

## MİKRODALGA ÖN İŞLEMİNİN TRAVERTEN VE MERMERİN KIRILMA HIZINA VE ULTRASONİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Alper ÖZKAN, Murat ÜNAL, Bilgehan KEKEÇ  
Selçuk Üniversitesi, Müh-Mim Fak., Maden Müh. Böl., Konya

Makalenin Geliş Tarihi: 14.03.2006

**ÖZET:** Bu çalışmada, traverten ve mermerin kırılma hızı ile ultrasonik özelliklerine, mikrodalga muamelesinin etkisi araştırılmıştır. Traverten ve mermerin -850+600 µm tane boyut sınıfının özgül kırılma hızları, laboratuvar ölçekli seramik bir bilyalı değirmen kullanılarak tespit edilmiştir. Mikrodalga ile muamele edilen ve edilmeyen örneklerin kuru öğütülmesi, birinci dereceden kırılma kanununu izlemiş ve bulunan  $S_i$  değerleri mikrodalga gücünün artışına paralel olarak artmıştır. Bununla birlikte, 600 W'tan daha yüksek mikrodalga güçlerinde  $S_i$  değerlerinde önemli bir artış elde edilememiştir. Diğer taraftan; mermer için elde edilen  $S_i$  değerleri, mikrodalga muamele süresi uzarken önemli ölçüde artmıştır. Ancak, travertenin kırılma hızı belirli bir değere ulaşıldıktan sonra artan muamele süresi ile iyileştirilememiştir. Ayrıca, bu malzemelerden geçen ultrasonik hız değerleri artan mikrodalga gücü ve muamele süresi ile azalan bir eğilim göstermiştir. Dolayısıyla, ultrasonik hız değeri ve kırılma hızı arasında, ultrasonik hız azalırken  $S_i$  değerlerinin artışı işaret eden kısmi bir ilişki bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Mikrodalga, Ultrasonik hız, Özgül kırılma hızı.

### Effect of Microwave Pre-Treatment on the Breakage Rate and Ultrasonic Properties of Travertine and Marble

**ABSTRACT:** In this study, the effect of microwave treatment on breakage rate and ultrasonic velocity of travertine and marble has been investigated. The specific rates of breakage ( $S_i$ ) of -850+600 µm particle size fractions of travertine and marble have been determined using a laboratory scale ceramic ball mill. The dry grinding of the samples treated and untreated with microwave followed the first-order breakage law, and the found  $S_i$  values increased with parallel to increasing of microwave power. However, a significant increase in the  $S_i$  values was not obtained at microwave power values higher than 600 W. On the other hand, the  $S_i$  values obtained for marble increased significantly as the microwave treatment times became longer. But, the breakage rate of travertine was not improved with increasing treatment time after reaching a particular value. In addition, the values of ultrasonic velocity of these materials showed a decreasing trend with increasing microwave power and treatment time. Consequently, a partial relationship was found between the ultrasonic velocity value and breakage rate, which indicates that the ultrasonic velocity decreases, as the  $S_i$  values increases.

**Keywords:** Microwave, Ultrasonic velocity, Specific rate of breakage.

### GİRİŞ

Kırma ve öğütme gibi mekanik boyut küçültme işlemleri cevher hazırlama, metalurji, enerji, toz ve seramik endüstrilerinin önemli işlemlerinden biri olup, önemli bir maliyet faktörü olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, süregelen çalışmalar bu maliyetleri azaltmak

yönünde olmaktadır. Öğütme koşullarının yeni yaklaşımlarla daha iyi optimizasyonu, öğütmeye yardımcı katkı maddelerinin kullanımı, ısıl ön işlemlerin uygulanması ve yeni tip öğütücülerin geliştirilmesi bu çalışmalara örnektir.

Isıl ön işlemlerin uygulanmasıyla, ufalama sırasında gereken enerji miktarının azaldığı ve minerallerin serbestleşme derecelerinin

artırıldığı ifade edilmektedir (Güngör, 1998; Whittles ve diğ., 2003; Kingman ve diğ., 2004). Bu nedenle, termal ısıtma kayaçların zayıflatılması ve tane-sınır kırılmasının teşviki ile cevherlerin ufalanma ve serbestleşme özelliklerini iyileştirmede potansiyel bir yöntem olarak görünmektedir. Mikrodalganın ısıtma işleminde kullanımı ile de cevherlerin veya minerallerin diğer ısıtma cihazlarına göre daha hızlı ve seçimli olarak ısıtılabilceği ortaya konulmuştur (Kingman ve diğ.,1999). Bununla birlikte, mikrodalga ile cevherlerin ön ısıtılması nispeten yeni bir çalışma alanı olup, üzerine bilgi sınırlıdır. Bazı mineraller mikrodalgayı adsorbe ederek ısınırken, kayaçlar içerisindeki diğer mineraller ısınmayabilmektedir (Wang ve diğ., 2000; Kingman ve diğ., 2004). Bu özelliğin sözkonusu olduğu durumlarda, mikrodalganın seçimli ısıtma özelliği cevher hazırlama uygulamaları için ayrı bir önem arz eder.

Mikrodalga genel olarak, frekansı 300 MHz - 300 GHz ve dalga boyu 1-300 mm aralığında değişen elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik bir enerji ya da kısa dalga boyulu radyo dalgaları olarak tanımlanmaktadır. Mikrodalga frekansları; düşük frekans (300 MHz-3 GHz), orta frekans, (3 GHz-30 GHz) ve yüksek frekans (30 GHz- 300 GHz) olmak üzere üç başlık altında sınıflandırılmıştır. Günümüzde, evlerde Percy L. Spencer tarafından icat edilmiş olan mikrodalga fırınlar kullanılmaktadır. Bu fırınlar, pek çok uygulamada da yaygın olarak kullanılan 2450 MHz (2.45 GHz) frekansa sahiptirler (Osepchuk, 1984; Güler ve Kurtuluş, 2003).

Mikrodalga ile ısı işlem, ısı yayılımını kullanan alışılmış ısıtma yöntemlerine göre kayaç içerisinde doğrudan ısının üretilmesi nedeniyle cazip bir tekniktir (Wang ve diğ., 2000). Cevher minerallerinin mikrodalga altında hızlı ısıtılması, mikro-çatlakların oluşumu/gelişimi için yeterli büyüklükte bir termal gerilme sağlar ve bu bazen de mineral-tane sınırlarında gerçekleşebilir (Güngör, 1998; Rao ve diğ., 1999; Wang ve diğ., 2000). Dolayısıyla, ufalama işleminden önce mikro-çatlakların oluşturulması/geliştirilmesi ile cevherlerin serbestleşme ve öğütülme özelliklerinin iyileşeceği beklenmektedir.

Bu çalışma, mikrodalga ile ön işlemin malzemelerin öğütülmesine etkisinin

belirlenmesi amacıyla hammadde olarak kullanılan traverten ve mermer örnekleri üzerinde yürütülmüştür. Bu numunelere farklı güç ve sürelerde uygulanan mikrodalga muamelelerinin etkileri, karot numuneleri üzerinde yapılan ultrasonik hız ölçümleri ve değirmende öğütülen malzemelerin özgül kırılma hızlarının belirlenmesi ile tespit edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

### Malzeme

Bu çalışmada, hammadde olarak Mut yöresinden temin edilen traverten ve Afyon yöresinden elde edilen mermer örnekleri kullanılmıştır. Bu örneklerinin petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ultrasonik hız ölçümleri, temin edilen blok halindeki numunelerden hazırlanan 42 mm çapında ve 80 mm boyundaki karotlar üzerinde yürütülmüştür. Öğütme testleri için numuneler çeneli kırıcıda kırıldıktan sonra, - 850+600 µm tane boyut sınıfına hazırlanmıştır.

### Yöntem

Mikrodalga ile ön işlemin traverten ve mermer numunelerinin ultrasonik hızları ve değirmendeki kırılma hızlarına etkilerinin araştırıldığı deneysel çalışmalarda izlenen akım şeması Şekil 1'de özetlenmiştir.

### Mikrodalga Muamelesi

Malzemelerin mikrodalga ile muamele edilmesinde mutfak tipi 2.45 GHz'lik frekansta ve farklı güç seviyelerinde çalışabilen bir mikrodalga fırın kullanılmıştır. Ultrasonik hız tespiti için kullanılacak karot numuneleri ve öğütme testlerine tabi tutulacak -850+600 µm tane boyut sınıfına hazırlanan malzemeler mikrodalga fırınında farklı güç (360, 600 ve 1000 Watt) ve farklı sürelerde (10, 20 ve 30 dak) ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.

### Ultrasonik Hız Ölçüm Deneyleri

Ultrasonik ölçüm yöntemi tahribatsız muayene yöntemi olup, test edilen malzemelere hasar vermeden, sadece malzemedeki hataları ve değişimleri ortaya çıkaran bir yöntemdir. Kayaç içinden geçirilen ultrasonik boyuna-dalganın

hızının ölçülmesi esasına dayanır. Dolayısıyla da ısı ön işlem sonrasında, kayaların mukavemetinin zayıfladığı düşünüldüğünde, bu değişimin ultrasonik dalga hızı ile belirlenebileceği öngörülmüştür.

Numunelerde, mikrodalga ile ısı işlem sonrası oluşan bozunum dereceleri, ultrasonik ölçüm (PUNDIT Plus) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ultrasonik ölçümler, 54 kHz transdüserler kullanılarak yapılmış olup, ultrasonik hız değişimleri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Ultrasonik hız ölçümleri aynı koşullarda işleme tabi tutulan üç numune

üzerinde yapılmış ve ortalama sonuçlar kullanılmıştır. Ultrasonik hız değerinin yüksekliği, malzemenin mukavemetinin yüksek olduğunu, UHD oranının düşmesi ise mukavemetin azaldığını göstermektedir.

$$UHD = \frac{V_s}{V_o} \quad (1)$$

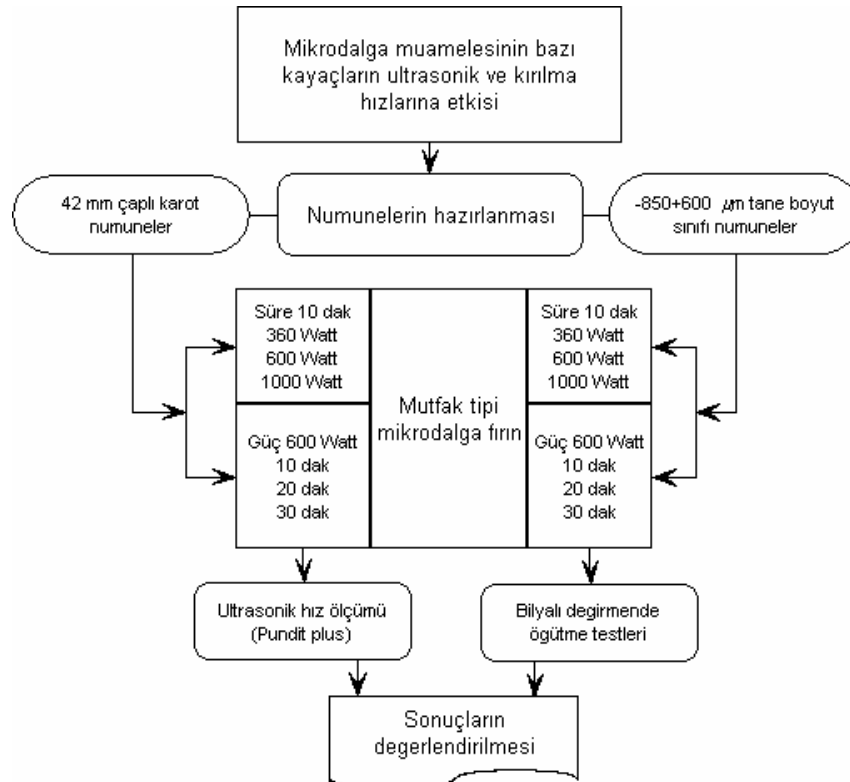
Burada;  $UHD$  ultrasonik hız değişim oranını,  $V_o$  ısı işlem öncesi numunenin ultrasonik hızını ve  $V_s$  ise ısı işlem sonrası numunenin ultrasonik hızını tanımlamaktadır.

**Çizelge 1.** Mermer ve travertenin petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri.

**Table 1.** Petrographical, physical and mechanical properties of marble and travertine.

Numune adı	Mineral bileşenleri	Mineral tane boyutu (mm)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	d	$\sigma_c$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$I_{550}$ (MPa)
Traverten	İntraklast Ooid İskeletsel taneler Sparit	>0.1-1.3	2.68	54.7	61.2	1.455	4.958
Mermer	Kalsit Mikrit Sparit	>0.1-3.2	2.73	58.4	73.84	1.417	3.755

$\sigma_c$ : Tek eksenli basınç dayanımı,  $\tau$ : Dolaylı çekme dayanımı, d: Schmidt sertliği,  $\gamma$ : Yoğunluk,  $I_{550}$ : Nokta yükü dayanımı.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda izlenen akım şeması.

**Figure 1.** Flowsheet of experimental studies.

## Öğütme Deneyleri Ve Kırılma Hızlarının Belirlenmesi

Deneyleerde 128 mm iç çapında ve 2500 cm<sup>3</sup> hacminde laboratuvar tipi bir seramik değirmen kullanılmış olup, öğütme deney koşulları ve değirmen özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Deneyleerde tek boyut fraksiyon tekniği (Austin ve diğ., 1984) kullanılarak, -850+600 µm tane boyut fraksiyonuna hazırlanan numuneler belirli sürelerde değirmende öğütülmüştür. Öğütme deneyleeri sonrası elde edilen ürünlerden konileme-dörtleme ile 45 g kadar numune alınarak elek analizi yapılmış ve özgül kırılma hızı ( $S_i$ ) değeri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.  $i$  boyutunun kırılmadan ileri gelen kaybolma hızı (Austin ve Luckie, 1972; Austin ve diğ., 1984; Klimpel, 1997);

$$S_i w_i(t) W \text{ 'dir} \quad (2)$$

Burada;  $w_i$  boyutundaki fraksiyonun ağırlıkça oranı,  $W$  değirmene beslenen malzeme miktarı,  $S_i$   $i$  boyutunun özgül kırılma hızı (dak<sup>-1</sup>) (*specific rate of breakage*) ve  $t$  ise öğütme süresidir. Eşitlik (2) analitik olarak ifade edilirse;

$$-d[w_i(t)W] / dt \propto w_i(t)W \quad (3)$$

$W$  sabit olduğu için,

$$dw_i(t) / dt = -S_i w_i(t), \text{ olur.} \quad (4)$$

Eğer  $S_i$  zamana bağlı olarak değişmiyorsa;

$$w_i(t) = w_i(0) \exp(-S_i t), \text{ yani} \quad (5)$$

$$\log[w_i(t)] = \log[w_i(0)] - S_i t / 2.3 \quad (6)$$

olarak bulunur.

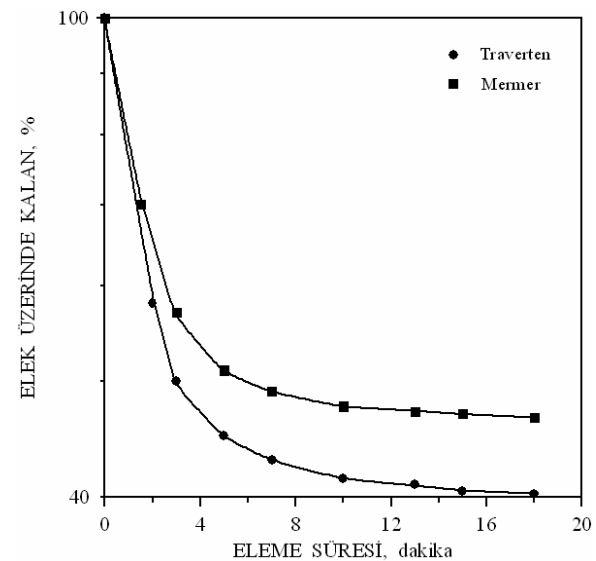
$i$  boyutunun elek üstü oranının öğütme süresine karşı değişimi çizilirse, elde edilen doğrunun eğimi  $-S_i/2.3$  olur (Austin ve diğ., 1984).

Öğütme testleri sonrası elek analizleri için optimum eleme süresinin tespiti amacıyla numunelerin eleme kinetikleri 600 µm'lik elek ile incelenmiş ve her iki numune için de 10 dakikalık eleme süresinin uygun olduğu belirlenmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, 3 dakikalık eleme süresine kadar her iki

numunenin de birinci dereceden bir eleme kinetiği gösterdiği söylenebilir ve bu durumda eleme hız sabiti ( $k$ ) traverten ve mermer için sırasıyla 0.24 dak<sup>-1</sup> ve 0.19 dak<sup>-1</sup>'dir. Sonrasında ise artan süre ile eleme hızlarının yavaşladığı ve 10 dakikanın üzerinde ise önemli bir değişim olmadığı yani eleme işleminin tamamlandığı görülmektedir.

## DENEYSEL BULGULAR

Farklı güç ve sürelerde mikrodalga ile ısı ön işlemin traverten ve mermer numunelerine etkileri, Şekil 1'de de verildiği gibi, öğütme testleri ve ultrasonik hız ölçümleri ile incelenmiştir. Mikrodalga gücü ve muamele süresi olmak üzere iki farklı parametrenin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, öncelikle mikrodalga gücündeki değişimlere bağlı olarak malzemelerin tepkisi araştırılmıştır. Bu grup deneyleerde, yapılan ön testlere dayanarak muamele süresi 10 dakika olarak sabit tutulmuştur. Mikrodalga gücünün değişimiyle traverten ve mermer numuneleri için elde edilen özgül kırılma hızları Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi, traverten ve mermer örnekleri için belirlenen özgül kırılma hızları birinci derece kinetik sergilemektedir. Ayrıca, mermerin travertene göre oldukça hızlı kırıldığı yine elde edilen kırılma hızı değerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Traverten ve mermerin eleme kinetikleri.

Figure 2. Sieving kinetics of travertine and marble.

**Çizelge 2.** Seramik bilyalı değirmenin özellikleri ve deney koşulları.*Table 2. Properties of ceramic ball mill and experimental conditions.*

Seramik	İç çapı, mm	128
	Uzunluğu, mm	212
Değirmen	Hacmi, cm <sup>3</sup>	2500
	Çalışma hızı, dev./dak.	77
Öğütücü ortam (Bilyalar)	Cinsi	Seramik
	Çapı, mm	20.24
	Şarj miktarı, g	1125
	Özgül ağırlığı	3.75
	Bilya şarj oranı, J'	0.20
Numune	Cinsi	Traverten Mermer
	Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Traverten 2.68 Mermer 2.73
	Malzeme şarj oranı, f <sup>**</sup>	0.04
	Malzeme-bilya doluluk oranı, U <sup>***</sup>	0.50

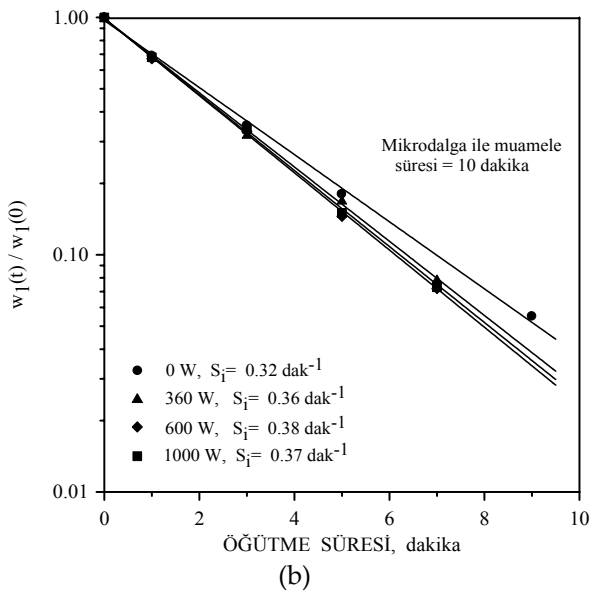
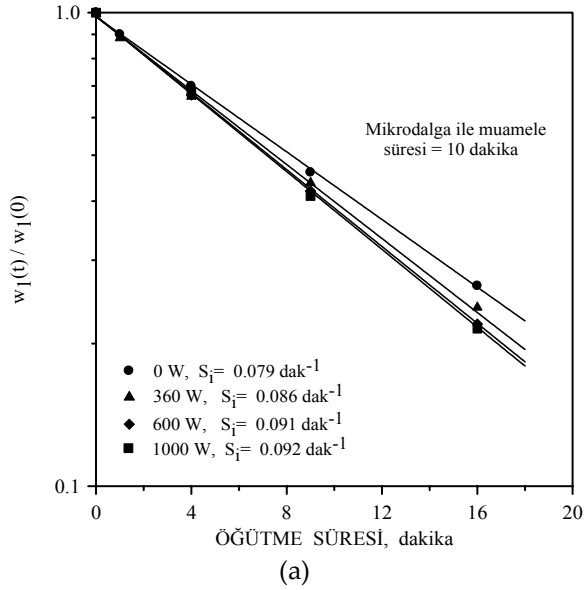
$$* J = \frac{(Bilya \text{ ağırlığı} / Bilya \text{ yoğunluğu})}{(Değirmen \text{ hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}, \quad ** f_c = \frac{(Numune \text{ ağırlığı} / Numune \text{ yoğunluğu})}{(Değirmen \text{ hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}, \quad *** U = \frac{f_c}{0.4 J}$$

Mikrodalga gücü ile traverten ve mermerin özgül kırılma hızlarının değişimi Şekil 4.a'da verilmiştir. Şekil 4.a'da görüldüğü gibi, artan mikrodalga gücü ile travertenin ve mermerin özgül kırılma hızlarında artış gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, 600 W'tan sonra özgül kırılma hızlarında traverten için önemli bir artış görülmezken, mermer için ise hafif bir azalma söz konusu olmuştur. Bu nedenle, mikrodalga ile muamele süresinin etkisinin araştırıldığı sonraki grup deneyler 600 W'lık mikrodalga gücünde yapılmıştır. Traverten ve mermer için 600 W mikrodalga gücünde elde edilen kırılma hızları, herhangi bir ön işlem görmeden elde edilen kırılma hızlarından sırasıyla 1.15 ve 1.19 kat daha fazladır. Şekil 4.b'de ise mikrodalga gücü ile karot numuneler üzerinde ölçülen ultrasonik hızların değişimi verilmiştir. Şekil 4.b'den görüldüğü gibi, mikrodalga gücünün artmasıyla traverten ve mermerin ultrasonik hızlarında azalma olmuştur. Bu sonuç, malzemelerin mukavemetinin azaldığını göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, artan mikrodalga gücü ile traverten ve mermer numunelerinin kırılmaya karşı mukavemetlerinin zayıfladığı, öğütme ve ultrasonik hız ölçüm testlerinden anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, 600 W'lık mikrodalga gücünden sonra, numunelerin öğütme ortamındaki kırılma hızlarında bir artış görülmezken (Şekil 4.a), karot numunelerinin ultrasonik hız değerleri ise azalmaya devam

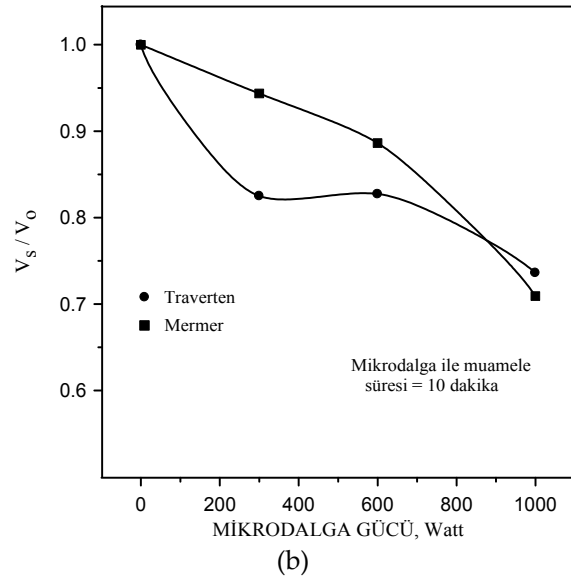
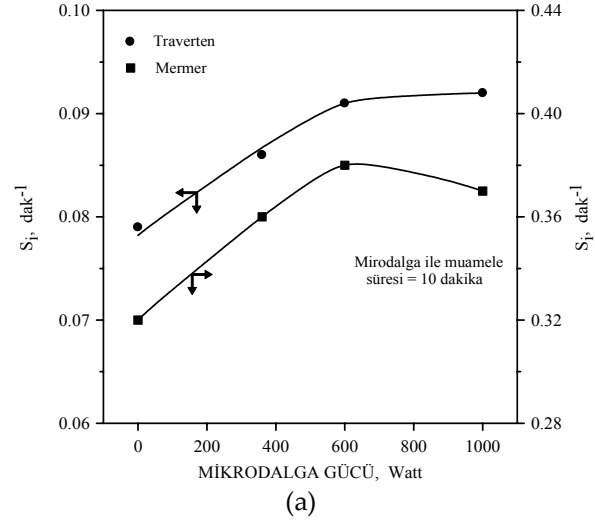
etmiştir (Şekil 4.b). Büyük boyutlu parçaların mikrodalga muamelesinden daha fazla etkilendiği bilinmektedir (Wang ve diğ., 2000; Kingman ve diğ., 2004). Bu özellik, karot numunelerinin artan mikrodalga gücü ile ultrasonik hız geçirgenliğinin azalması, yani mukavemetlerinin azalmaya devam etmesi şeklinde kendini göstermiştir. Ancak, 600 W'ın üzerindeki mikrodalga güçlerinde özgül kırılma hızlarının artmamasına bir neden olarak, - 850+600 µm tane boyutuna sahip malzemelerdeki çatlak teşekkülünün ve/veya mevcut çatlakların gelişmesinin bu mikrodalga güç değerinde nihai noktaya ulaşması gösterilebilir.

Traverten ve mermerin farklı süreler ile mikrodalgaya tabi tutulmasıyla elde edilen özgül kırılma hızları sırasıyla Şekil 5.a ve b'de gösterilmiştir. Şekil 6.a'da ise mikrodalga muamele süresiyle traverten ve mermerin özgül kırılma hızlarının değişimi verilmiştir. Şekil 6.a'da görüldüğü gibi, traverten için 10 dakika üzerindeki mikrodalga ile muamele sürelerinin kırılma hızları üzerine önemli bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte, 600 W'lık sabit mikrodalga gücünde artan işlem süresi ile mermerin özgül kırılma hızları önemli ölçüde artmıştır. Örneğin, 30 dakikalık muamele sonucu elde edilen özgül kırılma hızı değeri, mikrodalgaya tabi tutulmayan mermer numunesi için belirlenen kırılma hızının yaklaşık iki katıdır. Muamele süresinin uzaması ile kuru öğütmede daha ince tane boyutlarına ulaşıldığı

çeşitli mineraller için ifade edilmiş ve buna neden olarak sıcaklığın yükselmesi gösterilmiştir (Wang ve diğ., 2000). Şekil 6.b ise artan mikrodalga muamele süresi ile traverten ve mermerin ultrasonik hız ölçümlerine ait sonuçları göstermektedir. Mikrodalga ile muamele süresinin artması ile her iki numune için ölçülen ultrasonik hızlar azalmaktadır.



Şekil 3. Farklı mikrodalga güçlerinde muamele edilen (a) traverten ve (b) mermer için elde edilen özgül kırılma hızları. *Figure 3. Specific rate of breakages for (a) travertine and (b) marble treated with different microwave powers.*

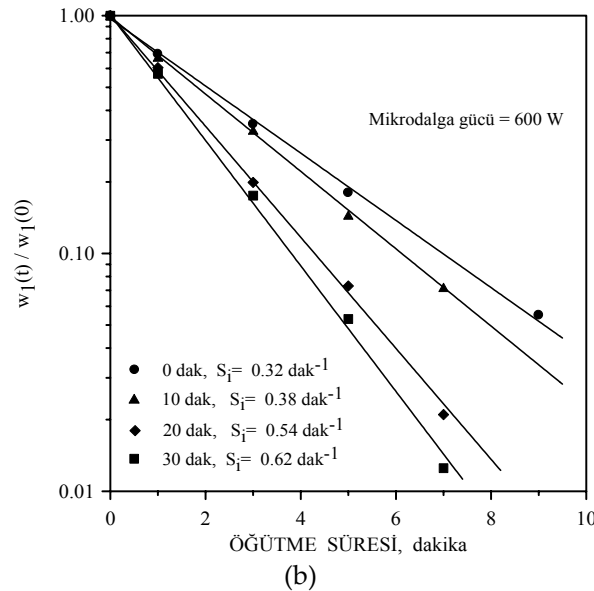
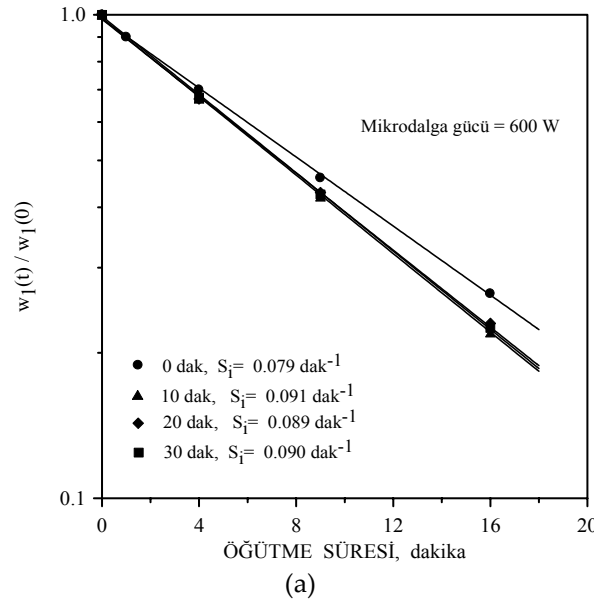


Şekil 4. Mikrodalga gücü ile traverten ve mermerin (a) özgül kırılma ve (b) ultrasonik hızlarının değişimi.

*Figure 4. Variation of the specific rate of breakages and ultrasonic velocity of (a) travertine and (b) marble with microwave power.*

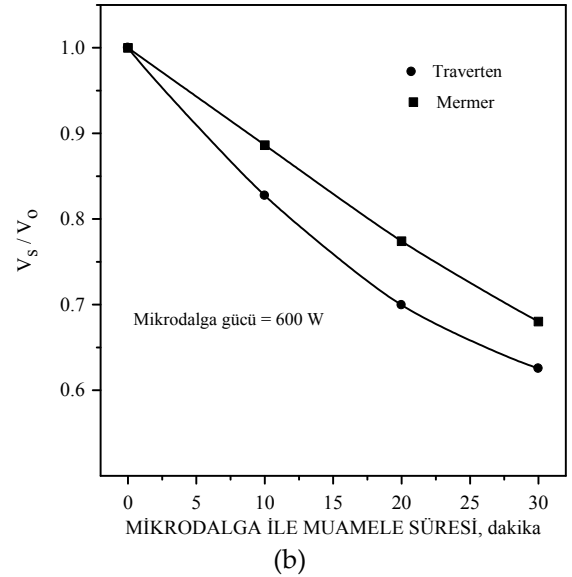
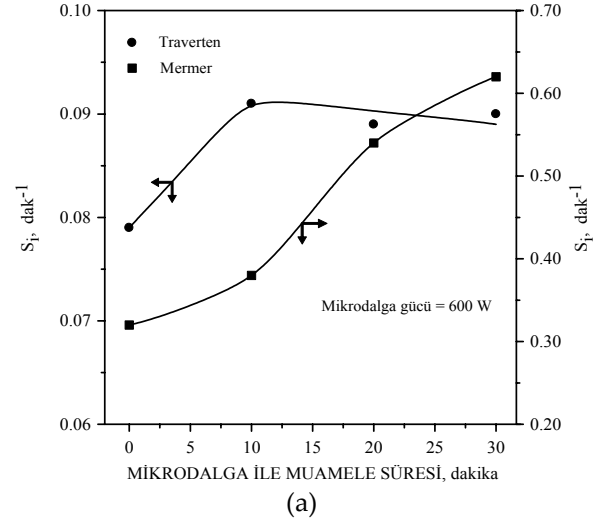
Traverten ve mermer için elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, mikrodalga ile ön işlem sonrası karot numuneler üzerinde yapılan ultrasonik hız ölçümleri ile değirmende yapılan öğütme testleriyle belirlenen kırılma hızları arasında genel olarak benzer bir eğilim görülmüştür. Yani, azalan ultrasonik hızlara paralel olarak kırılma hızlarının artması söz konusudur. Ancak, her iki numunenin de öğütme işleminde kırılma hızları 600 W mikrodalga gücü üzerinde çok fazla değişmezken, ultrasonik ölçümlerde 600 W'ın

üzerindeki mikrodalga gücünde hızların azalmaya devam ettiği yani mukavemetlerinin zayıfladığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, artan mikrodalga muamele süresi ile her iki numune için ultrasonik hızlar yine azalırken, bu eğilime uygun sonuç mermer için kırılma hızlarının da artması şeklinde kendini göstermiştir. Bununla birlikte, traverten için 10 dakikalık muamele süresinden sonra kırılma hızlarında bir artış tespit edilememiştir.



**Şekil 5.** Farklı mikrodalga muamele sürelerine tabi tutulan (a) traverten ve (b) mermer için elde edilen özgül kırılma hızları.

**Figure 5.** Specific rate of breakages for (a) travertine and (b) marble treated with different microwave treatment times.



**Şekil 6.** Mikrodalga muamele süresi ile traverten ve mermerin (a) özgül kırılma ve (b) ultrasonik hızlarının değişimi.

**Figure 6.** Variation of the specific rate of breakages and ultrasonic velocity of (a) travertine and (b) marble with microwave treatment times.

Bu çalışmada beklenen eğilim, ultrasonik hızların azalması yani malzemelerin mukavemetinin zayıflamasına uygun olarak, değirmendeki öğütme işleminde kırılma hızlarının artması şeklindedir. Genel olarak elde edilen sonuçlar bu yönde olmakla beraber, öğütme işlemine tabi tutulan malzeme tane/parça boyutunun, ultrasonik ölçümlerde kullanılan karot numunelerine oranla çok küçük boyutlu olması nedeniyle, bu eğilime nispeten uymayan ilişkilerin ortaya çıktığı düşünülebilir. Bu durum, artan mikrodalga gücü ve muamele

süresi ile her iki numune içinde ultrasonik hızların azalması şeklinde kendini bir ölçüde göstermiştir. Yani, mikrodalga ile ısı işlemin büyük boyutlu parçalar tarafından daha etkin bir şekilde hissedilmesi söz konusudur. Diğer taraftan, traverten ve mermerin nispeten benzer bir kimyasal bileşime sahip olmalarına rağmen, mikrodalga ile işleme farklı tepkiler vermesi, mineralojik karakterlerinin ve yapısal özelliklerinin farklı olmasına bağlanabilir. Buna benzer sonuçlar, yani tane boyutu, mineralojik özellikler ve tane boyutuna bağlı olarak yapısal değişimler nedeniyle malzemelerin mikrodalga işleminden farklı derecelerde etkilendiği literatürde de ifade edilmektedir (Wang ve diğ., 2000; Kingman ve diğ., 2004).

Cevher hazırlama endüstrisinde ufalama işlemleri büyük bir maliyet girdisi oluşturmaktadır. Mikrodalga ile muamele ise malzemelerin kırılabilirliğini dolayısıyla ufalanmasını kolaylaştırmakta ve boyut küçültme işlemleri sırasında harcanan enerji miktarını azaltmaktadır. Bununla birlikte uygulanan mikrodalga işlemi de ek bir maliyet oluşturmaktadır. Bu nedenle, süregelen çalışmalar mikrodalga ön işleminin maliyetinin azaltılması yönündedir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, mikrodalga kullanımıyla gerçekleştirilen ısı ön işlemin öğütme işlemine katkısı, hammadde olarak kullanılan traverten ve mermer örnekleri üzerinde yapılan ultrasonik ve kırılma hızı ölçümleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak;

- Mikrodalga ile ön muameleye tabi tutulan traverten ve mermer örneklerinin özgül kırılma hızlarında artış sağlanmıştır. Mikrodalga gücünün artmasıyla her iki numune için elde edilen kırılma hızlarının arttığı, ancak 600 W'ın üzerinde önemli bir etkinin olmadığı tespit edilmiştir. Diğer

taraftan, 600 W'lık sabit mikrodalga gücünde, 10 dakikanın üzerinde uygulanan mikrodalga muamele süreleriyle travertenin özgül kırılma hızlarında yine bir artış sağlanamamıştır. Ancak, aynı mikrodalga gücü altında, artan muamele süresi ile mermerin kırılma hızları önemli ölçüde yükselmiş olup, 30 dakikalık bir muamele sonucunda mikrodalgaya tabi tutulmadan elde edilen kırılma hızının yaklaşık iki katına ulaşmıştır. Yani, mikrodalga ile ön işlem travertenin kırılma hızlarında artış sağlamakla birlikte, mermer ile karşılaştırıldığında bu etki düşüktür. Mermer için, özellikle mikrodalga ile muamele süresinin uzatılması kırılma hızlarının artışı üzerinde önemli rol oynamıştır.

- Mikrodalga ile ısı ön işlemin, kayaçların mukavemeti üzerindeki etkileri ultrasonik hız ölçümleri ile tahmin edilmiştir. Artan mikrodalga gücü ve muamele süresi ile traverten ve mermerin ultrasonik hızları azalan bir eğilim sergilemiş, yani mukavemetleri azalmıştır.
- Traverten ve mermerin mikrodalgayla ön işleme tabi tutulan karot numuneleri üzerinde yapılan ultrasonik hız ölçümleri ile bilyalı değirmende gerçekleştirilen öğütme testleriyle belirlenen kırılma hızları arasında genel olarak benzer bir eğilim, yani artan mikrodalga gücü ve süresi ile ultrasonik hızların azalması ve kırılma hızlarının artması şeklinde bir ilişki tespit edilmiştir. Bu genel eğilime uymayan ilişkilerin varlığı ise, farklı parça boyutları üzerinde uygulanabilirliği mümkün olan farklı test tekniklerinin kullanılması, yani malzemelerin parça boyutuna bağlı olarak mikrodalga muamelesini farklı şekilde algılamalarıyla açıklanabilir.

## KAYNAKLAR

Austin, L.G., Luckie, P.T., 1972, Methods for determination of breakage distribution parameters, *Powder Technol.*, 5, 215-222.



- Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T., 1984, Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, SME/AIME, New York.
- Güler, H., Kurtuluş, F.D., 2003, Mikrodalga enerjisiyle kobalt bor fosfat bileşiği ve boraks pentahidratın elde edilmesi, *BAÜ Fen Bil. Enst. Derg.*, **5**, 1.
- Güngör, A., 1998, Grindability of Microwave-heated Ores, M.Sc. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU, Ankara.
- Kingman, S.W., Vorster, W., Rowson, N.A., 1999, The influence of mineralogy on microwave assisted grinding, *Miner. Eng.*, **13**, 313-327.
- Kingman, S.W., Jackson, K., Cumbane, A., Bradshaw, S.M., Rowson, N.A., Greenwood, R., 2004, Recent developments in microwave-assisted comminution, *Int. J. Miner. Process.*, **74**, 71-91.
- Klimpel, R.R., 1997. Introduction to the Principles of Size reduction of Particles by Mechanical Means, Instructional Module Series, Rajagopalan, R. (Series Ed.), Particle Science Technology, Florida, USA.
- Osepchuk, J.M., 1984, A history of microwave applications; *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **1**, **MTT-32**, 9, 1200-1224.
- Rao, K.J., Vaidyanathan, B., Ganguli, M., Ramakrishnan, P.A., 1999, Synthesis of inorganic solids using microwaves, *Chem. Mater.*, **11**, 882-895.
- Wang, Y., Forssberg, E., Svensson, M., 2000, Microwave assisted comminution and liberation of minerals, Proceedings of the 8th Int. Min. Process. Symp., Balkema, Rotterdam, 3-9.
- Whittles, D.N., Kingman, S.W., Reddish, D.J., 2003, Application of numerical modeling for prediction of the influence of power density on microwave assisted breakage; *Int. J. Miner. Process.*, **68**, 71-91.

