

## **FLOTASYONDA SU KAZANIMI-KATI KAZANIMI İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM**

### **A NEW APPROACH TO WATER -SOLIDS RECOVERY RELATIONSHIP IN FLOTATION**

Ö. Y. GÜLSOY

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

S. ERSAYIN

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

S. SİYAHAN

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

**ÖZET:** Literatürde su ve katı kazanımlar arasındaki ilişkiyi modellemek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktaysa da, bunlar özellikle hidrofobik tanelerin davranışlarını tanımlamakta yetersiz kalmaktadır. Bunun başlıca sebebi prosesin oldukça karmaşık olmasıdır. Bu çalışmada bu probleme sağlıklı mekanistik bir yaklaşımın oluşturulabilmesi için bir taban teşkil etmek hedeflenmiştir. Bu amaçla flotasyon koşullarının sıkıca kontrol edildiği 5 tekrarlı deney yapılmış ve elde edilen verimler arasındaki sapmalara su kazanımının neden olduğu varsayılmıştır. Deneysel sonuçlardan yola çıkılarak yeni bir yaklaşım için temel nasıl oluşturulması gerektiği tartışılmıştır.

**ABSTRACT:** Although, there exists several approaches to model the relationship between water and solids recovery in flotation, they are particularly unsuccessful in defining the behavior of hydrophobic particles. This is mainly due to the complex nature of the process. In this study, an attempt is made in order to develop the basis for a sound mechanistic approach to the problem. For this purpose, five flotation tests were repeated under strictly controlled conditions, the deviations in the recovery of hydrophobic particles are assumed to be due to the water recoveries. By using the experimental data the basis for a new approach is discussed.

### **1. GİRİŞ**

Rotasyonda tanelerin konsantreye gelmesi temel olarak, hava kabarcıklarına bağlanma ve konsantreye gelen su içinde istem dışı taşınma (entrainment) olmak üzere iki mekanizma ile gerçekleşmektedir. Hidrofobik malzemeler için bu iki mekanizma birlikte geçerli iken, hidrofilik malzemeler için sadece su ile kazanım söz konusu olmaktadır. Flotasyonda malzemenin hangi mekanizma ile ne kadar kazanıldığı belirlenmesi gerek tenor gerekse de verim tahminine yönelik bir model oluşturmak için önemli olmaktadır. Ayrıca mekanizmaların anlaşılması flotasyonda verim vetenörün kontrolü açısından da yararlı olacaktır.

Özellikle ince tanelerin konsantreye gelmesinde önemli rol oynayan su ile taşınım etkisi, ilk olarak

Gaudin ve arkadaşları (1931) tarafından, daha sonra da Jowett (1966), Johnson ve arkadaşları (1974) tarafından incelenmiştir. Jowett, su ile taşınım mekanizmasının önemini belirtmiş ve konsantredeki serbest gang derişimi ile palp içindeki serbest gang derişimi arasında bir ilişki olduğunu ve bununda sınıflanma fonksiyonu (CF<sub>f</sub>) adı verilen bir fonksiyon ile tanımlanabileceğini belirtmişlerdir. Johnson ve arkadaşları (1974), endüstriyel ölçekte çalışan bir makina için su ile kazanımın, deneysel çalışmalara bağlı olarak su kazanım hızı ve sınıflanma fonksiyonunun kullanılarak hesaplanabileceği bir model önermiştir. Daha sonra Bisshop ve White (1976) sınıflanma fonksiyonunu durma zamanına bağlayacak bir model oluşturmuşlardır.

Trahar (1981) tarafından yapılan, toplayıcı - köpürtücü bulunan bir flotasyon sistemi ile sadece

köptrttttt bulunan bir sistemde verimler arasındaki farkın su ile kazanımı ifade ettiği şeklindeki yaklaşım, Warren (1985) tarafından yapılan, çeşitli flotasyon parametreleri (köptrttttt miktarı, hava hızı vb) değiştirilerek elde edilen su kazanımlarına bağlı katı kazanımı ilişkisinin ortaya konduğu yaklaşım ve Ross (1990) tarafından yapılan, su ile kazanımın palp köpük arasında tanımladığı özel bir transfer faktörüne bağlanması ile açıklanmaya çalışılan ve kesikli flotasyon deneylerinde uzun flotasyon süresinin sonlarına doğru alınan köpüğün yalnızca su ile taşınma mekanizmasıyla gelebileceği varsayımına dayandırılan yaklaşım, su ile taşınma mekanizmalarını açıklamayı amaçlayan diğer önemli çalışmalardır.

Bütün bu yaklaşımların ortak özelliği su ile kazanılan hidrofobik katı arasındaki ilişkiyi büyük ölçüde doğrusal kabul etmeleridir. Böyle bir kabul flotasyon süresince palptaki konsantrasyonu çok fazla değişmeyen hidrofilik tanelere için doğru kabul edilebilirdi, konsantrasyonu çok hızlı değişen hidrofobik taneler için geçerliliği tartışma konusudur.

Bu noktadan yola çıkılarak, bu çalışmada, aynı koşullarda yapılan deney tekrarı ile elde edilen sonuçlardaki farklardan yararlanılarak, su ve hidrofobik katı kazanımı arasında bir ilişki belirlemek ve mekanistik bir modelin temelini oluşturmak amaçlanmıştır. Konsantre pirit kullanılarak yapılan deneylerle kinetik veriler toplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak, su ve hidrofobik katı kazanımı arasında bir ilişkinin nasıl oluşturulabileceği araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deney Düzenegi

Deneyler arası sapmanın büyük ölçüde su kazanımına dayandırılabilmesi için flotasyon deneylerindeki koşulların çok iyi kontrol edilip sabit tutulması amacıyla plexiglastan yapılmış özel bir flotasyon hücresi oluşturulmuştur. Denver flotasyon makinasına yerleştirilen hücrede otomatik palp seviye kontrol, hava miktarı ölçme ve kontrol ve düzenli konsantre toplama sistemleri yer almıştır.

Palp seviyesi kontrolü hücreye daldırılan içi su dolu bir cam çubuğun ucuna bağlı lastik balonun manometre görevi görerek, palp seviyesindeki iniş ve çıkışlara paralel olarak cam çubuktaki su seviyesinin yükselmesi alçalması temeline dayalı bir düzenekle sağlanmıştır. Optik bir sistem seviyeyi

sürekli takip etmekte ve seviye düştüğünde bir pompayı çalıştırarak başlangıç seviyesine ulaşmasını sağlamaktadır.

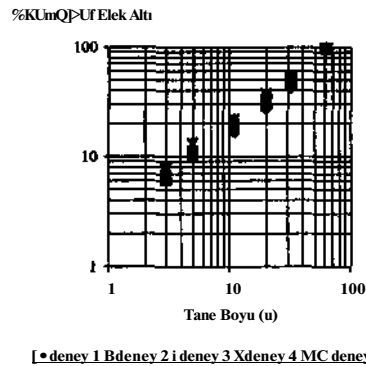
Sisteme hava girişinin sabit tutulabilmesi için hava girişi bir kompresör kullanılarak yapılmıştır. Giriş borusu bir akış ölçere bağlanmış ve hücreye beslenen havanın sürekli sabit tutulması temin edilmiştir.

Selül üzerinden köpük sıyırma işleminin sabit koşullar altında yapılmasını sağlayabilmek amacıyla iki adet köpük sıyırma elemanı kullanılmıştır.

### 2.2. Malzeme

Deneylerde Etibank Küre Bakirli Pirit İşletmelerinden temin edilen pirit konsantresi kullanılmıştır. Tesisten elde edilen pirit konsantresi 90 um luk elekten elendikten sonra -90 um fraksiyonu bölünerek flotasyon deney numuneleri oluşturulmuştur. -90 um malzemeden alınan örnekler kral suyunda çözülerek analiz edilmiş ve % 3-4 kadar çözülmeyen malzeme içerdiği belirlenmiştir.

Malzemenin boyut dağılımı Industrial D tipi Coulter Counter cihazı ile belirlenmiştir. Bu cihazla yapılan ön çalışmalar uygun elektrolit kullanımı, uygun prob seçimi ve yeterli kaştırma koşullarında pirit için tane boyu analizi belirlenebileceğini göstermiştir. Cihazın tane boyu analizlerinde kullanılabilirliği aynı numuneler ile yapılan dekantasyon testleri ile kontrol edilmiştir. Flotasyon beslemesi olarak kullanılan malzemelerin elek analizleri Şekil 1'de verilmiştir.



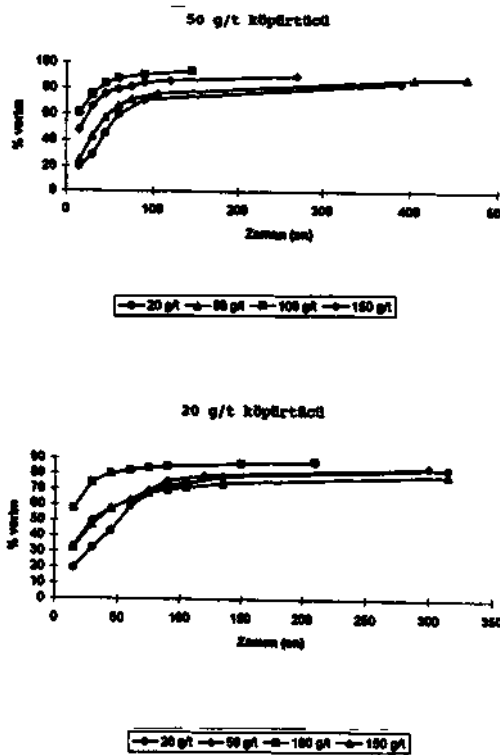
Şekil 1. Flotasyon Beslemelerinin Boyut Dağılımı

### 2.3. Deney Koşulları

Yukarıda belirtilen amaca uygun deneysel koşulları belirlemek amacıyla bir dizi ön deney yapılmıştır. Sabit katı derişimi, pH ve hava miktarında yapılan bu ön deneylerde köpürtücü ve toplayıcı dosajlarının flotasyon verimi üzerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2 de sunulmaktadır.

Yapılan bu ön deneylerden yola çıkılarak belirlenen flotasyon koşulları Çizelge 1 de sunulmaktadır.

Ortama sabit hacimde  $H_2SO_4$  ilavesi yapılarak ortam pH değeri hafif asidik yapılmıştır. Palp seviyesini sabit tutmak amacı ile rezervuardan beslenen su da flotasyon palpına eşdeğer oranda köpürtücü ve  $H_2SO_4$  içermektedir.



Şekil 2. Uygun toplayıcı ve köpürtücü dozajlarını belirlemek için yapılan ön deney sonuçları.

Çizelge 1. Flotasyon Deney Koşulları

Ağırlıkça % Katı Miktar	35
Palp Hacmi	2 lt
Toplayıcı (KAX) dosajı	70gr/t
Köpürtücü (PPGE)	100gr/t
PH	6.5-6.7
Rotor Dönüş Hızı (RPM)	
Koşullandırma	1700 rpm
Flotasyon	1500 rpm
Koşullandırma Süresi	10 dakika
Hava Akış Hızı	6.5 lt/dak.

Flotasyon deneylerinde, toplayıcı ilavesi yapıldığında rotor devri 1700 rpm olarak ayarlanmış bu koşulda 8 dk koşullandırma yapıldıktan sonra köpürtücü ilavesi yapılarak rotor devri 1500 rpm ye ayarlanmış ve 2 dakika bu şekilde koşullandırma işlemi devam etmiştir. Koşullandırma sonrasında hava açılarak köpük alma işlemine başlanmıştır.

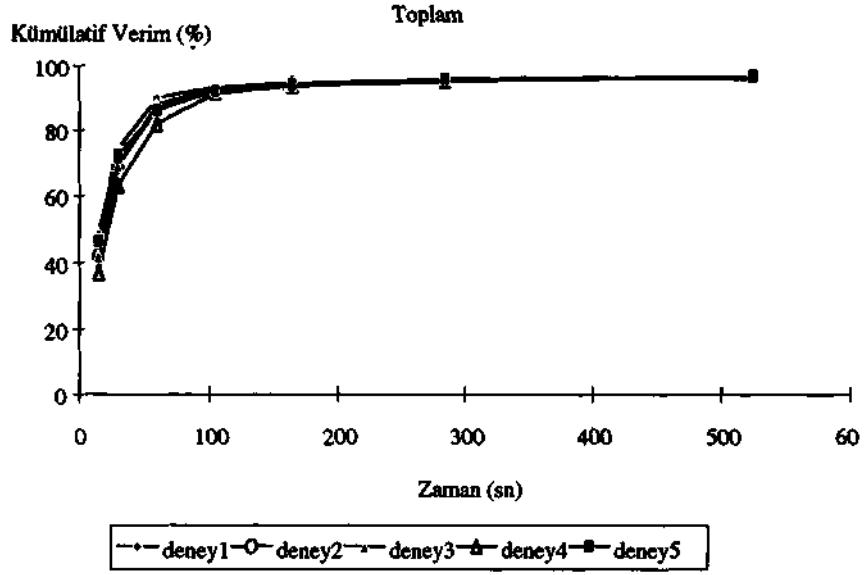
Köpük başlama-15, 15-30, 30-60, 60-105, 105-165, 165-285 ve 285-525 sn aralıklarında aynı kablara toplandıktan sonra her bir konsantrenin yaş ve kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Aradaki farkın su kazanımı olduğu kabul edilmiştir. Benzer şekilde artık içinde tartım yapılarak yaş ve kuru ağırlık belirlenmiştir.

Konsantrelerin ve artığın tane boyu dağılımları Coulter Counter Industrial D modeli tane boyu analiz cihazı kullanılarak saptanmıştır.

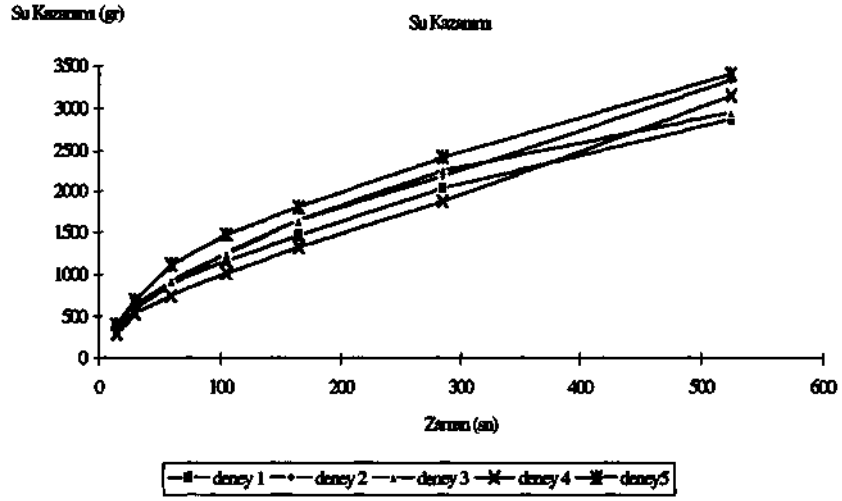
Elde edilen besleme, konsantreler ve artığın boyut dağılımları bir kütle denkleği programı kullanılarak kütle denkleği verecek şekilde düzeltilmiştir. Ölçülen ve düzeltilen değerler arasında büyük sapmalar gözlenmemiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

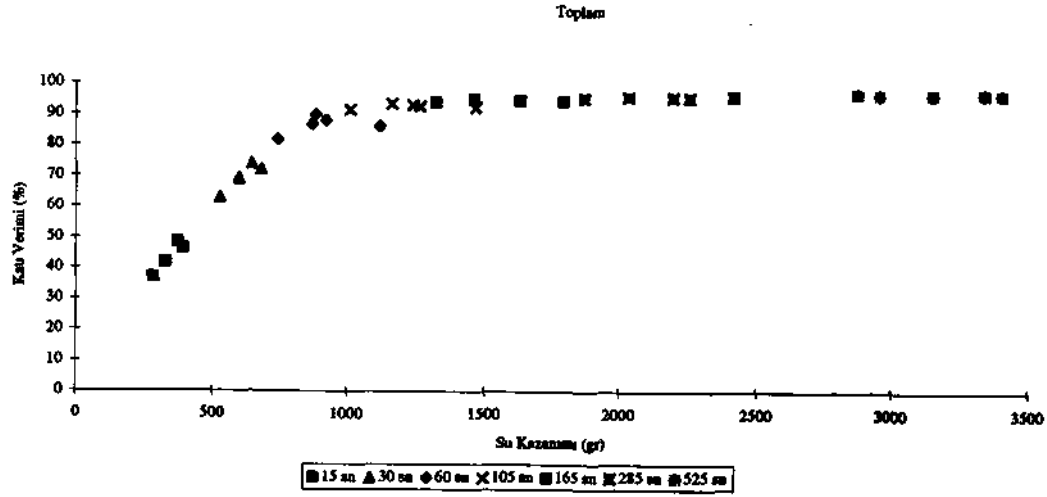
Toplam katı veriminin zamanla değişimi Şekil 3. de ve su veriminin zamanla değişimi ise Şekil 4. de verilmiştir. Toplam katı kazanımı ile su kazanımı arasındaki ilişkide Şekil 5. de sunulmaktadır. Büyük ölçüde su kazanımının neden olduğuna inanılan sapmaların bir göstergesi olarak toplam katı ve her bir boyut fraksiyonunun verimlerinin her bir zaman aralığı için aritmetik ortalamaları standart sapmaları hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 2. de sunulmuştur.



Şekil 3. Beş deneyde elde edilen kümülatif katı kazanımları.



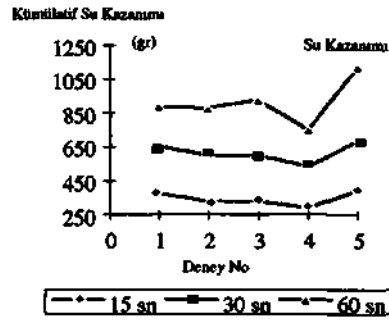
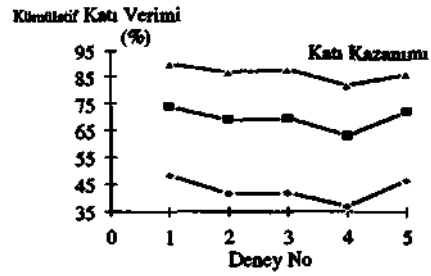
Şekil 4. Beş deneyde elde edilen kümülatif su kazanımları.



Şekil 5. Kümülatif bazda toplam su kazanımı kıta kazanımı ilişkisi

Çizelge 2. Toplam ve Fraksiyonel Olarak Beş Deney Sonunda Elde Edilen Ortalama Verimler ve Standart Sapmaları

Ort. S.D.	15 sn	30 sn	60 sn	105 sn	165 sn	285 sn	525 sn
Toplam	42.91 ±4.48	69.32 ±1.87	86.43 ±1.33	92.31 ±0.66	94.17 ±0.30	95.55 ±0.27	96.61 ±0.21
463u	36.72 ±11.51	55.53 ±19.18	77.25 ±15.89	89.89 ±6.63	93.45 ±3.42	95.63 ±1.18	96.64 ±1.10
-63u	45.00 ±5.72	72.71 ±5.64	91.03 ±2.94	96.40 ±0.68	97.72 ±0.25	98.38 ±0.15	98.78 ±0.18
-32u	46.07 ±4.85	73.53 ±2.92	90.22 ±2.35	94.86 ±0.34	96.23 ±0.41	97.12 ±0.41	97.78 ±0.44
-20u	39.89 ±4.33	66.13 ±4.15	82.37 ±2.53	89.00 ±0.84	91.64 ±0.78	93.86 ±0.91	95.66 ±0.74
-11u	42.44 ±4.02	69.75 ±4.23	86.24 ±3.36	92.25 ±1.29	93.92 ±1.14	95.30 ±0.73	95.95 ±0.54
-5u	38.90 ±4.91	62.44 ±3.73	76.35 ±3.61	82.14 ±1.54	84.37 ±1.44	86.26 ±1.47	87.75 ±1.11
-3u	29.11 ±4.95	48.76 ±5.43	62.41 ±4.52	70.45 ±3.29	75.20 ±2.73	80.62 ±2.37	86.41 ±2.38



Şekil 6. İlk 60 sn için kıta ve su kazanımının kümülatif bazda değişimi.

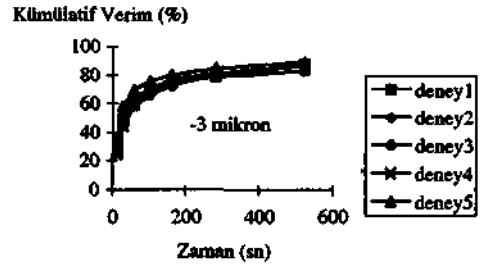
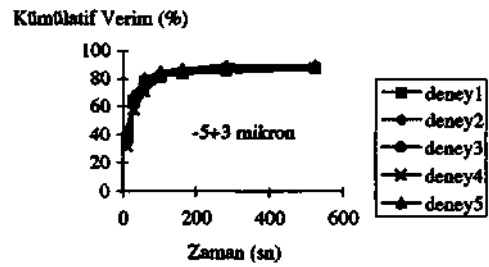
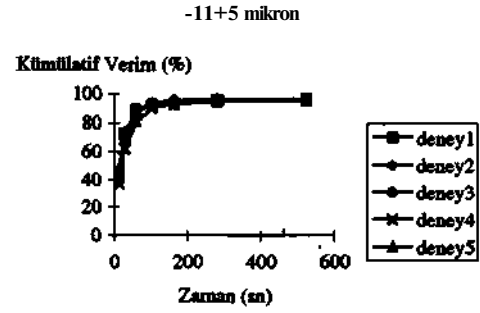
#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Su verimlerinde deneyden deneye oldukça büyük sapmalar meydana gelmesine karşın (Şekil 4.) bunun toplam katı veriminde aynı büyüklükte bir sapmaya neden olmadığı (Şekil 3.) görülmektedir. Deneyler arasındaki önemli sapmalar flotasyon işleminin ilk dakikası içindeki noktalardadır. Su ile katı verimleri arasındaki grafikten bu sapmaların su verimi ile ilişkilendirilebileceği izlenimi ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.). Bu görüntüyü detaylandırmak amacıyla ilk 1 dakika içinde elde edilen katı ve su verimlerinin deneyden deneye olan değişimleri ayrı ayrı grafikler haline dönüştürülmüş ve bu aralıkta katı-su verimlerinin benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür (Şekil 6.).

Bütün bu görünür ilişkiye karşın, bu durumun flotasyonun çok hızlı olduğu bu dönemde sapmaların deneyler arasındaki zaman farklılıklarından ortaya çıkmış olabileceği ileri sürülebilir. Zamanlama farklılıkları hem katı hem su kazanımının aynı ölçüde etkileyeceğinden ortaya ilişki var gibi bir görünüm çıkmış olabilir. Bununla beraber su verimleri arasındaki farklılıkların katı verimlerinin tersine, zamanla kaybolmuyor olmasının bu görüşün doğru olmayacağını bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Yine de bu noktanın daha detaylı bir araştırma gerektirdiğine inanılmaktadır. Boyut fraksiyonu bazında ele alındığında ise en fazla saçımın -90+63 um fraksiyonu için flotasyon işleminin başlangıcında olduğu görülmektedir. Fakat bu sapmaların ilerleyen flotasyon boyunca azaldığı anlaşılmaktadır. Diğer boyut fraksiyonlarında ise flotasyon başlangıcında sapmaların birbirine eşdeğer olduğu fakat irilerde bu sapmalar zamanla kaybolurken incelerde ise bütün flotasyon süresi boyunca bir saçımın oluşmaktadır. İncelerde oluşan bu saçımın en ince üç boyut fraksiyonu için Şekil 7. de görülmektedir. Bütün boyut fraksiyonlarındaki saçımın su kazanımı ile ilişkilendirilip ilişkilendirilemeyeceği araştırılmış -90+63 um fraksiyonu hariç diğer bütün boyut fraksiyonlarında çok iyi ilişki gözlenmiştir. Özellikle ince boyutlu fraksiyonlardaki saçımın su kazanımına bağlı olduğu izleniminin elde edilmesi ilgi çekicidir (Şekil 8.).

En iri fraksiyon olan -90+63 um'da saçımını boyut irileştikçe tanelerin flotasyon davranımının düzensizleştiği şeklinde yorumlamak mümkünse de, bu durumu bu fraksiyonun toplam beslemedeki oranının %3-5 kadar küçük olması nedeniyle boyut dağılımını belirlemedeki deneysel hatalara

dayandırmakta gerçekçi görünmektedir. Su kazanımından fazla etkilenmesi beklenmeyen bu fraksiyonda bir ilişkinin ortaya çıkmaması şaşırtıcı değildir.



Şekil 7. -11+5 um, -5+3 um ve -3 um fraksiyonlar için elde edilen verim-zaman eğrileri

Orta boyut gurubundaki fraksiyonlarda (-63+11 um) flotasyon başlangıcındaki saçımın sonlara doğru kaybolması ve buna rağmen su kazanımı ile ilişkili görünmelerinde iki sonuç çıkarılmıştır-. Bu fraksiyonların flotasyon başlangıcındaki verimleri su

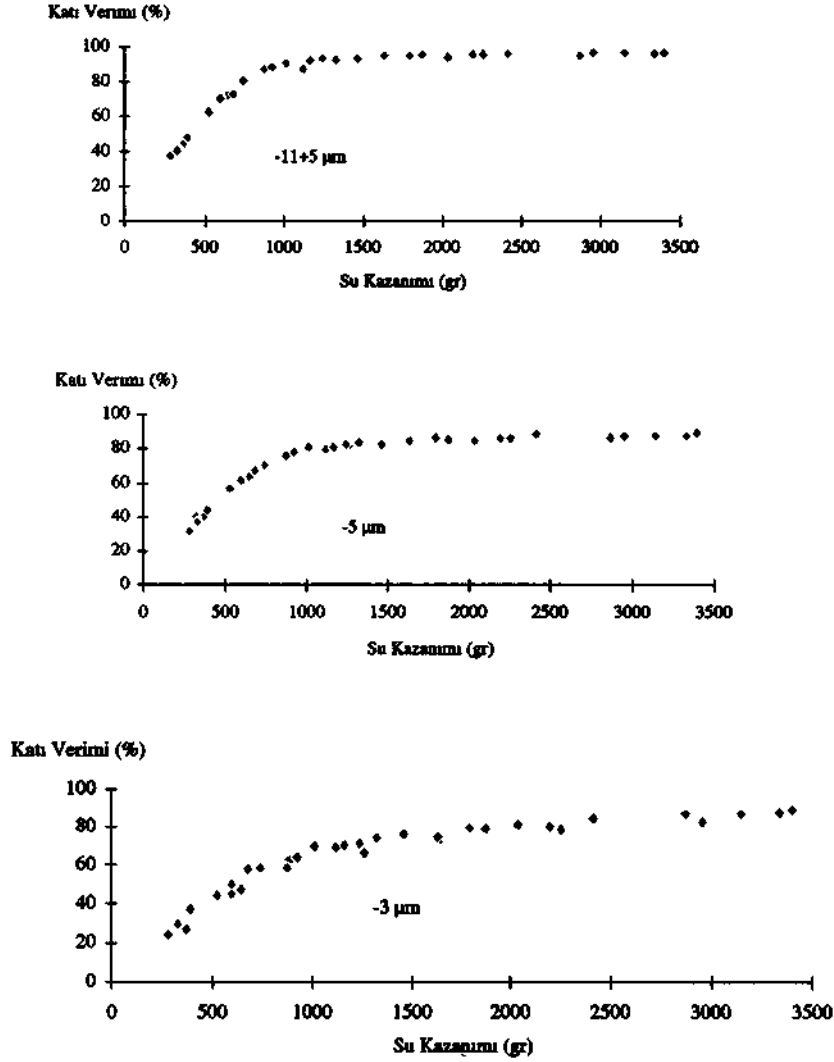
verimi ile ilişkilidir. Fakat nihai verimler büyük ölçüde su veriminden bağımsızdır.

İnce boyutlara doğru gidildikçe su kazanımının hem başlangıç verimlerini nemde nihai verimleri önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu da genel kanyaya paralel olarak su kazanımı etkisinin özellikle ince tanelerin davranışının tamamlanmasında önemli olacağı göstermektedir.

En iri ve incelerde meydana gelen bu sapmaların toplam malzeme verimini fazla etkilememiş

olması miktarca dominant olan (yaklaşık %80-85) orta boydaki fraksiyonların bu sapmaları maskeliyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İncelerin daha yüksek oranda olacağı bir flotasyon beslemesi için toplamda da daha fazla saçının meydana gelmesi beklenmelidir.

Elde edilen sonuçlar hidrofobik tanelerin kazanımının su kazanımı ile ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Bu durumda sorun ilişkinin nasıl tanımlanabileceğidir. Bütün fraksiyonlarda bir ilişki görülüyor olmasına karşın, orta boyut gurubu için flotasyon işleminin nihai veriminin su kazanımından



Şekil 8. -11+5 um, -5+3 um ve -3 um fraksiyonları için kümtlatif bazda su katı etkileşimi.

bağımsız görünmesi, incelerde ise flotasyonun sonundaki su kazanımının katı kazanımı üzerinde çok az bir etkisinin olması bütün bu ilişkilerin Ross yaklaşımı ile açıklanamayacağına işaret etmektedir. Warren yaklaşımı ile seçilen bir flotasyon süresi için tekrarlı flotasyon deneyleri sonucu oluşan verilerden su kazanımı ile hidrofobik tanelerin kazanımı arasında oluşturulan doğrusal bir ifadeninde bu ilişkiyi tanımlamakta yetersiz kalacağı anlaşılmaktadır. Warren yaklaşımı ile bulunan su ile taşınma onun seçilen flotasyon süresi ile değişim göstermektedir. Palptaki hidrofobik tane konsantrasyonunun hızla değiştiği göz önüne alındığında böyle olmasında beklenmektedir. Warren yaklaşımı konsantrasyonla ilişkilendirildiğinde bile özellikle flotasyonun başlangıcındaki ilişkiyi açıklamakta yetersiz kalacağı anlaşılmaktadır.

Aslında katı ve su kazanımları arasındaki ilişkinin tamamıyla bir su ile taşınım olarak tanımlanabileceği tartışılabilir görünmektedir. Özellikle flotasyonun başlangıcında su kazanımları aracılığıyla küçük hidrofobik tanelerin kazanımını önemli ölçüde etkiliyor görünmesi bu görüşü kuvvetlendirmektedir. Öte yandan daha öncede izah edildiği gibi başlangıçtaki bu ilişki deneyler arası zamanlama farklılıklarının bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar sadece hidrofobik tanelerin yer aldığı bir flotasyon sonucu elde edilmiştir. Kontrollü koşullarda hidrofobik ve hidrofilik tanelerin bir arada bulunduğu durumlarda yapılacak deneysel çalışmalarla burada oluşturulmaya çalışılan yapıyı destekleyici verilerin elde edilebileceğine inanılmaktadır. Bu konuda çalışmalar devam etmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Flotasyonda su kazanımı ile hidrofobik tanelerin kazanımı arasında görünür bir ilişki vardır. Bu ilişki orta boydaki tanelerin özellikle flotasyon başlangıcındaki davranımında etkili olurken incelerde bütün flotasyon süresince etkisini göstermektedir. Literatürde yer alan su ile taşınma modelleri bu ilişkiyi tanımlamakta yetersiz kalmaktadır. Oluşturulacak alternatif modelin bu ilişkiyi tane boyu fraksiyonu bazında tanımlaması, su sevmeyen tanelerin palptaki konsantrasyonunu bir değişken olarak alması ve ilişkiyi suyla taşınma mekanizmasına ilave yeni mekanizmalarla tanımlaması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Bishop, J.P. and White, M.E. A Study of Particle Entrainment in Flotation Froths. Trans. Inst. Min. Metall., 1976, 85: C191
2. Johnson, N. W., Mc Kee, D.J., Lynch, A.J., Flotation Rates of Non-sulphide Minerals in Calcopirite Processes. Trans. Am. Ins. Min. Metall. Pet. Eng., 1974, 256: 204-226.
3. Jowett, A. Gangue Mineral Contamination of Froth. Br. Chem. Engng. Vol:2 No:5, 1966, 330-333.
4. Ross, V. b., Flotation and Entrainment of Particles During Batch Flotation Tests. Minerals Engng., 1990, Vol.3, No: 3/4, 254-256.
5. Trahar, W.J. A Rational Interpretation of The Role of Particle Size in Flotation. Int. J. Miner. Process., 1981, 8: 289-327
6. Warren, L.J., Determination of the Contributions of True Flotation and Entrainment in Batch Flotation Tests., Int. J. Miner. Process., 1985, 14: 33-34