlenmesi

Çizelge 5. Üç Farklı Yaklaşım Kullanılarak Farklı Köpürtücü Dozajları için (100,50 ve 20 gr/t) Hesaplanan Su ile Taşınım Değerleri

Zaman (sn)	% Su ile Taşınım (Birikim i)								
	Warren (1975)			Ross (1990)			Gülsoy (1995)		
	100 g/t	50 g/t	20 g/t	100 g/t	50 g/t	20 g/t	100 g/t	50 g/t	20 g/t
-20+1 \\m									
15	31,94	22,99	18,06	0,08	0,04	0,01	1,53	1,16	<b>1,11</b>
30	45,54	37,15	27,83	0,12	0,07	0,02	2,22	1,92	1,85
60	34,22	27,41	19,62	0,15	0,08	0,03	2,64	2,32	2,25
105	15,77	12,15	8,29	0,18	0,10	0,03	2,88	2,51	2,45
165	7,72	5,61	3,72	0,21	0,11	0,03	3,06	2,63	2,55
285	5,85	3,79	2,41	0,26	0,12	0,03	3,29	2,75	2,64
525	5,68	3,24	1,84	0,33	0,14	0,04	3,56	2,90	2,72
-11/im									
15	31,37	22,58	17,73	0,82	0,74	0,44	3,07	2,43	2,30
30	45,33	36,97	27,70	1,28	1,31	0,76	4,55	4,12	3,91
60	37,01	29,64	21,22	1,68	1,70	0,97	5,55	5,11	4,84
105	20,96	16,15	11,02	2,04	2,01	1,11	6,26	5,69	5,38
165	13,68	9,93	6,59	2,40	2,27	1,21	6,85	6,09	5,73
285	12,05	7,81	4,95	2,95	2,60	1,32	7,68	6,55	6,07
525	12,12	6,91	3,93	3,77	3,08	1,40	8,76	7,18	6,39

(Wark (1981) tarafından yapılmış olan, hidrofobik minerallerin su ile taşımının sisteme havadan hafif bir gaz verilerek yapılabileceği gibi bir görüşün ileri sürülmesi, olayın zorluğunu daha da çarpıcı hale getirmektedir, ancak sağlam teorik temellere oturtularak oluşturulacak modelin deneysel verilere uyumu sınılandıktan sonra mümkün olabilir.

Model yapılarındaki bu farklılıklara rağmen flotasyonda su kazanımının hem tenor hem de verim üzerinde önemli rol oynadığı, bu nedenle tenor ve verimin kontrol edilebilmesi için flotasyonda su kazanımı üzerinde etkili olan parametrelerin kontrol edilmesiyle, su kazanımının kontrol altında tutulması gerekliliği gözden kaçırılmamalıdır.

Sonuç olarak, hidrofobik ve hidrofilik minerallerin flotasyonda su ile taşınmalarının açıklanması amacıyla geliştirilmiş olan bütün modeller, belli varsayımlar doğrultusunda geçerli olabilmektedirler. Bu nedenle, flotasyonda verim ve tenor değerlerinin daha etkili ve geniş sınırlar içinde kontrol edilebilmesi için, su ile taşımını tanımlayabilecek güvenilir modellerin oluşturulmasına ihtiyaç vardır.

Özellikle hidrofobik minerallerin su ile taşımının belirlenmesi ve kontrol edilmesi tesis bazında yapılacak ölçümler ve kurulacak ampirik modeller yardımıyla daha kesin ve doğru sonuçlar elde edilmesine imkan sağlayacak gibi görünmektedir.

Diğer taraftan su ile taşımının flotasyon sistemlerinde önlenmesi ve böylece kontrolün kolaylaştırılabilmesi için de çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Köpüğün su spreleriyle yıkanması da su ile taşımının etkisini azaltmak amacıyla önerilen önemli bir yaklaşımdır (Kaya, 1986; 1990). Ayrıca özel geliştirilmiş hücreler kullanılarak da su ile taşınan malzeme miktarında önemli ölçüde azalma sağlandığı

belirtilmektedir (Dell vd., 1972; 1981; Degner,1991).

## KAYNAKLAR

Bishop, J.P. ve White, M.E. 1976; A "Study of Partide Entrainment in Flotation Froths," Trans EİM, 85, C191-C194.

Dell, C. G, Bunyard, M.J., 1972; "Development of an Automatic Flotation Cell for Laboratory", Trans. Inst. Min. Metal., 81, C246-C248

Dell, C. C, Hall, G.A., 1981; "Leeds Open Tap Laboratory Cell", Trans. Inst. Min. Metal., 90, C174-C176

Denger, V.R, Person, P.L., 1991; "Leeds Column Performance Evaluation", Minerals Engineering, Vol.4, No.7-11, s.935-950.

Elzivir, A., G., Schubert, H. 1997; Proceedings of the XX IMPC-Aachen, 21-26 Sept. s.153-166

Engelbrecht, J.A., Woodburn, E.T., 1975; "The Effect of Froth Hight, Aeration Rate and Gas Precipitation on Flotation", J.S. Afr. Min. Mett., 76, s. 125-132.

Ersayin S., 1986; "Flotation Kinetics of Santiago Copper Ore", Doktora Tezi, Leeds Üniversitesi, İngiltere, s. 198-238.

Flint, L.R., 1973; "Factors Influencing the Flotation Cell Design", Miner. Sci. Eng, 5(3):232-241

Gülsoy, Ö.Y., 1995; "Hidrofobik ve Hidrofilik Mineral Flotasyonu Üzerine Su Kazanımının Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, s. 183

JKMRC, 1993; JKSimFloat Chapter 4. Benzetişim Programı Kullanım Kılavuzu, Version 1.0, Appendix İA.



- Johnson, N. W., Me Kee, D.J., Lynch, A.J., 1974; "Flotation Rates of Non-sulphide Minerals in Chalcopyrite Processes", *Trans. Am. Ins. Min. Metali. Pet. Eng.*, 256, 204226.
- Jowett, A., 1966; "Gangue Mineral Contamination of Froth", *Br. Chem. Engng.*, Vol.2 No.5, s, 330-333.
- Kaya, M. ve Laplante A.R., 1986; "Investigation of Batch and Continuous Flotation Kinetics in a Modified Denver Laboratory Cell", *Canadian Metallurgical Quarterly* Vol. 25, No. 1, s. 1-8
- Kaya, M. et al., 1990; "Froth Washing and Froth Vibration In Mechanical Flotation Machines", SEM Annual Meeting, Salt Lake City, Preprint Number 90-30, 11 s. (réf. Elzivir, 1997)
- Kirjavainen, V.M., 1989; "Application of a Probability Model for The Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation", *Int. J. Miner. Process.*, 27, s. 63-74.
- Kirjavainen, V.M. ve Laapas, H.R., 1988; "A Study of Entrainment Mechanism in Flotation", XVI International Mineral Processing Congress, Stockholm, Sweden, June 5-10, Part B. Forssberg K.S.E. ed. (Amsterdam, etc: Elsevier), s. 665-677.
- Kirjavainen, V.M., 1996; "Review and Analysis of Factors Controlling the Mechanical Flotation of Gangue Minerals", *Int. J. Miner. Process.*, 46, s. 21-34.
- Laplante, A.R., Kaya, M., Smith, H.W., 1989; "The Effect of Froth on Flotation Kinetics-A Mass Transfer Approach", *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, Vol. 5, s. 147-168.
- Lynch, A. J., Johnson, N.W., McKee, D. J., Thorne, 1974; "The Behaviour of Minerals in Sulphide Flotation Processes, with Reference to Simulation and Control", *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, April, s. 349-360.
- Lynch, A. J., Johnson, N.W., Manlaping, E.V., Thorne, C.G., 1981; "Mineral and Coal Flotation Circuits," Their Simulation And Control., *Developments in Mineral Processing*, Ed. D.W. Fuerstenau, New York, Elsevier Co.
- Mileva, E. D. Ve Nishkov, I.M., 1992; "Entrainment of Fine Hydrophilic Particles by Granulometric Separation," *Int. J. Miner. Process.*, 36, s. 125-136
- Ross, V. Ve Van Devanter J.S.J., 1988; "Mass Transport in Flotation Column Froths," In *Column Flotation '88, Proceedings of an International Symposium SME-AIME Annual Meeting*, Phoenix, Arizona Sastry K.V.S. éd., s. 129-139.
- Ross, V.E., 1990; "Flotation and Entrainment of Particles During Batch Flotation Tests", *Minerals Engng.*, Vol.3, No. 3/4, s. 254-256.
- Ross, V.E., 1991; "Comparison of Methods for Evaluation of True Flotation and Entrainment", *Trans. IMM* September, 100. C121-C126
- Smith, P.G. ve Warren, L.J., 1989, "Entrainment of Particles into Flotation Froths., *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*", *Int. J. Miner. Process.* Vol.5, s.123-145.
- Subrahmanyam, T.V. ve Forsberg, E., 1988a; "Froth Stability Particle Entrainment and Drainage in Flotation", A Review. *Int. J. Miner Process.*, 23, s.33-53.
- Subrahmanyam, T.V. ve Forsberg, E., 1988; "Froth Characteristics and Grade-Recovery Relationships in The Flotation of Lead-Zinc and Copper Ores", *Minerals Engng.*, 1. No. 1 s. 41-42.

Subrahmanyam, T.V. ve Forssberg, E., 1988b; "Frother Performance in Flotation of Copper and Lead-Zinc Ores", Trans IMM September, 97, s. C134-C142

Thome, G.C., Manlaping, E.V, Hall, J.S ve Lynch, A.J. 1976; "Modelling of Industrial Flotation Circuits", In: M.C. Fuerstenau (Editor), Flotation A.M. Gaudin Memorial Vol:2, s. 725-752

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

Trahar, W.J. ve Warren, L.J., 1976; "The Flotability of Very Fine Particles- A Review", Int. J. Miner. Process., s. 103-131.

Tuteja, R.K., 1995; Spottiswood, D.J.; Misra, V.N. "Recent Progress in the Understanding of Column Flotation-A Review", The AusEVIM Proceedings, No.2, s. 25-31

Waksmundzki, A., Neczaj-Hruzewicz, J. ve Planik, M., 1972; "Mechanism of Carry Over of Gangue Slimes During Flotation of Sulphure Ore", Trans. Inst. Min. Metali, C249-C251

Wark, I.W., 1981; "The Entrainment Difficulty in Rotation Experiments", Colloids Surface, 2, s.193-194

Warren, L.J., 1985; "Determination of the Contributions of True Flotation and Entrainment in Batch Flotation Tests", Int J. Miner. Process., 14, s. 33-34