

## OBLONG DELİKLİ ELEKLERİN ÇEKİÇLİ DEĞİRMENLERİN PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Mehmet Arif BEYHAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü  
55139 Kurupelit, SAMSUN, TÜRKİYE

Sorumlu yazar: mabeyhan@omu.edu.tr

Geliş Tarihi: 09.09.2008

Kabul Tarihi: 21.10.2008

**ÖZET:** Bu çalışmada, yuvarlak delikli eleklerle karşı oblong delikli elek kullanımının, çekiçli değirmenlerin performans karakteristikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Denemelerde, delik çapı 2.5, 4.5 ve 6.5 mm olan yuvarlak delikli elekler ile delik ölçüleri 19.8x1.5, 19.8x2 ve 19.8x2.5 mm olan oblong delikli elekler kullanılmıştır. Materyal olarak, sert beyaz buğdayın kullanıldığı öğütme işlemleri, her bir elek için 5 farklı çekiç çevre hızında yapılmıştır. Araştırma sonuçları, öğütme sonrası elde edilen ürünlerin, ortalama geometrik çap, geometrik standart sapma ve özgül yüzey alanı değerlerinin, elek tiplerine göre farklı olmakla birlikte, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Her iki tip elek ile yapılan öğütme sonrası, elde edilen örneklerin partikül büyüklük dağılımları, birbirine yakın bulunmuştur. Yine, her iki elek grubunda da, öğütme kapasitesinin, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değiştiği, oblong delikli eleklerin, özellikle yüksek çekiç çevre hızlarında, öğütme kapasitesini önemli düzeyde arttırdığı saptanmıştır. Özgül yüzey alanı 3.37-4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında değişen ürünlerin, oblong delikli eleklerle 70-80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızlarında öğütülmesinin, yuvarlak delikli eleklerle göre, öğütme etkinliğini önemli düzeyde arttırdığı belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Çekiçli değirmen, Oblong delikli elek, Partikül büyüklük dağılımı, Enerji etkinlik katsayısı.

### THE EFFECT OF OBLONG-HOLED SCREENS ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HAMMER MILL

**ABSTRACT:** In this study, the effect of oblong-holed screen usage instead of round-holed screens on performance characteristics of hammer mill was investigated. In the experiments, hole diameters of 2.5, 4.5 and 6.5 mm for round-holed screens and hole dimensions of 19.8x1.5, 19.8x2 and 19.8x2.5 for oblong-holed screens were used. As material, grinding procedures were performed at five different hammer tip speeds for grinding white hard wheat. Results obtained from the present study showed that mean geometric diameter, geometric standard deviation and specific surface area of the products differed significantly depending on screen types as well as showing variations with changing screen hole sizes and hammer tip speeds. It was also found that products from both screen types showed similar particle size distribution. Moreover, grinding capacity for both screen types varied with screen hole size and hammer tip speed. On the other hand, oblong-holed screens increased markedly grinding capacity especially at higher hammer tip speeds. Grinding with oblong-holed screens at hammer tip speeds of 70-80 ms<sup>-1</sup> instead of using round-holed screens gave much higher mill efficiency for products having specific surface areas from 3.37 to 4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>.

**Key Words:** Hammer mill, Oblong-holed screen, Particle size distribution, Energy efficiency coefficient.

#### 1. GİRİŞ

Taneli ürünlerin gıda ve yem amaçlı işlenmesinde, tane büyüklüğünün azaltılması, en önemli ve en fazla enerji tüketen işlemdir (Dziki, 2008). Taneli veya lifli materyallerin büyüklüklerinin azaltılmasında, yapılarının basit ve öğütülen ürünün incelik derecesinin kolay kontrol edilebilmesi nedeniyle, çekiçli değirmenlerin kullanımı oldukça yaygındır. Ancak, bu değirmenlerde, enerji kullanım etkinliğinin önemli bir göstergesi olan öğütme etkinliği, diğer değirmenlere göre daha düşüktür (Ayık, 1997; Dmitrewski, 1982).

Çekiçli değirmenlerin öğütme etkinliği, teknolojik (öğütülen ürünün; fiziko-mekanik özellikleri, incelik derecesi, partikül büyüklük dağılımı v.d.), mekanik (çekiç çevre hızı, rotorun dinamik özellikleri, kırıcı ünitenin boyutları, çekiçlerin şekli, kırıcı ünite duvarları ile çekiç kenarları arasındaki aralığın boyutu, kırıcı ünitenin beslenme tekniği, öğütülmüş ürünün boşaltılma tekniği, elek alanı, çarpma plakası v.d.) gibi faktörlere bağlıdır (Dmitrewski, 1982). Yapılan

çalışmalarda, teknolojik faktörler içerisinde yer alan, materyalin mekanik özelliklerinin, nem içeriğinden önemli oranda etkilendiği ve buğdayın nem içeriğindeki artışla, özgül enerji tüketiminin arttığı bildirilmektedir (Glenn ve Johnston, 1992; Mabil ve ark., 2001; Islam ve Matzen, 1988). Yine, çeşide bağlı olan buğday sertliğinin, partikül büyüklük dağılımını etkilediği ve yumuşak buğdaylarda 50 µm'den daha küçük partikül miktarında önemli düzeyde bir artışa neden olduğu saptanmıştır (Pujol ve ark., 2000). Genel olarak, öğütme uygulamalarında, partikül büyüklüğündeki azalmaya bağlı olarak, incelik derecesindeki artışın, öğütme etkinliğini azaltacak yönde etkilediği bildirilmiştir (Dmitrewski, 1982; Stamboliadis, 2007). Ayrıca, buğdayın öğütülmesinde çekiçli değirmenlerin, tanelerin mekanik özelliğini değiştiren ezme uygulaması ile birlikte kullanılmasının öğütme etkinliğini arttırdığı saptanmıştır (Dziki, 2008). Mekanik faktörler içinde yer alan çekiç çevre hızının, öğütme etkinliği açısından, optimum 60-80 ms<sup>-1</sup> aralığında değiştiği (Islam ve Matzen, 2002; Dmitrewski, 1982) ve bu

değerlerin üzerindeki çekiç çevre hızlarında, kırıcı ünite içindeki vantilasyon direncindeki artışa bağlı olarak, özgül enerji tüketiminin önemli düzeyde arttığı bildirilmiştir (Dmitrewski, 1982). Konstrüktif faktörler konusunda ise, Dmitrewski (1982), çekiçli değirmen boyutlarının enerji tüketimi açısından önemli olduğunu bildirmiş ve yüksek kapasiteli değirmenler için  $D(\text{rotor çapı})/L(\text{rotor genişliği})=1.5-1.7$ , düşük kapasiteli değirmenler için ise  $D/L=4-7$  olarak önermiştir. Ayrıca, en kullanışlı çekiç şeklinin, kalınlıkları 1.5-10 mm arasında değişen, uçları girintili ve düz dikdörtgen plakalar olduğunu ve çekiç kalınlığındaki azalmanın özgül enerji tüketimini %15'e varan oranlarda azalttığını bildirmiştir. Yine, Dmitrewski (1982), çekiç ucu ile elek yüzeyi arasındaki aralığın artmasıyla, öğütme kapasitesinin azaldığını ve özgül enerji tüketiminin arttığını; kırıcı ünitenin dairesel cidarına teğetsel olarak besleme yapılması durumunda ise, öğütme kapasitesinin arttığını ve buna bağlı olarak özgül enerji tüketiminin azaldığını belirtmiştir.

Konstrüktif faktörler içerisinde yer alan elekler ise, çekiçli değirmenlerin öğütme etkinliğini etkileyen en önemli faktördür. Elek delik çapı, öğütülen materyalin incelik derecesini ve öğütme kapasitesini belirler. Belirli bir incelik derecesi için öğütme kapasitesindeki artış, öğütme etkinliğini artıran temel faktördür (Fang ve ark., 1997; Koch, 1996). Bu nedenle, öğütme kapasitesini artırmak için, "delik alanı / toplam elek alanı" oranı, elek dayanımının izin verdiği ölçüde yüksek tutulmalıdır. Elek alanı kullanım faktörü olarak da adlandırılan bu oran değerleri, uygulamada, elek delik büyüklüklerine bağlı olarak %8-%35 arasında değişmektedir (Dmitrewski, 1982). Tarımsal uygulamalarda, genellikle yuvarlak delikli elekler, yem üretim amaçlı endüstriyel ağır iş

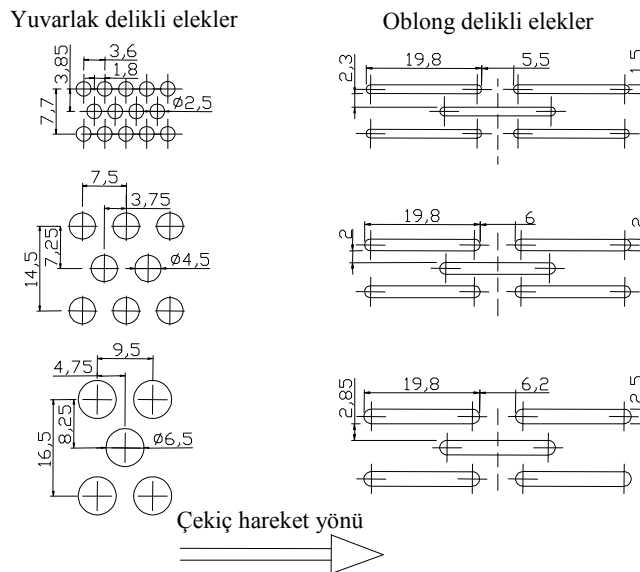
makinalarında ise cep şeklinde (rende tipi) deliklere sahip elekler kullanılmaktadır. Cep delikli elekler, keskin kenarları nedeniyle, ezme etkisini arttırmakla birlikte, öğütme kapasitesini de arttırmaktadır. Ancak, bu eleklerin olumsuz yönü, çok hızlı aşınmalarıdır. Yuvarlak delikli elekler, öğütme kapasitesini artırmak için konik şekilli olarak delinebilmektedir. Ayrıca, rotor miline paralel olarak, elek üzerine 7 mm veya 9 mm yüksekliğinde çelik barların yerleştirilmesi, hem öğütme kapasitesini, hem de parçalama etkisini artırarak, enerji tüketiminde ortalama %15'e varan azalma sağlamaktadır (Dmitrewski, 1982).

Yukarıda verilen açıklamalara göre, çekiçli değirmenlerin öğütme etkinliği, büyük oranda, istenilen incelik derecesine ulaşan materyalin, kırıcı üniteyi hızlı bir şekilde terk etmesine bağlıdır. Oblong delikli eleklerin, yuvarlak delikli eleklerle göre, öğütülmüş materyali daha hızlı geçirebileceği dikkate alınarak yapılan bu çalışmada; yuvarlak delikli eleklerle göre, oblong delikli eleklerde, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüğü faktörlerine bağlı olarak, öğütme sonrası elde edilen örneklerin büyüklük dağılımının ve öğütme kapasitesinin nasıl değiştiği, belirli bir özgül yüzey alanına sahip materyal üretimi için, elek tiplerinin, aynı faktörlere bağlı olarak özgül enerji tüketimini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

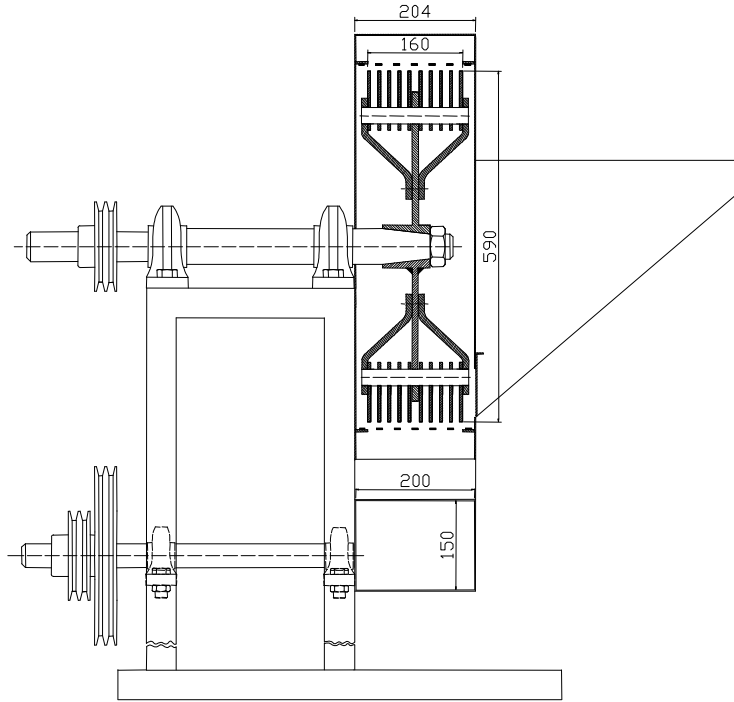
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

Denemelerde, delik çapı 2.5, 4.5 ve 6.5 mm olan yuvarlak delikli elekler ile delik ölçüleri 19.8x1.5, 19.8x2 ve 19.8x2.5 mm olan oblong delikli elekler kullanılmıştır. Kullanılan eleklerin delik şekli ve deliklerin geometrik ölçüleri, Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Denemelerde kullanılan eleklerin delik şekli ve geometrik ölçüleri (ölçüler mm'dir).



Şekil 2. Denemelerde kullanılan çekiçli değirmenin konstrüktif özellikleri (ölçüler mm'dir).

Kullanılan eleklerde, “delik alanı / toplam elek alanı” değerleri, yuvarlak delikli eleklerde, delik çapı 2.5 mm için %35.4, delik çapı 4.5 mm için %29.2 ve 6.5 mm için %42.3, oblong delikli eleklerde ise delik genişliği 1.5 mm için %30.4, delik genişliği 2 mm için %37.5 ve delik genişliği 2.5 mm için %34.6 olarak hesaplanmıştır. Elekler, aktif elek genişliği 160 mm, çapı 610 mm olmak üzere, kırıcı ünite rotorunu 360° saracak şekilde, 2 mm kalınlığında çelik sacdan imal edilmiştir.

Eleklerin kullanıldığı kırıcı ünite, Dmitrewski (1982)' de şekli verilmiş olan, orta kapasiteli, üniversal kullanım olanağı sağlayan çekiçli değirmen örnek alınarak, çalışmanın amacına uygun olarak imal edilmiştir. İmal edilen değirmenin konstrüktif özellikleri Şekil 2'de, teknik veriler ise Çizelge 1'de verilmiştir. Denemelerde, beyaz sert buğday (*Triticum aestivum* L.) kullanılmıştır. Kullanılan buğdayın hacim ağırlığı  $818 \text{ kgm}^{-3}$  ve nem içeriği (yaş baz) %14.6 olarak ölçülmüştür.

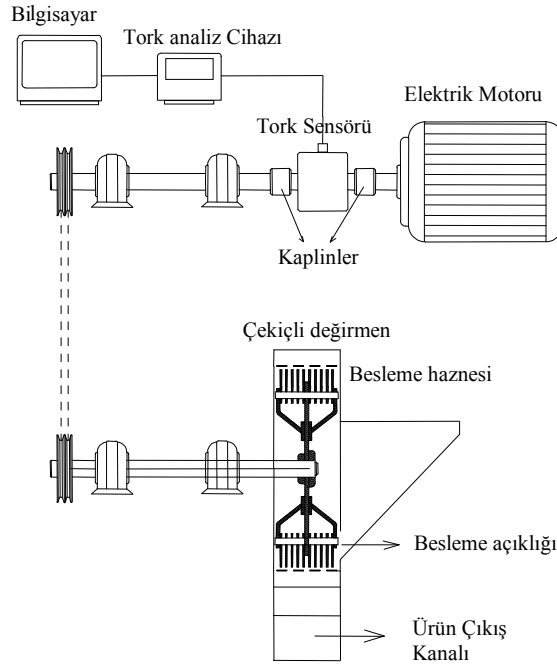
Çizelge 1. Denemelerde kullanılan çekiçli değirmenin teknik verileri.

Çekiç sayısı (adet)	36 (2x10; 2x8)
Çekiç ölçüleri (mm)	100x50x5
Çekiç şekli	düz dikdörtgen plaka
Kırıcı ünite rotor çapı (mm)	590
Bir çekiğin ağırlığı (kg)	0.18
Çekiç-elek aralığı (mm)	10
Aktif elek genişliği (mm)	160
Besleme ağız açıklığı (mm)	40x80
Besleme	gravitasyonel
Ürün çıkışı	gravitasyonel
Motor gücü (kW)	15
Motor devir sayısı ( $\text{min}^{-1}$ )	1460

## 2.2. Yöntem

Öğütme denemeleri için kurulan sistemin akış diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'den de görüldüğü gibi, değirmen, güç ünitesine kayış kasnak mekanizmasıyla bağlanmıştır. Kırıcı ünite rotor milinin devir sayıları, 40, 50, 60, 70 ve  $80 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızlarını sağlayacak şekilde, kasnak büyüklükleri değiştirilerek kabaca ve daha sonra güç ünitesine bağlı frekans dönüştürücü ile hassas olarak ayarlanmıştır. Söz konusu hız değerleri için hesaplanan kırıcı ünite rotor devir sayıları, ayrıca Hasler tipi mekanik takometre ile kontrol edilmiştir. Öğütme işlemleri sırasında değirmenin güç gereksinimini saptayabilmek amacıyla, yine, Şekil 3'de görülen, güç ünitesindeki elektrik motorunun miline kaplinlerle direk bağlanmış olan 115-230V, 50-60 Hz, UMV 2000 model tork sensörünün, statik kalibrasyonu yapılmış ve tork sensörüne bağlı aynı model tork analiz cihazında okunan değerlerle uyumlu olduğu saptanmıştır. Öğütme işlemleri sırasında tork sensöründen alınan sinyaller, tork analiz cihazı üzerinden aynı anda bilgisayara aktarılarak ( $25 \text{ data/s}$ ) depolanmıştır.

Her bir elek ile yapılan öğütme işlemleri sırasında, değirmenin besleme ağız kapak açıklığı  $40 \times 80 \text{ mm}$  ( $3200 \text{ mm}^2$ ) olarak ayarlanmıştır. Öğütme işlemleri öncesi, değirmenin besleme haznesi tam olarak doldurulmuş ve her bir öğütme işlemi süresince, kırıcı üniteye giren materyalin akış hızındaki değişimi önlemek amacıyla, besleme haznesindeki materyal miktarı sabit tutulmuştur. Güç ünitesinden veri aktarımı ve değirmenin çıkış kanalından örnek alımları için değirmenin optimum çalışma rejimine ulaşması beklenmiştir. Bu amaçla, tork analiz cihazında, tork değerlerindeki değişimin durduğu



Şekil 3. Öğütme denemeleri için kurulan sistemin akış diyagramı

andan sonraki zaman dilimleri dikkate alınmıştır. Öğütme kapasitesini belirlemek amacıyla, her bir uygulama için değirmenin ürün çıkış kanalından 20 s süreyle, farklı zaman dilimlerinde, 3 ayrı öğütülmüş materyal alınarak tartılmıştır. Bu zaman dilimi içerisinde alınan materyal miktarı  $th^{-1}$ 'e dönüştürülmüştür.

Özgül enerji tüketimini saptayabilmek amacıyla, her bir elek için, yükte ve boşta çalışmadaki tork değerleri 20 s süreyle bilgisayara aktarılmıştır. Boştaki tork değerlerinin ölçülmesi sırasında, vantilyasyon etkisini azaltmak için besleme ağız kapağı kapatılmıştır. Bilgisayara aktarılan tork değerlerinin ortalaması alınarak, aşağıdaki eşitlik (Yavuzcan ve ark, 1987) yardımıyla, her bir uygulama için değirmenin güç gereksinimi hesaplanmıştır.

$$N = M_i \times n / 9550 \dots\dots\dots 1$$

Eşitlikte;

$N$  = güç (kW),

$M_i$  = ortalama tork (Nm),

$n$  = tork sensörünün bağlı olduğu milin devir sayısı ( $min^{-1}$ ).

Hesaplanan, yükteki güç değerlerinden boştaki güç değerleri çıkarılarak, öğütme için gereksinim duyulan net güç gereksinimi saptanmıştır. Net güç gereksinimi değerleri, öğütme kapasitesi değerlerine oranlanarak, her bir uygulama için özgül enerji tüketimi değerleri  $kWh^{-1}$  olarak belirlenmiştir.

Öğütülmüş materyalin partikül büyüklük dağılımını belirlemek için elek testi yapılmıştır. Bu amaçla, değirmenin ürün çıkış kanalından materyal akışı devam ederken, farklı zaman dilimlerinde olmak

üzere, her bir uygulama için yaklaşık olarak 250 g'lık 3 ayrı örnek alınmıştır. Alınan her bir örnek, delik büyüklüğü 3350, 2800, 2000, 1400, 1000, 500, 250, 150  $\mu m$  (ASTM E:11) olan standart elekler kullanılarak 9 fraksiyona ayrılmıştır. Elek testlerinde, 100 g'lık örnekler kullanılmış ve her bir örnek, dairesel hareketli silkeleyici ile 10 min süreyle elenmiştir (Pasikatan ve ark. 1999; Baker ve Herrman, 2002; Tapela ve Chimbombi, 2006).

Pfost ve Headley (1972), çekiçli değirmenle öğütülmüş buğdayın partikül büyüklük dağılımının, log-normal dağılıma uyduğunu bildirmiştir. Bu bildirim esas alınarak, örneklerin partikül büyüklük dağılımlarını karakterize eden, log-normal dağılıma dayanan ortalama geometrik çap ve geometrik standart sapma değerleri sırasıyla, aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır (Pfost ve Headley, 1976; Baker ve Herrman, 2002; Mani ve Tabil, 2002).

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{d}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \dots\dots\dots 2$$

Eşitlikte;

$d_{gw}$  = ortalama geometrik çap ( $\mu m$ ),

$W_i$  = i. elek üzerindeki materyal ağırlığı (g),

$\bar{d}_i$  = i. eleğin üzerinde kalan partiküllerin geometrik ortalama çapı ( $\mu m$ )'dir.

$$\bar{d}_i = (d_u \times d_o)^{0.5} \dots\dots\dots 3$$

Eşitlikte;

$d_u$  = partikülleri i. eleğe geçiren eleğin delik çapı ( $\mu m$ ),

$d_o$  = i. eleğin delik çapı (partikülleri geçirmeyen) ( $\mu\text{m}$ )'dir.

$$S_{g_w} = \log^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i (\log d_i - \log d_{g_w})^2}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]^{0.5}$$

..... 4

Eşitlikte;

$S_{g_w}$  = log-normal dağılımın geometrik standart sapması (birimsiz)'dir.

Özgül enerji tüketiminin bir fonksiyonu olarak, yeni yüzey alanı elde etmek için harcanan enerjinin nasıl kullanıldığını açıklayan, öğütülmüş materyalin özgül yüzey alanı değerleri (Stamboliadis, 2007) ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır (Pfof ve Headley, 1976; Baker ve Herrman, 2002; Mani ve Tabil, 2002).

$$A_t = (\beta_s / \rho \beta_v) \exp(0.5 \ln^2 S_{g_w} - \ln d_{g_w}) \dots\dots\dots 5$$

Eşitlikte;

$A_t$  = özgül yüzey alanı ( $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ ),

$\beta_s$  = partiküllerin yüzey alanını hesaplamak için şekil faktörü ( $\beta_s=6$ ),

$\beta_v$  = partiküllerin hacmini hesaplamak için şekil faktörü ( $\beta_v=1$ ),

$\rho$  = materyalin özgül ağırlığı ( $\text{kgm}^{-3}$ )'dir.

Eşitlikte, materyalin özgül ağırlığı ( $\rho$ ) için, Mohsenin (1980)'de buğday için verilmiş olan değerlerin ortalaması ( $1420 \text{ kgm}^{-3}$ ) kullanılmış ve buna bağlı olarak, ortalama geometrik çap değerlerinin birimi metreye dönüştürülmüştür.

Elde edilen, ortalama geometrik çap, geometrik standart sapma, özgül yüzey alanı ve öğütme kapasitesi değerleri üzerine, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızı faktörlerinin etkilerini saptamak amacıyla, çoklu-regresyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca, her bir elekten, farklı çekiç çevre hızlarında yapılan öğütme sonucu materyale kazandırılan özgül yüzey alanı değerleri ile özgül enerji tüketimi değerleri arasındaki ilişkinin derecesini saptamak için de regresyon analizleri yapılmıştır.

Çekiçli değirmenin enerji etkinliği, Veri Zarflama Yöntemi (VZY) kullanılarak ölçülmüştür. Etkinliğin ölçülmesinde VZY, özel bir üretim fonksiyonuna ihtiyaç duyulmadığı için ve etkinliğin ölçüsü olarak kabul edilen hata terimine ait dağılımın tipinin, önceden belirlenmesi zorunluluğu olmadığı için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Coelli ve ark., 1998). Araştırmada Farrell (1957)'in girdiye yönelik etkinlik ölçümü kullanılmıştır. Etkinlik analizinde, 2 farklı elek tipi (yuvarlak delikli ve oblong delikli), her bir elek için 3 farklı delik büyüklüğü (yuvarlak delikli eleklerde delik çapı 2.5, 4.5 ve 6.5 mm, oblong delikli eleklerde delik genişliği 1.5, 2 ve 2.5 mm) ve 5 farklı çekiç çevre hızının (40, 50, 60, 70 ve 80  $\text{ms}^{-1}$ ) oluşturduğu toplam 30 uygulamanın (kombinasyon) etkinliği değerlendirilmiştir. Enerji etkinliği değeri 1'e eşit

olduğunda, enerji etkinliği en yüksek seviyesinde olmakta ve başarısızlığa bağlı olarak azalmaktadır. Etkinlik ölçümünde, Coelli (1996) tarafından geliştirilen DEAP 2.1 paket programı kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Partikül büyüklük analizi sonuçları

##### 3.1.1. Ortalama geometrik çap ( $d_{g_w}$ )

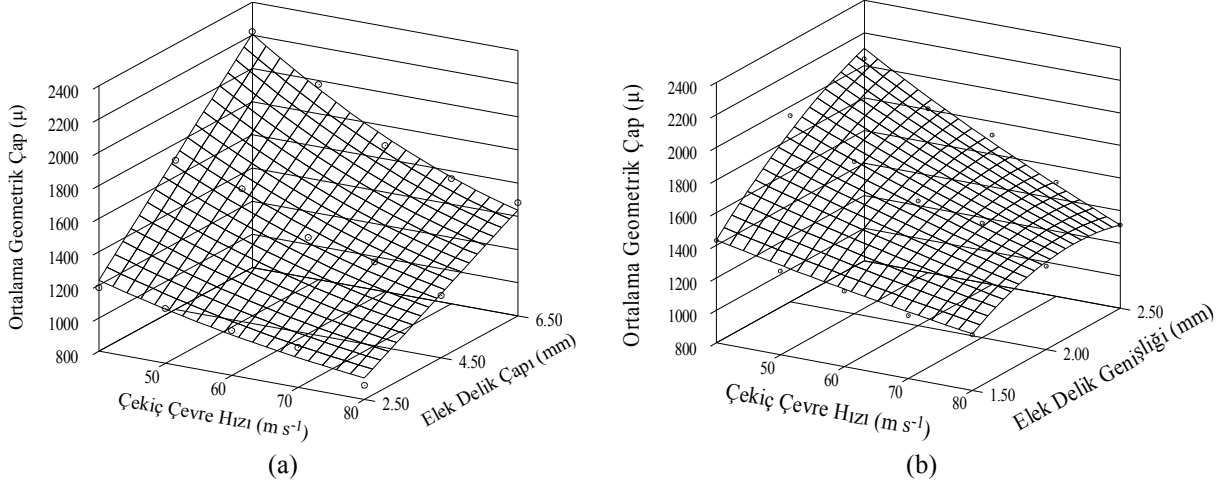
Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle öğütme sonrasında elde edilen materyalin, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerine bağlı olarak  $d_{g_w}$ 'nin değişimi, Şekil 4'de verilmiştir. Her bir elek tipi için yapılan çoklu-regresyon analiz sonuçları,  $d_{g_w}$ 'deki değişimin, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerinin interaktif etkilerine bağlı olduğu göstermiştir.

Şekil 4'den görüldüğü gibi, her iki elek tipinde de  $d_{g_w}$ , çekiç çevre hızındaki artışla azalmış ve elek delik büyüklüğündeki artışla artmıştır. Ancak, her iki elek tipinde de, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak  $d_{g_w}$ 'nin azalış hızı, elek delik büyüklüklerindeki artışla artmıştır. Buna göre, 40-80  $\text{ms}^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığında elde edilen  $d_{g_w}$  değerleri, yuvarlak delikli eleklerde, hafif bir eğrisellikle azalmak üzere, 2.5 mm çaplı elekte 1183.1-885.7  $\mu\text{m}$ , 4.5 mm çaplı elekte 1699.5-1174.9  $\mu\text{m}$ , 6.5 mm çaplı elekte 2273.3-1482.9  $\mu\text{m}$  arasında değişmiştir. Oblong delikli eleklerde ise, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak  $d_{g_w}$ , 1.5 mm elek delik genişliğinde 1429.3-1142.1  $\mu\text{m}$ , 2 mm elek delik genişliğinde 1943.3-1310.9  $\mu\text{m}$  ve 2.5 mm elek delik genişliğinde 2040.9-1310.9  $\mu\text{m}$  arasında olmak üzere lineere yakın bir değişimle azalmıştır.

Yine, Şekil 4'den görüldüğü gibi, elek delik büyüklüklerindeki artışa bağlı olarak  $d_{g_w}$ 'de görülen artışın değişim trendi, çekiç çevre hızına bağlı olarak farklı olmakla birlikte, elek tipine bağlı olarak da farklı olmuştur. Buna göre, yuvarlak delikli elekte  $d_{g_w}$ , düşük çekiç çevre hızlarında daha fazla olmak üzere, elek delik çapındaki artışla lineer olarak artmıştır. Oblong delikli elekte ise yüksek çekiç çevre hızlarında daha belirgin olmak üzere  $d_{g_w}$ 'nin artış hızı, elek delik genişliğindeki artışla eğrisel olarak azalmıştır.

##### 3.1.2. Geometrik standart sapma ( $S_{g_w}$ )

Aynı örnekler için hesaplanan  $S_{g_w}$  değerlerinin her iki elek tipi için, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerine bağlı olarak değişimleri, Şekil 5'de verilmiştir. Yapılan çoklu-regresyon analiz sonuçları, her iki elek tipinde de,  $S_{g_w}$  değerlerinde meydana gelen değişimin, istatistik açıdan önemli olmak üzere (yuvarlak delik için  $P<0.05$ , oblong delik için  $P<0.01$ ) çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerinin interaktif etkilerine bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 5'den görüldüğü gibi, yuvarlak delikli elekte, çekiç çevre hızının  $S_{g_w}$ 'ye etkisi, elek delik çaplarına bağlı olarak farklı olmuştur. Buna göre, 2.5 mm çaplı elekte

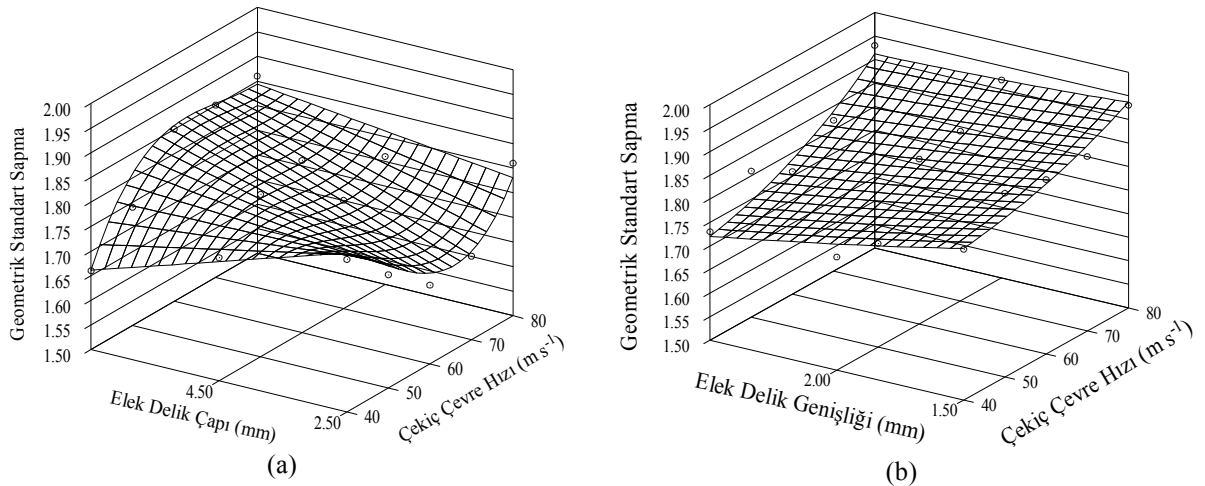


**Şekil 4.** Yuvarlak (a) ve oblong (b) delikli eleklerle öğütmede, ortalama geometrik çapın, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değişimi [Çekiç çevre hızı ( $w$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) ve elek delik büyüklüğüne (yuvarlak delikli eleklerde delik çapı  $d$ , mm; oblong delikli eleklerde elek delik genişliği  $b$ , mm) bağlı olarak, ortalama geometrik çap ( $d_{g_{gw}}$ ,  $\mu\text{m}$ ) için geliştirilen eşitlikler sırasıyla; yuvarlak delikli eleklerde,  $d_{g_{gw}} = 614.70 + 472.64 d - 7.05 wd + 0.034 w^2 d$ ,  $R^2=0.990$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 31.73\*\*, 47.40\*\*, 1.63\*\*, 0.014\*, oblong delikli eleklerde,  $d_{g_{gw}} = -727.20 + 1899.49 b - 48.49 w^{0.5} b^2$ ,  $R^2=0.974$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla 106.33\*\*, 95.07\*\*, 2.93\*\*, dür (\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ )].

öğütmede saptanan  $S_{g_w}$  değerleri,  $60 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızına kadar eğrisel bir değişimle 1.81'den 1.66'ya azalmış ve çekiç çevre hızındaki devam eden artışla birlikte tekrar 1.81'e yükselmiştir. 4.5 ve 6.5 mm çaplı eleklerle öğütmede ise  $S_{g_w}$ ,  $60 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızına kadar eğrisel bir trenle değişerek, 4.5 mm çaplı elekte 1.75'den 1.85'e, 6.5 mm çaplı elekte 1.66'dan 1.85'e yükselmiş ve çekiç çevre hızındaki devam eden artışla birlikte, 6.5 mm çaplı elekte daha belirgin olmak üzere, yataya yakın bir değişim göstermiştir. Yine, Şekil 5'den görüldüğü gibi, elek delik çaplarındaki artışın  $S_{g_w}$ 'ye etkisi ise, çekiç çevre hızına bağlı olarak

farklı bulunmuştur. Buna göre, elek delik çapındaki artışa bağlı olarak,  $S_{g_w}$ ,  $40 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında lineer bir değişimle azalmış,  $40 \text{ ms}^{-1}$ 'nin üzerindeki çekiç çevre hızlarında ise lineer bir değişimle artmıştır.

Yine, Şekil 5'den görüldüğü gibi oblong delikli eleklerle öğütülmüş örnekler için saptanan  $S_{g_w}$  değerlerinin, söz konusu faktörlere bağlı olarak değişim trendi, yuvarlak delikli eleklerle göre farklı olmuştur. Buna göre,  $40-80 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığı için saptanan  $S_{g_w}$  değerleri, 1.5 mm elek delik genişliğinde 1.82-1.93, 2 mm elek delik genişliğinde



**Şekil 5.** Yuvarlak (a) ve oblong (b) delikli eleklerle öğütmede, geometrik standart sapmanın, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değişimi [Çekiç çevre hızı ( $w$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) ve elek delik büyüklüğüne (yuvarlak delikli eleklerde delik çapı  $d$ , mm; oblong delikli eleklerde elek delik genişliği  $b$ , mm) bağlı olarak, geometrik standart sapma ( $S_{g_w}$ ) için geliştirilen eşitlikler sırasıyla; yuvarlak delikli eleklerde,  $S_{g_w} = 2.66 - 0.54 d + 0.018 dw - 0.00014 dw^2 - 0.0007 w^2 + 7.84 \cdot 10^{-6} w^3$ ,  $R^2=0.731$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.25\*\*, 0.15\*\*, 0.005\*\*,  $4.20 \cdot 10^{-5}$ \*\*, 0.0002\*\*,  $2.30 \cdot 10^{-6}$ \*\*, oblong delikli eleklerde,  $S_{g_w} = 2.19 - 0.315 b^{0.5} + 1.71 \cdot 10^{-7} bw^3$ ,  $R^2=0.792$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.09\*\*, 0.066\*\*,  $2.82 \cdot 10^{-8}$ \*\* dür (\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ )].

1.74-1.92 ve 2.5 mm elek delik genişliğinde 1.73-1.93 arasında olmak üzere, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak lineere yakın bir değişimle artmıştır. Elek delik genişliğindeki artış ise, düşük çekiç çevre hızlarında daha belirgin olmak üzere,  $S_{gw}$ 'de, lineere yakın bir değişimle azalma eğilimine neden olmuştur.

### 3.1.3. Özgül yüzey alanı ( $A_t$ )

Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle, farklı çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerinde yapılan öğütme sonrası materyale kazandırılan  $A_t$  değerlerindeki değişim, Şekil 6'da verilmiştir. Yapılan çoklu-regresyon analiz sonuçları, her iki elek tipi ile yapılan öğütme sonrası materyale kazandırılan  $A_t$  değerlerinde meydana gelen değişimin, istatistik açıdan önemli olmak üzere ( $P<0.01$ ) çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerinin interaktif etkilerine bağlı olduğunu göstermiştir.

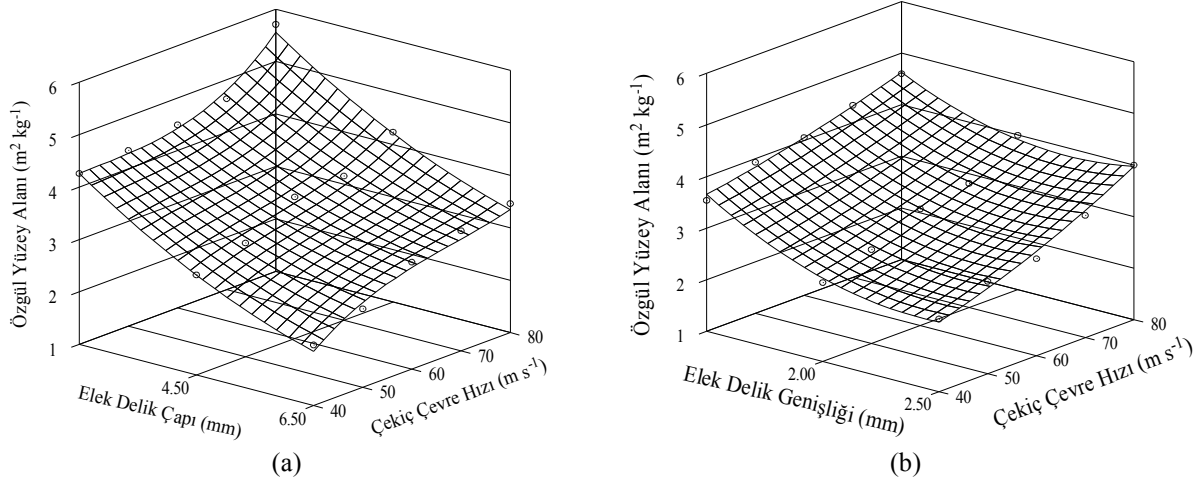
Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, yuvarlak delikli eleklerle 40-80  $ms^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığında öğütülen materyalin  $A_t$  değerleri; delik çapı 2.5 mm olan elekte 4.26-5.71  $m^2kg^{-1}$ , delik çapı 4.5 mm olan elekte 2.91-4.24  $m^2kg^{-1}$ , delik çapı 6.5 mm olan elekte 2.16-3.46  $m^2kg^{-1}$  arasında değişmiştir. Elde edilen bu değerlerin değişim trendleri, elek delik çapındaki artışa bağlı olarak hafif bir eğrisellikle azalırken, çekiç çevre hızındaki artışla artmıştır. Ancak, çekiç çevre hızının etkisi elek delik çaplarına bağlı olarak farklı olmuştur. Buna göre, delik çapı 2.5 mm olan elekte  $A_t$ 'nin artış hızı, çekiç çevre hızındaki artışla artarken, delik çapı 6.5 mm olan elekte, çekiç çevre hızındaki artışla azalmıştır. Delik çapı 4.5 mm olan elekte ise  $A_t$ , çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak lineere yakın bir değişimle artmıştır. Yine, Şekil 6'dan görüldüğü gibi, oblong delikli eleklerle 40-80  $ms^{-1}$  çekiç çevre

hızı aralığında öğütülen materyalin  $A_t$  değerleri; delik genişliği 1.5 mm olan elekte 3.54-4.60  $m^2kg^{-1}$ , delik genişliği 2 mm olan elekte 2.53-3.99  $m^2kg^{-1}$ , delik genişliği 2.5 mm olan elekte ise 2.41-4.00  $m^2kg^{-1}$  arasında değişmiş olup, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak lineere yakın bir değişimle artmıştır. Ayrıca, elek delik genişliğinin 1.5 mm'den 2 mm'ye çıkarılması durumunda,  $A_t$  önemli düzeyde azalırken, elek delik genişliğinin 2 mm'den 2.5 mm'ye çıkarılması,  $A_t$ 'de önemli bir değişim meydana getirmemiştir.

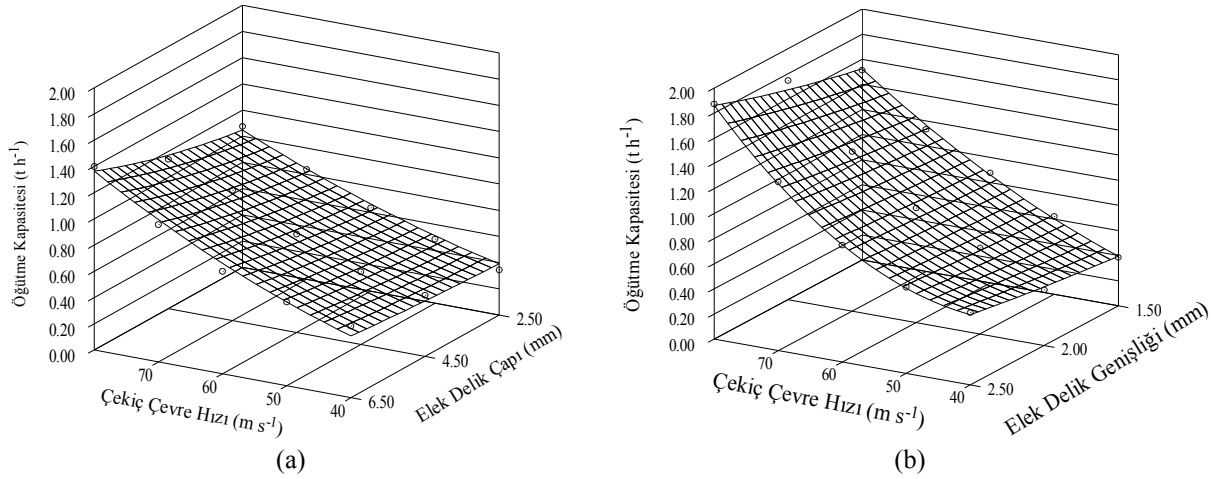
### 3.2. Öğütme kapasitesi ( $Q_o$ )

Her bir elek tipi için saptanan  $Q_o$  değerlerinin, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüğü faktörlerine bağlı olarak değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan çoklu-regresyon analiz sonuçları,  $Q_o$ 'de meydana gelen değişimin, her iki elek tipi için de, istatistik açıdan önemli ( $P<0.01$ ) olmak üzere, çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerinin interaktif etkilerine bağlı olduğunu göstermiştir.

Şekil 7'den görüldüğü gibi, her iki elek tipinde de  $Q_o$ , çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüğündeki artışla artmıştır. Ancak, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak  $Q_o$ 'nün artış hızı, yuvarlak delikli eleğe göre, oblong delikli elekte önemli düzeyde yüksek olmuştur. Buna göre, 40-80  $ms^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığında saptanan  $Q_o$  değerleri, yuvarlak delikli eleklerle öğütmede, 2.5 mm elek delik çapında 0.35-1.08  $th^{-1}$ , 4.5 mm elek delik çapında 0.47-1.14  $th^{-1}$  ve 6.5 mm elek delik çapında 0.55-1.40  $th^{-1}$  arasında olmak üzere lineere yakın bir değişimle artmıştır. Oblong delikli eleklerle öğütmede ise  $Q_o$ , 1.5 mm elek delik genişliğinde 0.39-1.51  $th^{-1}$ , 2 mm elek delik genişliğinde 0.44-1.75  $th^{-1}$  ve 2.5 mm elek delik



Şekil 6. Yuvarlak (a) ve oblong (b) delikli eleklerle öğütmede, özgül yüzey alanının, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değişimi [Çekiç çevre hızı ( $w$ ,  $ms^{-1}$ ) ve elek delik büyüklüğüne (yuvarlak delikli eleklerde delik çapı  $d$ , mm; oblong delikli eleklerde elek delik genişliği  $b$ , mm) bağlı olarak, özgül yüzey alanı ( $A_t$ ,  $m^2kg^{-1}$ ) için geliştirilen eşitlikler sırasıyla; yuvarlak delikli eleklerde,  $A_t = 8.27 - 2.57 d + 0.059 d^2 - 0.00046 dw^2 + 0.055 dw - 0.002 w^2 + 2.43 \cdot 10^{-5} w^3$ ,  $R^2=0.987$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.82\*\*, 0.46\*\*, 0.019\*, 0.00012\*\*, 0.015\*\*, 0.0006\*, 6.8\*10<sup>-6</sup>\*\*, oblong delikli eleklerde,  $A_t = 11.43 - 7.73 b + 1.55 b^2 + 0.00013 bw^2$ ,  $R^2=0.982$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.86\*\*, 0.89\*\*, 0.22\*\*, 7.54\*10<sup>-6</sup>\*\*'dır (\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ ).



**Şekil 7.** Yuvarlak (a) ve oblong (b) delikli eleklerle öğütmede, öğütme kapasitesinin, elek delik büyüklüğü ve çekiç çevre hızına bağlı olarak değişimi [Çekiç çevre hızı ( $w$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) ve elek delik büyüklüğüne (yuvarlak delikli eleklerde delik çapı  $d$ , mm; oblong delikli eleklerde elek delik genişliği  $b$ , mm) bağlı olarak, öğütme kapasitesi ( $Q_{\delta}$ ,  $\text{th}^{-1}$ ) için geliştirilen eşitlikler sırasıyla; yuvarlak delikli eleklerde,  $Q_{\delta} = 0.174 + 1.28 \cdot 10^{-4} w^2 + 1.37 \cdot 10^{-6} w^2 d^2$ ,  $R^2=0.981$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla,  $0.027^{**}$ ,  $7.87 \cdot 10^{-6**}$ ,  $1.84 \cdot 10^{-7**}$ , oblong delikli eleklerde,  $Q_{\delta} = -0.73 + 0.026 w + 0.35 b^2 - 0.012 w b^2 + 1.1 \cdot 10^{-4} w^2 b^2$ ,  $R^2=0.996$ ,  $P<0.01$ ,  $n=15$ , standart hata katsayıları sırasıyla,  $0.096^{**}$ ,  $0.0015^{**}$ ,  $0.042^{**}$ ,  $0.0013^{**}$ ,  $1.7 \cdot 10^{-5**}$ , dir (\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ ).

genişliğinde  $0.58-1.87 \text{ th}^{-1}$  arasında olmak üzere eğrisel bir değişimle artmıştır. Yine, Şekil 7'den görüldüğü gibi, her iki elek tipinde de, elek delik büyüklüğündeki artışa bağlı olarak,  $Q_{\delta}$ 'nin artış hızı, genel olarak düşük olmakla birlikte, yüksek çekiç çevre hızlarında daha fazla olmak üzere, lineere yakın bir değişimle artmıştır.

### 3.3. Özgül yüzey alanı ( $A_t$ ) üretimine karşı özgül enerji tüketimi ( $E_{\delta}$ )

Her bir elekte,  $40-80 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığında yapılan öğütme sonrası materyale kazandırılan  $A_t$  değerlerine karşı  $E_{\delta}$ 'nin değişimi, Şekil 8'de verilmiştir. Her bir elek için yapılan regresyon analizi sonuçları,  $A_t$  değerlerine bağlı olarak  $E_{\delta}$  değerlerinde görülen değişimin, istatistik açıdan önemli olmak üzere, yine Şekil 8'de verilmiş olan regresyon eşitliklerine uyduğunu göstermiştir.

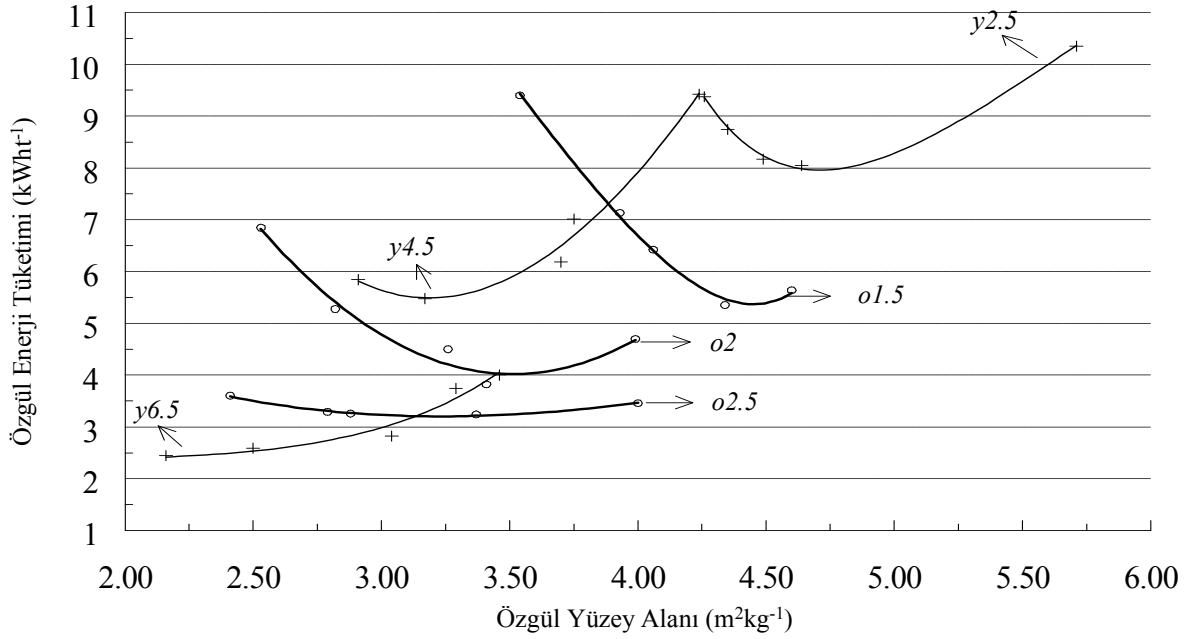
Şekil 8'den de görüldüğü gibi, her bir elekte yapılan öğütmede, çekiç çevre hızına bağlı olarak elde edilen  $A_t$  değerleri için  $E_{\delta}$  değerleri, yuvarlak delikli  $2.5 \text{ mm}$  çaplı elekte  $9.38-10.36 \text{ kWh}^{-1}$ ,  $4.5 \text{ mm}$  çaplı elekte  $5.84-9.42 \text{ kWh}^{-1}$  ve  $6.5 \text{ mm}$  çaplı elekte  $2.45-4.00 \text{ kWh}^{-1}$  arasında olmak üzere eğrisel bir değişimle artmıştır. Ancak,  $E_{\delta}$ ,  $2.5 \text{ mm}$  çaplı elekte  $70 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında elde edilen  $4.64 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$   $A_t$  değerine kadar eğrisel bir değişimle azalarak  $8.05 \text{ kWh}^{-1}$ 'a düşmüş ve çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak  $A_t$ 'deki artışla birlikte tekrar artmıştır. Benzer şekilde,  $4.5 \text{ mm}$  çaplı elekte de  $E_{\delta}$ ,  $50 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında elde edilen  $3.17 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$   $A_t$  değerine kadar hafif bir azalma ( $5.48 \text{ kWh}^{-1}$ ) eğilimi göstermiş ve çekiç çevre hızındaki artışla birlikte, artan  $A_t$  değerlerine bağlı olarak eğrisel bir değişimle önemli düzeyde artmıştır. Oblong delikli eleklerle yapılan öğütmede ise çekiç çevre hızına bağlı olarak elde edilen  $A_t$  değerlerine

karşılık  $E_{\delta}$  değerleri, delik genişliği  $1.5 \text{ mm}$  olan elekte  $9.40-5.64 \text{ kWh}^{-1}$ , delik genişliği  $2 \text{ mm}$  olan elekte  $6.85-4.70 \text{ kWh}^{-1}$  ve delik genişliği  $2.5 \text{ mm}$  olan elekte  $3.61-3.46 \text{ kWh}^{-1}$  arasında olmak üzere eğrisel bir değişimle azalmıştır. Ancak,  $E_{\delta}$ , tüm elek delik genişliklerinde,  $70 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında elde edilen  $A_t$  değerlerine kadar (elek delik genişliği  $1.5 \text{ mm}$ 'de  $4.34 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm}$ 'de  $3.41 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$  ve  $2.5 \text{ mm}$ 'de  $3.37 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$ ) eğrisel bir değişimle azalarak, delik genişliği  $1.5 \text{ mm}$  olan elekte  $5.36 \text{ kWh}^{-1}$ , delik genişliği  $2 \text{ mm}$  olan elekte  $3.82 \text{ kWh}^{-1}$ , delik genişliği  $2.5 \text{ mm}$  olan elekte  $3.24 \text{ kWh}^{-1}$  ile en düşük değere ulaşmıştır. Çekiç çevre hız  $80 \text{ ms}^{-1}$ 'ye çıkarıldığında ise, artan  $A_t$  değerlerine bağlı olarak tekrar artış eğilimine girmiştir.

Yine, Şekil 8'den görüldüğü gibi, belirli bir  $A_t$  değerine sahip materyal, farklı eleklerle, farklı çekiç çevre hızlarında yapılan öğütmeyle elde edilebilmiştir. Ancak, aynı  $A_t$ 'ye sahip materyal için gereksinim duyulan  $E_{\delta}$  değerleri, kullanılan eleğe ve çekiç çevre hızlarına göre farklı olmuştur. Buna göre, her bir öğütme uygulaması için elde edilen enerji etkinlik katsayıları, Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'den de görüldüğü gibi, en yüksek enerji etkinlik katsayısı ( $1.00$ ),  $4.00 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$   $A_t$ 'ye sahip bir ürün,  $2.5 \text{ mm}$  delik genişliğine sahip oblong delikli elekte,  $80 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında öğütüldüğünde elde edilmiştir. Bu uygulamaya göre, diğer öğütme uygulamalarının enerji etkinlik katsayıları, farklı düzeylerde olmak üzere daha düşük bulunmuştur.

Yine, Çizelge 2'den görüldüğü gibi,  $2.16-3.04 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$  arasında değişen  $A_t$ 'ye sahip bir materyalin üretimi için en yüksek enerji etkinlik katsayısı, diğer öğütme uygulamalarına göre,  $6.5 \text{ mm}$  çaplı yuvarlak delikli elekte,  $40-60 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızı aralığında yapılan öğütmeyle elde edilmiştir. Daha yüksek  $A_t$ 'ye





**Şekil 8.** Farklı elek delik büyüklüklerine sahip yuvarlak ve oblong delikli eleklerle öğütmede, özgül enerji tüketiminin, özgül yüzey alanına bağlı olarak değişimi [özgül yüzey alanına ( $A_t$ , m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>) bağlı olarak, özgül enerji tüketimi ( $E_{\bar{o}}$ , kWh t<sup>-1</sup>) için geliştirilen eşitlikler sırasıyla; yuvarlak delikli eleklerde, delik çapı 2.5 mm için  $E_{\bar{o}} = 25.57 - 585.88 (1/A_t)^2 + 96104.84 (1/A_t)^6$ ,  $R^2=0.997$ ,  $P<0.01$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.69\*\*, 25.69\*\*, 4643.94\*\*, delik çapı 4.5 mm için  $E_{\bar{o}} = 173.14 + 52.61 A_t - 187.83 A_t^{0.5}$ ,  $R^2: 0.980$ ,  $P<0.05$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 36.88\*, 10.49\*, 39.42\*, delik çapı 6.5 mm için  $E_{\bar{o}} = 2.36 + 2.86 \cdot 10^{-4} A_t^7$ ,  $R^2: 0.955$ ,  $P<0.01$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.12\*\*,  $3.59 \cdot 10^{-5}$ \*\*, oblong delikli eleklerde, elek delik genişliği 1.5 mm için  $E_{\bar{o}} = 22.69 - 1.09 A_t^2 + 1.42 \cdot 10^{-6} A_t^{10}$ ,  $R^2: 0.997$ ,  $P<0.01$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 0.85\*\*, 0.06\*\*,  $1.36 \cdot 10^{-7}$ \*\*, elek delik genişliği 2 mm için  $E_{\bar{o}} = 39.85 - 20.40 A_t + 2.90 A_t^2$ ,  $R^2: 0.968$ ,  $P<0.05$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 5.70\*, 3.55\*, 0.54\*, elek delik genişliği 2.5 mm için  $E_{\bar{o}} = 23.74 + 6.36 A_t - 22.85 A_t^{0.5}$ ,  $R^2: 0.984$ ,  $P<0.05$ ,  $n=5$ , standart hata katsayıları sırasıyla, 1.82\*\*, 0.57\*\*, 2.05\*\*dir (\*\*:  $P<0.01$ ; \*:  $P<0.05$ )].

(3.37-4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında) sahip bir materyalin üretiminde ise en yüksek enerji etkinlik katsayısı, delik genişliği 1.5, 2 ve 2.5 mm olan oblong delikli eleklerle, 70-80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızı aralığında yapılan öğütmelerde saptanmıştır. Ayrıca, her bir elek ile yapılan öğütmelerde saptanan en yüksek enerji etkinlik katsayıları; yuvarlak delikli eleklerde, elek delik çapı 2.5 mm için 70 ms<sup>-1</sup>, elek delik çapı 4.5 mm ve 6.5 mm için 60 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızında elde

edilmiştir. Oblong delikli eleklerde ise, en yüksek enerji etkinlik katsayıları, elek delik genişliği 1.5 mm ve 2.5 mm olan eleklerle 80 ms<sup>-1</sup>, elek delik genişliği 2 mm olan elekte ise 70 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızında yapılan öğütmede saptanmıştır.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle yapılan

**Çizelge 2.** Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle, farklı delik büyüklükleri ve farklı çekiç çevre hızlarında yapılan öğütme uygulamalarının enerji etkinlik katsayıları.

Elek tipi	Elek delik büyüklüğü (mm)	Çekiç çevre hızı (ms <sup>-1</sup> )				
		40	50	60	70	80
Yuvarlak delikli	2.5	0.393 (4.26)	0.430 (4.35)	0.475 (4.49)	0.499 (4.64)	0.477 (5.71)
	4.5	0.431 (2.91)	0.500 (3.17)	0.518 (3.70)	0.462 (3.75)	0.389 (4.24)
	6.5	0.763 (2.16)	0.835 (2.50)	0.930 (3.04)	0.761 (3.29)	0.747 (3.46)
Oblong delikli	19.8x1.5	0.326 (3.54)	0.477 (3.93)	0.547 (4.06)	0.701 (4.34)	0.705 (4.60)
	19.8x2	0.320 (2.53)	0.462 (2.82)	0.627 (3.26)	0.772 (3.41)	0.734 (3.99)
	19.8x2.5	0.578 (2.41)	0.733 (2.79)	0.765 (2.88)	0.899 (3.37)	1.000 (4.00)

Parantez içindeki değerler öğütülmüş materyalin özgül yüzey alanı ( $A_t$ )'dir.

öğütme sonrası elde edilen ortalama geometrik çap değerleri, çekiç çevre hızının artmasıyla azalmış, elek delik büyüklüklerinin artmasıyla artmıştır. Çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak partikül büyüklüğündeki azalma, çekiçli değirmenlerde temel etken çarpışma kuvveti olduğundan, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak çarpışma kuvvetindeki artışın bir sonucudur (Anderson, 1994; Dmitrewski, 1982; Koch, 1996). Elek delik büyüklüğü ise partikül büyüklüğünü etkileyen önemli bir faktördür (Dmitrewski, 1982; Islam ve Matzen, 1988; Koch, 1996). Oblong delikli eleklerle 1142.1-2040.9  $\mu\text{m}$  aralığında elde edilen ortalama geometrik çap değerleri, yuvarlak delikli eleklerle elde edilen 885.7  $\mu\text{m}$  ve 2273.3  $\mu\text{m}$  ortalama geometrik çap değerlerinin sınırları içinde yer almıştır. Goodband ve ark (2002), domuz beslemede, buğday için optimum partikül büyüklüğünün 800-900  $\mu\text{m}$  arasında değiştiğini ve etlik piliç beslemede 1000  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki partikül büyüklüğünün bir yararı olmadığını bildirmişlerdir. Yine, Dmitrewski (1982), ortalama partikül büyüklüğünün sığırlar için 3000  $\mu\text{m}$ 'nin üzerinde, domuz ve etlik piliç beslemede ise 1000  $\mu\text{m}$ 'nin üzerinde olması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, aşırı ince öğütmenin, sindirim açısından zararlı olduğunu ve maliyeti etkileyen enerji tüketimini artırdığını bildirmiştir. Bu bildirimlere göre, yuvarlak delikli eleklerle karşı kullanılan oblong delikli eleklerle, farklı çekiç çevre hızı ve farklı elek delik genişliklerinde elde edilen ortalama geometrik çap değerlerinin, hayvan beslemede gereksinim duyulan ortalama partikül büyüklüklerini sağladığı söylenebilir.

Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle yapılan öğütme sonrası elde edilen materyalin geometrik standart sapma değerleri, her iki elek grubunda da çekiç çevre hızı ve elek delik büyüklüklerine bağlı olarak değişmiştir. Ancak, yuvarlak delikli eleklerde, söz konusu faktörlerin geometrik standart sapma değerlerine etkisi, oblong delikli eleklerle göre farklı olmuştur. Buna göre, yuvarlak delikli ekte, geometrik standart sapma değerleri 4.5 mm ve 6.5 mm elek delik çaplarında çekiç çevre hızındaki artışla artmış, 2.5 mm elek delik çapında ise, çekiç çevre hızındaki artışla çukurlaşan bir eğri şeklinde değişmiştir. Elek delik çapındaki artış ise  $40 \text{ ms}^{-1}$  çekiç çevre hızında geometrik standart sapmanın azalmasına, bunun üzerindeki çekiç çevre hızlarında ise artmasına neden olmuştur. Oblong delikli eleklerde ise, geometrik standart sapma, çekiç çevre hızındaki artışla artmış, elek delik genişliğindeki artışla, hafif bir azalma eğilimi göstermiştir. Yapılan literatür taramasında söz konusu ilişkilerle ilgili çalışmaya rastlanılmamış olması, tartışmayı güçleştirmiştir. Ancak, Baker ve Herrman (1995), partikül büyüklük analizi için kullanılan iki farklı elek seti ( Ro Tap (dairesel hareketli ve çarpma etkili) ve portatif elek silkeleyici (sadece dairesel hareketli)) ile 1191, 594, 297, 150 ve 73  $\mu\text{m}$ 'lik delik çaplarına sahip elek setini kullandıkları çalışmalarında, birinci örnek için Ro Tap silkeleyicide 421  $\mu\text{m}$  ortalama geometrik çap, 2.55

geometrik standart sapma ve portatif elek silkeleyicide 417  $\mu\text{m}$  ortalama geometrik çap, 2.52 geometrik standart sapma, ikinci örnek için ise Ro Tap silkeleyicide 897  $\mu\text{m}$  ortalama geometrik çap, 2.00 geometrik standart sapma ve portatif elek silkeleyicide 900  $\mu\text{m}$  ortalama geometrik çap, 1.94 geometrik standart sapma değerlerini saptamışlardır. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlara göre, ortalama geometrik çap değeri arttıkça geometrik standart sapma değeri azalmıştır. Çalışmamızdan da, genel olarak, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, Baker ve Herrman (1995), çoğu yem örneklerinde, geometrik standart sapmanın 2.00-2.40 arasında değiştiğini ve mümkün olması durumunda en iyi geometrik standart sapmanın 1.00 olduğunu belirtmişlerdir. Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle yapılan tüm öğütme uygulamalarından elde edilen materyallerin geometrik standart sapmalarının ortalaması sırasıyla, 1.77 (standart sapma 0.07) ve 1.83 (standart sapma 0.07) olarak saptanmıştır. Her iki elek grubu arasında ortalama değerler açısından önemli bir farklılık gözlenmez iken, yukarıda verilmiş olan literatür bildirimleriyle de uyumludur.

Ortalama geometrik çap ve geometrik standart sapma değerlerine bağlı olarak hesaplanan özgül yüzey alanı değerleri, genel olarak, her iki elek grubunda da çekiç çevre hızındaki artışla artmış ve elek delik büyüklüğündeki artışla azalmıştır. Ancak, yuvarlak delikli eleklerde çekiç çevre hızının özgül yüzey alanına etkisi elek delik çaplarına bağlı olarak farklı olmuştur. Söz konusu farklılık, geometrik standart sapma üzerine çekiç çevre hızının etkisinin, elek delik çaplarına bağlı olarak farklı düzeyde olmasının bir sonucudur. Yuvarlak delikli eleklerde, çekiç çevre hızı ve elek delik çaplarına bağlı olarak saptanan özgül yüzey alanı değerlerinin değişim trendi, Maloun (2001)'in, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 ve 4.5 mm çaplı yuvarlak delikli eleklerle yaptığı çalışmada da belirlenmiştir. Ayrıca, oblong delikli eleklerde, elek delik genişliğinin 2 mm'den 2.5 mm'ye çıkması, tüm çekiç çevre hızlarında, özgül yüzey alanı değerlerinde önemli bir azalmaya neden olmamıştır. Bu durum, 2, 2.5 mm elek delik genişliklerinde çekiç çevre hızına bağlı olarak elde edilen ortalama geometrik çap ve geometrik standart sapma değerlerindeki değişime bağlıdır. Yapılan tüm öğütme uygulamalarından elde edilen örneklerin minimum-maksimum ortalama geometrik çap değerleri ve bu değerlere karşılık hesaplanan özgül yüzey alanı değerleri sırasıyla, yuvarlak delikli ekte 885.7  $\mu\text{m}$ -5.71  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$  ve 2273.3  $\mu\text{m}$ -2.16  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ , oblong delikli ekte ise 1142.1 $\mu\text{m}$ -4.60  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$  ve 2040.9  $\mu\text{m}$ -2.41  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$  arasında değişmiştir. Buna göre, oblong delikli eleklerle yapılan öğütme sonrası elde edilen özgül yüzey alanı değerleri, yuvarlak delikli eleklerle elde edilen özgül yüzey alanı değerlerinin sınırları içerisinde kalmıştır. Ortalama geometrik çap değerlerine karşılık hesaplanan özgül yüzey alanı değerleri, Dmitrewski (1982)'nin öğütülmüş arpa için bildirdiği, 200, 1000, 1800 ve 2600  $\mu\text{m}$ 'lik ortalama

partikül büyüklüklerine karşılık sırasıyla, 23.0, 4.6, 2.5, 1.8 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> özgül yüzey alanı değerleriyle uyumludur.

Yuvarlak ve oblong delikli eleklerle elde edilen öğütme kapasitesi değerleri, her iki elek grubunda da, çekiç çevre hızındaki artışla artmıştır. Ancak, çekiç çevre hızındaki artışa bağlı olarak, öğütme kapasitesinin artış hızı, yuvarlak delikli eleklerde hafif bir eğrisellikle artarken, oblong delikli eleklerde, özellikle 50 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızından sonra, önemli düzeyde artmıştır. Yine, öğütme kapasitesi, yüksek çekiç çevre hızlarında daha fazla olmak üzere, elek delik büyüklüğündeki artışla artmıştır. Her iki elek grubunda da, öğütme kapasitesi üzerine elek delik büyüklüğünün etkisi, çekiç çevre hızının etkisine göre çok daha az olmuştur. Bu sonuçlar, Dmitrewski (1982)'nin, "öğütülen materyalin ortalama partikül boyutunun fonksiyonu olan öğütme kapasitesi, lineer bir değişime sahiptir ve bu kapasiteyi açıklayan düz hatların eğimi çekiç çevre hızındaki artışla artar" bildiriyle uyumludur. Yuvarlak delikli eleklerde, elek delik çapındaki artış, aynı özgül yüzey alanı değerleri için özgül enerji tüketimini azaltmıştır. Ancak, öğütme sonrası elde edilen materyalin özgül yüzey alanı değerlerindeki artışa bağlı olarak özgül enerji tüketimi değerlerinin değişimi, elek delik çaplarına göre farklı olmuştur. Buna göre, özgül enerji tüketimi, 2.5 mm ve 4.5 mm çaplı eleklerde sırasıyla, 4.64 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> (70 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızı) ve 3.17 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> (50 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızı) özgül yüzey alanı değerine kadar eğrisel bir değişimle azalmış ve daha sonra tekrar önemli düzeyde artmıştır. 6.5 mm çaplı elekte ise, özgül yüzey alanı değerlerindeki artış, özgül enerji tüketimini artan bir hızla arttırmıştır. Bu değişim trendi, Maloun (2001)'de verilmiş olan çalışmanın sonuçlarıyla uyumludur. Oblong delikli eleklerle yapılan öğütmede ise, özgül enerji tüketimi, 1.5 mm ve 2 mm elek delik genişliklerinde önemli düzeyde olmak üzere, tüm elek delik genişliklerinde, 70 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızında elde edilen özgül yüzey alanı değerlerine kadar, eğrisel bir değişimle azalmış ve daha sonra tekrar artış eğilimine girmiştir. Ancak, 2.5 mm delik genişliğine sahip oblong delikli elekte, özgül yüzey alanı değerlerindeki artışa bağlı olarak, özgül enerji tüketimi, yataya yakın bir değişim göstermiştir. Elek delik büyüklüklerindeki artış ise, aynı özgül yüzey alanı değerleri için özgül enerji tüketimini azaltmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 3.37-4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında değişen özgül yüzey alanına sahip bir ürünü elde etmek için oblong delikli eleklerin kullanılması, yuvarlak delikli eleklerle göre, elek delik büyüklüklerine bağlı olarak %14.1-%56.3 arasında değişen oranlarda özgül enerji tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Bu durum, oblong delikli eleklerle yapılan öğütmede, özellikle yüksek çekiç çevre hızlarında, öğütme kapasitesinin, yuvarlak delikli eleklerle göre önemli düzeyde yüksek olmasının bir sonucudur.

Yapılan veri zarflama analizi sonuçları, 2.16-3.04 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında değişen özgül yüzey alanına sahip

ürünlerin, delik çapı 6.5 mm olan yuvarlak delikli eleklerle 40-60 ms<sup>-1</sup> arasında değişen çekiç çevre hızlarında elde edilmesi durumunda, değirmenin enerji etkinlik katsayısının en yüksek olduğunu göstermiştir. 3.37-4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında değişen özgül yüzey alanına sahip ürünler için ise, en yüksek enerji etkinlik katsayıları, oblong delikli eleklerle 70-80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızlarında yapılan öğütmelerde saptanmıştır. Ayrıca, her bir eleklerle yapılan öğütmelerde saptanan en yüksek enerji etkinlik katsayıları, elek delik büyüklüklerine bağlı olarak değişmekle birlikte, 60-80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızı aralığında elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Islam ve Matzen (1988)'in buğday için yaptıkları çalışmada, özgül enerji tüketiminin elek delik büyüklüğündeki azalmayla arttığı ve 60-80 ms<sup>-1</sup> arasındaki çekiç çevre hızlarının özgül enerji tüketimi açısından optimum olduğu yönündeki bildirimleriyle uyumludur.

Sonuç olarak, oblong delikli eleklerle yapılan öğütme sonucunda elde edilen partikül büyüklük dağılımı, yuvarlak delikli eleklerle elde edilen partikül büyüklük dağılımına benzer bir dağılım göstermiştir. Ayrıca, oblong delikli elekler, yuvarlak delikli eleklerle göre, öğütme kapasitesinin artmasına ve öğütülen ürünün incelik derecesi arttıkça, özgül enerji tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Buna göre, özgül yüzey alanı 3.37-4.60 m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup> arasında değişen ürün elde etmek için oblong delikli eleklerin kullanılması (70-80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızlarında), özgül enerji tüketimini, elek delik büyüklüklerine bağlı olarak %14.1-%56.3 arasında azaltmıştır. Özellikle, delik genişliği 2.5 mm olan oblong delikli elek, değirmenin performans karakteristikleri üzerine etkisi dikkat çekicidir. Bu elek, daha yüksek incelik derecesinde ürün elde edebilmek amacıyla, 80 ms<sup>-1</sup> çekiç çevre hızının üzerindeki hızlarla çalışmada, çekiçli değirmenin performans karakteristiklerinin nasıl değiştiğinin araştırılması, teknik açıdan yararlı olabilecek niteliktedir.

## **5. KAYNAKLAR**

- Anderson, S., 1994. Large Rotor High Speed Hammermills: Beyond Screen Size. Feed Management, Vol. 45, No. 9, Pages 20-22.
- Ayık, M., 1997. Hayvancılıkta Mekanizasyon (III. Baskı). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları. Yayın No: 1463, Ders Kitabı: 433, Ankara.
- Baker, S., Herrman T., 1995. MF-2051 Feed Manufacturing. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, KS.
- Baker, S., Herrman T., 2002. MF-2051 Feed Manufacturing. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, KS.
- Coelli, T. 1996. "A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis Program" CEPA Working Paper 96/8 Department of Econometrics

- University of New England, Armidale.
- Coelli, T., Rao, D.S.P and Battese, G.E. 1998. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*: Boston, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Dmitrewski, J., 1982. *Agricultural Machines, Theory and Construction*. Vol. 3. TT 75-54072. Warsaw, Poland.
- Dziki, D., 2008. The Crushing of Wheat Kernels and its Consequence on the Grinding Process. *Power Technology* 185 (2008) 181-186.
- Fang, Q., Bölöni, I., Haque, E., and Spillman, C. K., 1997. Comparison of Energy Efficiency Between a Roller Mill and a Hammer Mill. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 13 (5): Pages 631-635.
- Farrell, M.J. 1957. "The Measurement of Productive Efficiency." *Journal of Royal Statistical Society Association*, 120:253-281.
- Glenn, G. M., Johnston, R. K., 1992. Moisture-Dependent Changes in the Mechanical Properties of Isolated Wheat Bran. *Journal of Cereal Science* 15 (1992) 223-236.
- Goodband, R. D., Tokach, M. D., and Nelssen J. L., 2002. MF-2050 Feed Manufacturing. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, KS.
- Islam, M. N., Matzen, R., 1988. Size Distribution Analysis of Ground Wheat by Hammer Mill. *Power Technology*. Vol. 54, Issue 4, Pages 235-241.
- Koch, K., 1996. MF-2048 Feed Manufacturing. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Manhattan, KS.
- Mabille, F., Grilet, J., and Abecassis J., 2001. Mechanical Properties of Wheat Seed Coats. *Cereal Chemistry* 78(3) (2001) 231-235.
- Maloun, J., 2001. *Technologická Zarizení a Hlavní Procesy Při Vyrobě Krmiv*. Ceska Zemedelska Univerzita v Praze, Technická Fakulta.
- Mani, S., Tabil, L. G., 2002. Grinding of Chickpeas. An ASAE Meeting Presentation, Paper No: MBSK 02-211.
- Mohsenin, N. N., 1980. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc. One Park Avenue, New York.
- Pasikatan, M. C., Steele, J. L., Milliken, G. A., Spillman, C. K., and Haque, E., 1999. Particle Size Distribution and Sieving Characteristics of First-Break Ground Wheat. ASAE Mid. Central Conference Ramada Inn, St. Joseph, MO, Paper No. MC99-129.
- Pfost, H. B., Headley, V. E., 1972. Use of Logarithmic Normal Distribution to Describe Hammermill Performance. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 14(3): Pages 531-535.
- Pfost, H. B., Headley, V. E., 1976. Methods of Determining and Expressing Particle Size. In : H. Pfost (ed), *Feed Manufacturing Technology II-Appendix C*. Am. Feed Manufacturers Assoc., Arlington, VA.
- Pujol, R., Letang, C., Lempereur, A., Chaurand, M., Mabile, F., and Abecassis, J., 2000. Description of and Micromill with Instrumentation Handicap Measuring Grinding Characteristics of Wheat Kernel. *Cereal Chemistry* 77(4) (2000) 421-427.
- Stamboliadis, E. T., 2007. The Energy Distribution Theory of Comminution Specific Surface Energy, Mill Efficiency and Distribution Mode. *Minerals Engineering* 20(2007), Pages 140-145.
- Tapela, M., Chimbombi, E. M., 2006. Bulk Density and Particle Size Distribution of Selected Sorghum Milling Products. *Botswana Journal of Agriculture and Applied Sciences* Vol. 2. Number 1.
- Yavuzcan, G., Erdiler, B., Saral, A., 1987. Ölçme Tekniği. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yayın No: 3, Ankara.