

## KBİ SAMSUN BAKIR İZABE TESİSLERİ CÜRUF ÖĞÜTME DEVRESİNİN MODELLEMESİ VE SİMÜLASYONU

Modelling and Simulation of the Slag Grinding Circuit at KBİ Samsun Copper Smelter

Tarık DOĞRU<sup>n</sup>  
Levent ERGÜN<sup>n</sup>

### ÖZET

Bu çalışmada, KBİ Samsun İzabe Tesisleri cüruf zenginleştirme tesisi öğütme devresinde yürütülen modelleme ve simülasyon çalışmaları sunulmaktadır. Öğütme ve flotasyon devresinde örnekleme çalışmaları yürütülmüş, tüm örneklerin tane boyut dağılımları ve katı içerikleri, flotasyon devresinden alınan örneklerin bakır içerikleri belirlenmiştir. Madde denkliği hesaplamaları sonunda akışların katı ve su tonajları hesaplandıktan sonra, öğütme devresinde bulunan otojen ve çakıllı değirmen, elek ve hidrosiklonların matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller devre performansını başarıyla tahmin etmiştir. Daha sonra, cürufun soğutma süresinin öğütme devresi performansı üzerinde etkisi simülasyon yoluyla incelenmiştir. Şok soğutulan cürufla daha ince flotasyon beslemesi elde edilirken, diğer numuneler benzer tane boyut dağılımı vermektedir.

Anahtar Sözcükler: Otojen Öğütme, Bakır İzabe Cürufu, Modelleme, Simülasyon

### ABSTRACT

In this study, modelling and simulation studies performed in the grinding circuit of slag concentration plant at KBİ Samsun Smelter are presented. An elaborate sampling survey was performed in grinding and flotation circuits and size distributions and solid contents of the all samples and copper content of the samples taken from flotation circuits were determined. After calculation of solid and water flow rates by mass balancing, models for the autogenous and pebble mills, screen and hydrocyclones were developed. Models predicted the circuit performance successfully. Then, the effect of cooling duration of slag on the performance of the grinding circuit was investigated by simulation. Shock cooled slags gave finer flotation feed while the other samples provided similar size distributions.

Keywords: Autogenous Grinding, Copper Smelter Slag, Modelling, Simulation

<sup>n</sup> Dr., Büyükşehir Belediye Başkanlığı, İSU Genel Müdür Yrd., İzmit-Kocaeli, [tarikdogru@isu.gov.tr](mailto:tarikdogru@isu.gov.tr)

<sup>n</sup> Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, 06532, ANKARA

## 1. GİRİŞ

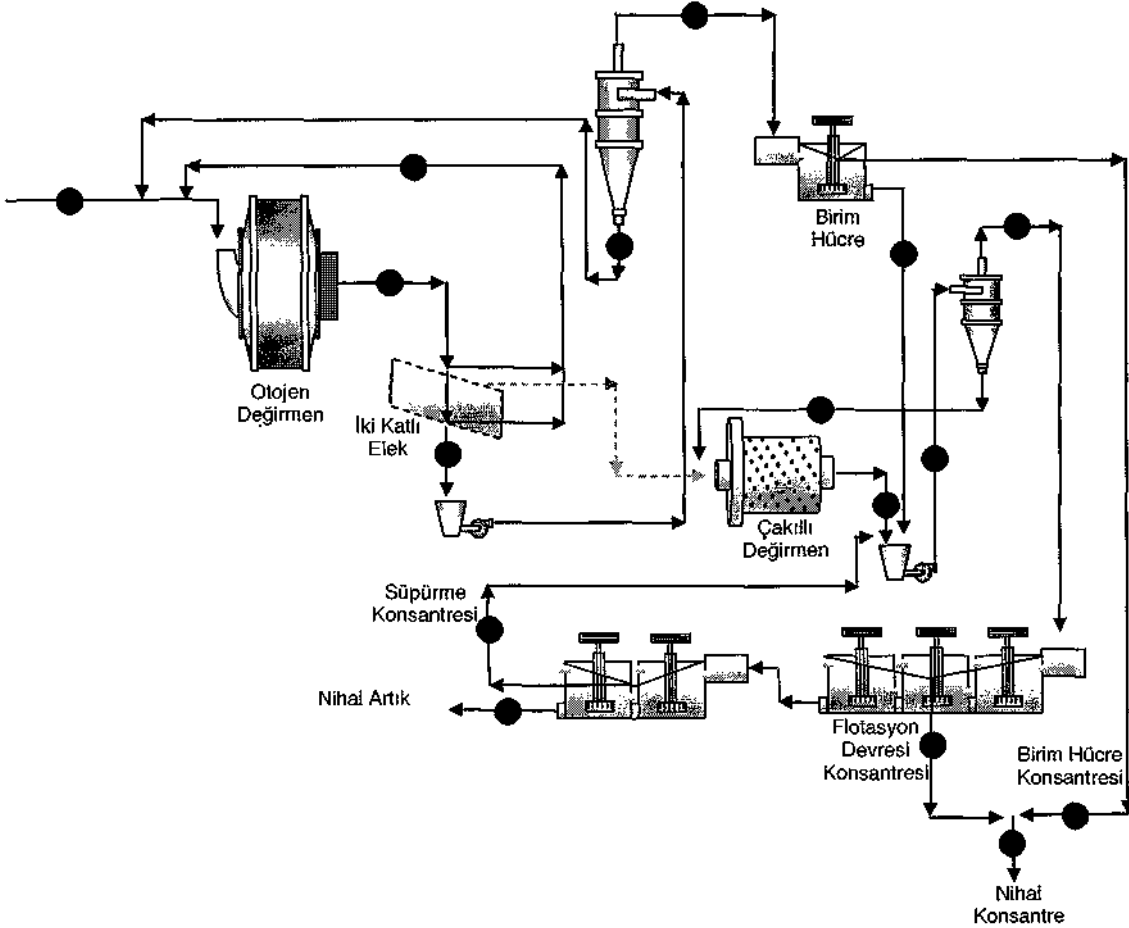
Çevresel ve ekonomik nedenlerle, bakır izabe işlemleri sırasında üretilen cürufun içerisinde kalan bakır, sıvı halde elektrik fırınında veya cüruf soğutulduktan sonra öğütülerek flotasyonla zenginleştirilerek kazanılmaktadır (Davenport ve Partelpoeg, 1987).

KBİ Samsun İzabe Tesisi'nde bulunan cüruf zenginleştirme tesisi öğütme devresi pilot tesis testlerine göre tasarlanmış ve öğütme devresinde %90-92 -53jım inceliğinde flotasyon beslemesi üretilmesi planlanmıştır. Testler sırasında bu inceliğe tek aşamalı otojen değirmen ile erişilemeyeceği belirlendiğinden devreye çakıllı değirmen eklenmiştir (Anon, 1968).

Cüruf öğütme ve zenginleştirme devresinin basitleştirilmiş akım şeması Şekil 1'de sunulmaktadır.

Soğutulmuş cüruf çeneli kırıcıda kırılarak elenmekte ve +100 mm ve -100+40 mm olarak

stoklanmakta ve bu iki stoktan belirli oranlarda karıştırılarak otojen değirmene beslenmektedir. Değirmen çıkışı iki katlı elekte elenmektedir. 40x40 mm açıklığa sahip ilk eleğin üzeri çakıllı değirmenin güç çekişine göre öğütücü ortam olarak çakıl değirmene (Şekil 1'de kesikli çizgi ile gösterilmiştir) veya 1,5x12 mm açıklıklı diğer eleğin üzerinde kalan malzemeyle birlikte otojen değirmene geri beslenmektedir. Elek altı birinci kademe hidrosiklona beslenmekte, alt akım otojen değirmene geri dönerken üst akım dört hücreden oluşan birim-hücre flotasyon devresine beslenmektedir. Bu devrenin konsantresi nihai konsantreye eklenmekte artığı ise ikinci kademe hidrosiklon besleme havuzuna gönderilmektedir. İkinci kademe hidrosiklon alt akımı çakıllı değirmene gönderilirken, çakıllı değirmen çıkışı ve süpürme devresi konsantresi de bu havuza beslenmektedir. Üst akım ise flotasyon devresine beslenmektedir. Flotasyon devresi kaba, temizleme ve süpürme aşamalarından oluşmaktadır. Devre konsantresi birim-hücre konsantresi ile birlikte nihai konsantreyi oluşturmaktadır.



Şekil 1. Basitleştirilmiş zenginleştirme tesisi akım şeması ve örnekleme noktaları

Bakır izabe cüruflarının minerallerden farklı olarak, soğutma hızıyla öğütülebilirliği ve mineralojisinin değişmesi, soğutma hızının optimize edilmesiyle zenginleştirme performansında önemli iyileşmeler sağlanabileceğine işaret etmektedir. Hızlı soğutma öğütülebilirliği olumlu etkilerken zenginleştirmeyi güçleştirmektedir (Doğru ve Ergün, 2004). Bu çalışmanın amacı, soğutma süresinin öğütme devresi üzerinde etkilerinin nicel olarak belirlenebilmesini sağlayacak modelleme ve simülasyona dayanan bir aracın geliştirilmesidir. Bu kapsamda, KBİ Samsun İzabe Tesisi'nde bulunan cüruf zenginleştirme tesisinde yürütülen örnekleme ve deneysel çalışmalar, madde denkliliği sonrasında elde edilen veriler kullanılarak öğütme devresinde bulunan otojen ve çakıllı değirmen, elek ve hidrosiklonların modellerinin oluşturulması ve farklı koşullarda soğutulan cüruf örneklerinin devre performansına etkilerinin incelendiği simülasyon çalışmaları sunulmaktadır.

## 2. TESİSİN ÖRNEKLENMESİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1 Örnekleme Çalışmaları ve Tane Boyut Dağılımlarının Belirlenmesi

Tesisin duyarlı bir matematiksel modelinin oluşturulması için tesis kararlı durumda çalışırken detaylı ve dikkatli bir örnekleme çalışması yürütülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Şekil 1'de gösterilen noktalardan örnekler alınmıştır. Örnekleme çalışmalarında, örnek alınan noktanın fiziksel durumuna, o noktadaki debiye ve en büyük tane boyutuna bağlı olarak, boyut dağılımı ve % katı içeriği açısından temsili örnek almaya uygun aparatlar imal edilmiştir. Özellikle, debinin yüksek ve/veya iri tane boyutunda malzemelerin bulunduğu otojen çıkışı ve elek etrafındaki kollardan fazla miktarda örnek alınmıştır. Tesis taze beslemesinden, diğer akışlarda örnekleme işlemi tamamlandıktan sonra bant durdurularak örnek alınmıştır. Alınan örneklerin yaş ağırlıkları tartılmış, filtre edilerek süzülmüş, kurutulmuş, kuru ağırlıkları tartılmış ve katı içeriği belirlenmiştir. Örneklerin tane boyut dağılımları 5 mm' ye kadar alınan örneğin tamamının elenmesiyle belirlenmiştir. 5 mm den ince boyutlar için ise, örnek alınarak elemeye devam edilmiştir. İnce boyutların dağılımı ise Sympatec marka lazerli analiz cihazı kullanılarak kuru olarak ölçülmüştür. Tesis beslemesi 200 mm tane boyutundan başlanarak elenmiş ve her

fraksiyonun nem içeriği belirlenmiştir. Flotasyon devresinden alınan örneklerin bakır içerikleri de saptanmıştır.

### 2.2 Laboratuvar Testleri ve Sonuçları

Çalışmada, tesis beslemesinin kırılma dağılım fonksiyonunun karakterize edilmesi için ağırlık düşürme düzeneği ve tambur testi kullanılmıştır (Napier-Munn vd, 1996). Bu amaçla, hazırlanan boyut fraksiyonları farklı enerji düzeylerinden kırılarak boyut dağılımları belirlenmiş ve gerekli parametreler hesaplanmıştır. Tesis beslemesinin darbe (A ve b) ve aşınma ( $t_a$ ) kırılma parametreleri Çizelge 1'de sunulmaktadır. Farklı koşullarda hazırlanmış cüruf numuneleri için elde edilen değerler de Çizelge 1'de verilmiştir (Doğru ve Ergün, 2004). Çalışmada devrede kullanılan çakıllı değirmende öğütülebilirliği karakterize etmek üzere tesis beslemesi ve farklı soğutulmuş cüruf örneklerinin Bond iş indeksi ( $W_i$ ) değerleri belirlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Farklı Cüruf Örneklerinin Kırılma Parametreleri ve Bond İş İndeksi (kWh/t) Değerleri

Örnek	$W_i$			
Tesis beslemesi	56,73	1,27	0,27	16,00
Şok soğutma	71,49	0,24	0,59	15,59
24 saat soğutma	54,65	0,31	0,38	16,11
36 saat soğutma	54,00	0,31	0,30	19,13
Konverter cürufu	49,49	0,33	0,41	18,85

## 3. MADDE DENKLİLİĞİ HESAPLAMALARI VE SONUÇLAR

Herhangi bir tesiste örnekleme çalışması yürütüldüğünde sistem dinamiği, yüksek debi, örnek alma noktasının fiziksel durumu ve insan hataları sonucu kaçınılmaz olarak bazı hatalar yapılmaktadır. Bu nedenle örnekleme sonucu elde edilen ham verilerin istatistiksel olarak düzeltilmesi gerekmektedir. Bir besleme ve iki üründen oluşan basit sistemlerde bu hesaplar elle yapılabilirken devreden yüklerin bulunduğu sistemlerde karmaşıklaşmakta ve bir bilgisayar programı gerekmektedir. Ancak bu düzeltme yapıldıktan sonra akışların katı ve su tonajlarını hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, madde denkliliği hesaplamalarında JKSimMet simülatörünün madde denkliliği modülü kullanılmıştır. Madde denkliliği hesaplamaları hatalı örnekleme ile elde edilen verileri

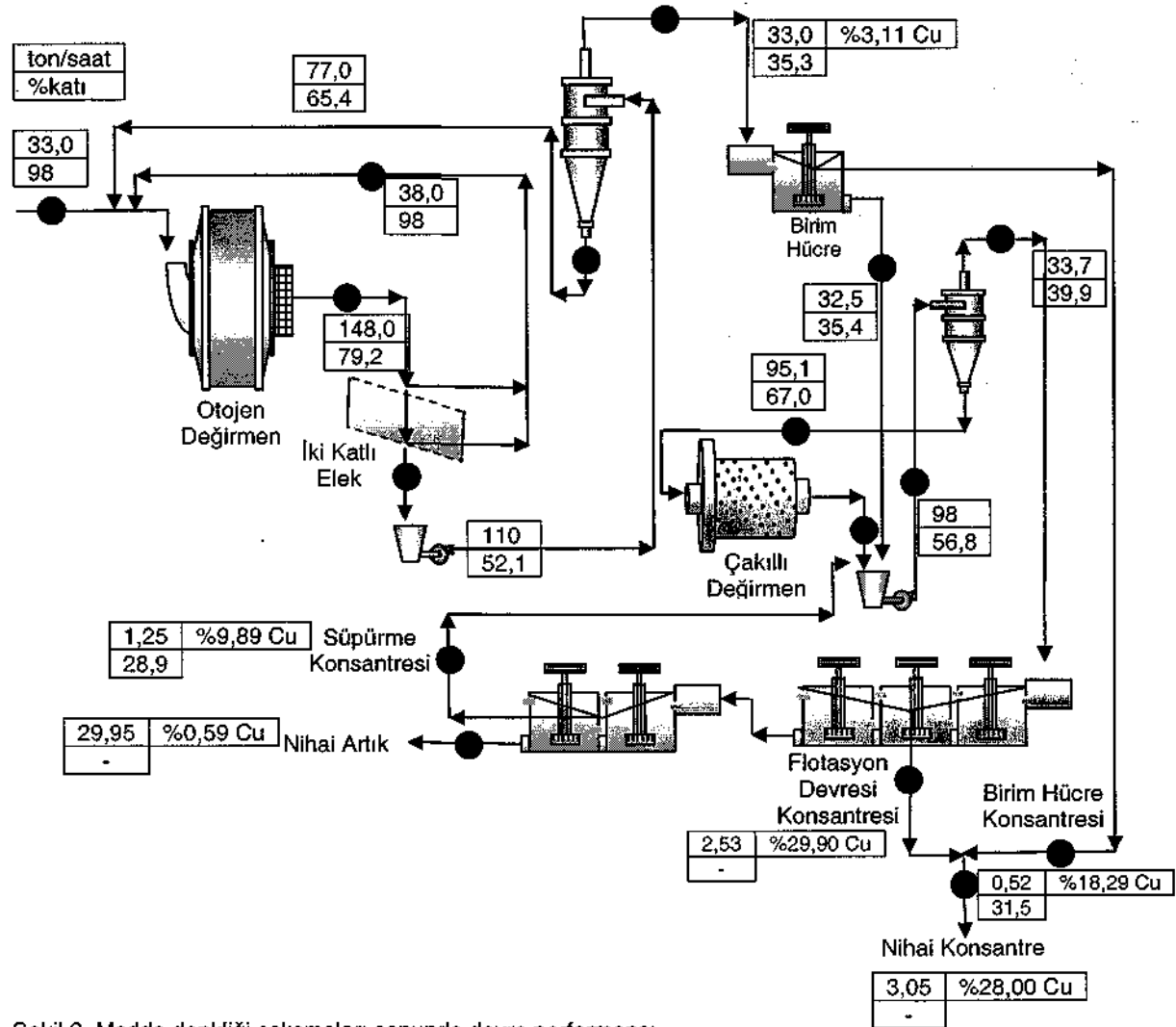
düzeltemez. Örnekleme işleminin başarısı, ölçülen verilerle madde denklığı hesaplamaları sonucu bulunan değerlerin karşılaştırılması ile değerlendirilmektedir. Aradaki farkın fazla olduğu noktalarda kullanılan örnekleme tekniği, uygun veya yeterli değildir ve örnekleme işleminin tekrarlanmasını gerektirmektedir.

Şekil 1'de işaretlenen noktalardan alınan örneklerin tane boyut dağılımları, katı içerikleri ve bazı kolların bakır analizleri ve besleme tonajı kullanılarak diğer akışların tonajları hesaplanmıştır. Öncelikle, birinci aşama hidrosiklon etrafındaki akışlardan başlanarak otojen değirmen devresi çözülmüş, birinci aşama hidrosiklon üst akımı, nihai konsantre ve nihai artık kollarının bakır analizleri kullanılarak öğütme devresine dönen süpürme konsantresinin tonajı belirlenmiştir.

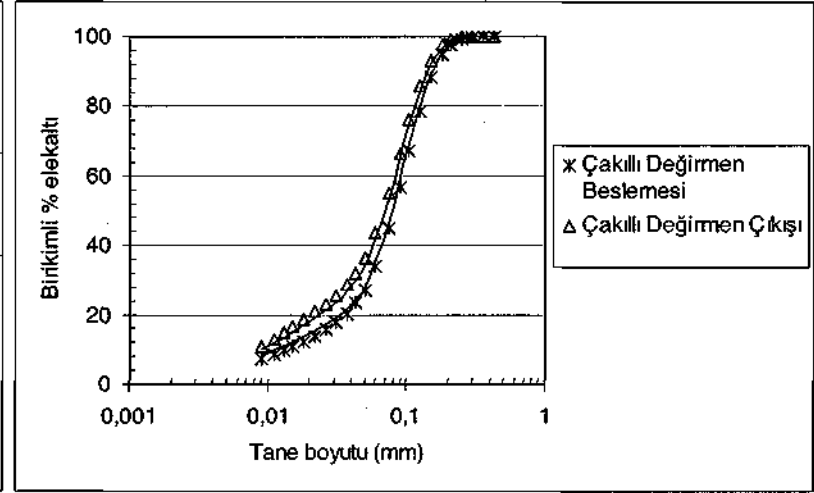
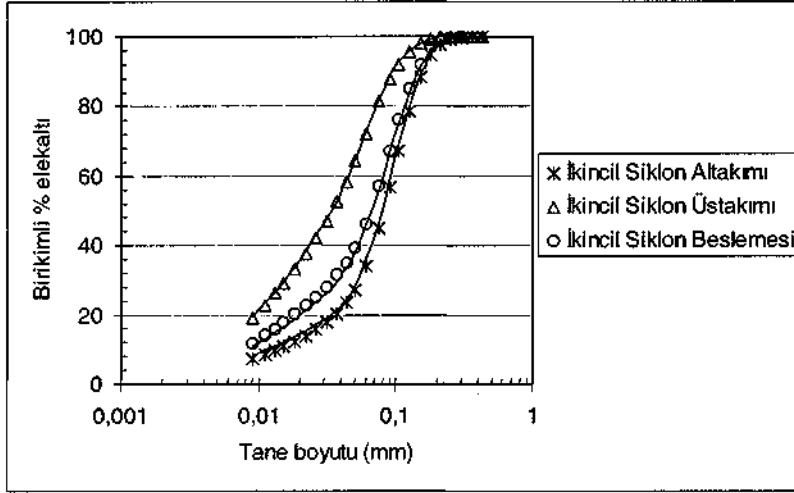
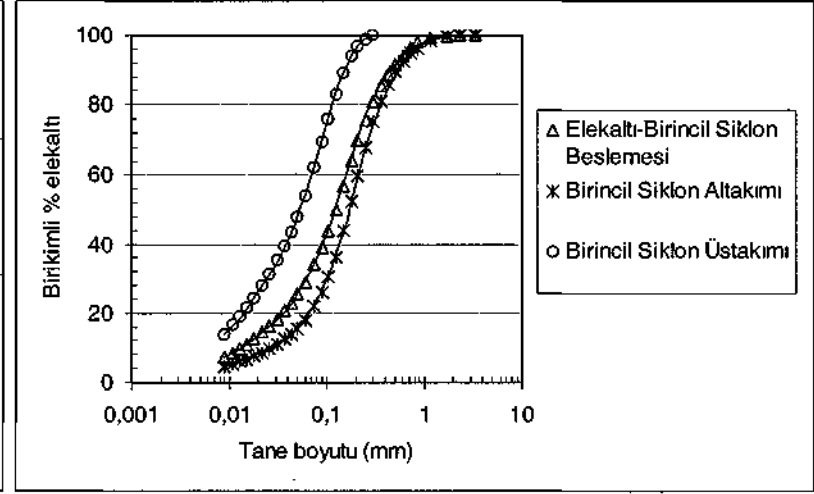
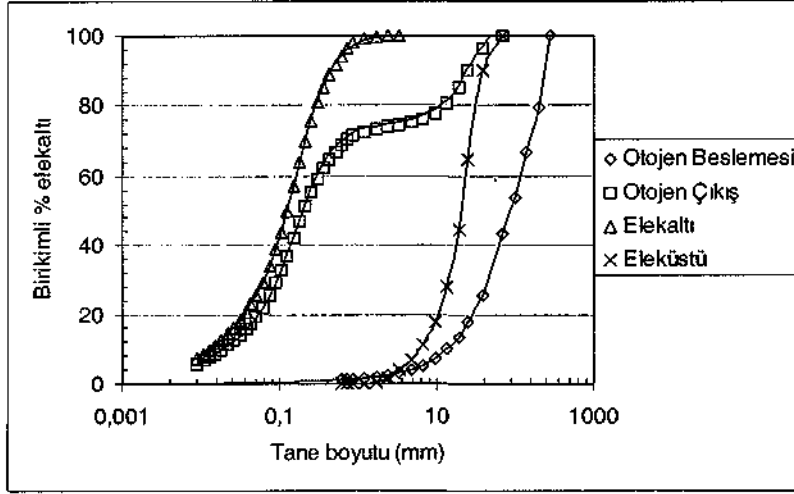
Buna göre devrede, hesaplanan tonajlar, % katı ve bakır içerikleri Şekil 2'de sunulmaktadır.

Şekil 3'te ölçülen ve madde denklığı sonucu düzeltilen değerle elde edilen boyut dağılımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Şekillerde semboller deneysel noktaları eğriler ise madde denklığı çalışmaları sonucu belirlenen tane boyut dağılımlarını göstermektedir. Aradaki farkların çok küçük olması örnekleme işleminin başarılı olduğunu ve hesaplanan tonaj ve boyut dağılımlarının modelleme çalışmalarında kullanılmaya uygun olduğunu doğrulamaktadır.

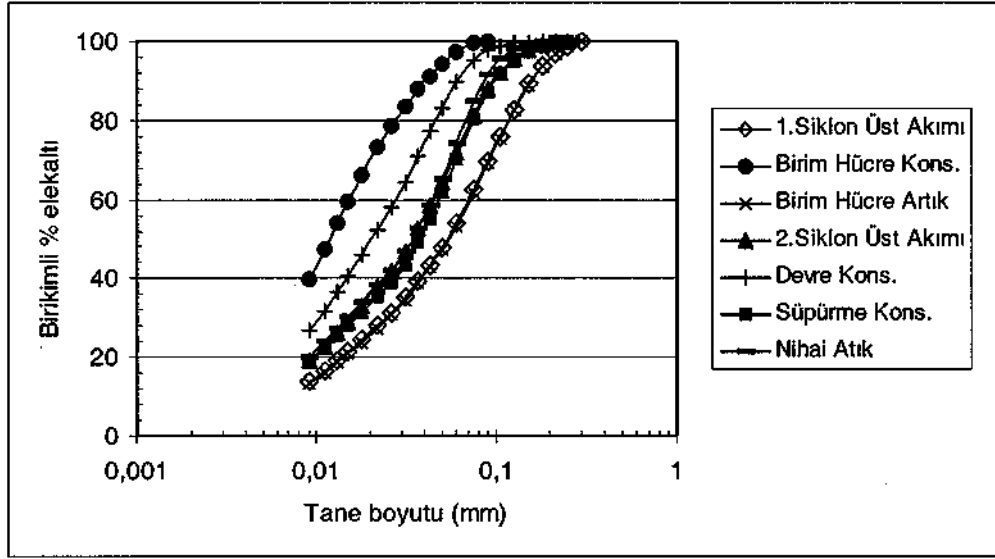
Şekil 4'te flotasyon devresindeki akışların boyut dağılımları sunulmaktadır.



Şekil 2. Madde denklığı çalışmaları sonunda devre performansı



Şekil 3. Ölçülen ve madde denkliği hesaplamaları sonucu düzeltilen boyut dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 4. Flotasyon ürünlerinin boyut dağılımları

#### 4. MODELLEME ÇALIŞMALARI

Cürufun soğutma hızının öğütme devresi performansı üzerine etkisinin nicel olarak belirlenebilmesi için devrede kullanılan tüm ekipmanların matematiksel modellerinin oluşturulması gerekmektedir.

##### 4.1 Kullanılan Modeller

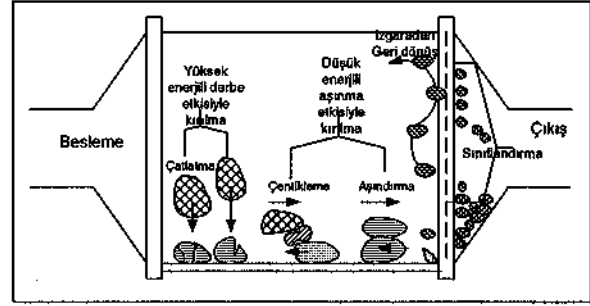
###### 4.1.1 Otojen Değirmen Modeli

Bilyalı ve çubuklu değirmenlerden farklı olarak otojen değirmenlerde öğütücü ortam ve değirmendeki yük, beslemenin tane boyut dağılımı ve öğütülebilirliğine bağlı olmaktadır. Değirmene giren taneler darbe ve aşınma-çentikleme etkisiyle ufalanırken, ufalanan tanelerin bir bölümü ızgaradan geçerek değirmenden çıkarken diğerleri değirmende kalarak tekrarlı kırılmaya maruz kalmaktadır (Şekil 5). Bu çalışmada, yukarıdaki mekanizmaların bileşkesi sonucu değirmende oluşan yükün boyut dağılımını saptamaya olanak sağlayan ve endüstriyel verilerle en fazla sınanmış model olan Leung (1987) Modeli kullanılmıştır.

Yaklaşımda, değirmen içinde gerçekleşen süreçler üç temel kavram ile açıklanmaktadır:

- 1) Çarpışma sıklığı veya kırılma hızı
- 2) Çarpışmadan sonra oluşan boyut dağılımı (kırılma dağılım fonksiyonu)

#### 3) Malzemenin değirmenden taşınımı (boşalma fonksiyonu)



Şekil 5. Otojen değirmende etkili mekanizmaların şematik gösterimi

Mükemmel karışım varsayımı ile herhangi bir tane boyut fraksiyonu için kararlı durumda madde denkliği Eşitlik (1) ve (2) ile verilmektedir (Whiten, 1974).

$$0 = f_i - p_i + \sum_{j=1}^i r_j s_j a_{ij} - r_i s_i \quad (1)$$

$$p_i = d_i s_i \quad (2)$$

Burada,

$f_i$  : i. boyut fraksiyonunda değirmene giren malzeme tonajı

$p_i$  : i. boyut fraksiyonunda değirmenden çıkan malzeme tonajı

$H$  : i. boyut fraksiyon undaki tanelerin kırılma hızı

S<sub>i</sub> : i. boyut fraksiyonunun değirmen içindeki tonajı  
d<sub>i</sub> : i. boyut fraksiyon undaki tanelerin değirmenden boşalma hızı  
a<sub>ij</sub> : kırılma dağılım fonksiyonu

Birleştirilmiş kırılma dağılım fonksiyonu ikiz sarkaç veya ağırlık düşürme yöntemi ve tambur testi ile belirlenmektedir. (Napier-Munn vd, 1996).

Boşalma hızı,  
d, = d - c, (3)

d : maksimum boşalma hızı  
C<sub>i</sub> : i. boyut fraksiyonundaki taneler için sınıflandırma fonksiyonu

d, değirmen içindeki suyun veya su gibi davrandığı varsayılan malzemenin değirmenden boşalma hızını temsil etmektedir. Izgaradan iri taneler ise değirmende kalacaktır, dolayısıyla boşalma hızı sıfır olmaktadır. Deneysel veriler kullanılarak bu iki tane boyutunun belirlenmesiyle diğer tane boyutları için bir sınıflandırma fonksiyonu tanımlanmaktadır.

d, doğrusal olmayan optimizasyon yöntemiyle bir kütle taşınımı fonksiyonu yardımıyla belirlenmektedir (Austin vd, 1976).

$$L = n r_i F m_2 \quad (4)$$

L : Izgara açıklığından ince malzemenin değirmen yükü içinde kapladığı hacimsel oran  
F : Değirmenden çıkış debisi  
m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> : Sabitler

Değirmen içinde tanelerin sahip olduğu enerji düzeyi, E<sub>i</sub>, değirmen çapıyla Eşitlik 5 'teki gibi ilişkilendirilmektedir(Austin vd, 1984).

$$ECS: \text{ } ^\circ c E, \cdot X_i^{-1.5} \quad (5)$$

E<sub>c</sub>S<sub>i</sub> : Özgül kırılma enerjisi (kWh/t)  
X<sub>j</sub> : i. tane boyutu

Her tane boyutunun kırılma hızı ise büküm (spline) fonksiyonu kullanılarak besleme ve ürün boyut dağılımları kullanılarak geri hesaplanmaktadır.

Kırılma dağılım fonksiyonu kullanılarak, Eşitlik 1-3, Şekil 6'da verilen dizgeyle (algoritma) çözülmektedir.

#### 4.1.2 Çakıllı Değirmen Modeli

Çakıllı değirmenin matematiksel modelinin oluşturulması için bilyalı değirmen için geliştirilen mükemmel karışım modeli kullanılmıştır.

Eşitlik 2'den S<sub>i</sub> terimi çekilerek Eşitlik 1 'de yerine yazılarak düzenlendiğinde, Eşitlik 6 elde edilmektedir.

$$0 = f_i - P_i - r - \sum_{j=1}^r a_{ij} P_j r \sim P \quad (6)$$

Burada, ay darbe ile belirlenen kırılma dağılım fonksiyonunu temsil etmektedir. Ağırlık düşürme yöntemiyle 41,788 kg.cm yükleme enerjisine karşılık gelen t<sub>10</sub> değeri belirlenerek t eğri ailesinden kırılma dağılım fonksiyonu belirlenmektedir(Napier-Munn vd, 1996).

Kırılma dağılım fonksiyonu, besleme tonajı, besleme ve ürün tane boyut dağılımları bilindiğinde tüm tane boyutları için kırılma hızı/boşalma hızı oran olarak belirlenebilmektedir.

#### 4.1.3 Tromp Eğrisi Modeli

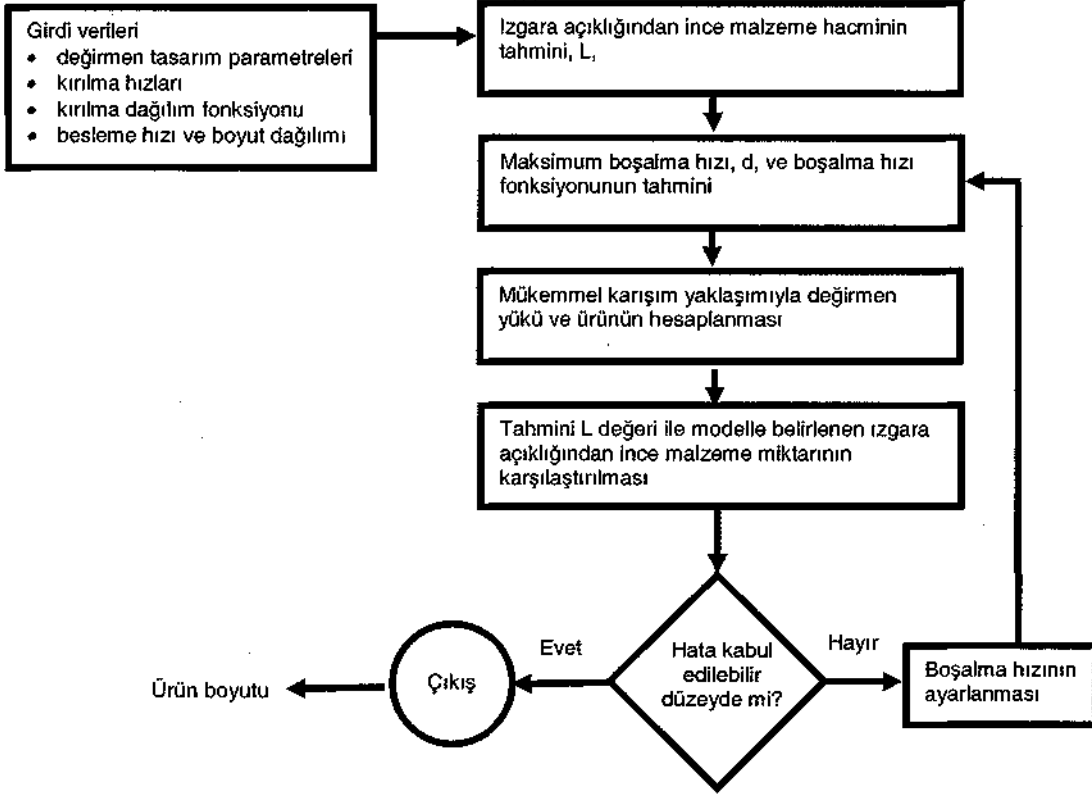
Çalışmada, devrede bulunan elek ve hidrosiklonlar için Whiten (Lynch, 1977) tarafından geliştirilen Tromp eğrisinin matematiksel ifadesine dayanan model kullanılmıştır.

$$R = C \cdot \frac{(e^a - 1)}{(e^{(a \cdot X)} + e^a \cdot 2)}. \quad (7)$$

Burada,

: i. tane boyut fraksiyonunun ince ürüne giden yüzdesi  
a : Malzemeye özgü ayırmanın etkinliğini tanımlayan parametre  
5G : di/d<sub>50c</sub>  
di : i. tane boyut fraksiyonun ortalama boyutu  
d50<sub>c</sub> : düzeltilmiş kesme boyutu, tanelerin alt ve üst akıma gitme olasılıklarının %50 olduğu tane boyutu  
: Beslemedeki suyun ince ürüne giden yüzdesi

Boyut dağılımları, katı içeriği ve tonaj değerleri kullanılarak elek ve hidrosiklonlar için parametreler belirlenmiştir.



Şekil 6. Otojen değirmen model dizgesi (Napier-Munn vd, 1996).

## 4.2 Modelleme Çalışmalarının Sonuçları

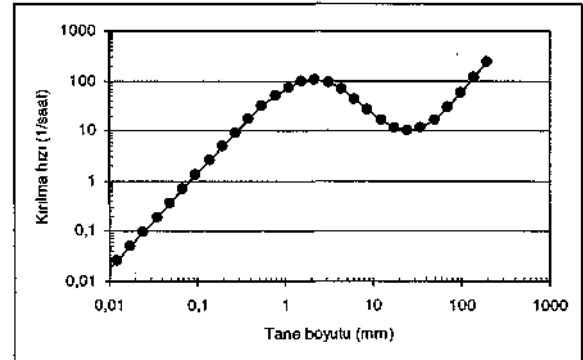
### 4.2.1 Model Parametreleri

Bölüm 4.1'de açıklanan modeller kullanılarak önce her bir ekipmanın modeli oluşturulmuş, daha sonra otojen değirmen, elek ve birinci aşama hidrosiklon modellerinin parametreleri birlikte belirlenerek modeller rafine edilmiştir. Aynı işlem çakıllı değirmen ve ikinci aşama hidrosiklon modelleri için de uygulanmıştır. Flotasyon işlemi madde denklığında, belirlenen oranlarda üzerine gelen malzemeyi bölen bir ayırıcı olarak tanımlanmıştır. Model parametrelerinin belirlenmesinde JKSimMet simülörünün Levenberg-Marquardt dizgesini temel alan parametre, tahmin modülü kullanılmıştır.

Otojen değirmende farklı tane boyutlarının kırılma ve boşalma hızları sırasıyla Şekil 7 ve 8'de sunulmaktadır. Şekil 7'den görülebileceği gibi, tane boyutu irileştikçe kırılma hızı 2 mm'ye kadar artmakta ve daha sonra 25 mm'ye kadar düşmekte ve daha iri boyutlara doğru tekrar artmaktadır. Bu durum otojen öğütmede kritik boyutlu tanelerin oluşumuyla uyumludur. Düşük

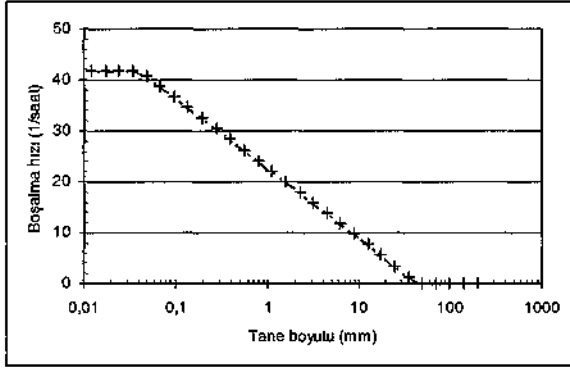
kırılma hızına sahip taneler değirmen içinde iri taneler tarafından kırılmamakta, kendi kendine aşınma hızları da düşük olmaktadır. Örnekleme yapılan koşulda 0,049 mm'den küçük taneler değirmende su gibi davranmakta ve maksimum hızda değirmeni terkederken, 52 mm den iri taneler değirmende kalmaktadır (Şekil 8).

Şekil 9'da çakıllı değirmendeki farklı tane boyutları için  $r/d$  değerleri sunulmaktadır. Tane boyutu irileştikçe kırılma hızı artmaktadır.

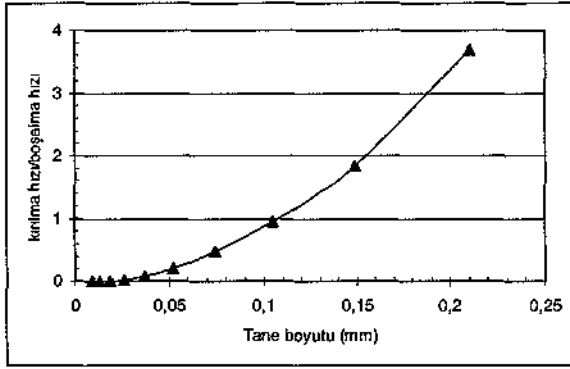


Şekil 7. Otojen değirmende kırılma hızının tane boyutuyla değişimi



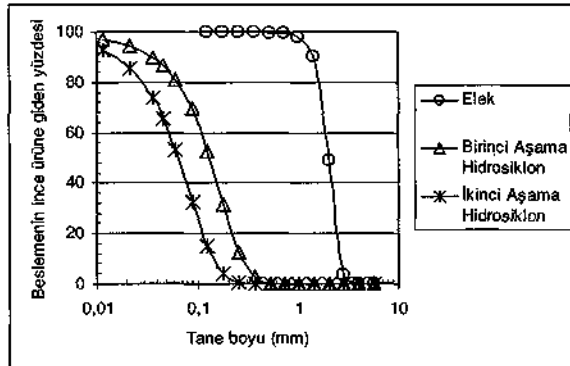


Şekil 8. Otojen değirmende boşalma hızının tane boyutuyla değişimi



Şekil 9. Çakıllı değirmenin r/d değerlerinin tane boyutuyla değişimi

Şekil 10' da elek ve hidrosiklonlar için düzeltilmiş Tromp eğrileri verilmektedir. Buna göre, eleğin, birinci ve ikinci aşama hidrosiklonların düzeltilmiş  $d_{50}$  değerleri sırasıyla, 1,99 mm, 0,132 mm ve 0,065 mm olmuştur. İki katlı elek, otojen değirmen çıkışı, ince eleğin elek altı ve toplam eleküstü akışları kullanılarak tek bir elek olarak modellenmiştir.



Şekil 10. Sınıflandırıcıların Tromp eğrileri.

#### 4.2.2 Modelleme Sonuçları

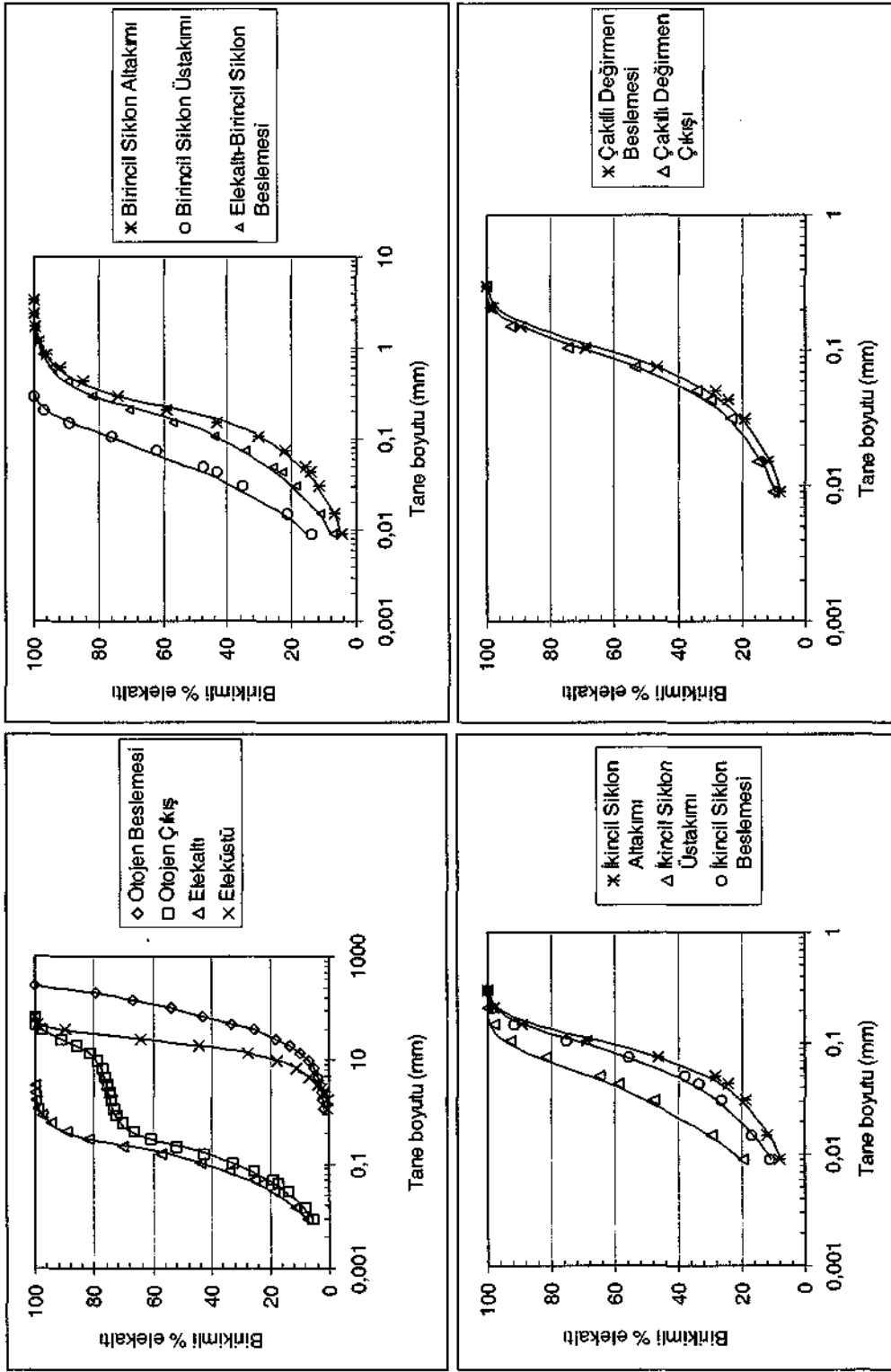
Modelleme işleminin başarısını ölçmek üzere otojen değirmen beslemesinin tane boyut dağılımı, tonajı ve model parametreleri girilerek tüm devrede tane boyut dağılımları ve tonajlar hesaplanmıştır. Şekil 11'de madde denklığı ile belirlenen noktalar sembollerle, modelleme sonucu belirlenen değerler ise eğrilerle gösterilmektedir. Sonuçlar, modellerin ürün boyut dağılımlarının belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Madde denklığı sonucunda belirlenen tonajların ve % katı değerlerinin modelleme çalışmaları sonunda elde edilen değerlerle karşılaştırması Çizelge 2' de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Simülasyon ve Madde Denklığı Sonucu Hesaplanan Tonaj ve % Katı Değerlerinin Karşılaştırılması

		Madde denklığı	Modelleme
O.Değ.Çıkışı	(t/s)	148,0	150,0
	% katı	79,2	77,9
Elek Altı	(t/s)	110,0	112,0
	% katı	74,2	72,6
Elek Üstü	(t/s)	38	37,8
	% katı	98	98
1. HS Bes.	(t/s)	110,0	112,0
	% katı	52,1	52,0
1.HS Alt Akım	(t/s)	77	79,5
	% katı	65,4	65,5
1.HS Üst Akım	(t/s)	33,0	33,0
	% katı	35,3	34,7
2. HS Bes.	(t/s)	129,0	130,0
	% katı	50,0	51,3
2. HS Alt Akım	(t/s)	95,1	96,1
	% katı	67	61,9
2.HS Üst Akım	(t/s)	33,7	33,7
	% katı	39,9	34,5

Devre çok sayıda ekipman ve akış içermesine karşın simülasyonla hesaplanan tonaj değerlerinin madde denklığı sonucu belirlenen değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. İkinci aşama hidrosiklon modelinin alt ve üst akıma suyunun dağılımının (water split) tahmininde belirli bir sapması olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hata boyut dağılımlarına yansımamaktadır.



Şekil 11. Madde denklığı sonrası boyut dağılımlarının modelleme ile tahmin edilen değerlerle karşılaştırılması.

## 5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

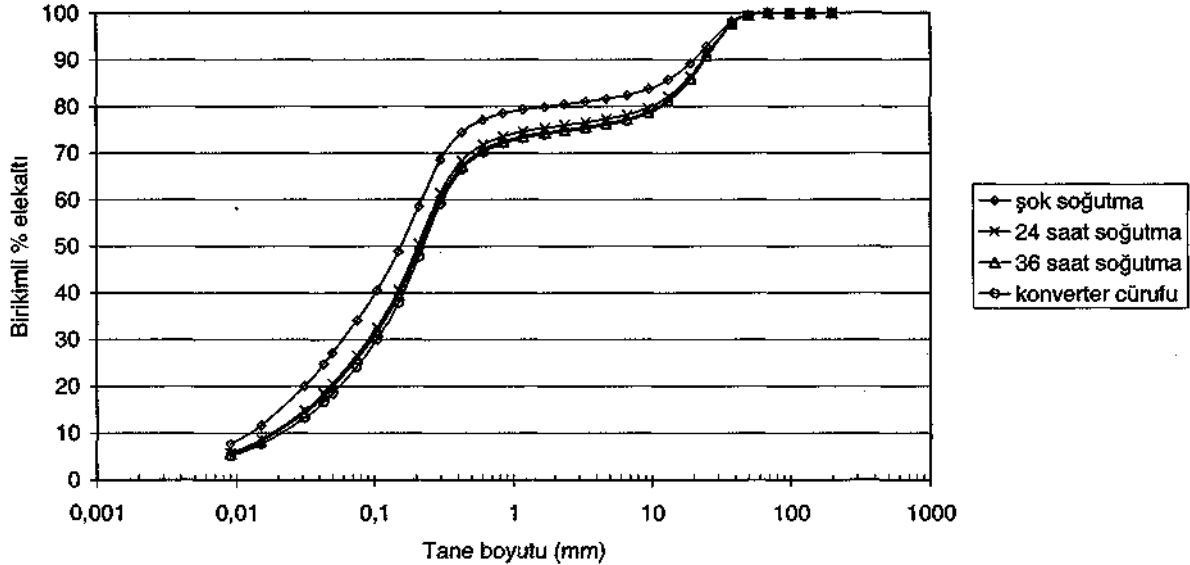
Farklı soğutulmuş cüruf numunelerinin öğütülebilirliklerinin devre performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan simülasyon çalışmalarında, aynı besleme tonajı ve boyut dağılımı kullanılarak, şok soğutulan, 24 saat ve 36 saat sonunda soğutulan flaş fırın cürufları ve konverter cürufunun Çizelge 1'de verilen kırılma parametreleri ve Şekil 1'deki akım şemasına göre simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sırasında değirmen ve sınıflandırıcı parametreleri ile ilgili bir optimizasyon yapılmamıştır. Ayrıca, simülasyon çalışmalarında boyut dağılımlarının flotasyon işleminin performansını etkilemeyeceği varsayılmıştır.

Şekil 12'de devreye farklı koşullarda soğutulmuş cüruflar beslendiğinde elde edilecek otojen değirmen çıkışı boyut dağılımları sunulmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi, şok soğutulan cüruf beslendiğinde otojen değirmen çıkışı diğerlerine oranla önemli ölçüde ince olmaktadır. Şok soğutma için otojen değirmen çıkışının  $P_{80}$  değeri 1,73 mm olurken diğer cüruflarda 9,9-11,6 mm arasında değişmektedir. Şok soğutulan cüruf için, birinci aşama hidrosiklon alt akımı ve eleküstü olarak toplam devreden yük önemli ölçüde azalmaktadır. Bu noktadan hareket

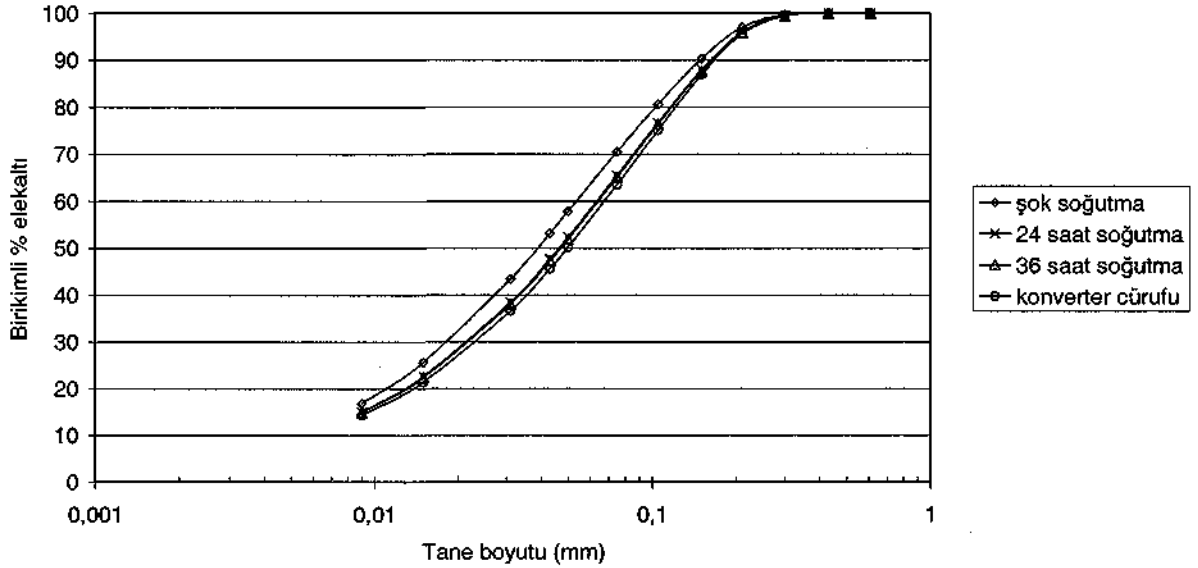
ederek 24 saat soğutulan cüruf beslendiğinde elde edilen boyut dağılımı elde edilene kadar besleme tonajı artırılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu şekilde, şok soğutma cürufu beslendiğinde öğütme devresinin kapasitesinin 45 t/s'e kadar artırılacağı belirlenmiştir. Dolayısıyla aynı incelik için şok soğutma %36 kapasite artışı sağlamaktadır.

Şekil 13'te birinci aşama hidrosiklon üst akımının tane boyut dağılımının karşılaştırılması sunulmaktadır. Farklı koşullarda hazırlanan cüruflar için, otojen çıkış boyut dağılımının benzeri bir sıralama gözlenmektedir. Şok soğutma için  $P_{80}$  değeri 0,103 mm olurken, diğer cüruflarda 0,160 ile 0,165 mm arasında değişmektedir.

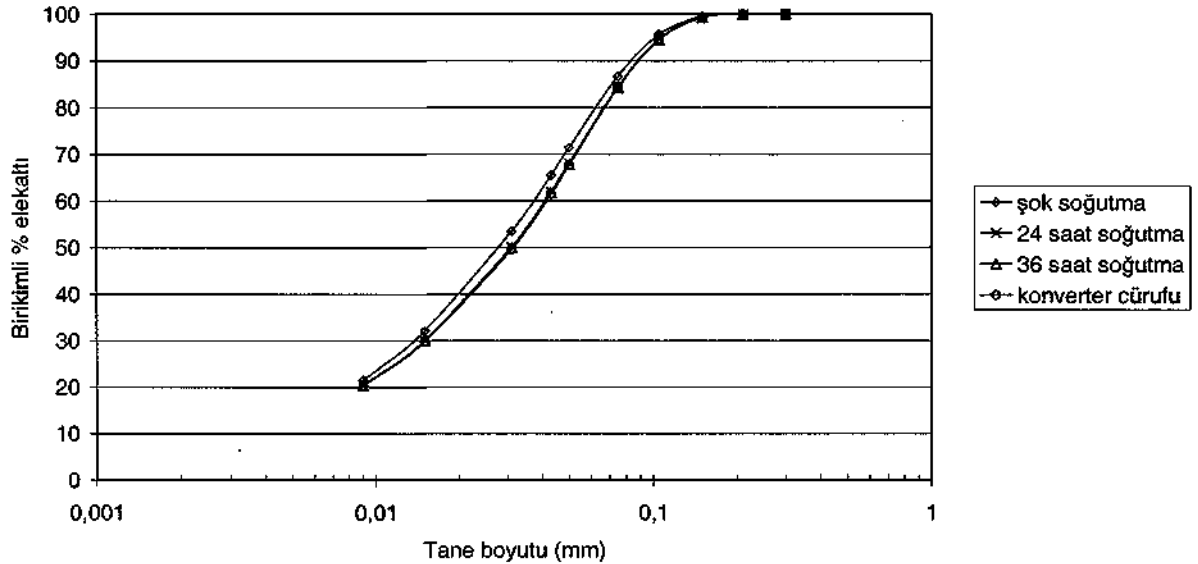
Şekil 14'te ikinci aşama hidrosiklon üst akımının tane boyut dağılımının karşılaştırılması sunulmaktadır. Şok soğutma için  $P_{80}$  değeri 0,062 mm olurken, 24 saat soğutma ve konverter cürufu için 0,067 mm ve 36 saat soğutulan flaş fırın cürufu için ise 0,069 mm olmaktadır. Çakıllı değirmende malzemenin darbe ile kırılabilirlik ve Bond iş indeksi performansı belirlediğinden 19,13 kWh/t iş indeksi değerine sahip 36 saat soğutma cürufu ile en iri flotasyon beslemesinin elde edileceği belirlenmiştir.



Şekil 12. Farklı cüruf numunelerinin tesise beslenmesi durumunda otojen değirmen çıkışının simülasyonla belirlenen boyut dağılımları.



Şekil 13. Farklı cüruf numunelerinin tesise beslenmesi durumunda birinci aşama hidrosiklon üst akımının simülasyonu ile belirlenen boyut dağılımları.



Şekil 14. Farklı cüruf numunelerinin tesise beslenmesi durumunda ikinci aşama hidrosiklon üst akımının simülasyonu ile belirlenen boyut dağılımları.

## 6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

KBİ Samsun İzabe Tesis'i'nde bulunan cüruf zenginleştirme tesisi öğütme devresinde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda modelleme ve simülasyon teknikleri kullanılarak farklı koşullarda soğutulmuş cüruf numunelerinin laboratuvarında belirlenen darbe ve aşınma karakteristikleri kullanılarak devre performansında meydana gelecek değişikliklerin

öğütme devresi performansı üzerine etkisi nicel olarak belirlenebilmektedir.

Madde denklığı sonuçları, örnekleme çalışmalarının başarıyla yapıldığını ve kullanılan örnekleme yönteminin uygun olduğunu göstermiştir. Modelleme çalışmalarında kullanılacak verilerin elde edildiği bu aşamanın, titizlikle yürütülmesi gereklidir.

Çalışmada, elek ve hidrosiklonlar için partiyon eğrisini tanımlayan basit bir model kullanılmıştır. Literatürde bulunan daha kapsamlı modeller olan Nageswararao veya Plitt Modelleri kullanılarak siklon geometrisinin etkisini inceleyebilecek şekilde rafine edilebilir (Napier-Munn vd., 1996).

Otojen değirmen performansında şok soğutma numunesi için belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu etki, otojen değirmenin açık devre çalıştığı varsayılarak başka bir çalışmada hesaplanmış, değirmen kapasitesinin şok soğutma için %100 kapasitede çalıştığı varsayılarak 24 saat soğutma sonunda kapasitenin %84'e, 36 saat soğutma sonunda %80'e ve konverter cürufu için %71'e düşeceği belirlenmiştir (Doğru ve Ergün, 2001). Kapalı devre öğütme ise şok soğutma dışındaki numuneler için bu etki devreden yükteki değişimlerle belirli ölçüde maskelenmektedir.

Geliştirilen simülasyon modeli devrenin optimizasyonu için de kullanılabilir duyarlılıktadır. Model güç tahminine yönelik kalibre edilerek daha da geliştirilebilir.

Bu çalışmada, cüruf numunelerinin flotasyon özellikleri ile ilgili bir çalışma yürütülmemiştir. Cüruf içinde fazların oluşum tane boyutunun soğuma hızına bağlı olduğu bilinmektedir (Shen ve Forssberg, 2003). Özbayoğlu ve Akgök'ün (1995) yaptıkları çalışma, şok soğutulan cüruf numunelerinin flotasyonunun başarısız olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, şok soğutma uygulanması cüruf lar için zenginleştirme açısından mümkün görünmemektedir. 36 saat soğutma sonunda ise cürufun Bond iş indeksi değeri çok artmaktadır. 24 ve 36 saat soğutma örneklerinin mineralojileri de benzerlik göstermektedir (Doğru ve Ergün, 2004). Buna göre, öğütme ve flotasyon açısından optimum soğutma süresinin 24 saatten kısa ve fazların oluşumuna yetecek kadar uzun olması gerekmektedir. Şok soğutulan ve 24 saat sonunda soğutma için devre kapasitesi arasında %36 gibi önemli bir fark bulunmaktadır. Bu durumda, deneysel olarak 6, 12 ve 18 saat soğutma için bu çalışmaya benzer bir çalışma ile öğütme devresi üzerine soğutma süresinin etkisi belirlendikten sonra buna paralel yürütülecek mineraloji ve flotasyon çalışmaları ile optimum koşullar belirlenebilecektir. Daha sonra, optimum soğutma koşullarında hazırlanan cüruf işlenirken yapılacak örnekleme çalışmaları ile elde edilecek

verilerle bu soğutma koşuluna göre tesis optimize edilebilir.

## 7. SONUÇLAR

KBİ Samsun İzabe Tesisi cüruf zenginleştirme tesisi öğütme devresinde yapılan örnekleme çalışmalarıyla elde edilen verilerle devrede bulunan otojen ve çakıllı değirmen, elek ve hidrosiklonların matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, tesiste ölçülmüş olan tane boyut dağılımları ve tonajları başarı ile tahmin etmektedir.

Simülasyon yoluyla, farklı koşullarda soğutulmuş cüruf ların öğütme devresi üzerine performansı incelenmiş, şok soğutmanın öğütmeyi önemli ölçüde kolaylaştıracağı belirlenmiştir.

Diğer soğutma süreleri sonunda birbirine yakın ürünler alınmaktadır. Bu nedenle optimum soğutma süresinin 24 saatten daha kısa, fazların oluşumuna yetecek kadar uzun olması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışma sırasında işbirliği ve yardımlarından ötürü KBİ Samsun İzabe Tesisleri çalışanlarına ve H.Ü. Maden Müh. Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı Öğretim Görevlisi Dr.Hakan Benzer ve Araştırma Görevlileri Namık Aydoğan, Aysun Günlü, İlkay Çelik, Ömürden Genç, Can Özer ve Seyfi Erdem'e teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

Anon., 1968; "Pilot Plant Evaluation of Wet Autogenous Grinding of a Copper Smelter Slag", Yayınlanmamış Rapor, Inst.Min.Res, Michigan Tech.University, 65.

Austin, L.G. and Luckie, P.T. ve Klimpel,R.R., 1984; "The Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", SME/AIME, New York: 561.

Austin, L.G., Weymont, N.P. Prsbrey, K.A. ve Hoover, M., 1976; "Preliminary Results on the Modelling of Autogenous Grinding", Proc. of 14th APCOM Conf., Penn.State Uni., 207-226.

Davenport, W.G. ve Partelpoeg, E.H., 1987, "Flash Smelting: Analysis, Control and Optimization", Pergamon Press, Oxford, 28-29.

Doğru, T., ve Ergün, Ş.L., 2004; "Soğutma Süresinin KBİ Samsun Bakır İzabe Cüruflarının Kırılma Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi" Madencilik Dergisi, Haziran 2004, 43, (2), 25-36.

Doğru, T., ve Ergün, Ş.L., 2001; "KBİ Samsun İzabe Cüruflarının Otojen Öğütme Özelliklerinin İncelenmesi", 17. Uluslararası Madencilik Kongresi, 19-22 Haziran, Ankara, 153-159.

Leung, K., 1987; "An Energy Based Ore Specific Model for Autogenous and Semi-Autogenous Grinding", Doktora Tezi University of Queensland.

Lynch, A.J., 1977; "Mineral Crushing and Grinding Circuits: their Simulation, Optimisation, Design and Control. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 340.

Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D. ve Kojovic T., 1996; "Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation; JKMRRC, Brisbane, 413.

Ozbayođlu, G. ve Akgök, Y.Z., 1995; "Effect of Cooling Rate on the Flotation Behaviour of Copper Slags", Proc. XIX IMPC, SME, Littleton-Colorado, 4, 147-149.

Shen, S. ve Forssberg, E., 2003; "An Overview of Recovery of Metals from Slags", Waste Management, 23, 933-949.

Whiten, W.J., 1974; "Matrix Theory of Comminution Machines", Chem. Engng. Sci., 29, 589-99.