

HAVA SÜPÜRMELİ KURU BİLYALI DEĞİRMEN KÖMÜR ÖĞÜTME DEVRESİNİN PERFORMANS ÖLÇÜMÜ, MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Performance Analysis, Modelling and Simulation of Dry Air-Swept Coal Ball Mill Grinding Circuit

Geliş (received) 28 Aralık (December) 2008; Kabul (accepted) 31 Mart (March) 2008

Ömürden GENÇ^(*)
A.Hakan BENZER^(**)

ÖZET

Bu çalışmada hava-süpürmeli bilyalı değirmen kömür öğütme devresinin performans ölçümü, modellenmesi ve simülasyonu çalışmaları sunulmaktadır. Devrede yer alan bilyalı değirmen Whiten'in (1972) mükemmel karışım modeli bazında taşınma hızı ve özgül kırılma hızı fonksiyonları ayrı ayrı hesaplanarak modellenmiştir. Statik havalı separatörün ayırım performansı Whiten'in performans eğrisi (Lynch, 1977) yaklaşımına göre değerlendirilmiş ve modellenmiştir. Değirmen ve statik separatör için belirlenen model parametreleri kullanılarak simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Simülasyon çalışmaları devrede öğütme performansının besleme tane boyu ve bilya boyu optimizasyonu ile iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Hava Süpürmeli Bilyalı değirmen, Modelleme, Simülasyon, Kömür

ABSTRACT

In this study, performance evaluation, modelling and simulation of air-swept coal ball mill grinding circuit is presented. Ball mill in the circuit was modelled based on the Whiten's (1972) perfect mixing model by calculating the discharge and specific breakage rate functions separately. Static separator was analysed and modelled based on the Whiten's efficiency curve model (Lynch, 1977). By using the determined model parameters for the mill and the separator, simulation was carried out. Simulation studies indicated that, grinding performance of the circuit could be improved by fresh feed and ball size distribution optimization.

Keywords: Air-swept Ball Mill, Modelling, Simulation, Coal

^(*)Araş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, ogenc@hacettepe.edu.tr

^(**)Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

1.GİRİŞ

Çimento üretimi enerjinin yoğun kullanıldığı bir proses olup, 1 ton çimento üretmek için 100 Kwh elektrik enerjisi harcanmaktadır. Öğütme, çimento endüstrisinin en fazla enerji tüketen birim işlemidir. Çimento öğütmede kullanılan elektrik enerjisi harcanan toplam elektrik enerjisinin %60'ından fazla olup, çimento üretim maliyetinin %30-40'ına karşılık gelmektedir. Entegre bir çimento fabrikasında bulunan üniteler şu şekilde sıralanabilir; Hammadde ocakları, kırıcı ünitesi, ön homojene ve hammadde stoklama ünitesi, hammadde öğütme ünitesi, stok ve homojene siloları, döner fırın ve klinker soğutucu ünitesi, kömür öğütme ünitesi, çimento öğütme ünitesi, katkı kırma ünitesi, çimento siloları ve paketleme ünitesi. Kömür öğütme ünitesinde kuru öğütme yoluyla klinker fırınına yakıt olarak pulverize kömür hazırlanmaktadır. Bu aşamada dikey valsli değirmenler ve hava süpürmeli bilyalı değirmenlerde kömür kurutulup, öğütülmektedir. Özellikle kül içeriği yüksek olan kömürün veya antrasitin öğütülmesinde bilyalı değirmenler dik değirmenlere göre avantajlı olmaktadır. Bunun nedeni dik değirmenlerde bu tipteki kömürlerin öğütülmesi sırasında meydana gelen yüksek aşınmadır. Ayrıca bilyalı değirmenlerin yatırım ve bakım maliyetleri dik değirmenlere göre daha düşük seyretmektedir. Fakat normal kalitede bir kömürün öğütülmesi koşulunda ise bilyalı değirmenlerdeki öğütmenin daha yüksek enerji tüketiminde gerçekleştiği bir gerçektir. Kömürün kuru olarak öğütüldüğü hava süpürmeli bilyalı değirmenlerde öğünmüş malzeme tamamen hava ile dışarı taşınmaktadır. Bu tip değirmenlerin tipik özelliği giriş ve çıkış mil kasnak çapının büyük olmasıdır. Değirmenlerin bu tipte bir tasarıma sahip olmasının nedeni, değirmende biriken gazların dışarı çıkması esnasında fan gücünün basınç düşmelerini yenebilmesini sağlayabilmektir. Bu nedenle bu tip değirmenlerde bilya yükü düşük olup %25 civarındadır ve normal bilyalı değirmenlere göre düşük kapasitede çalıştırılırlar

Kömür değirmeninde havanın temel iki işlevi bulunmaktadır. Birincisi malzemenin dışarı taşınması, diğeri değirmenin bir kurutucu görevi yapmasını sağlayarak, nemli kömürün kurutulmasına olanak vermesidir. Nemli kömürün öğünme sırasında aynı zamanda kurutuluyor olması öğütme verimini artırmaktadır (Austin vd., 1984).

Hava süpürmeli bilyalı değirmenlerin matematiksel modellenmesine yönelik yaklaşım literatürde Austin (1984) ve Benzer (2004)'de tartışılmıştır. Austin, hava-süpürmeli bilyalı kömür değirmeninin malzemenin tamamının hava ile taşınması koşulunda mükemmel karışmış tek bir reaktör gibi düşünülerek modellenebileceği sonucuna varmıştır. Bunun nedeni, değirmen çıkışına ulaşmış hava ile taşınamayacak büyüklükteki iri tanelerin değirmenden dışarı çıkamayacağı ve geri yönde karışarak öğünmeye devam edeceğidir.

Hava süpürmeli bilyalı kapalı devre kuru öğütme sistemlerinde statik separatörler kullanılmaktadır. Statik separatör mekanik olarak iç içe geçirilmiş iki koni ve koniler üzerinde hava ve tanecik geçirgenliği dışarıdan ayarlanabilen kanatlardan meydana gelmektedir. Toz yüklü gaz statik separatöre dış ana gövde ile iç koni arasından değirmen filtre vantilatörünün emme çekişi ile girer. Bu hava çekişi ile iç koninin üzerine taşınan gaz hava devri ile dönme hareketi kazanır ve bunun sonucu ağır-iri taneler merkezkaç kuvveti ile dışarı atılmaktadır. Koni duvarına çarpan bu tanelerin hızı kesilir ve koninin tabanına çökerek boşaltma olduğundan tekrar öğünmek üzere değirmene geri döndürülür. Kanatlar separatör içerisinden geçirilen gaz akımının türbülansını ayarlar ve merkezkaç kuvvetinin tanecikler üzerindeki etkisini kontrol eder. Kanat açısı 0° ise separatörden kaba-iri ürün alınır. Açı 45° ise alınan ürün incelmektedir. Kanat açısı işletme açısından önemli olup periyodik olarak kanat ayarlarının kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın ilk aşamasında, KHD Humboldt® modelindeki 6,87 ton/saat kapasiteli kuru öğütme yapan hava süpürmeli bilyalı kömür değirmeninin öğütme performansı, devre etrafından alınan ve ani duruş sonrası değirmen içinden eksensel olarak alınan numunelerin boyut dağılımlarının analizi yoluyla incelenmiştir. Boyut dağılımları ile kontrol odası tonaj ölçümleri kullanılarak devre etrafında madde denkliliği kurulmuştur. Daha sonra, bilyalı değirmen Whiten'in (1972) mükemmel karışım modelleme yaklaşımına göre, değirmen ile kapalı devre çalıştırılan statik separatör ise Whiten'in performans eğrisi (Lynch,1977) yaklaşımına göre modellenmiştir. Değirmen ve statik separatör için belirlenen model parametreleri kullanılarak besleme dağılımı inceliği ve bilya boyu değiştirilerek simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Besleme ve bilya

dağılımının inceltilmesi koşulunda ürün kalitesi (inceliği) bozulmadan devre kapasitesinde %12'lik bir artışın sağlanabileceği belirlenmiştir.

2. TESİS ÇALIŞMALARI

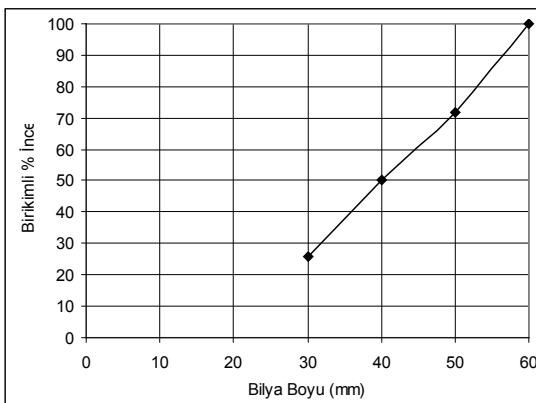
Kömür öğütme devresi, statik separatör ile hava süpürmeli olarak kapalı devre çalışan tek kamaralı bilyalı değirmenden oluşmaktadır. Örnekleme döneminde devreye -10+0,5mm'lik kömür beslenmiştir. Değirmene ait tasarım değerleri ve değirmen bilya şarjı değerleri Çizelge 1 ve 2 'de verilmektedir. Bilya dağılımı kümülatif olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Değirmene Ait Tasarım Değerleri

Çap (m)	2,4
Öğütme Kamarası Uzunluğu (m)	4,6
Değirmen Kurulu Gücü (kW)	315
Değirmen dönüş (dev/dk)	21
Kritik hız %	77
Orjinal bilya doluluk %	24

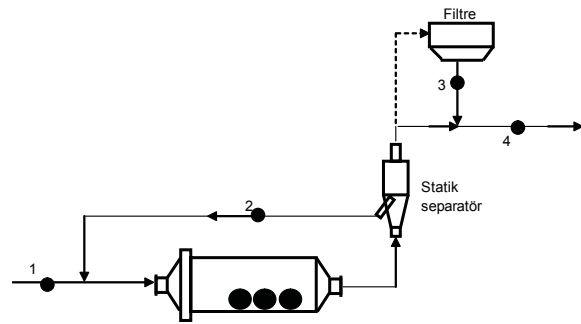
Çizelge 2. Uygulanan Bilya Dağılımı

Bilya boyu (mm)	Ağırlık %
60	28
50	22
40	24
30	26
Toplam	100



Şekil 1. Uygulanan birikimli bilya dağılımı

Öğütme - sınıflandırma devresinin basitleştirilmiş akım şeması ve devre etrafı numune alma noktaları Şekil 2'de verilmektedir. Devrede KHD Humboldt® tipi kuru öğütme yapan hava süpürmeli bilyalı değirmen statik separatör ile kapalı devre çalışmaktadır. Değirmen çıkışı malzeme hava ile statik separatöre taşınmaktadır. Statik separatör irisi helezonlarla değirmene döndürülürken, toz boyutundaki ince malzeme elektrofiltrede tutulduktan sonra son ürüne katılmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği üzere değirmen çıkışı statik separatör beslemesinden oldukça yüksek hava debisi nedeniyle numune alınamamıştır.

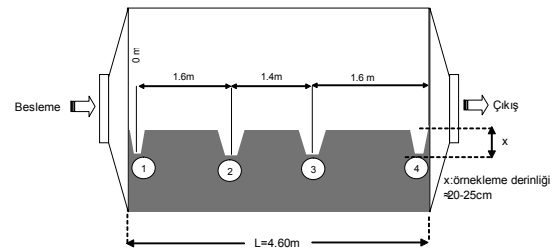


Şekil 2. Öğütme-sınıflandırma devresi akım şeması ve devre etrafı numune alma noktaları

Örnekleme noktaları:

1. Taze besleme akışı
2. Statik separatör geridönüş
3. Elektrofiltre geridönüş
4. Son ürün

Normal işletme koşullarında, devrenin kararlı durumda çalıştığı, kontrol odası verilerinden gözlemlenerek, örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Örnekleme çalışmaları sırasında devre etrafından ve ani duruş sonrası değirmen içerisinden belirli aralıklarla değirmen eksenini boyunca numuneler alınmıştır. Örnekleme dönemine ait kontrol odasından kaydedilen bazı parametre değerleri Çizelge 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Kömür öğütme devresi değirmen içi numune alma noktaları

Çizelge 3. Kömür Öğütme Devresi Örnekleme Dönemine Ait Kontrol Odası Parametreleri

Toplam besleme (ton/saat)-nemli	8,04
Hazemag (kurutucu) girişi (°C)	298
Hazemag (kurutucu) çıkışı (°C)	103
Değirmen giriş sıcaklık (°C)	250
Değirmen çıkış sıcaklık (°C)	101
Kömür filtre girişi (°C)	95
Kömür filtre çıkışı (°C)	89
Hazemag girişi emiş (mmSS)*	-12
Değirmen öncesi emiş (mmSS)*	-39
Değirmen sonrası emiş (mmSS)*	-260
Değirmen vantilatörü öncesi emiş (mmSS)*	-335
Değirmen filtre öncesi emiş (mmSS)*	-79
Hazemag vantilatör (A)	43
Değirmen filtre vantilatör (A)	83
Değirmen (A)	28
Değirmen vantilatörü (A)	112
Sıcak gaz vantilatörü (A)	62
Değirmen giriş klepesi (%)	100
Değirmen vantilatör devri (%)	100
Hazemag vantilatör devri (%)	76
Filtre vantilatör devri (%)	87
Statik seperatör kanat açıklığı (°)	17

*mmSS: milimetre su sütunu

Ana besleme akışından nem numunesi alınmış ve nem değeri %14,08 olarak belirlenmiştir. Devre etrafından alınan numunelerin ağırlıkları Çizelge 4'de verilmektedir.

Çizelge 4. Numune Ağırlıkları

Numune Adı	Ağırlık (kg)
Taze besleme	5,77
Statik seperatör geridönüş	6,81
Filtre altı	1,68
Son ürün (numune alıcı)	1,45

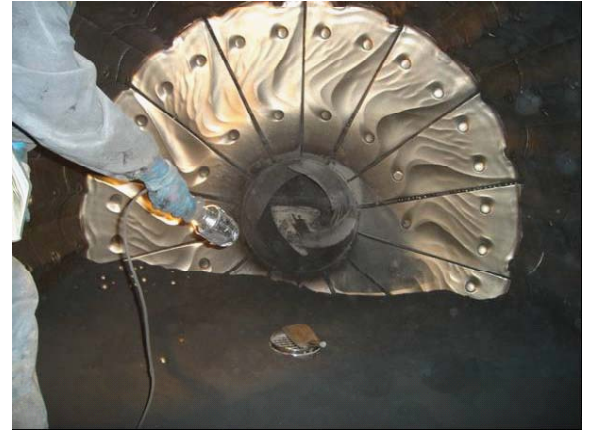
Değirmen içi numune alma noktaları şematik olarak Şekil 3'te gösterilmektedir. Değirmen içi örnekleme sırasında, değirmen eksenine boyunca belirlenen numune alma noktalarına ani duruş sonucu yığılan ilk 20-25 cm'lik üst tabaka (bilya+malzeme) kazılarak belirli bir derinlikten numune alınmıştır.

Değirmen içinden alınan numunelerin ağırlıkları Çizelge 5'de verilmektedir.

Çizelge 5. Değirmen İçinden Alınan Numunelerin Ağırlıkları

1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta
0.m (kg)	1,6m (kg)	3.m (kg)	4,6m (kg)
1,27	1,39	1,20	1,90

Ani duruş sonrası değirmen içi ve sınıflandırıcı astarların görünümü Şekil 4 ve 5'de verilmektedir.

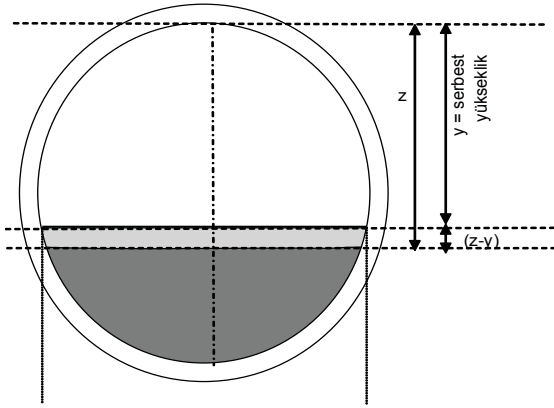


Şekil 4. Ani duruş sonrası değirmen içi görünümü



Şekil 5. Değirmen İçi Sınıflandırıcı Astarlar

Değirmen içi doluluk ölçümleri kesitsel olarak Şekil 6'da gösterilmektedir. Değirmen içi serbest yükseklik y değeri 157cm, z değeri 160cm ve malzeme yüksekliği 3cm olarak ölçülmüştür.



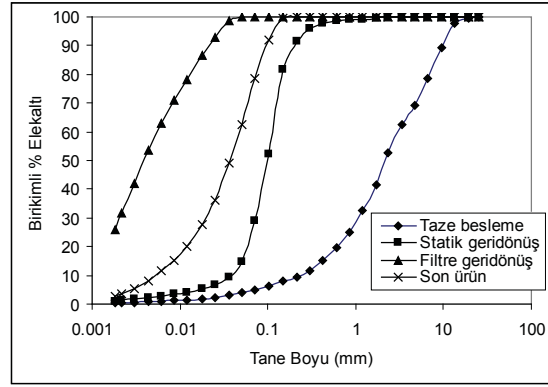
Şekil 6. Doluluk ölçümü (kesit)

Numune alma dönemine ilişkin Şekil 6'da gösterilen doluluk ölçüm değerleri dikkate alınarak değirmen doluluğu (bilya+malzeme) %30,69 ve bilya şarjı tonajı bazında bilya doluluğu %24,17 olarak hesaplanmıştır. Değirmen içi örnekleme çalışmaları sırasında bilyalarda ve astarlarda herhangi bir sıvanmanın olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4 ve 5)

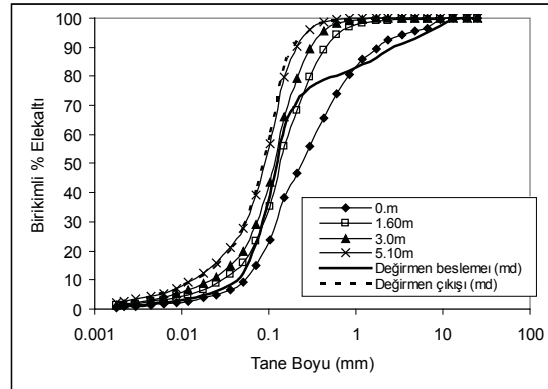
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Devre etrafından alınan numunelerin tane boyu dağılımları Şekil 7'de verilmektedir. Örnekleme çalışmaları sırasında statik separatör beslemesinden fiziksel koşullar nedeniyle numune alınamamıştır. Bu nedenle, madde denkleği çalışmaları sırasında değirmenin son metresinden (4,6m) alınan numunenin dağılımı statik beslemesi olarak kabul edilmiştir. Değirmen içerisinden alınan numunelerin dağılımları madde denkleği sonucunda hesaplanan, taze besleme ile statik separatör geridönüşünün birleşiminin oluşturduğu değirmen toplam besleme (md) ve değirmen çıkışı (md) dağılımları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 8'da sunulmaktadır.

Değirmen taze beslemesi ve statik separatör geridönüşünün birleşiminin oluşturduğu değirmen beslemesi dağılımının değirmen içi 0.m numunesinden daha ince olduğu görülmektedir (Şekil 8). Statik separatör geridönüş yükünün inceliğine bağlı olarak değirmene oldukça ince malzeme geri döndürülmektedir. Değirmen içerisinde ise sistematik bir boyut küçültmenin gerçekleştiği belirlenmiştir. Şöyleki değirmen girişi numunesini temsil eden 0.m den alınan



Şekil 7. Devre etrafı tane boyu dağılımları



Şekil 8. Değirmen içi tane boyu dağılımları

numunenin boyut dağılımı 1. metreden daha iridir ve değirmen çıkışına doğru bu şekildeki sistematik boyut küçültme izlenebilmiştir.

3.1. Kömürün darbe kırılma indeksi

Modelleme çalışmalarında, kırılma hızı parametresine malzemeden gelecek etkiyi yansıtabilmek için değirmen taze beslemesinin darbe altındaki kırılma dağılım fonksiyonu ağırlık düşürme test yöntemiyle belirlenmiştir. Ağırlık düşürme test yönteminde temel prensip, çelik örs üzerine yerleştirilen tane üzerine ağırlığın belirli bir yükseklikten serbest düşme hareketi yapacak şekilde bırakılmasıyla kırılmasıdır. Kırılma davranımı belirlenecek numune -9,5+8,0mm dar tane boyu fraksiyonuna kuru elemeye ayrılmış ve belirli sayıda tane içeren tane fraksiyonu belirlenen standart özgül enerji (kWs/t) seviyesinden kırılmıştır.

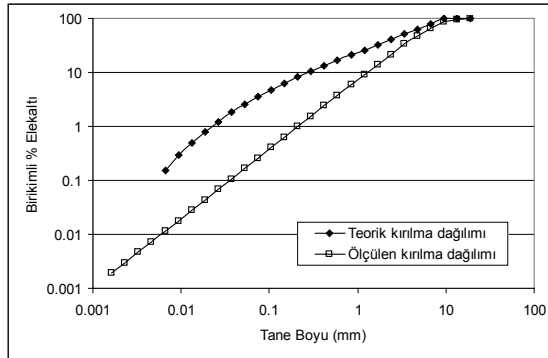
Kömür numunesi için deneyde kullanılan standart

boyut fraksiyonu, bu fraksiyonda kırılan ortalama tane sayısı ve çalışılan özgül enerji seviyesi Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6. Ağırlık Düşürme Deneyi Standart Test Koşulları

Tane Boyu Fraksiyonu (mm)	Kırılan ortalama tane sayısı	Tanelerin kırıldığı ortalama özgül enerji seviyesi (kWs/t)
-9,5+8,0	80	1,00

Kırılmış ürünün elek analizleri yapılarak tane boyu dağılımları $\sqrt{2}$ elek serisine göre belirlenmiştir. Çalışılan tane boyu aralığının geometrik ortalaması alınarak orjinal boy olarak tabir edilen tane boyu 8,72mm hesaplanmış ve bu boyun 1/10'undan geçen birikimli malzeme yüzdesi t_{10} (incelik indeksi) değeri %37,90 olarak belirlenmiştir. Ağırlık düşürme testi sonucunda elde edilen kümülatif kırılma dağılımı literatürde kömür numunesi baz alınarak malzemeler için verilen standart teorik dağılım ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'dan izleneceği üzere kömürün ölçülen kırılma dağılımı teorik dağılıma göre daha iridir. Bu durum kömür değirmeni beslemesinin oldukça zor ufanabilir bir karakterde olduğunu göstermektedir.

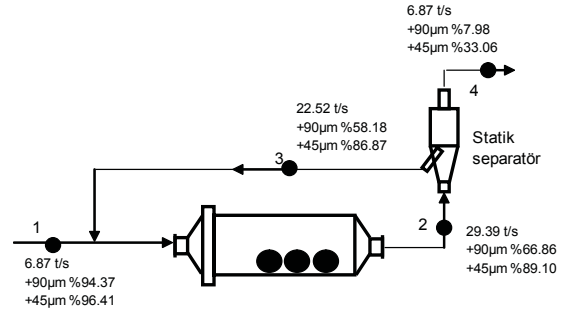


Şekil 9. Kömürün teorik ve ölçülen darbe kırılma dağılımı fonksiyonları

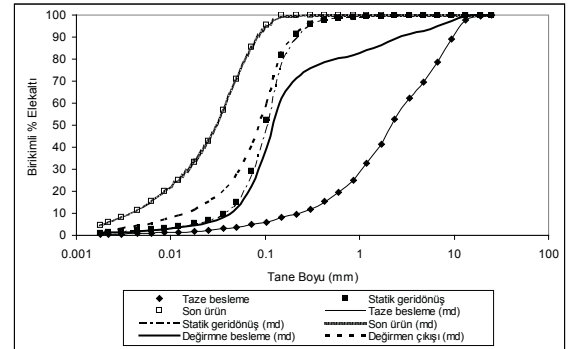
3.2. Madde Denkliği Çalışmaları

Kömür öğütme devresinden alınan devre etrafı numunelerinin tane boyu dağılımları ve kontrol odasında kaydedilen tonaj değerleri kullanılarak madde denkliği çalışmaları yapılmıştır. Devre etrafında madde denkliği hesaplamaları yapılırken kuru bazda taze besleme tonajı 6,87 t/s alınmıştır.

Madde denkliği çalışmaları sonucu, hesaplanan akış tonajları (t/s) Şekil 10'da, ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımlarıda Şekil 11'de verilmektedir. Devreden yük oranı geri dönüş tonajının statik incesi tonajına oranı olarak alınmış ve % 328 olarak belirlenmiştir. Devreden yük oranının yüksek olması, statik seperatör havasının yeterli olmamasından kaynaklanabilir.



Şekil 10. Kömür öğütme devresi için madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri

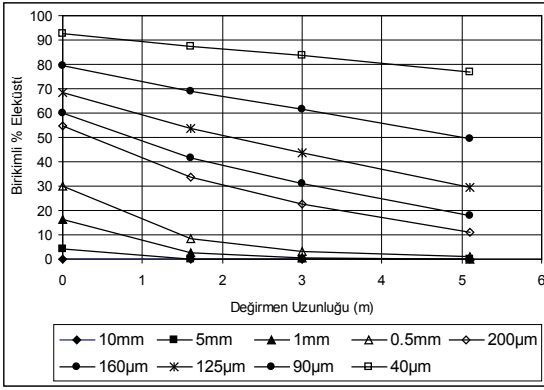


Şekil 11. Kömür öğütme devresi için madde denkliği sonucunda hesaplanan değerlerin ölçülen değerlerle uyumu

Değirmende boyut küçültme performansının incelenebilmesi amacıyla değirmen içi incelik eğrileri birikimli % eleküstü değerlerine göre çizilmiştir (Şekil 12). Değirmen içi dağılımı öğütmenin sistematik bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

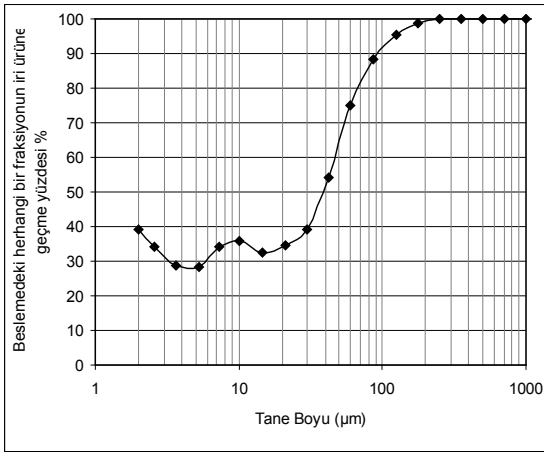
3.3. Statik Separatörün Ayrım Performansı (Tromp Eğrisi)

Şekil 13'de madde denkliği çalışması sonrası elde edilen seperatör performans eğrisi gösterilmektedir. Bu eğri Tromp eğrisi olarak



Şekil 12. Değirmen boyunca incelik değişimi

bilinmektedir. Performans eğrisi üzerinden performans parametreleri olan kesme boyu (d_{50}) 39,17µm ve by-pass (kaçak) miktarı %28,36 olarak belirlenmiştir.



Şekil 13. Statik separatör performans eğrisi

5µm'den daha ince tanelerin yüzdesinin separatör geri dönüşünde arttığı belirlenmiştir. Bu durum fish-hook etkisi olarak bilinmekte ve ayırım sırasında ince tanelerin aglomerasyonu sonucunda oluşmaktadır. Ayırım sırasında aglomera olan taneler boyut analizi sırasında (lazerli boyut dağılımı ölçüm cihazında) ayrılmakta ve fish-hook etkisi ortaya çıkmaktadır.

4. MODELLEME ÇALIŞMALARI

4.1. Değirmen Modeli

Kömür değirmeni özgül kırılma hızı fonksiyonu mükemmel karışım modeli kullanılarak

hesaplanmıştır. Whiten'in 1972'de önermiş olduğu mükemmel karışım bilyalı değirmen modeli, değirmenin mükemmel karışım tek bir birimden meydana geldiğini kabul etmektedir. Değirmen içerisindeki malzeme miktarındaki değişim hızı, kırılma ve taşınma hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. Yaklaşım, herhangi bir boyut aralığındaki tanelerin kırılma ve taşınma hızını birinci dereceden kabul etmektedir. Bu durumda Eşitlik 1'de verilen ilişki geçerli olmaktadır.

$$p_i = d_i * s_i \quad (1)$$

s_i değirmen içerisindeki i tane boyut aralığında bulunan malzeme miktarı, p_i değirmen ürününde i tane boyut aralığında bulunan malzeme miktarı, d_i ise özgül taşınma hızıdır. Değirmen içerisindeki i boyut aralığındaki malzemenin kütle denklığı Eşitlik 2 ile ifade edilmektedir.

$$f_i - r_i s_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j - p_i = 0 \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki f_i değirmen beslemesinde i boyut aralığında bulunan malzeme miktarını, $r_i * s_i$ ifadesi i boyut aralığındaki malzemenin kırılma

için seçilen kısmını, $\sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j$ ifadesi i boyut

aralığına kırılan kısmı, $p_i (=d_i * s_i)$ ise değirmen ürünündeki i boyut aralığındaki malzeme miktarını nitelemektedir. Eşitlikteki a_{ij} kırılma dağılım matrisi bir üçgen matris olup, j boyutundaki malzemenin i boyutuna dağılmasını tanımlar. Eşitlik 2'de besleme ve ürün boyut dağılımlarının örneklenerek, malzemenin karakteristik kırılma dağılımı a_{ij} değerlerinde laboratuvarında belirlenmesiyle ve s_i değerinin ani duruş sırasında alınan değirmen içi doluluk ölçümleri bazında hesaplanması koşulunda özgül kırılma hızı parametresi Eşitlik 2'den geri hesaplanabilmektedir.

Modelde $\delta = \frac{p_i}{d_i}$ eşitliğinin uygulanması

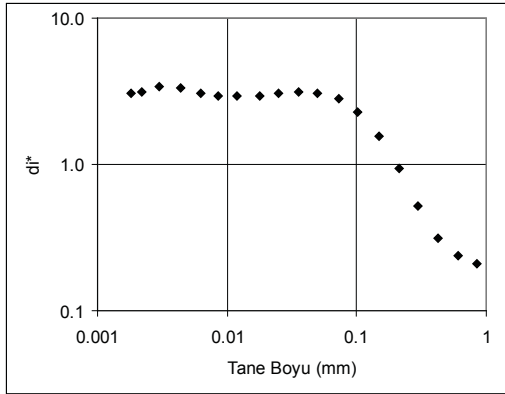
durumunda Eşitlik 3 elde edilmektedir.

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \left(\frac{r_j}{d_j} \right) - \delta \left(\frac{r_i}{d_i} \right) - p_i = 0 \quad (3)$$

Mükemmel karışım modelindeki (r_i/d_i) parametresi d_i^* ile tanımlanan boyutsuz taşınma fonksiyonu ile r/d^* şeklinde normalize edilmektedir. Bu durumda i boyut aralığındaki malzemenin hacim ve besleme hızına bağlı taşınma hızı Eşitlik 4'de verilmektedir (Napier Munn et al, 1996)

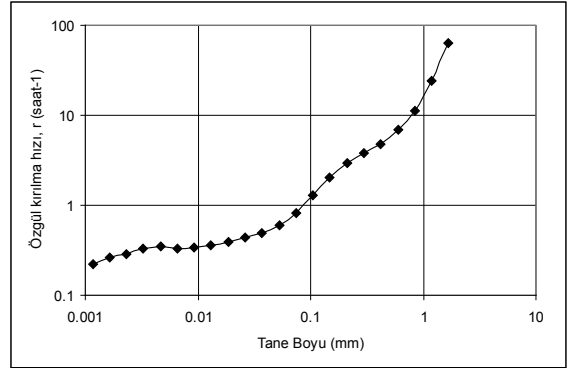
$$d^* = \frac{d_i}{4Q/D^2L} \quad (4)$$

Kömür değirmeni için değirmen içi yükü baz alınarak oluşturulan taşınma hızı fonksiyonu Şekil 14'de sunulmaktadır. Çok küçük taneler değirmen içerisinde bir akışkan gibi davranacaklarından, değirmenden taşınma hızının yaklaşık $72\mu\text{m}$ 'den ufak taneler için ortalama sabit bir değerde seyrettiği belirlenmiştir. $72\mu\text{m}$ 'den iri tanelerin hızı çıkış ızgarasına doğru düşmektedir. Hesaplamalarda kömürün özgül ağırlığı $1,45 \text{ ton/m}^3$ alınmış değirmen içi yükü s ise $4,88 \text{ ton}$ olarak belirlenmiştir.

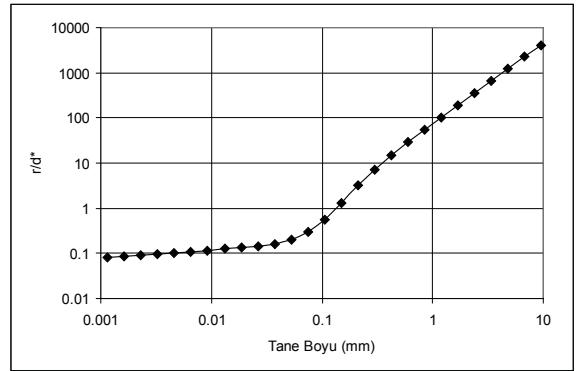


Şekil 14. Kömür değirmeni taşınma hızı fonksiyonu

Mükemmel karışım modelinden geri hesaplanan tane boyu-kırılma hızı ve tane boyu - r/d oransal kırılma hızı parametresi değişimleri Şekil 15 ve 16'da gösterilmektedir. Kırılma hızının $25\mu\text{m}$ 'den ufak taneler için yavaşladığı belirlenmiştir. Bilyalı değirmen için belirlenen kırılma hızı/taşınma hızı (r/d^*) model parametre değerleri Çizelge 7'de sunulmuştur.



Şekil 15. Tane boyu ile kırılma hızı arasındaki ilişki



Şekil 16. Tane boyu ile kırılma hızı/taşınma hızı (r/d^*) model parametresi arasındaki ilişki

Çizelge 7. Bilyalı değirmenin kırılma hızı model parametreleri

Tane Boyu (mm)	$\ln(r/d^*)$
0,025	-2,00
0,102	-0,99
0,300	1,61
0,850	3,69

4.2. Statik Separatör Modeli

Whiten performans eğrisini (Lynch,1977) Eşitlik 5 ile ifade etmiştir. Eşitlik üst akıma (ince akış) göre çizilecek olan gerçek performans eğrisini ifade etmektedir.

$$E_{oa} = C \left[\frac{(1 + \beta \beta^* X)(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha \beta^* X) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (5)$$

Eşitlikte;

β : Olta etkisini (fish-hook) ifade eden değişken

α : Ayrım keskinliğini ifade eden değişken

β^* : d_{50c} 'nin tanımından gelen bir değişken;
 $E=(1/2)C$ iken $d=d_{50c}$

X : d/d_{50c}

C : Gerçek sınıflandırma işlemine maruz kalan fraksiyon; (1-by pass)

d_{50} : İri ya da ince ürüne gitme olasılığı birbirine eşit tane boyu, kesme boyu

d_{50c} :Düzeltilmiş kesme boyu

E_{oa} :Üst akıma göre hesaplanmış gerçek verimlilik eğrisi

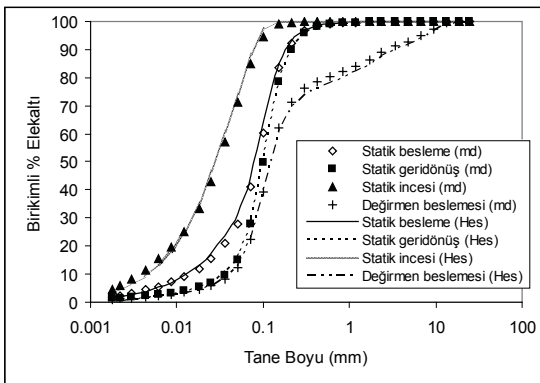
Whiten eşitliğinden belirlenen performans eğrisi model parametreleri Çizelge 8'de verilmektedir.

Çizelge 8. Statik separatör için belirlenen performans eğrisi model parametreleri

C (%)	54,22
α	0,56
β	1,65
d_{50c} (mm)	0,06
β^*	4,62

Separatörün farklı hava emişinde ve kanat açılarında çalıştırılması koşullarında by-pass ve fish-hook oranı değişecek ve bu parametrelerin yükselmesi durumunda seperatörün ayırım performansı bozulacaktır. Devredeki statik separatörün bir dinamik seperatör gibi çalıştığı düşünülmektedir.

Madde denkliği sonucunda elde edilen dağılımların (md) , modelleme sonrasında hesaplanan dağılımlarla uyumu devre etrafı boyut dağılımları için Şekil 17'de gösterilmiştir.



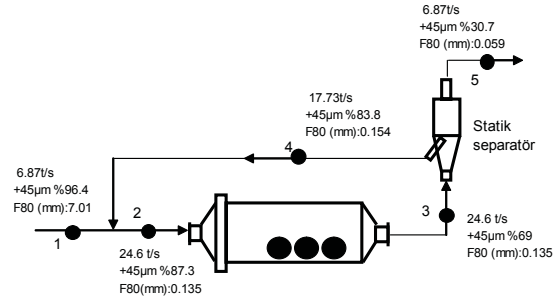
Şekil 17. Madde denkliği (md) ve modelleme sonucu elde edilen devre etrafı boyut dağılımlarının uyumu

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Modelleme sonucu elde edilen parametre değerleri kullanılarak değirmende kapasite artışı sağlayacak alternatifler simülasyon yoluyla değerlendirilmiştir. Simülasyon ile değirmen besleme dağılımı ve bilya dağılımının devre kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları kuru tonaj bazında ürün incelik değeri korunarak gerçekleştirilmiştir.

Orjinal Koşul

Modelleme sonrası değirmen taze besleme tonajının 6,87t/s ve besleme dağılımının orjinal koşulu için devre etrafı tonaj ve incelik değerleri Şekil 18'de sunulmaktadır.



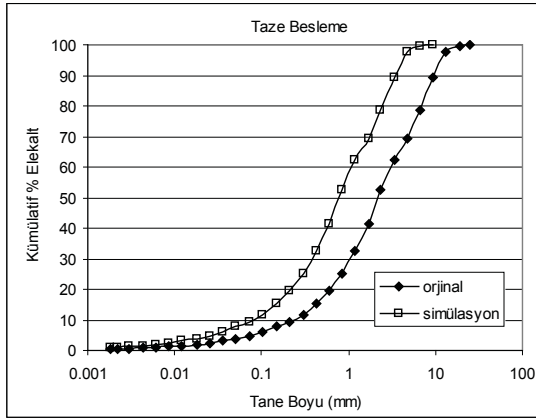
Şekil 18. Modelleme sonrası devre etrafı tonaj ve incelik değerleri

Akışlar:

1. Taze besleme akışı
2. Değirmen beslemesi
3. Statik separatör besleme
4. Statik separatör geridönüş
5. Statik separatör incesi

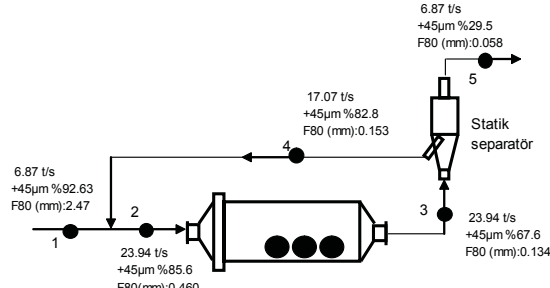
Simülasyon aşaması-1: Taze besleme dağılımının inceltilmesi koşulu

Besleme dağılımının %80'i 7,01mm'den ince iken %80'i 2,47mm'den ince bir dağılıma uygun bir kırıcı ile (örneğin dişli merdaneli değirmen) çekilmesi koşulunda devre etrafı tonaj ve incelik değerlerinde meydana gelen değişim hesaplanan model parametreleri kullanılarak simülasyon yoluyla incelenmiştir. Orjinal besleme dağılımı ve simülasyonda kullanılan besleme dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 19'da verilmektedir.

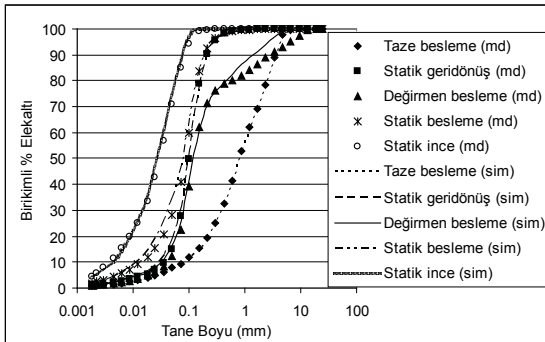


Şekil 19. Orjinal ve kırma sonrası elde edilen (simülasyonda kullanılan) besleme dağılımları

Orjinal bilya dağılımının uygulanması koşulunda yalnız besleme dağılımının inceltmesi durumunda devrede meydana gelen tonaj ve incelik değişimleri Şekil 20'de gösterilmektedir. Simülasyon sonucunda devre etrafı tonaj ve incelik değerlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 20. Simülasyon aşaması-1 sonrası devre etrafında elde edilen tonaj ve incelik değerleri

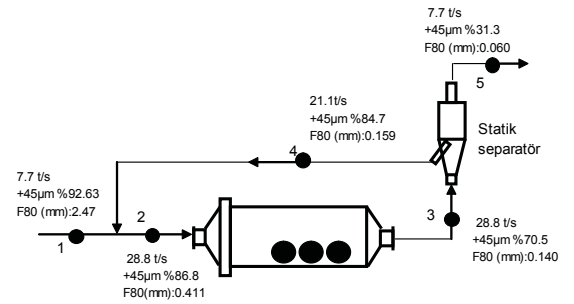


Şekil 21. Simülasyon aşaması-1 sonrasında devre etrafı tane boyu dağılımlarının madde dengeli sonuçları ile uyumu

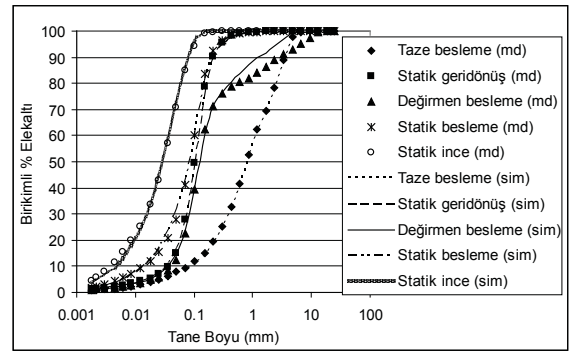
Şekil 20 ve 21'den görüleceği üzere besleme dağılımının inceltmesi ile devre etrafı dağılımları da incelmıştır. Bu durum kapasite artışı için bir marj yaratmıştır.

Simülasyon aşaması-2: Taze besleme dağılımı inceltmesi ve devre kapasitesinin % 12 artırılması koşulu

Devre kapasitesi ince besleme dağılımı koşulunda 7,7 ton/saate çıkartılmış ve devre etrafı tonaj ve incelik değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Simülasyon aşaması-2 sonrası devre etrafında elde edilen tonaj ve incelik değerleri

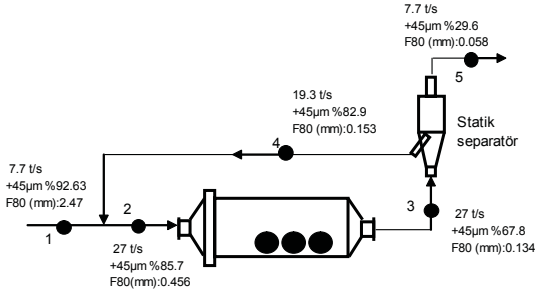


Şekil 23. Simülasyon aşaması-2 sonrasında devre etrafı tane boyu dağılımlarının madde dengeli sonuçları ile uyumu

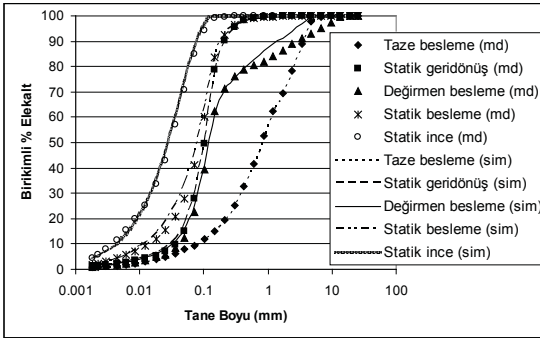
Kapasite artışına paralel olarak devre ürünü irilemiştir. Bu durumda orjinal ürün kalitesini elde edebilmek amacıyla bilya boyu optimizasyonu yapılmıştır.

Simülasyon aşaması-3: Değirmende uygulanan bilya dağılımının inceltmesi koşulu

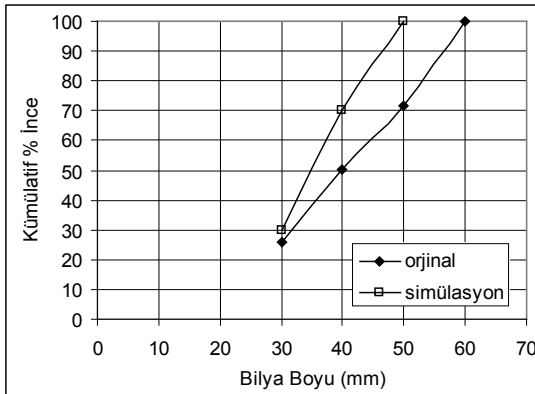
%12'lik kapasite artışı koşulunda bilya dağılımının inceltilmesi gerekmektedir. Değirmende maksimum bilya boyunun 60mm'den 50 mm 'ye çekilmesiyle sabit ürün kalitesinde devrenin rahatlıkla 7,7 ton/saat kapasiteyle çalıştırılabileceği belirlenmiştir. Yeni koşulda elde edilecek tonaj ve incelik değerleri Şekil 24'de ve değirmende uygulanması gereken bilya dağılımı Şekil 25'de verilmektedir.



Şekil 24. Simülasyon aşaması-3 sonrasında elde edilen tonaj ve incelik değerleri



Şekil 25. Simülasyon aşaması-3 sonrasında devre etrafı tane boyu dağılımlarının madde dengeli sonuçları ile uyumu



Şekil 26. Orjinal ve simülasyon çalışmaları sonrası öngörülen bilya dağılımları

6. SONUÇLAR

Farklı işletme ya da tasarım koşullarında ürün boyut dağılımının ne olacağını tahmini, kırılma dağılımı, kırılma hızı ve taşınma hızı parametrelerinin tane boyutu ile işletme değişkenleri arasındaki ilişkiyi yansıtan matematiksel modellerin kullanımı yoluyla mümkün olmaktadır. Bu çalışmada statik separator ile kapalı devre çalıştırılan hava süpürmeli kuru bilyalı kömür değirmeninin besleme boyut dağılımı ve bilya dağılımının değiştirilmesi koşulunda tonaj ve incelik bazında devrede meydana gelebilecek değişiklikler simülasyonla tahmin edilerek devrede kapasite artışının sağlandığı optimum koşullar belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları, besleme dağılımının %80'i 7,01mm'den ince iken, %80'i 2,47mm'den ince bir dağılıma ve en iri bilya boyunun 60mm'den 50mm'ye çekilerek inceltmesi durumunda aynı ürün inceliğinde devre kapasitesinin 6,87t/s'den 7,7t/s'e çıkacağını göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar numune alma çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı Araş.Gör.Okay Altun'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Austin, L.G., 1984; "A simulation model for an Air-Swept Ball Mill Grinding Coal", Powder Technology, **38(3)**, 255-266.

Austin, L.G., Klimpel R.R., Luckie P.T., 1984; "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", AIME Publ., NY.

Benzer, A.H., 2004; "Modeling and Simulation of a Fully Air-Swept Ball Mill in a Raw Material Grinding Circuit", Powder Technology, **150**, 145-154.

Lynch, A.J., 1977; "Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization, Design and Control", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 116.

Whiten, W.J., 1972; "A model for Simulating Crushing Plants", J.S.Afr. Inst. Min. Metall, **72**, 257-264.

7. ULUSLARARASI ENDÜSTRİYEL HAMMADDELER SEMPOZYUMU VE SERGİSİ

25 - 27 ŞUBAT 2009
KUŞADASI

YENİ TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR



TMMOB
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI
İZMİR ŞUBESİ



DEÜ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

www.indmintr.org