

BİLYALI DEĞİRMENLERDE HIZIN PERFORMANSA OLAN ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Fatih Dökme*

Makina Yüksek Mühendisi,
Soda Sanayii A.Ş.,
Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası, Mersin
fdokme@siseecam.com

Onur Güven

Yrd. Doç. Dr.,
Mersin Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin
oguvn@mersin.edu.tr

ÖZET

Bilyalı değirmenlerde performans; kapasite, ürün boyutu, enerji ve malzeme maliyetleri ile ölçülür. Verimliliğin firmaların pazardaki yerlerini koruma ve güçlendirmede en önemli kozu olduğu günümüzde ekipman verimliliği konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Üretim proseslerinde bilyalı değirmen kullanan firmalar, ekipman performansını etkileyen değerleri optimize ederek maksimum verim sağlamak istemektedirler. Değirmen hızı; kapasite, ürün boyutu, enerji ve malzeme maliyetlerini doğrudan etkileyen bir olgudur. Yapılan çalışmada, çeşitli değirmen astar plakaları tasarımları ile hızın, değirmenin güç tüketimlerine ve ürün boyutuna olan etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı değirmen, hız, performans, güç tüketimi

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SPEED IN BALL MILL PERFORMANCE

ABSTRACT

In the ball mills performance is measured by capacity, product size, energy and materials costs. In these days which productivity is the most important advantage for companies to protect and strengthen their place in the market, various studies have been made about equipment efficiency. Companies which use ball mills in their process, want to achieve maximum ball mill efficiency by optimizing the factors which are effect the mill performance. Ball mill speed is a factor which effects directly capacity, product size, energy and material costs. In this study it examined that mill speed's effects on power consumption and product size with various ball mill liner plates.

Keywords: Ball mill, speed, performance, power consumption

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 22.11.2013

Kabul tarihi : 08.08.2014

Dökme, F., Güven, O. 2014. "Bilyalı Değirmenlerde Hızın Performansa Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi," Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 657, s. 38-50

1. GİRİŞ

Bilyalı değirmenler, öğütücü malzemesi bilya olan değirmenlerdir. Genellikle öğütmenin son kademesinde kullanılır. Yaş ve kuru olarak çalıştırılabilir. Bilyalar; dökme çelik, dökme demir veya dövme çelikten üretilirler.

Bilyalı değirmenlerin iç plaka tipleri imalat malzemesine göre üç başlıkta toplanabilir. Bunlar; çelik plakalar, kauçuk plakalar ve seramik plakalardır. Bu plakalardan kauçuk plakalar, sadece yaş öğütme sistemi ile çalışan değirmenlerde kullanılır. Seramik plakalar, kuru sistemlerde ve öğütülen malzeme içerisinde demir ve demir bileşeni olmayan durumlarda kullanılmaya uygundur. Çelik plakalar ise kuru ve yaş sistemlerin her ikisinde de kullanılabilir [1].

Değirmen iç kısmındaki plakalar genel olarak şu şekilde sınıflandırılır:

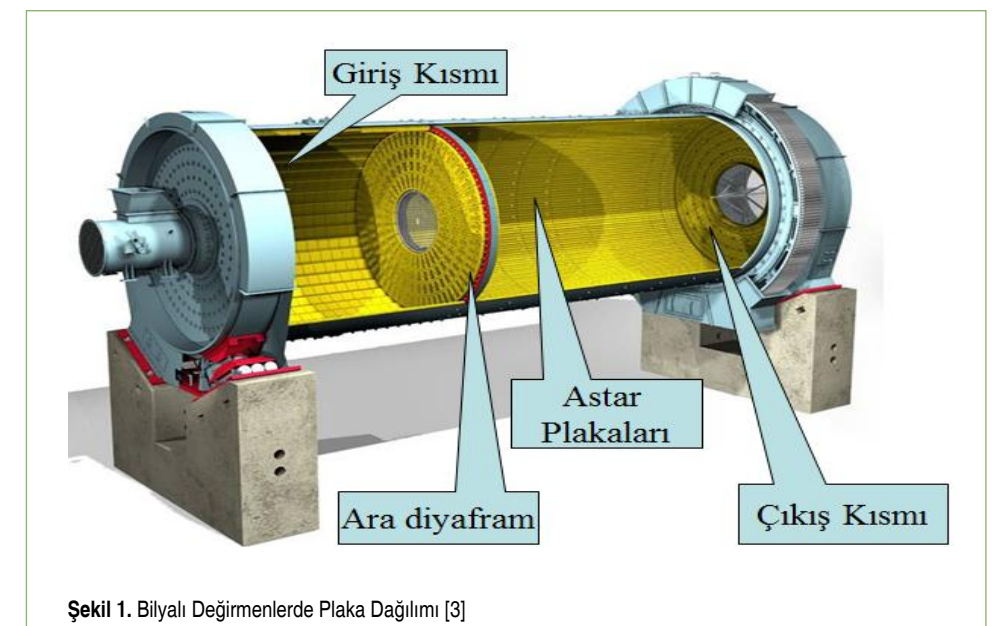
- **Astar Plakaları:** Asıl görevi, değirmen gövdesini bilyaların ve öğütülen malzemenin darbelerine karşı korumak ve bilyaları öğütme çemberi içerisinde tutmaktır.
- **Ara Bölme Plakaları:** Değirmenin birden fazla kompartımana sahip olduğu durumlarda var olan plakalardır. İki, üç veya nadir de olsa daha fazla kompartımana sahip olduğu durumlarda değirmen, kompartımanlar arasında geçiş görevi görürler. Genelde değirmenler, kaba öğütme ve ince öğütmenin yapıldığı iki kompartımandan oluşur. İlk kısımda yapılan kaba öğütmeden sonra öğütülen malzeme, ara bölme plakalarından geçerek ince öğütmenin yapılacağı kompartımana gelir. Bu gibi durumlarda ara bölme plakaları, kaba öğütülmesi tamamlanmış malzemenin ince öğütme kompartımanına geçmesi esnasında görev yapan plakalardır. Yeterince öğütülmüş malzemeler, plaka üzerindeki açıklıklardan diğer kompartımana geçebilirken, açıklıktan geçemeyen malzeme yeterince öğütülmemiş anlamına gelmektedir.
- **Giriş Plakaları:** Bu plakalar değirmenin giriş ayna kısmını darbeler karşı korumakla görevlidir. Plaka üzerinde herhangi bir açıklık bulunmaz. Bu plakalar arasından herhangi bir malzeme geçişi söz konusu değildir.
- **Çıkış Plakaları:** Çıkış plakalarının birinci görevi, çıkış ayna kısmını darbelere karşı korumaktır. İkinci önemli

görevi ise öğütülmüş malzemenin plaka üzerinde bulunan açıklıklardan geçmesini sağlayarak değirmenin dışına alınmasını sağlamaktır [2].

Giriş ve çıkış tarafı plakaları da montaj kolaylığı açısından genelde iki parçalı olur. Bu durumda giriş plakası iç, giriş plakası dış, çıkış plakası iç, çıkış plakası dış olarak adlandırılırlar. Şekil 1'de görülen değirmen kesitinde değirmen içerisindeki plakaların genel montaj şekli verilmiştir.

Değirmenin dönme sırasında, öğütme elemanları ile astar plakalarının birbirine sürtünmesini gidermek için, öğütme elemanları dinamik dengeye ulaşmaya kadar yukarı kaldırılır. Öğütme elemanlarının bir kısmı, bu hareket sırasında geriye doğru kayarken, bir kısmı da biraz daha yükseldikten sonra düşmeye maruz kalır. Düşük dönme hızlarında veya astarların düz olması durumunda, öğütme elemanları yuvarlanarak aşağı kayar. *Cascade (Kaskad)* denilen bu hareketin sonucunda aşınma ile öğütme gerçekleşir. "Cascade" hareketi, oldukça ince tane oluşumuna ve değirmen astarlarının daha fazla aşınmasına neden olur [4]. Yüksek hızlarda veya değirmen astarlarının düz olmaması durumunda öğütücü elemanlar, değirmen içinde daha yükseğe çıkarılır ve buradan düşerler. Düşükleri yerlerde bulunan cevher parçalarını, şok ve aşındırma yoluyla öğütürler. Bu harekete de "Cataract" adı verilir. Bu hareket, daha iri ürünün oluşumuna ve daha az astar plaka aşınmasına neden olur.

"Cascade ve Cataract" hareketlerini etkileyen en önemli iki faktör, taşıyıcı plaka tasarımı ve değirmen hızıdır. Uygun olmayan plaka tasarımı veya hız ile çalışan değirmenler verimsiz çalışırlar. Uygun olmayan bir plaka tasarımı ile çalışan değirmenin performansı uygun bir hız seçimi ile bir noktaya kadar düzeltilebilir.



Şekil 1. Bilyalı Değirmenlerde Plaka Dağılımı [3]

2. ÜRÜN BOYUTUNU VE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN ETKENLER

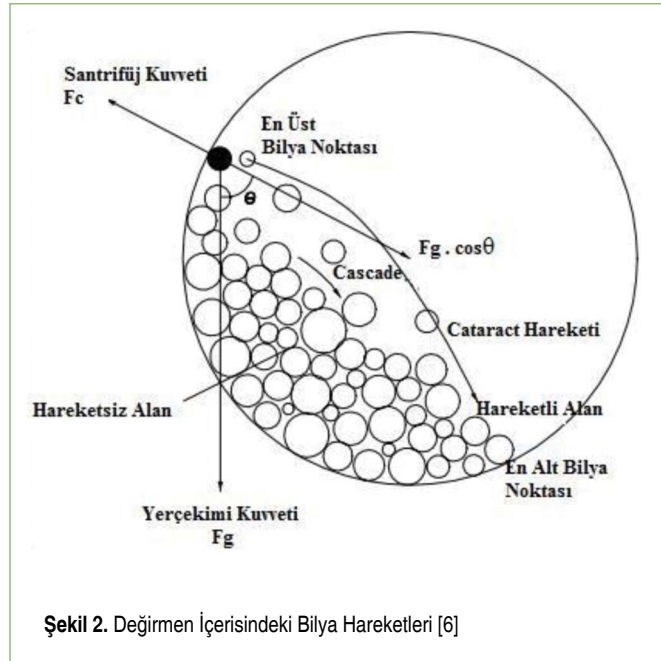
2.1 Kritik Hız

Değirmen dönüş hızı değirmen işletmesindeki en önemli kavramlardan biridir. Kaskad ve Katarakt hareketlerinin sağlanmasındaki ana rolü değirmen dönüş hızı sağlamaktadır. Bununla birlikte, dönüş hızındaki kavramsal hatalar ise değirmen astar plakalarının tasarımı ile kısmen giderilebilir.

Değirmen içerisindeki bir bilyanın hareketi pratikte çok karmaşık olup, dönüş esnasındaki yolu hesaplamak imkânsızdır (Şekil 2). Bununla birlikte, değirmen içerisindeki dinamik koşullar için değerli bilgiler veren “Ayrık Elemanlar Yöntemi” sayesinde değirmen içerisindeki genel hareketinin simülasyonunu yapmak olanaklıdır.

Değirmen kritik hızı, “Değirmenin açısal hızının değirmen içindeki öğütücüleri merkez kaç kuvveti sayesinde değirmen gövdesine sabitleyen hızdır.”

Değirmenler, genellikle kritik hızlarının %65-%82 arası bir değerde çalıştırılırlar. Bazı durumlarda kritik hızlarının %90 değeri ile de çalıştırılabilirler [5].



Şekil 2. Değirmen İçerisindeki Bilya Hareketleri [6]

Değirmen içerisinde bilyaların yığılması veya plakanın taşıyıcı etkisi sayesinde, bilyaların birbirine çarparak oluşturduğu kuvvetlerin sistematik olmamasından dolayı bu kuvvetler ihmal edilip, bilyanın tek başına değirmen içerisindeki hareketi göz önünde bulundurularak matematiksel hareket modeli değerlendirilmiştir [7]. Bilya kütlesi üzerindeki değirmen gövdesine karşı olan kuvvet, santrifüj kuvvet olarak tanımlandığında;

$$F_c = m_p \cdot \omega^2 \cdot D_m / 2 \quad (1)$$

Bu denklemde;

ω : Açısal hız,
 m_p : Çalışılan bilyanın kütlesi,
 D_m : Değirmenin plaka iç kısmından ölçülen çap

olarak verilir.

Yerçekimi kuvveti,

$$F_g = m_p \cdot g \quad (2)$$

Eğer bu iki kuvvet de birbirine eşit ise bilya, değirmen gövdesine yapışık halde dengede duracaktır. Şekil 2'deki θ açısı göz önüne alınır,

$$F_c = F_g \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Bu denklemde,

$$\cos\theta = F_c / F_g \quad (4)$$

Değirmenin kritik hızı (ω_c), bir bilyanın değirmenin tam tur hareketinde askıda kalmasını sağlayan hız olarak tanımlanır. En üst noktada θ açısının 0 olacağı göz önüne alınır,

$$F_c = F_g \quad (5)$$

$$m_p \cdot (\omega_c^2 \cdot D_m) / 2 = m_p \cdot g \quad (6)$$

$$\omega_c = \sqrt{2 \cdot g / D_m} \quad (7)$$

Değirmen kritik devri (N_c) saniyedeki tur sayısı ile hesaplanacak olursa;

$$N_c = \omega_c / 2\pi = (1 / 2 \cdot \pi) \cdot \sqrt{2 \cdot g / D_m} = \sqrt{2 \cdot 9,81} / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{D_m} \quad (8)$$

$$N_c = 0,705 / \sqrt{D_m} \text{ devir/saniye} \quad (9)$$

$$N_c = 42,3 / \sqrt{D_m} \text{ devir/dakika} \quad (10)$$

2.2 Maksimum Bilya Çapının Belirlenmesi

Maksimum bilya çapı hesabında kullanılan farklı modeller mevcuttur. Fakat bu konuda tasarımcıların büyük bir bölümü, genel kabul gören Bond Modeli ile maksimum bilya çaplarını hesaplamaktadır.

Bond Modeli'nde maksimum bilya çapı formülü aşağıdaki gibidir:

$$D_{\max} = 20,17 \cdot (D_{20} / K)^{1/2} \cdot 3 \cdot [W_i \phi / N_c (D_u)^{1/2}]^{1/2} \quad (11)$$

D_{\max} : Maksimum bilya çapı

D_{20} : Öğütülecek malzemenin %80'nin geçtiği elek çapı (μ)

K : Açık veya kapalı devre sistemler için sabit değer ($K = 350$)

W_i : Bond Öğütme İndeksi (kwh/ton)

N_c : Kritik devir

D_u : Değirmen etkin çapı (m)

ϕ : Malzeme özgül ağırlığı



Şekil 3. Değirmen Bilya Şarjı

2.3 Bilya Dolum Oranı

Bilya miktarının belirlenmesinde ise aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$Q = (\pi \cdot D_u^2 / 4) \cdot L \cdot d \cdot V_p \quad (12)$$

Q : Bilya miktarı

L : Değirmen uzunluğu

d : Bilya yığın yoğunluğu

V_p : Hacimsel şarj oranı

Değirmenin çalışması için çok önemli bir kriter olan değirmen bilya dolum oranı, öğütme boyutuna, enerji tüketimine, plaka aşınması gibi bir çok durumu doğrudan etkiler. Değirmen prosesine göre optimum bir dolum oranı vardır. Örneğin %25 bilya dolum oranıyla çalışan bir değirmenin bilya dolum oranı %30'a çıktığı zaman daha ince öğütülmüş ürün elde edebiliriz [8]. Fakat bu oranı %35'e çıkardığımızda, daha da ince bir ürün elde edilebileceği sonucuna varmak doğru değildir. Bu durum, sadece daha fazla güç kaybı oluşmasına neden olacaktır.

Değirmene az malzeme doldurulması düşük kırılma hızı verir. Malzeme miktarının artırılmasıyla, bilyalar arasında çarpışma, boşlukları doldurur ve yüksek kırılma hızı elde edilir. Bütün etkin boşluklar doldurulduğu zaman maksimum kırılma hızına ulaşır. Daha fazla malzeme ilavesi, çarpışma alanının doymasına ve fazla malzemenin depo olarak değirmene gir-

mesinden dolayı kırılma hızının azalmasına neden olur. Aşırı malzeme doldurulması, malzemenin yastıklama yapmasına ve çarpışmasının azalmasına sebep olur. Bu nedenle kırılma hızı azalır [9].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deneysel İçin Verilerin Belirlenmesi

Değirmen performansı birden fazla verilerin değerlendirilmesi ile belirlenen bir kavramdır. Bu veriler; kapasite, güç kaybı, ürün boyutu, astar öğütme performansı ve ekonomisidir [10].

Deneysel ölçekli değirmen, çalışma prensipleri açısından Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası hammaddenin öğütme değir-

menleri örnek alınarak üretilmiştir. Vakum sisteminin olmadığı değirmende öğütülecek olan kromit, aynı parti içerisinde alınmış ve deney sayısı kadar eşit oranda ayrılmıştır. Böylece hammaddenin nem ve boyut değerlerinin değişkenliği önlenmiştir. Değirmen hız testleri için tahrik sistemine hız kontrol cihazı da eklenmiştir. İmalatı yapılmış olan değirmen ile ilgili etiket değerleri aşağıdaki gibidir:

Üreticisi: Kromsan Fabrikası Mekanik Bakım Onarım Şefliği
 Üretim Tarihi: 03.04.2013

Motor Gücü: 4 kW

Motor Devri: 1445 devir/dakika

Redüktör Markası: Sew Euro drive

Redüktör Modeli: SK873.1-112M/4

Redüktör Tahvil Oranı: 23,49

Redüktör Çıkış Devri: 62 devir/dakika

Etkin Çapı: 555 mm

Boy: 1.300 mm

Değirmen plaka tasarımı parçalı plaka olarak belirlenmiş ve plaka dizilimi çevrede 8 adet plaka olmak üzere 4 sıra olarak yapılmıştır. Öğütücü olarak, çapları 10-20 mm olan 55-65 HRC sertlikteki bilyalar belirlenmiştir. Bilya dolum oranı için ise değirmen tasarımcıları, bilya dolum oranının değirmen hacminin %22-35 arasında bir değer olması gerektiğini açıklamaktadırlar [11].

Değirmenin kritik devrini bulmak için 10 numaralı denklemi kullanacak olursak;

$$N_c = 42,3 / \sqrt{D_m}$$

$$N_c = 42,3 / \sqrt{(0,545)} = 57,30 \text{ devir/dakika}$$



Şekil 4. Deneysel Ölçekli İmalatı Yapılan Değirmen

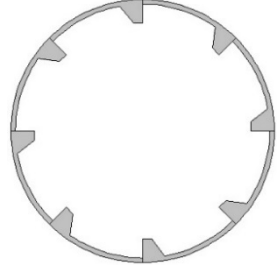
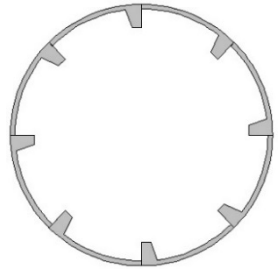
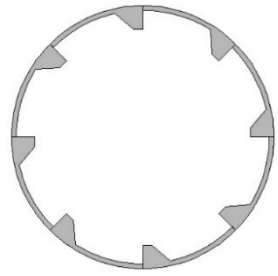
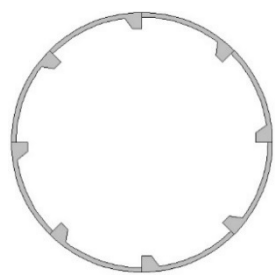
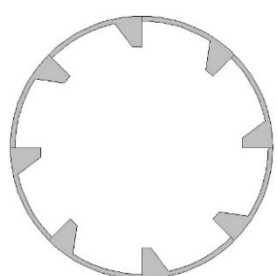


Şekil 5. Örnek Plaka Dizilimi (Plaka Tip 1 içindir.)

Tablo 1. Yapılan Deneysel Kullanılan Plaka Tipleri

Deneyde Kullanılan Plaka Tipi	Deneysel Kullanılan Plakaların Ölçüsü	Plaka Şekli
Plaka Tip 1	Yükseklik: 40 mm Açı: 37°	
Plaka Tip 2	Yükseklik: 40 mm Açı: 20°	
Plaka Tip 3	Yükseklik: 40 mm Açı: 50°	
Plaka Tip 4	Yükseklik: 25 mm Açı: 37°	
Plaka Tip 5	Yükseklik: 55 mm Açı: 37°	

Tablo 2. Deneysel Kullanılan Plaka Miktarları ve Plaka Dizilimleri

Plaka Tipi	Plaka Miktarı	Plaka Dizilimi Kesiti
Plaka Tip 1	Çevrede: 8 Adet Sıra: 4 Adet Toplam: 32 Adet	
Plaka Tip 2	Çevrede: 8 Adet Sıra: 4 Adet Toplam: 32 Adet	
Plaka Tip 3	Çevrede: 8 Adet Sıra: 4 Adet Toplam: 32 Adet	
Plaka Tip 4	Çevrede: 8 Adet Sıra: 4 Adet Toplam: 32 Adet	
Plaka Tip 5	Çevrede: 8 Adet Sıra: 4 Adet Toplam: 32 Adet	



Şekil 6. Değirmen Plaka İmalatları

Değirmende kullanılacak olan maksimum bilya çapının belirlenmesi için 11 numaralı denklem kullanılır. Bu denkleme göre;

$$D_{\max} = 20,17 \cdot (D_{20}/K)^{1/2} \cdot 3 \cdot [W_i \cdot \phi / N_c \cdot (D_u)^{1/2}]^{1/2}$$

$$D_{\max} = 20,17 \cdot (40 / 350)^{1/2} \cdot 3 [9,7 \cdot 4,5 / 57,3 \cdot (0,555)^{1/2}]^{1/2}$$

$$D_{\max} = 20,59 \text{ mm} \approx 20,00 \text{ mm}$$

Bilya dolum oranını bulmak için ise 12 numaralı formülü kullanmak gerekir. Buna göre;

$$Q = (\pi \cdot D_u^2 / 4) \cdot L \cdot d \cdot V_p$$

Yapılacak deneyler için bilya dolum oranı sabit tutulmuş olup, değer %25 olarak seçilmiştir.

$$Q = (\pi \cdot 0,555^2 / 4) \cdot 1,30 \cdot 4300 \cdot 0,25$$

$$Q = 338 \text{ Kg}$$

Bilyalı değirmene, çapları 10 ile 20 mm arasında değişen 340 kg bilya şarjı yapılmış ve 100 kg kromit yüklemesi ile bilyalı değirmen deneye hazır hale getirilmiştir. Yapılacak olan deney sürelerini belirlemek için bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada uygun öğütme ortamı hazırlandıktan sonra sistem, otuz dakika çalıştırılmıştır. Bu sürenin ardından, malzeme numunesi alınmış ve laboratuvar analizine gönderilmiştir. Ardından değirmen, otuz dakika daha çalıştırılmış ve tekrar malzeme numunesi alınmıştır. Alınan numuneler karşılaştırılmış ve malzeme boyutunun değerlendirilmesi yapılmıştır. Otuz dakika periyodunda çalıştırılan sistemden alınan numunelerin karşılaştırılması sonucunda, iki saatlik çalışmadan sonra öğütmenin yapılamadığı gözlemlenmiştir. İki saatin ardından yapılan ölçümlerde malzeme boyutunun hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, yapılacak olan

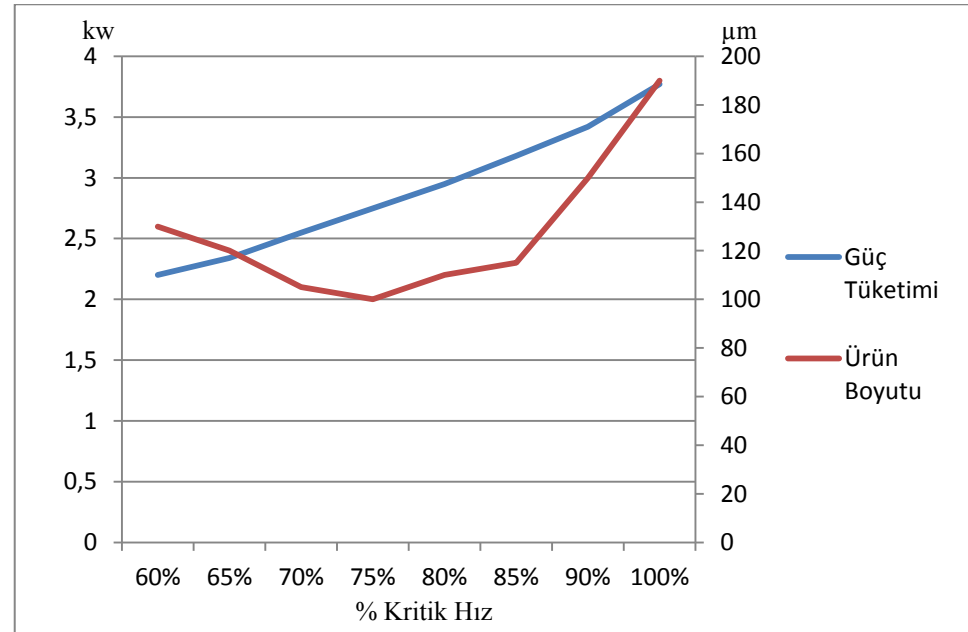
deneylerde toplam öğütme süresinin iki saat olmasına karar verilmiştir.

3.2 Deneylerden Elde Edilen Veriler ve Değerlendirilmesi

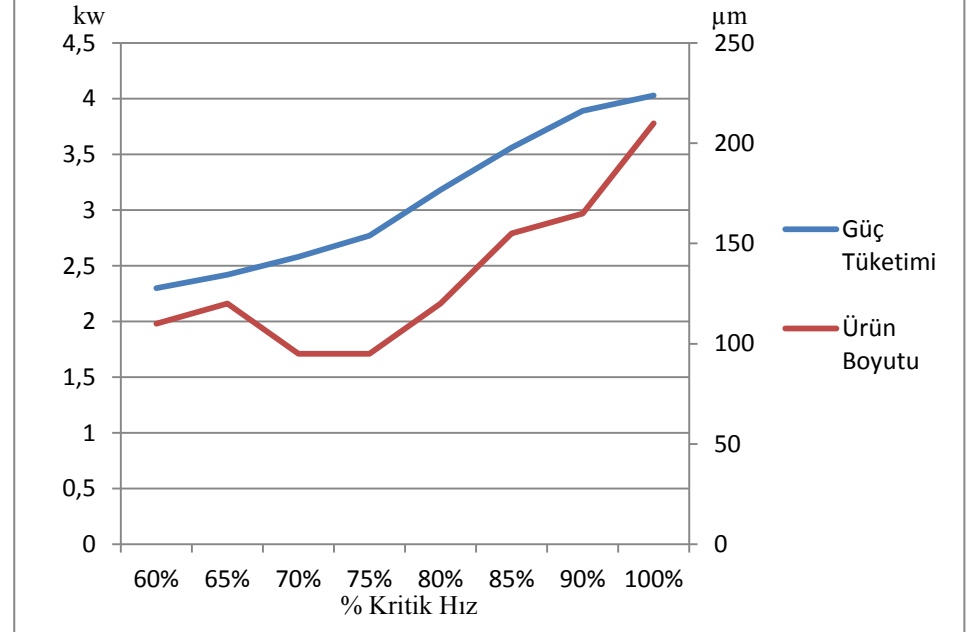
Yapılan deneyler ile elde edilen değirmen astar plakalarında optimum plaka modelinin bulunması amaçlanmıştır. Optimum plaka modelinin değirmene sağlayacağı faydalar şu şekilde olacaktır:

- Bilyaların en yükseğe çıkarak, en yüksek noktadan malzeme üzerine düşmesi ve böylece öğütmenin en iyi düzeyde olması.
- İnce öğütmenin verimli yapılabilmesi için "cascade" hareketini sağlamak.
- Değirmen gövdesini darbelere karşı korumak.
- Plaka tutucu çubuklarının koruması sayesinde plakaların ömürlerinin uzatılmasını sağlamak.
- Bilyaların değirmen gövdesine doğrudan çarpmasını engelleyerek, bilya kırılmasını önlemek.
- Plaka tasarımında önemli bir faktör olan plaka taşıyıcı çubuklarının doğru boşlukta ve yükseklikte ayarlanması ile değirmen ömrünü uzatmak [12].

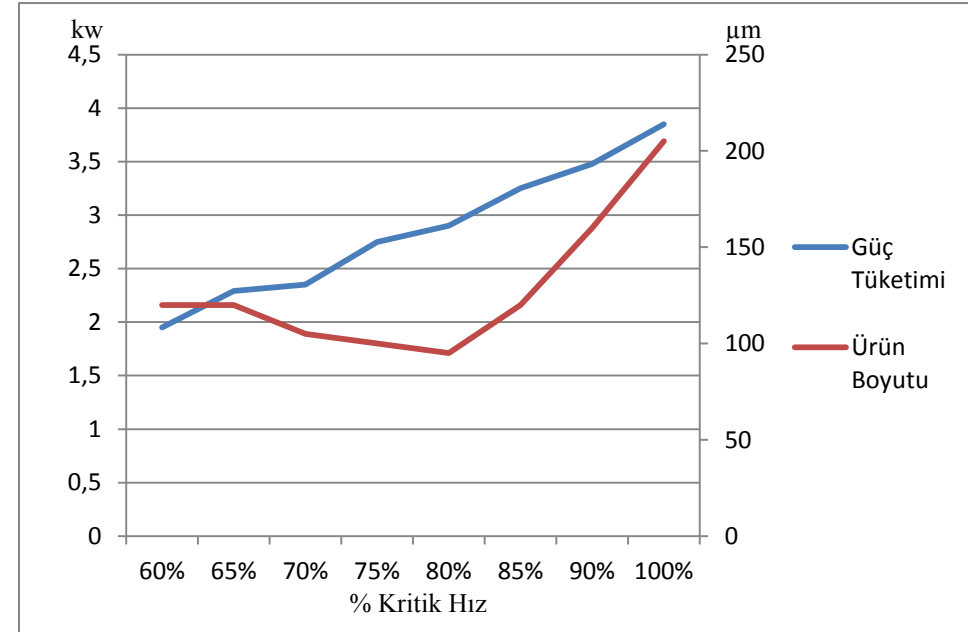
Deneylerden elde edilen verilere göre oluşan ürün boyutu 95-225 µm arasında değişmektedir. Yapılan deneyler sonucunda en uygun ürün boyutu Plaka Tip 2, %80 kritik hızda; Plaka Tip 3, %70 ve %75 kritik hızda oluşmuştur. Bu deneylerde oluşan ürün boyutu 95 µm'dir. Bu deneylerin haricinde elde edilen en iyi sonuçları irdeleyebilmek için, 95 µm değerinin %10 fazlası da değerlendirmeye alınmıştır. Buna göre, oluşan en uygun ürün boyutları için plaka tipleri ve harcanan güç aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.



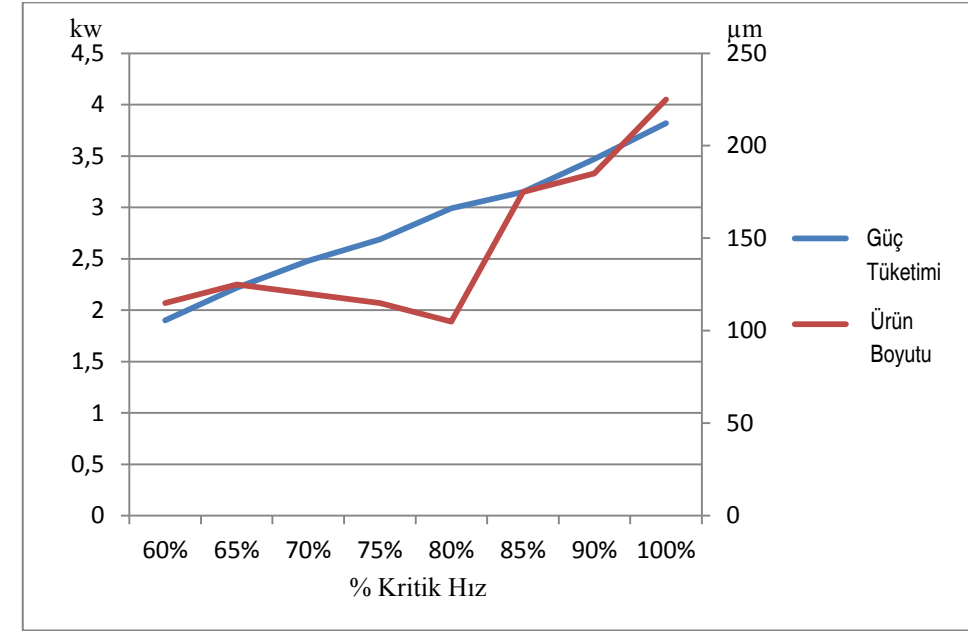
Şekil 7. Plaka Tip 1 ile Yapılan Deney Sonuçları



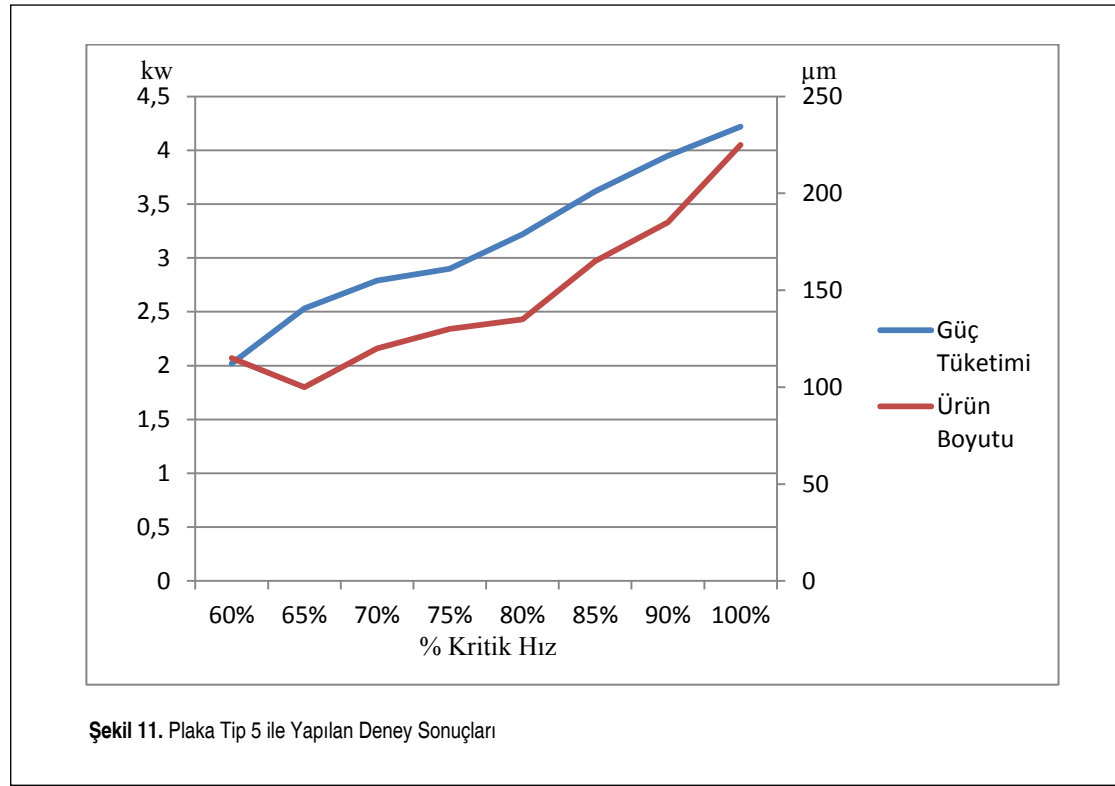
Şekil 9. Plaka Tip 3 ile Yapılan Deney Sonuçları



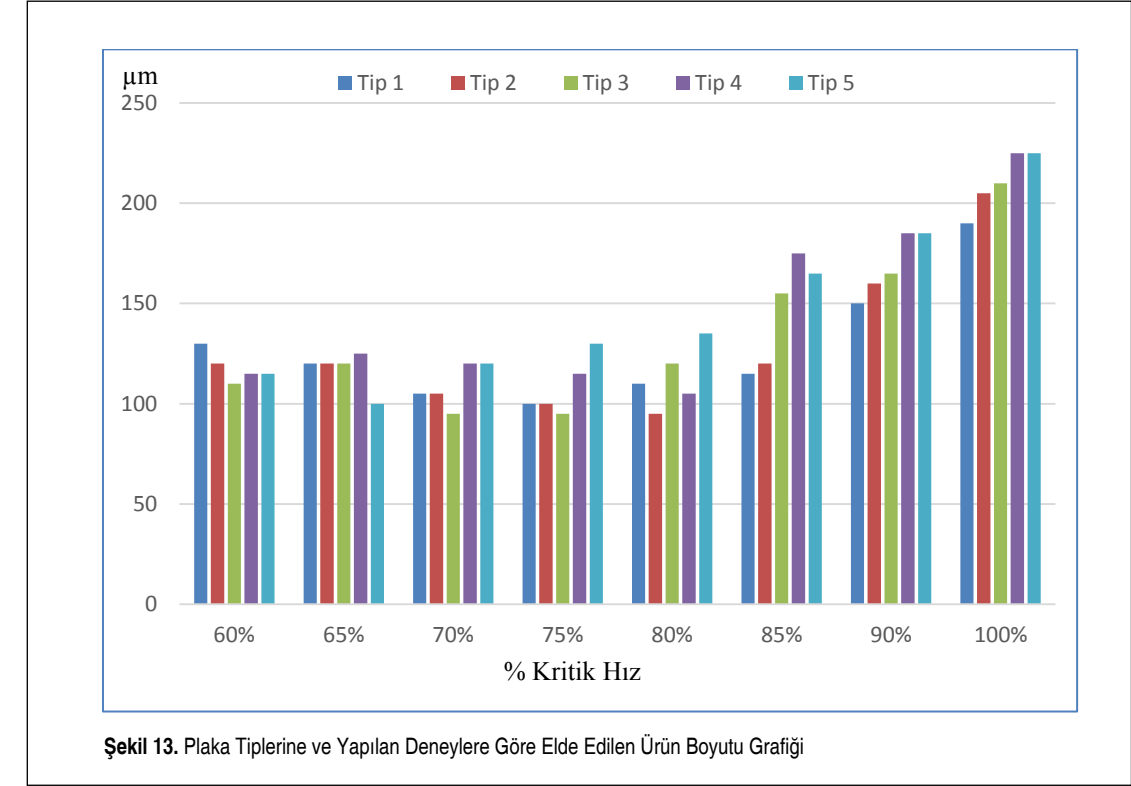
Şekil 8. Plaka Tip 2 ile Yapılan Deney Sonuçları



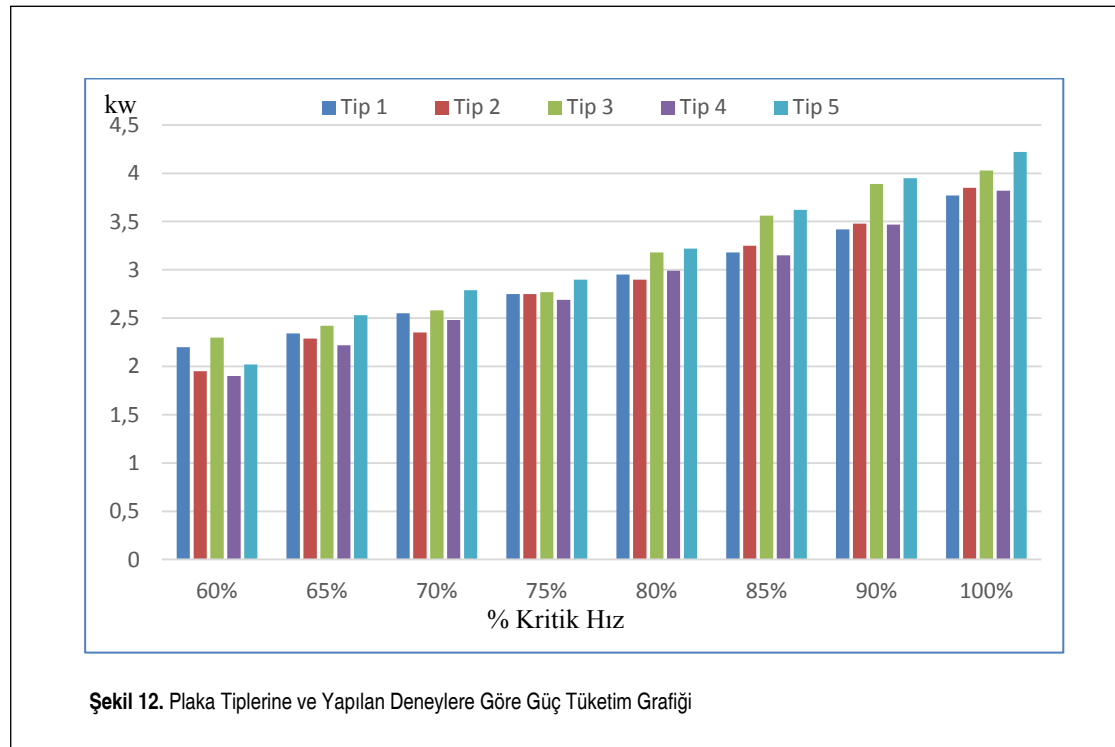
Şekil 10. Plaka Tip 4 ile Yapılan Deney Sonuçları



Şekil 11. Plaka Tip 5 ile Yapılan Deney Sonuçları



Şekil 13. Plaka Tiplerine ve Yapılan Deneylere Göre Elde Edilen Ürün Boyutu Grafiği



Şekil 12. Plaka Tiplerine ve Yapılan Deneylere Göre Güç Tüketim Grafiği

Tablodan da görüldüğü gibi, en uygun ürün boyutlarının oluştuğu plaka tipleri Tip 1, Tip 2, ve Tip 3'tür. Bu plakaların ortak özellikleri hepsinin yüksekliğinin aynı olmasıdır. Tip 4'te yükseklik daha az, Tip 5'te ise yükseklik fazladır. Bu duruma göre, deneysel ölçekli değirmenin çalışması için hazırlanan plakalardaki optimum yüksekliğin 40 mm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

En uygun ürün boyutu veren üç deneyden en az güç tüketimi 2,58 kWh değer ile Plaka Tip 3'ün %70 kritik hız ile çalıştırılması sonucunda oluşmuştur. Plaka Tip 3'ün taşıyıcı açısı 50°'dir. Söz konusu üç deney içerisinde en az güç tüketimi yapan ikinci deney ise yine Plaka Tip 3 ile %75 kritik hızda

yapılan deneydir. İmalatı yapılan plakalar içerisinde en uygun plaka açısının 50° olduğu sonucuna ulaşılabilir.

4. SONUÇ

Belirlenen 5 plaka tipi ile toplamda 45 adet deney yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilere göre en uygun ürün boyutu, Plaka Tip 2 ve Plaka Tip 3 ile yapılan, sırasıyla kritik devrin %80'i, %70'i ve %75'i hızında gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşmuştur. Burada dikkat çeken en önemli nokta, üç deneyde de aynı ürün boyutu elde edilmesine rağmen, en az güç tüketen yani en verimli deney, Plaka Tip 3'ün %70 kritik hız ile çalıştırılmasıyla yapılan deneydir. Her ne kadar en uygun öğütme verimi için optimum bir plaka açısı ve yüksekliği belirlenmiş ise de optimum profilde olmayan bir plaka için de kendi içerisinde en iyi çalışma devri vardır. Örneğin taşıyıcı plaka açısının düşük olduğu Plaka Tip 4 için kabul edilebilir ürün boyutu daha yüksek hızlarda oluşmuştur. Fakat bu durum, plaka ve bilya aşınmasını hızlandırabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bütün deneyler göstermektedir ki, hızın artırılması güç tüketimini de arttırmaktadır. Fakat bu durum, ürün boyutu için tamamen aynı değildir. Hızın artmasıyla ürün boyutu optimum seviyeye kadar iyileşmektedir. Bu seviyeden sonra ürün, yeterince öğütülememekte, ancak daha fazla güç tüketilmektedir.

Deneylerde kullanılan her plaka tasarımı için belirli bir optimum çalışma hızı vardır. Bu çalışma hızında değirmen, en

Tablo 3. En Verimli Deneyler

Plaka Tip	Hız (Kritik Hız x %)	Ürün Boyutu (µm)	Güç Tüketimi (kWh)
Tip 3	%70	95	2,58
Tip 3	%75	95	2,77
Tip 2	%80	95	2,90
Tip 1	%75	100	2,75
Tip 2	%75	100	2,75
Tip 2	%70	105	2,35
Tip 1	%70	105	2,55

uygun ürün boyutu ve minimum güç tüketimi ile optimum seviyede çalışmaktadır. Optimum çalışma hızı plaka tasarımına göre değişmekle birlikte, %70-80 kritik hız değerleri arasındadır.

SEMBOLLER

ω	: Açısal Hız
m_p	: Çalışılan Bilyanın Kütlesi
F_g	: Yer çekimi kuvveti
D_m	: Değirmenin Plaka İç Kısmından Ölçülen Çap
D_{max}	: Maksimum bilya çapı
D_{20}	: Öğütülecek malzemenin %80'inin geçtiği elek çapı (μ)
K	: Açık veya kapalı devre sistemler için sabit değer ($K = 350$)
W_i	: Bond Öğütme İndeksi (kwh/ton)
N_c	: Kritik devir
D_u	: Değirmen etkin çapı (m)
φ	: Malzeme özgül ağırlığı
Q	: Bilya miktarı
L	: Değirmen uzunluğu
d	: Bilya yığın yoğunluğu
V_p	: Hacimsel şarj oranı

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya maddi ve manevi yönden destek veren Sayın Mehmet Güler ve Sayın Oktay Onaç başta olmak üzere *Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası* değerli yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Elmoftly, S.** 2004. Lecture Notes of Material Technology, Part-2 Grinding, Mining and Environmental Engineering Department of Cairo University Publish, Eygpt, p. 18.
2. Outotec Company, 2010. "Ball Mill Operation and Maintenance Seminar Notes," Outotec Oyj. Press (OTE-10 185-1-4), Finland, p. 38.

3. FL Smidth Company, 2010. "Ball Mill for Cement Grinding," FLSmidth Institute Press (C 11-10 300-1-ENG), p. 4-5.
4. **Powell, M. S.** 1991. "The Effects of Liner Design on the Motion of the Outer Grinding Elements in a Rotary Mill," International Journal of Mineral Processing, vol. 31, p. 163-193.
5. **Fortsch, D.** 2006. Ball Charge Loading-Impact on Specific Power Consumption and Capacity, 1-4244-0372-3/06, FLSmidth, Denmark.
6. **King, R. P.** 1999. "Modeling and Simulation of Mineral Processing System," <http://www.mineraltech.com/MODSIM/ModsimTraining/Module6/Grinding.pdf>, son erişim tarihi: 22.11.2013.
7. **Meivor, R. E.** 1983. "Effects of Speed and Liner Configuration on Ball Mill Performance," Mining Engineering, vol. 35, no. 6, p. 617-622.
8. **Clermont B., De Haas, B., Hancotte, O.** 2008. "Real Time Mill Management Tools Stabilizing Your Milling Process," The 3rd International Platinum Conference, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 26/09/2008, Sun City, South Africa.
9. **Çalkaya, M.** 2008. "Bilyalı Değirmende Zeolitin İnce Yaş Öğütmesinin Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya, s. 29.
10. **Koçak H., Benzer, H., Aydoğan N.** 2008. Çimento Değirmenlerinde Bilya Boyut Optimizasyonu, Çemaş Döküm Sanayi AŞ., Kırşehir.
11. **Magdalinovic, N., Trumic, M., Andric, L.** 2012. "The Optimal Ball Diameter in a Mill," Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 48 (2), p. 329-339.
12. **Kendrick, M. J., Marsden, J. O.** 2001. Candelaria Post Expansion Evolution of Sag Miller Design and Milling Performance, Proceedings International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Published CIM, Vancouver, Canada, p. 280-287.