

## BİR BAKIR/ÇİNKO CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI

Okay ALTUN (ORCID: 0000-0002-9823-3130)\*

Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 17.04.2017  
Kabul / Accepted: 10.07.2017

### ÖZ

Cevher hazırlama süreci içerisinde enerjinin en yoğun harcandığı birim işlem kırma ve öğütme olup modelleme ve simülasyon çalışmaları ile enerji optimizasyonunun sağlanabileceği bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında, kalkopirit, sfalerit ve pirit minerallerinin öğütüldüğü yaş çalışan bir öğütme devresinde gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada ilk olarak 2 adet bilyalı değirmen ve siklon bataryası bulunan tesisten numuneler alınmış ve boyut dağılımı, kimyasal analiz gibi ölçümler yapılmıştır. Sonrasında devreye ait kütle denklığı kurulmuş ve ekipmanlara ait model yapıları geliştirilmiştir. Model yapılarının geliştirilmesinin ardından farklı simülasyon senaryoları üzerinde durulmuştur. Sırasıyla, birincil bilyalı değirmenin çalışma %katı değeri ve hidrosyklona ait apex ve vortex parametreleri değiştirilmiştir. Tesiste yapılan değişiklikler neticesinde, besleme kuru tonajı 172,5 t/sa değerinden 190 t/sa ve 195 t/sa değerine çıkartılmış olup artış oranı sırasıyla %10 ve %13 olarak hesaplanmıştır. Bilgisayar ortamında tamamlanan hesaplamaların ardından işletme tarafından ikinci alternatif seçilmiş ve fiili olarak tonaj değeri 195 t/sa değerine çıkartılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Öğütme, optimizasyon, enerji, simülasyon

## ENERGY OPTIMIZATION OF A COPPER/ZINC GRINDING CIRCUIT

### ABSTRACT

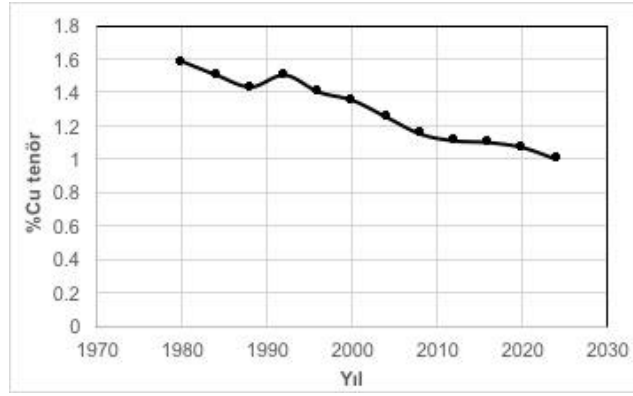
Since the comminution process is the most energy consuming part of the whole mining operation, it is well known that energy optimization can be provided with the aid of modelling and simulation studies. Within the scope of the study, the simulation studies performed for wet grinding circuit processing chalcopryrite, sphalerite and pyrite minerals are presented. Initially, sampling campaign was arranged around the circuit that consisted of two ball mills and a hydrocyclone cluster system. Then the size distributions together with the chemical assays were determined. Afterwards, mass balancing around the circuit was performed and the model structures of the equipment were developed. Model of the whole circuit was used to simulate different operating conditions. Initially, solid content of the primary ball mill was adjusted and apex/vortex geometries of the hydrocyclone were redesigned. As a consequence of the simulations, the dry tonnage of the feed to the circuit was increased from 172.5 t/h to 190 t/h and then 195 t/h that corresponds to increase by 10% and 13%. Finally, the second option was chosen for the plant and the real production rate was increased to 195 t/h.

**Keywords:** Grinding, optimization, energy, simulation

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 312 780 76 08; e-mail / e-posta: okyaltun@hacettepe.edu.tr

*BİR BAKIR/ÇİNKÖ CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI***1. GİRİŞ**

Öğütme işleminin amacı, ham cevherin tane boyutunu bir sonraki zenginleştirme işlemine uygun bir hale getirmektir. Bir başka deyişle, mineral taneleri zenginleştirme işlemine uygun serbestleşme boyutuna ulaşana kadar boyut indirgeme işlemi devam etmektedir. Günümüze kadar farklı teknolojiler geliştirilmiş olsa dahi, öğütme işlemi tüm madencilik operasyonu düşünüldüğünde enerjinin en yoğun harcandığı birim işlem olma özelliğini kaybetmemiştir. Yürütülen araştırmalar neticesinde Dünya genelinde harcanan elektrik enerjisinin %4'ünün ve madencilik operasyonunda ise %50'sinin kırma ve öğütme işlemlerinde harcandığı tespit edilmiştir [1]. Enerji tüketiminin yüksek olmasının yanı sıra bakır cevheri besleme tenör değerlerinin de giderek azalması bir diğer sorun olarak ön plana çıkmaktadır. Şekil 1'de Crowson [2] tarafından besleme bakır tenörü üzerinden yapılan tahminler yer almaktadır.



**Şekil 1.** Dünya genelinde besleme bakır tenörünün yıl bazlı değişimi [2]

Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere dünya genelinde %1,5-1,6 gibi değere sahip olan besleme bakır tenörünün, 2024 yılına gelindiğinde %1 değerine gerileyeceği öngörülmektedir. Ayrıca bakır mineralinin giderek daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle de daha ince serbestleşme boyutlarına öğütme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Gerek madencilik operasyonunun daha maliyetli hale gelmesi ve gerekse de daha ince boyutta öğütme yapılması ihtiyacı, enerji verimli öğütme devrelerine olan ihtiyacı da arttırmaktadır.

Bir öğütme devresinde birim enerji tüketiminin (kWs/a/t) düşürülmesinde birkaç farklı yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan ilki yeni gelişen teknolojilerin üretim sürecine dahil edilmesidir. Bu bağlamda son yıllarda geniş uygulama alanı bulan karıştırılmalı değirmenler [3, 4], ön öğütme işleminde kullanılan yüksek basınçlı merdaneli presler [5] ve hem öğütme hem de sınıflandırma işlemini tek bir ekipmanda gerçekleştirebilen dik değirmenler [6] yeni devre akım şemalarında tercih edilebilmektedir. Ek olarak bu ekipmanlar, tesiste bulunan bazı akış kollarına adapte edilerek üretim miktarında artış sağlayabilmekte ve devrenin özgül enerji tüketimini düşürebilmektedir.

Bir diğer yöntem de mevcut devrede bulunan ekipmanların uygun çalışma koşullarının belirlenerek verimli bir öğütme-sınıflama işleminin gerçekleştirilmesidir. Geleneksel bir kapalı devre öğütme sisteminde bilyalı değirmen ve sınıflandırıcı bulunmaktadır. Bilyalı değirmende bilya boyu, bilya tipi, bilya doluluğu, astar dizaynı, besleme miktarı, besleme malzemesi boyut dağılımı, kullanılan kimyasal tipi gibi değişkenler öğütme performansını doğrudan etkilemektedir. Sınıflandırıcılarda da benzer şekilde besleme miktarı, işletme koşulları (%katı, basınç vb.) ve dizayn değişkenleri (apex, vortex vb.) performans üzerinde etkili olmaktadır. Tesis ölçeği düşünüldüğünde bütün bu değişkenlerin etkilerinin ortaya konulması hem zahmetli hem de maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle de, ekipmanlara ait matematiksel model yapılarını içeren paket programlar ile bilgisayar ortamında iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Bu bağlamda JKSimMet, ModSim vb. yazılımlar kullanılabilir ve bilgisayar ortamına aktarılan devre üzerinde çalışmalar yürütülebilmektedir. Dunder ve ark. [7], çimento öğütme devresinde yürüttükleri çalışmada, farklı zamanlarda ve koşullarda numune almış ve devrede bulunan bilyalı değirmen, sınıflandırıcı ekipmanlarına ait model yapıları geliştirmiştir. Çalışmada bilya boyut dağılımının üretim miktarı üzerindeki etkisini gösteren simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonrasında da önerilen değişiklik tesis tarafından uygulanmıştır. Simülasyon ortamında %10-17 arasında olduğu belirlenen üretim miktarı artışı, gerçekte %12-20 aralığında olmuştur. Altun [8] yürüttüğü çalışmada çimento öğütme devresi akım şemasını çimento kalite verilerini baz alarak bilgisayar ortamında değiştirmiş ve üretim miktarında

O. ALTUN

%10'luk bir artışın olabileceğini öngörmüştür. Umucu ve ark. [9] yapay sinir ağı modellemesi ve simülasyonu ile öğütme devresi üzerinde çalışmışlardır. Delgadillo ve ark. [10] ve Fuerstenau ve ark. [11] matematiksel model yapıları geliştirerek simülasyon için alt yapı hazırlamışlardır.

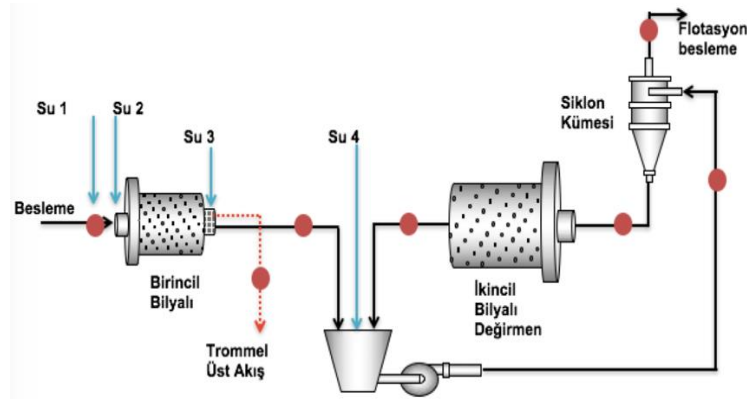
Benzer çalışmaların yaş öğütme devresi için de yapılabileceği aşikardır. Ülkemizde farklı mineral uygulamalarında yaş öğütme sistemleri tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde bulunan ve kalkopirit, sfalerit, pirit minerallerinin öğütüldüğü çalışan bir tesiste yürütülen simülasyon çalışmalarının sonuçları sunulmaktadır. Şunu önemle vurgulamak gerekir ki, bu çalışma kapsamında yürütülen çalışmalar ve elde edilen bulgular gerçek tesis verilerine dayanmaktadır. Çalışma yöntemi olarak, ilk aşamada çalışan tesis üzerinde, tesis personelinin belirlediği koşullar doğrultusunda örnek toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada, toplanan numunelerin özellikleri ya da karakteristikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Bu bağlamda devre etrafındaki boyut dağılımının değişimi, besleme malzemesinin iş indeksi ve kırılma dağılımı, yoğunluk ve kimyasal analiz gibi ölçümler gerçekleştirilmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinin akabinde, devre etrafındaki akış hızlarının belirlenmesi ve geliştirilecek model yapılarına baz oluşturması açılarından madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Lagrange eşitliklerinin kullanıldığı madde denkliği çalışmalarının neticesinde ölçülen değerler hatalardan arındırılmış olup model ve simülasyon çalışmalarının alt yapısı hazırlanmıştır. Yürütülen bu çalışmanın son aşamasında, tesisin enerji verimliliğini iyileştirebilecek 2 farklı çözüm senaryosu üzerinde durulmuştur. Çözüm senaryoları, çalışan bir tesisin performansını arttırabilecek gerçekliğe sahip olup devre koşullarının ve ekipman dizaynlarının belirli oranlarda değiştirilmesini kapsamaktadır. Bilimsel olarak yürütülen bu çalışmadan elde edilen bulguların tartışılmasının ve sunulmasının hem akademik hem de tesis bazında katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Örneklenen Devre Akım Şeması ve Örneklemeye Koşulları

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesiste işlenen cevherin içeriğinde çoğunlukla sülfürlü mineraller bulunmaktadır. Cevher çok yüksek oranda kalkopirit, sfalerit ve pirit ihtiva etmekle birlikte az miktarda dolomit ve barit de içermektedir.

Tesiste cevher yeraltından çıkartılmakta ve sonrasında stok sahasına yönlendirilmektedir. Stok sahasından alınan cevher öncelikle çeneli kırıcıdan geçirilmekte ve buradan en üst boyu 13mm olan cevher yaş öğütme devresine bant konveyörler aracılığıyla taşınmaktadır. Çalışmanın gerçekleştirildiği devreye ait akım şeması ve kırmızı bölgelerle gösterilen örneklemeye noktaları Şekil 2'de sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, devrede iki adet bilyalı değirmen ve bir adet siklon bataryası/kümesi kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. Şekil 2'den de izlenebileceği gibi birincil değirmen çıkışında bulunan trommel elekten belirli bir miktarda mıcır alınmaktadır. Öğütme ve sınıflama işlemi sonrasında yeterli incelikte olan siklon üst akış malzemesi flotasyon işlemine gönderilmekte ve zenginleştirme işlemi neticesinde %24 bakır içeriğine sahip cevher alınmaktadır. Tesise ait bilgi olması açısından, değirmen astarları kauçuk ile kaplı olmakla birlikte devrede meydana gelen toplam bilya aşınması 1,1 kg/t cevher olarak ölçülmektedir. Örnek toplama işleminin gerçekleştirildiği yaş öğütme devresinde bulunan ekipmanlara ait teknik özellikler Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Çalışmanın gerçekleştirildiği yaş öğütme devresine ait akım şeması

**BİR BAKIR/ÇİNKO CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI****Tablo 1.** Bilyalı değirmenlere ait teknik veriler

Özellik	Birincil bilyalı değirmen	İkincil bilyalı değirmen
Çap (m)	3,2	4,4
Uzunluk (m)	4,3	7,2
Kurulu güç (kW)	550	2200
Değirmen hızı (d/dk)	20,98	19,11

**Tablo 2.** Hidrosiklona ait teknik veriler

Besleme çap (mm)	154
Vortex çap (mm)	130
Apex çap (mm)	80
Giriş basıncı (kPa)	100

Örnek alma işlemi öncesinde devrenin çalışma koşulları 2 saat süre ile incelenmiş ve kararlı durumda çalıştığına tespitinin ardından numune toplama aşamasına geçilmiştir. Tablo 3'te öğütme devresinin kararlı durumda olduğunun tespitinin ardından ölçülen ortalama değerler sunulmaktadır.

**Tablo 3.** Öğütme devresine ait kararlı durum ortalama çalışma koşulları

Birincil değirmenin çektiği güç (kW)	2048
İkincil değirmenin çektiği güç (kW)	481
Ortalama besleme tonajı (t/sa)	180,13
Hidrosiklon beslemesi havuz seviyesi (%)	86,16
Hidrosiklon üst akışı katı oranı (%)	36,2
Hidrosiklon basıncı (kPa)	102

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar numunelerin, boyut dağılımlarının, katı oranlarının, kimyasal analizlerinin, yoğunluklarının, Bond iş indeksi değerlerinin belirlenmesi aşamalarını içermektedir. Boyut dağılımının belirlenmesi 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tüm malzeme en üst boydan 36µm boyuna kadar yaşı elenmiştir. Bu boyun altında kalan malzemenin dağılımı ise tesis imkanları doğrultusunda çok siklonlu boyutlandırıcı tekniği kullanılarak 8µm boyuna kadar tespit edilmiş ve sonrasında iki teknikten gelen veriler birleştirilmiştir. Çok siklonlu boyutlandırıcı birbirine seri olarak bağlanmış 5 adet siklondan oluşmaktadır. Bu teknikte, her bir siklonun besleme ve dalma borusu (vortex) çaplarındaki farklılığına bağlı olarak farklı boylarda malzeme almak mümkün olmaktadır. Temelde merkezkaç kuvveti ayırımı etkili olmaktadır. Toplanan örnekler ait katı oranları yaş ve kuru tartımların alınması ile belirlenmiştir. Cevherin ve trommel elek üst malzemesinin Bond iş indeksleri de TS 7700 [12] standardı uygulanarak tespit edilmiştir.

Şekil 3'te devreye ait ölçülen boyut dağılımları sunulmaktadır. Hidrosiklon etrafı boyut dağılımlarından belirli bir ayırımın olduğu hidrosiklon alt akım malzemesinin hidrosiklon beslemesine oranla iri, hidrosiklon ürününün ise en ince boyut dağılımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Trommel elekte kalan malzemenin boyut dağılımı tesis besleme malzemesine oranla daha iri kalmaktadır.

Tablo 4'te malzeme özellikleri sunulmaktadır. Bond iş indeksi sadece tesis beslemesi ve trommel elekte kalan malzeme için yapılmışken, yoğunluk ve kimyasal analiz ölçümlerinde trommel elek altı malzemesi de değerlendirilmeye alınmıştır.

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, trommel elek üstünde kalan malzemeye ait iş indeksi tesis beslemesine oranla daha yüksek bir değere sahip olmaktadır. Değirmen çıkışında bulunan trommel elek malzemeyi seçimli olarak ayırabilmektedir. Ayrıca kimyasal analiz ve yoğunluk ölçümlerinden de malzemeler arasında belirli bir farklılığın olduğu izlenebilmektedir. Cevher mineralojisine ait bilgilerden de takip edilebileceği üzere cevher yüksek oranda sülfürlü mineraller içermesine rağmen az miktarda dolomit ve baritin de yapıda bulunması nedeniyle bu sonucun elde edildiği düşünülmektedir.

O. ALTUN

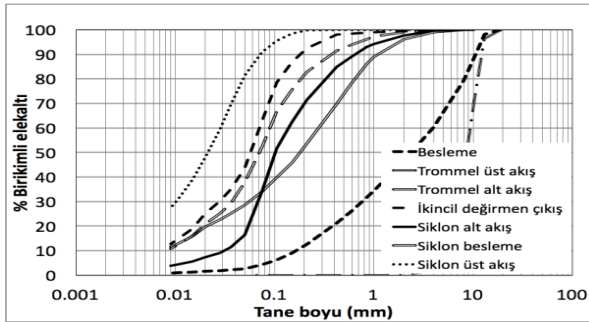
**Tablo 4.** Bond iş indeksi testi sonuçları

Numune adı	İş indeksi (kWsa/t)	Yığın yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%Cu	%Zn	%Fe
Tesis beslemesi	12,62	2,33	3,75	3,00	2,85	29,0
Trommel elekte kalan malzeme	17,15		2,77	0,31	0,23	6,25
Trommel elek altı malzemesi	-		3,88	3,01	2,61	29,3

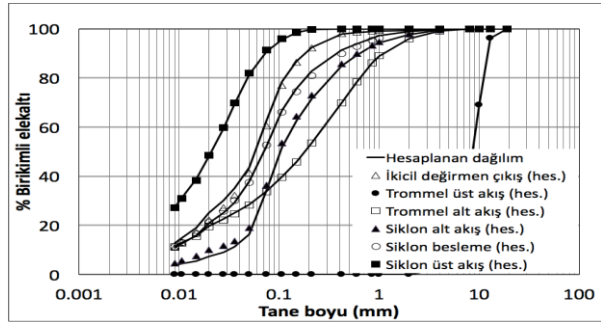
### 2.3. Madde Denkliği ve Modelleme Çalışmaları

#### 2.3.1. Madde Denkliği

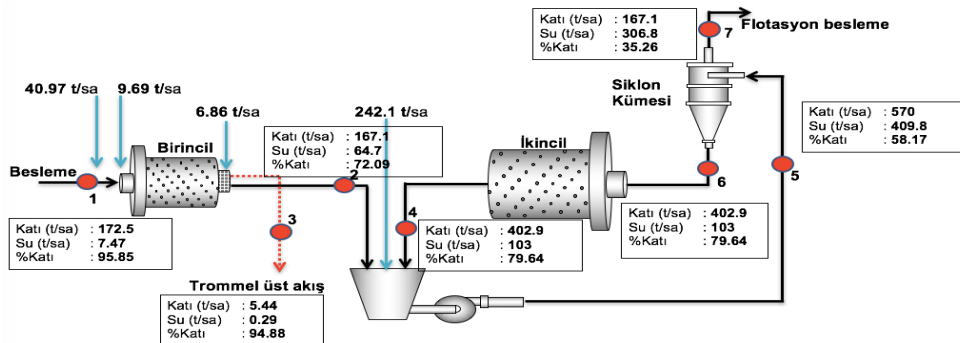
Herhangi bir örnekleme çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçümsel hatalardan kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denkliği, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak devre etrafındaki akışların en iyi şekilde tahmin edilmesi işlemini kapsamaktadır. Bu çalışma kapsamında, öğütme devresinden alınan devre etrafı numunelerinin tane boyu dağılımları, kontrol odasında kaydedilen tonaj değerleri ve akışların katı oranları kullanılarak madde denkliği çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında JKSimMet programı yapısında yer alan madde denkliği algoritması kullanılmıştır. Madde denkliği çalışmaları sonucunda, devre etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak devredeki tüm kolların akış hızları hesaplanmıştır. Şekil 4’te ölçülen ve madde denkliği sonucu hesaplanan tane boyu dağılımları gösterilmektedir. Her bir akış kolunun değerlerinin birbirine çok yakın olması örnek alma işleminin sorunsuz gerçekleştirildiğini göstermektedir. Hesaplanan akış hızları da Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Devre etrafı ölçülen boyut dağılımları



Şekil 4. Ölçülen ve hesaplanan devre etrafı boyut dağılımları



Şekil 5. Madde denkliği sonucu ölçülen akış hızları

#### 2.3.2. Bilyalı Değirmen Modeli

Bilyalı değirmenlerde gerçekleşen işlem ister kesikli, ister sürekli olsun değirmene ait model yapısı mükemmel karışım üzerine geliştirilmiştir. Mükemmel karışım modeli denge koşulundaki bir sistemde, bir kütle denkliği

**BİR BAKIR/ÇİNKO CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI**

modelinin temelini oluşturur. Bu model yapısında besleme ve öğütme işlemi ile iri boylardan alt boylara gelen malzeme toplamı ile sistemi terk eden ve öğütülerek alt boya geçen malzemenin toplamı birbirlerine eşit olmaktadır.

Mükemmel karışım modeline göre;  $i$  fraksiyonunun değirmenden çıkışı,  $d_i = p_i / s_i$  olarak verilebilir. Burada;  $s_i$ , değirmen durdurulduğunda (S) içerideki  $i$  fraksiyonunun ağırlığını ton cinsinden;  $p_i$  ise  $i$  fraksiyonunun, değirmenden ürün olarak çıktığı akış hızını ifade etmektedir [13].

Kırılma hızı ( $r$ ), değirmenin durdurulmasına dayalı çıkış hızı fonksiyonundan bağımsız olarak geri hesaplanabilir (Eşitlik 1).

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

Burada;

- $f_i$  : Değirmen içerisindeki  $i$  fraksiyonunun kütle akış hızı
- $p_i$  : Değirmen çıkışındaki  $i$  fraksiyonunun kütle akış hızı
- $r_i$  :  $i$  fraksiyonunun özgül kırılma hızı
- $a_{ij}$  : Kırılmadan sonra  $i$  boyunda oluşan  $j$  boyunun kütle fraksiyonu
- $d_i$  :  $i$  fraksiyonunun özgül çıkış hızı
- $s_i$  :  $i$  fraksiyonunun değirmen durdurulduğundaki kütlesi

Değirmenlerde, değirmen durdurulduğunda (S) ölçüm yapmak zordur. Bu sebeple, bilyalı değirmenler, kırılma hızının, çıkış hızına oranının ( $r/d$ ) geri hesaplanmasıyla modellenmektedir. Geleneksel olarak, bilyalı değirmen model parametresi olarak tanımlanan  $r/d$  oranı, Eşitlik 2 kullanılarak geri hesaplanmaktadır [13].

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \left( \frac{r_j}{d_j} \right) - p_i \left( \frac{r_i}{d_i} \right) = 0 \quad (2)$$

Modelleme çalışmaları süresince yapılan hesaplamalarda  $a_{ij}$  değişkeninin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu parametre malzemeye özgü olup, enerjiye bağlı olarak tanelerin alt boylara hangi oranda dağıldığını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, Eksi ve ark.. [14] tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak kırılma dağılım fonksiyonu belirlenmiş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Tablo 5'te hesaplamalarda kullanılan kırılma dağılım fonksiyonu sunulmaktadır.

**Tablo 5.** Kırılma dağılım fonksiyonu

1,700	0,00
1,180	0,34
0,850	0,13
0,600	0,10
0,425	0,08
0,300	0,05
0,212	0,06
0,150	0,04
0,106	0,03
0,075	0,03
0,053	0,03
0,038	0,04
-0,038	0,06

### 2.3.3. Trommel Elek Modeli

Trommel elekte belirli bir sınıflama işlemi gerçekleşmektedir. Sınıflama işleminin verimliliği Tromp ya da verimlilik eğrisi ile ifade edilebilmektedir. Sınıflandırıcıların matematiksel modellenmesinde verimlilik eğrisini ifade eden matematiksel eşitliğin kullanılabileceği Altun ve Benzer [15] tarafından belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında da verimlilik eğrisinin matematiksel modelini geliştiren Whiten'a ait verimlilik eğrisi yaklaşımı kullanılmıştır [16]. Modelin matematiksel eşitliği Eşitlik 3'te verilmektedir.

O. ALTUN

$$E_{oa} = C * \left[ \frac{\left( 1 + \beta * \beta^* * \frac{d}{d_{50c}} \right) * (\exp(\alpha) - 1)}{\exp\left( \alpha * \beta^* * \frac{d}{d_{50c}} \right) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (3)$$

Burada;

$E_{oa}$  : Beslemenin üst akışa giden fraksiyonu

$C$  : “Gerçek” sınıflandırmadaki fraksiyon. Örnek; 1-bypass fraksiyonu

$\alpha$  : İndirgenmiş verimlilik eğrisi keskinlik parametresi

$\beta$  : İndirgenmiş verimlilik eğrisi olta etkisi parametresi

$\beta^*$  :  $d_{50c}$  tanımını ifade eden bir parametre. Örnek;  $E = (1/2)C$  olduğunda  $d = d_{50c}$

$d$  : Boyut

$d_{50c}$  : Beslemedeki, alt akıma ya da üst akıma gitme olasılığı eşit olan tanenin boyu

Bu modelde;  $\beta$ , ince boylarda, eğrideki ilk yükselmeyi kontrol eder.  $\alpha$  ise  $d$ 'nin  $d_{50c}$  yakınlarında olduğu daha iri boylarda, eğimi belirler.  $\beta^*$ , eşitliğin sağlanması sırasında tekrarlanarak hesaplanır.

### 2.3.4. Hidrosiklon Modellemesi

Hidrosiklon modeli, Nageswararo yaklaşımı kullanılarak geliştirilmiştir [16]. Nageswararo, hidrosiklondaki tüm değişkenleri göz önünde bulundurarak, bunlar (besleme akış hızı ve hidrosiklon geometrisi) arasında bir ilişki elde etmiştir. Bu yöntemin ana hatları aşağıdadır:

Bağımlı değişkenler

- Euler sayısı,
- Birimsiz kesme boyu,
- Alt akıma giden suyun geri kazanımı,
- Alt akıma giden besleme pülünün hacimsel geri kazanımı

Çalışma ve tasarım değişkenleri

- Siklon çapı
- İndirgenmiş üst açıklık
- İndirgenmiş alt açıklık
- İndirgenmiş besleme ağzı
- Silindirik kısmın indirgenmiş uzunluğu

Model yapısında, bu çalışmada da sunulan, 7 adet parametre bulunmaktadır bunlar Nageswararao [16] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- $K_{D0}$  : Besleme tane boyu ve özgül ağırlığına bağlı sabit
- $K_{Q0}$  : Besleme özgül ağırlığına
- $K_{V1}, K_{W1}$  : Sabitler
- Alpha, Beta, Beta\* : Whiten verimlilik eğrisi yaklaşımından elde edilen parametreler Nageswararao [16] tarafından geliştirilmiş olan eşitlikler, Eşitlik 4,5,6,7,8,9 aşağıda sunulmaktadır

$$Q = K_{Q2} D_c^2 (P / \rho_p)^{0.5} (D_o / D_c)^{0.68} \quad (4)$$

$$K_{Q2} = K_{Q1} (D_i / D_c)^{0.45} (\theta)^{-0.1} (L_c / D_c)^{0.2} \quad (5)$$

$$K_{Q1} = K_{Q0} D_c^{-0.1} \quad (6)$$

$$R_f = K_{w2} (D_o / D_c)^{-1.19} (D_u / D_c)^{2.40} (P / \{ \rho_p g D_c \})^{-0.53} (\lambda)^{0.27} \quad (7)$$

$$K_{w2} = K_{w1} (D_i / D_c)^{-0.50} (\theta)^{-0.24} (L_c / D_c)^{0.22} \quad (8)$$

$$K_{v2} = K_{v1} (D_i / D_c)^{-0.25} (\theta)^{-0.24} (L_c / D_c)^{0.22} \quad (9)$$

Burada;

$Q$  : Hidrosiklondan geçen debi ( $m^3/sa$ )

$R_f$  : Beslemeden alt akıma giden su oranı (%)

$P$  : Besleme basıncı (kPa)

*BİR BAKIR/ÇİNKO CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI*

- $L_c$  : Silindirik kısım uzunluğu (m)
- $D_c$  : Hidrosiklon çapı (m)
- $D_i$  : Hidrosiklon giriş çapı (m)
- $D_o$  : Hidrosiklon üst akış borusu çapı (m)
- $D_u$  : Hidrosiklon alt akış borusu çapı (m)
- $\rho_p$  : Besleme pülp yoğunluğu ( $t/m^3$ )
- $\theta$  : Konik kısım çapı (derece)
- $\lambda$  :  $10^{1.82C_v} / (8.05 * (1 - C_v)^2)$
- $C_v$  : Beslemedeki hacimsel katı oranı
- $K_{Q2}$  : Besleme malzemesi ile siklon çapına bağlı bir sabit
- $K_{W2}$  : Sabit
- $K_{V2}$  : Sabit

**3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

**3.1. Bilyalı Değirmen Performansları**

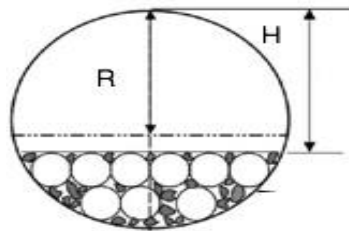
Birincil ve ikincil bilyalı değirmenlerin performanslarının değerlendirilmesinde indirgeme oranları, özgül enerji tüketimleri, doluluk oranları ve değirmen içi bilya dağılımları baz alınarak değerlendirilmiştir. Buradan elde edilen veriler bilyalı değirmenlerin modellenmesi işlemi sırasında kullanılmıştır [16]. Tablo 6’da bilyalı değirmenlerin üretim sırasında çektikleri güçler, özgül enerji tüketimleri ve incelik değerleri sunulmaktadır. İncelik değerleri olarak malzemenin %80’inin ( $d_{80}$ ) ve %50’sinin ( $d_{50}$ ) geçtiği boylar hesaplanmıştır.

**Tablo 6.** Bilyalı değirmen özgül enerji tüketimleri ve incelikleri

	<b>Birincil değirmen</b>	<b>İkincil değirmen</b>
Güç (kW)	481	2048
Üretim miktarı (t/sa)	172,5	402,9
Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)	2,79	5,08
Besleme $d_{80}$ (mm)	8,2	0,33
Besleme $d_{50}$ (mm)	6,9	0,15
Ürün $d_{80}$ (mm)	0,73	0,12
Ürün $d_{50}$ (mm)	0,44	0,10
İndirgeme oranı ( $F_{80} / P_{80}$ )	11,2	2,7

Değirmenlere ait veriler incelendiğinde besleme malzeme boylarındaki farklılıktan dolayı ikincil değirmen birincil değirmene oranla daha yüksek enerji tüketimine ve daha düşük boyut indirgemesine sahip olmaktadır.

Değirmen içi bilya doluluğu öğütme performansını doğrudan etkileyen değişkenlerden bir tanesidir. Bu çalışma kapsamında her iki değirmene ait doluluk oranları, durdurulan değirmenlerin içerisinden yükseklik ölçümleri alınarak hesaplanmıştır. Şekil 6’da ölçüm noktaları gösterilmekte olup, Eşitlik 10’da hesaplama metodolojisi özetlenmektedir [16].



**Şekil 6.** Değirmene ait kesit görünümü

$$A_c = R^2 \cos^{-1} \left( \frac{H}{R} \right) - H \sqrt{R^2 - H^2} \tag{10}$$



O. ALTUN

Burada;

H : Değirmen içi yükseklik ölçümü (m)

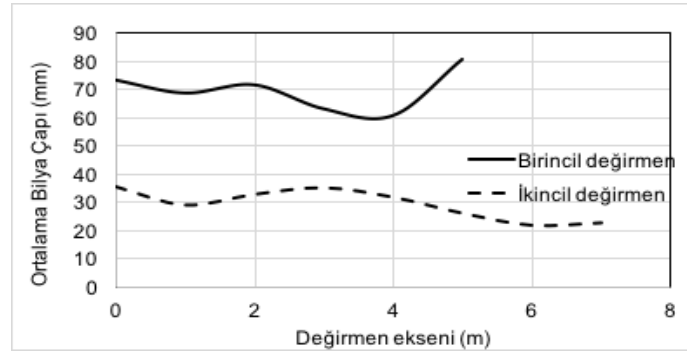
R : Değirmen yarı çapı (m)

Bilya doluluğuna geçerken eşitlikten hesaplanan  $A_c$  değeri değirmenin toplam kesit alanına oranlanmaktadır. Tablo 7’de değirmenlere ait doluluk oranları belirtilmektedir.

**Tablo 7.** Değirmenlere ait doluluk oranları

	Birincil değirmen	İkincil değirmen
Etkin çap (cm)	310	435
Yükseklik (cm)	190	265
<b>Doluluk oranı (%)</b>	<b>35,8</b>	<b>27,7</b>

Çalışmanın son aşamasında durdurulan değirmenlerin içerisinde her bir metre ara ile bilya numuneleri toplanmıştır. Her bir metreden yaklaşık olarak 20 kg bilya örneği alınmış ve kumpas yardımıyla bilyaların farklı bölgelerinden ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler sonrasında boyut dağılımları çizilmiş ve dağılımın tek bir boyla ifade edilmesi amacıyla her metredeki ortalama bilya boyu hesaplanmıştır. Şekil 7’de değirmen eksenı boyunca ortalama bilya boyundaki değişim gösterilmektedir.



**Şekil 7.** Değirmenlerin eksenı boyunca ortalama bilya çapındaki değişim

Şekil 7’den de anlaşılacağı üzere, ortalama bilya çapı değirmen girişinde değirmen çıkışına oranla daha iri olmaktadır. Her ne kadar kimi bölgelerde bilya çapında artışlar gözlemlense de genel eğilim azalma yönündedir. Yapılan ölçümler neticesinde birincil ve ikincil değirmen için ortalama bilya çapı sırasıyla 67,4 mm ve 29,5 mm olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde elde edilen bu değerler, değirmenlerin modellenmesi ve ardından yürütülen simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Ancak belirtmek gerekir ki, simülasyon çalışmalarında ortalama bilya boyunda değişikliğe gidilmemiştir.

### 3.2. Hidrosiklon Performansı

Herhangi bir sınıflandırıcının boyut ayırımı yönünden performansı değerlendirilirken performans eğrisi (verimlilik veya tromp eğrisi) kullanılmaktadır. Tipik bir performans eğrisi Şekil 8’de verilmektedir.

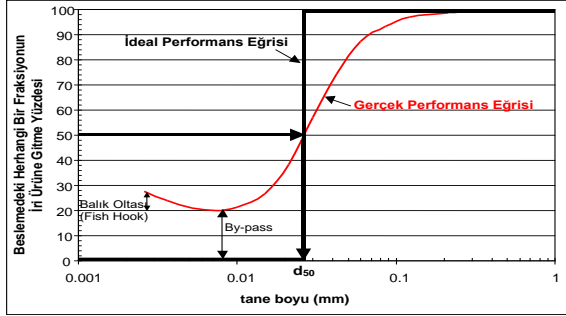
Şekil 8’de ideal ve gerçek performans eğrileri gösterilmektedir. İdeal bir eğride ekipmanın ayırım boyutundan ince tanelerin tümü, sistemi ince ürün akışından terk ederken, ayırım boyundan iri tanelerin tümü sistemi iri ürün akışından terk etmektedir. Eğride göze çarpan bir diğer değişken bypass ya da kaçaktır. Kaçak miktarı, sınıflandırma işlemine tabi tutulmadan hidrosiklon alt akımından giden malzeme miktarını temsil etmektedir [16]. Hidrosiklonun çalışma prensibi düşünüldüğünde kaçak miktarının alt akıma giden su yüzdesi ile orantılı olduğu literatürde yer almaktadır. Kesme boyu ( $d_{50}$ ) ayırım boyu olarak belirtilmekte olup, bu boydaki tanelerin iri ya da ince akışa gitme olasılıkları birbirlerine eşittir.

Performans eğrisinin şekli ayırım keskinliği hakkında bilgi vermektedir. Eğrinin daha dik bir görünüme sahip olması ayırım keskinliğinin arttığını yani daha iyi bir ayırımın meydana geldiğini, eğrinin daha yatık olması ise ayırım keskinliğinin azaldığını göstermektedir. Eğrinin eğiminin hesaplanmasında Eşitlik 11’den faydalanılmaktadır. Eşitlikten elde edilen sonucun azalması daha iyi bir ayırım yapıldığı anlamına gelmektedir.

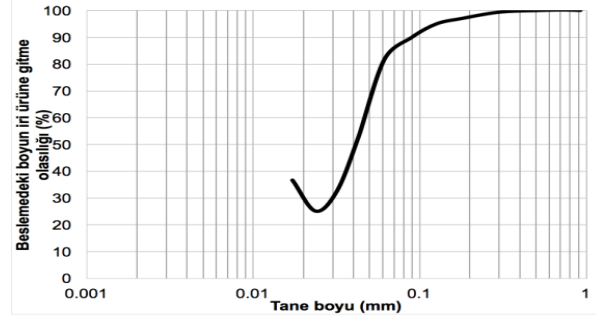
**BİR BAKIR/ÇİNKÜ CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI**

$$I = (d_{75} - d_{25}) / (2 \times d_{50}) \tag{11}$$

Şekil 9’da öğütme devresinde bulunan hidrosiklonun madde denkliği sonrasında hesaplanan gerçek performans eğrisi Tablo 8’de performans değişkenlerinin özetleri sunulmaktadır.



Şekil 8. Örnek bir performans eğrisi



Şekil 9. Hidrosiklon performans eğrisi

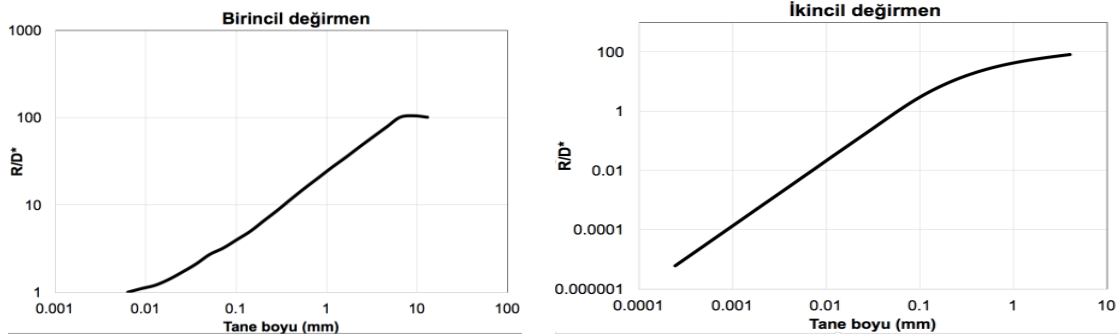
**Tablo 8.** Hidrosiklon performans değişkenleri

<b>Hidrosiklon besleme akış suyu (t/sa)</b>	409,8
<b>Hidrosiklon alt akış suyu (t/sa)</b>	103
<b>Alt akıma giden su yüzdesi (%)</b>	25,13
<b>Bypass miktarı (grafikten)</b>	25,15
<b>Kesme boyu (mm)</b>	0,041
<b>Ayırım keskinliği (I)</b>	0,4

Tablo 8’de sunulan veriler incelendiğinde, hidrosiklon bataryasından elde edilen kaçak miktarının, alt akıma giden su miktarı ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ayırım keskinliği de 0,4 olarak hesaplanmış olup tesiste çalışan hidrosiklonun veriminin düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

**3.3. Yaş Öğütme Devresine Ait Model Yapısı**

Önceki bölümlerde de irdelendiği üzere, çalışmanın gerçekleştirildiği yaş öğütme devresinde iki adet bilyalı değirmen, bir adet trommel elek ve bir adet hidrosiklon bulunmaktadır. Bu birimlerin her biri bu çalışma kapsamında modellenmiştir. Bilyalı değirmenlerin modellenmesinde mükemmel karışımı kullanılmış olup bu noktada amaç değirmendeki öğütme işlemi tanelerin kırılma hızları (r) ve taşınma hızlarına (d) olan oranlarına göre ifade etmektir (Eşitlik 2). Yürütülmüş olan bu çalışma kapsamında da elde edilen r/d grafikleri Şekil 10’da gösterilmektedir.



Şekil 10. Birincil ve ikincil bilyalı değirmenlerin r/d grafikleri

Eşitlik 3 baz alınarak geliştirilen Trommel elek model yapısı Tablo 9’da sunulmakta iken hidrosiklon kümesi için yapılmış olan modelleme çalışmalarının sonuçları da Tablo 10’da sunulmaktadır.

Model oluşturma çalışmalarının güvenilirliği, tüm devre için gerçekleştirilen hesaplamaların neticesinde değerlendirilebilmektedir. Şekil 11’de ölçülen ve modelleme çalışmaları sonucunda hesaplanan boyut

O. ALTUN

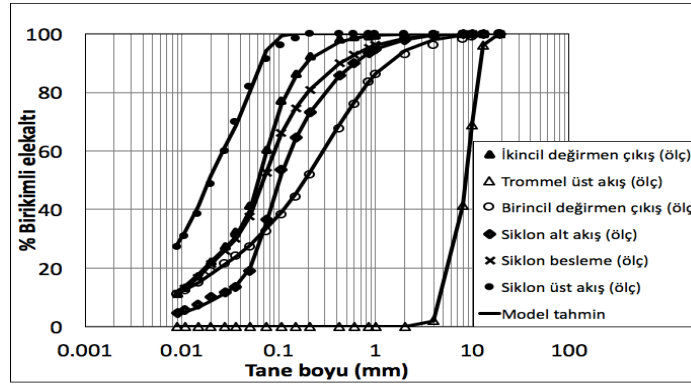
dağılımlarının karşılaştırması gösterilmektedir. Ölçülen ve model sonucu tahmin edilen dağılımların yakın olması, kurulan model yapısının güvenilir olduğunu göstermekte olup, simülasyon çalışmalarını için kullanılabilirliğini ifade etmektedir.

**Tablo 9.** Trommel eleğin verimlilik eğrisi parametreleri

Parametre	Değer
Verimlilik Eğrisinin Keskinliği – Alfa	0,174
Verimlilik Eğrisindeki İlk Eğim - Beta	2,028
İnce Ürüne Giden Su (%)	99,52
Düzeltilmiş $D_{50} - d_{50c}$ (mm)	7,45
Hesaplanmış Değer - Beta*	14,4

**Tablo 10.** Nageswararao model parametreleri

Değişken adı	Değer
D50 Sabiti - KD0	$6,78 \cdot 10^{-5}$
Kapasite Sabiti - KQ0	366,4
Hacim Ayrımı Sabiti - KV1	7,9
Su Ayrımı Sabiti - KW1	22,0
Verimlilik Eğrisinin Keskinliği - Alpha	1,8
Verimlilik Eğrisindeki İlk Eğim - Beta	0,1
Hesaplanmış Değer - Beta*	1,093



**Şekil 11.** Ölçülen ve model sonucu hesaplanan boyut dağılımları

### 3.4. Simülasyon çalışmaları

Yürütülen simülasyon çalışmalarında JKSimMet paket programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 2 adet simülasyon senaryosu üzerinde çalışılmış olup detaylar aşağıda sunulmaktadır.

İlk simülasyon çalışmasında %72 olan birincil değirmenin çalışma katı oranı %80'e çıkarılmış, aynı zamanda 102 kPa olan hidrosiklon basınç değeri 120 kPa değerine kadar zorlanmaya çalışılmıştır. Ancak ürün inceliği, hidrosiklon alt akımı katı oranı gibi değişkenlerin de değerlendirilmesi gerektiğinden 117 kPa değerine kadar çıkılabilmektedir. Bir diğer simülasyon çalışmasında (simülasyon 2) hidrosiklon alt akış borusu (apex) ve üst akış borusu (vortex) çaplarında yapılacak değişiklik ile devre üretim miktarının artırılması düşünülmüştür. Bir önceki simülasyon çalışmasında olduğu gibi birincil değirmen katı oranı %80 olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Benzer şekilde, simülasyon çalışmaları sırasında devreden alınan ürün inceliği, %katı ve siklon basıncı değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Siklon basıncı maksimum değeri olan 120 kPa değerine kadar zorlanmıştır. Bu simülasyon çalışmasında hidrosiklona ait apex ve vortex değerleri 70 mm ve 110 mm olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 11'de özetlenmektedir.

**BİR BAKIR/ÇİNKO CEVHERİ ÖĞÜTME DEVRESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONUNUN SAĞLANMASI**

İlk simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlara göre birincil değirmenin % katısının artırılması ile birincil değirmene beslenebilecek malzeme miktarı 172,5 t/sa değerinden 190 t/sa değerine çıkarılabilmiş, %10'luk bir artış sağlanabilmektedir. Bu besleme hızı değerinde trommel üst akışından 7,2 t/sa'lik bir malzemenin atılacağı öngörülmüş ve bu nedenle kapalı devre olan ikincil değirmene 182,8 t/sa'lik bir malzeme gideceği hesaplanmıştır. Siklon üst akış hızı değerleri baz alındığında devre katı üretim tonajı 167,1 t/sa değerinden 182,8 t/sa değerine çıkmıştır. Bu bağlamda üretim tonajı olarak %9,4'lük bir artışın olacağı belirlenmiştir. İkinci simülasyon çalışmasında ise siklon sayısının 6'ya yükseltildiği ve basınç değerinin 100 kPa olarak hesaplandığı görülmektedir. Devrede bir miktar daha artışın olabileceği anlaşılmakta olup flotasyon devresinin kapasite değerine ulaşmasından dolayı daha fazla artış sağlanamamıştır. Bu simülasyon çalışması neticesinde birincil değirmene yapılabilecek besleme miktarı 172,5 t/sa değerinden 190 t/sa değerine çıkarılabilmiş ve %13'lük bir artış sağlanabilmektedir. Bu koşulda trommel elekten atılacak malzeme miktarı 8,1 t/sa olarak hesaplandığından ikincil değirmen devresinde 186,9 t/sa'lik bir besleme sağlanabilmektedir. Hidrosiklon üst akış kolu değerlendirmeye alındığında tüm devre üretim miktarının 167,1 t/sa değerinden 186,9 t/sa değerine çıkarılabildiği ve %11,8'lik bir artışın sağlanabildiği anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçların enerji yönünden değerlendirilmesi gerekmektedir. Değirmenlere ait özgül enerji tüketimi, değirmenin çektiği güç ile üretim miktarının birbirlerine oranlanması ile hesaplanabilmektedir. İlk simülasyon çalışmasına göre, değiştirilen koşullarda değirmenlere ait güç tüketiminin fazla değişmeyeceği varsayıldığında (toplam 2529 kW) devre özgül enerji tüketiminin 15,13 kWsa/t değerinden 13,83 kWsa/t değerine düşürülebileceği, bir başka deyişle %8,6'lık bir enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir. İkinci simülasyon çalışması için de özgül enerji tüketiminin artan üretim miktarı ile 15,13 kWsa/t değerinden 13,53 kWsa/t değerine düşürülebileceği, bir başka deyişle %10,6'lık bir enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmüştür. Bu çalışma neticesinde elde edilen bulgular literatürle de benzerlik göstermektedir. Kwon ve ark. [17] iki aşamalı bilyalı değirmenle öğütme üzerine yaptıkları çalışmada simülasyon yolu ile devre kapasitesini arttırmış ve özgül enerji tüketiminde düşüş sağlamıştır. Benzer şekilde Dünder ve ark. [7], Altun [8] çimento öğütme devrelerinde enerji tasarrufu sağlayabilmişlerdir.

**Tablo 11.** Yaş öğütme devresinde yürütülen simülasyon çalışmalarının sonuçları

	Simülasyon 1		Simülasyon 2	
	Devre koşulu	Simülasyon sonucu	Devre koşulu	Simülasyon sonucu
Taze Besleme	172,5 t/sa, %95,85 katı	190 t/sa, %95,85 katı	172,5 t/sa, %95,85 katı	195 t/sa, %95,85 katı
Birincil Değirmen Çıkışı	167,1 t/sa, %72,09 katı	190 t/sa, %80 katı	167,1 t/sa, %72,09 katı	186,9 t/sa, %80 katı
Siklon Beslemesi	570 t/sa, %58,17 katı	645 t/sa, %60,5 katı	570 t/sa, %58,17 katı	643 t/sa, %60,8 katı
Siklon Alt Akımı	402,9 t/sa, %95,85 katı	462 t/sa, %79,9 katı	402,9 t/sa, %95,85 katı	455 t/sa, %80,1 katı
Siklon Üst Akımı	167,1 t/sa, %35,26 katı	182,8 t/sa, %37,5 katı	167,1 t/sa, %35,26 katı	186,9 t/sa, %38 katı
Siklon Üst Akımı -36µm%	67,4	66,7	67,4	66,6
Siklon Basıncı (kPa)	102	117	102	100
Siklon Sayısı	5	5	5	6

**4. SONUÇLAR**

Yürütülen bu çalışma kapsamında, ülkemizde bulunan ve kalkopirit, sfalerit, pirit minerallerinin öğütüldüğü, çalışan bir tesiste simülasyon teknikleri kullanılarak devre üretim miktarının artırılması ve buna bağlı olarak devre ve dolayısıyla tesis enerji tüketiminin düşürülmesi hedeflenmiştir. Enerji kaynaklarının etkin kullanımı hem ülkemiz gayri safi milli hasılasına katkıda bulunacak hem de ülkemiz öz kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayacaktır. Bu nedenle de simülasyon çalışmalarının önemi bir nebze daha artmaktadır. Yürütülen bu çalışma kapsamında 2 farklı devre simülasyon senaryosu üzerinde durulmuştur. İlk simülasyon çalışmasında %72 olan birincil değirmenin çalışma katı oranı %80'e çıkarılmış, aynı zamanda 102 kPa olan hidrosiklon basınç değeri 120 kPa değerine kadar zorlanmaya çalışılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, hidrosiklon üst akış hızı değerleri baz alındığında devre katı üretim tonajı 167,1 t/sa değerinden 182,8 t/sa

*O. ALTUN*

değerine çıkmıştır. Bu bağlamda üretim tonajı olarak %9,4'lük bir artışın olacağı belirlenmiştir. Değirmenlere ait güç tüketiminin fazla değişmeyeceği varsayıldığında devre özgül enerji tüketiminde %8,6'lık bir enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir. Bir diğer simülasyon çalışmasında hidrosiklon apex ve vortex çaplarında yapılacak değişiklik ile devre üretim miktarının artırılması düşünülmüştür. Bir önceki simülasyon çalışmasında olduğu gibi birincil değirmen katı oranı %80 olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, hidrosiklon üst akış kolu değerlendirmeye alındığında tüm devre üretim miktarında %11,8'lik bir artış sağlanabildiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde değirmenlerin güç tüketimlerinin yeni koşullar için değirmenliği varsayıldığında, devre özgül enerji tüketiminde %10,6'lık bir azalma sağlanabileceği öngörülmektedir. Çalışmadan elde edilen çıktılar, tesis koşullarının daha uygun bir şekilde belirlenmesi ve buna bağlı olarak da tesisin daha ekonomik işletilmesi açılarından önemli olduğu düşünülmektedir.

**TEŞEKKÜR**

Yazar deneysel çalışmalardaki değerli katkılarından ötürü Dr. Nurettin Alper Toprak'a ve çalışmayı 14 D09 602 005-740 No'lu proje ile destekleyen Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür etmektedir.

**KAYNAKLAR**

- [1] <http://technology.infomine.com/reviews/comminution> (erişim tarihi 03.03.2017).
- [2] CROWSON, P., "Some Observations on Copper Yields and Ore Grades", *Resources Policy*, 37, 1, 59-72, 2012.
- [3] ALTUN, O., BENZER, H., ENDERLE, U., "Effects of Operating Parameters on the Efficiency of Dry Stirred Milling", *Minerals Engineering*, 43-44, 58-66, 2013.
- [4] GAO, M., YOUNG, M., ALLUM, P., "Isa Mill Fine Grinding Technology and Its Industrial Applications at Mt. Isa Mines", *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 171-188. Ottawa, Canada, 2002.
- [5] AYDOGAN, N., ERGUN, L., BENZER, H., "High Pressure Grinding Rolls (HPGR) Applications in the Cement Industry", *Minerals Engineering*, 19, 130-139, 2006.
- [6] ALTUN, D., BENZER, H., AYDOGAN, N., GEROLD, C., "Operational Parameters Affecting the Vertical Roller Mill Performance", *Minerals Engineering* 103-104, 67-71, 2017.
- [7] DUNDAR, H., BENZER, H., AYDOGAN, N.A., ALTUN, O., TOPRAK, N.A., OZCAN, O., EKSI, D., SARGIN, A., "Simulation Assisted Capacity Improvement of Cement Grinding Circuit: Case Study Cement Plant", *Minerals Engineering*, 24, 205-210, 2011.
- [8] ALTUN, O., "Simulation Aided Flow Sheet Optimization of a Cement Grinding Circuit by Considering the Quality Measurements", *Powder Technology*, 301, 1242-1251, 2016.
- [9] UMUCU, Y., DENİZ, V., BOZKURT, V., ÇAĞLAR, F., "The Evaluation of Grinding Process Using Artificial Neural Network, *International Journal of Mineral Processing*, 146, 46-53, 2016.
- [10] DELGADILLO, J.A., VALDIVIESO, A., TELLO, A., "Optimization of a Grinding and Classification Circuit of a Magnetite Ore Processing Plant Through Computer Simulation", *Minerals and Metallurgical Processing*, 25, 223-228, 2008.
- [11] FUERSTENAU, D.W., PHATAK, P.B., KAPUR, A.Z.M., ABOUZEID, C., "Simulation of the Grinding of Coarse/Fine (Heterogeneous) Systems in a Ball Mill", *International Journal of Mineral Processing*, 99, 32-38, 2011.
- [12] TÜRK STANDARTLARI, TS 7700, "Öğütme İş İndeksi Tayini".
- [13] LYNCH, A.J., "Mineral Crushing and Grinding Circuits", Elsevier Scientific Publishing Company, The Netherlands, 1977.
- [14] EKSI, D., BENZER, H., SARGIN, A., GENÇ, O., "A New Method for Determination of Fine Particle Breakage", *Minerals Engineering*, 24, 216-220, 2011.
- [15] ALTUN, O., BENZER, H., "Selection and Mathematical Modelling of High Efficiency Air Classifiers", *Powder Technology*, 264, 1-8, 2014.
- [16] NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T., "Mineral Comminution Circuits-Their Operation and Optimization", Brisbane: JKMRRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, 1996.
- [17] KWON, J., JEONG, J., CHO, H., "Selection and Optimization of a Two-Stage Ball mill Grinding Circuit of Molybdenum Ore", *Advanced Powder Technology*, 27, 1073-1085, 2016.