



ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article)

**ULTRASONİK SES DALGALARININ KÖMÜR TANE BOYUTU ÜZERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Uğur DEMİR

Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ugur.demir@dpu.edu.tr, ORCID:
0000.0001.8828.4711

Geliş Tarihi: 28.02.2020

Kabul Tarihi: 16.07.2020

ÖZ

İnsan kulağı tarafından duyulamayan, 20 kHz frekanstan daha yüksek olan sese, ultrasonik ses dalgaları denilmektedir. Ultrasonik ses dalgaları cevher ve kömür hazırlamanın birçok alanından özellikle son 10-15 yıl içerisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ultrasonik sesin kavitasyon olarak tanımlanan mekanik etkisi, başta fiziksel olmak üzere kimyasal olarak ta mineral ve kömür üzerinde etkilere neden olmaktadır. Bu çalışmada önce ultrasonik ses dalgaları ve özellikleri hakkında bilgi verilecek, ardından kavitasyon etkinin kömür (yüksek oranda pirik kükürt içeren) tane boyutu üzerinde meydana getirdiği değişimler belirtilecektir. Deneysel çalışmalarda 20kHz frekans ile çalışmakta olan 200W güce sahip prob tipi ultrasonik ses üretici kullanılmıştır. Ultrasonik ses dalgalarının farklı güç (%10-30) seviyesi ve süresinin (5-30 dakika) kömür numunesi boyutunda meydana getirdiği etki, referans tane boyutu olan 0,038 mm boyuttaki tane miktarı dikkate alınarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı ve beraber değerlendirildiğinde de ultrasonik ses dalgalarının uygulama süresi ve güçteki artış tane boyutunda belirgin değişmelerin meydana gelmesine neden olduğu tespit edilmiştir. -4+2 mm tane boyutu içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı ultrasonik işlemten sonra %1,86'dan %6,97'ye yükselmiştir. Yapılan mikroskobik incelemeler de ultrasonik ses dalgalarının kömür yüzeyinde yeni kırık ve çatlakların oluştuğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: *Ultrasonik ses dalgaları, kömür, tane boyut değişimi*

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ULTRASONIC ENERGY ON COAL PARTICLE
SIZE**

ABSTRACT

Sound that cannot be heard by the human ear, which is higher than the 20 kHz frequency, is called ultrasonic waves. Ultrasonic waves have been widely used in many areas of ore and coal preparation, especially in the last 10-15 years. The mechanical effect of ultrasonic waves, defined as cavitation, causes various effects on mineral and coal, both physical and chemical. In this study, firstly information will be given about ultrasonic waves and properties, and then the changes caused by cavitation effect on coal (included high pyritic sulfur) particle size will be specified. In experimental studies, a probe type ultrasonic wave generator with a power of 200W operating at a frequency of 20

kHz was used. The effect of ultrasonic waves at different power level (10-30%) and application time (5-30 minutes) on coal sample size was determined by considering the particle size of the reference particle size of 0.038 mm. When the obtained results were evaluated separately and together, it was found that the increase in power and application time of ultrasonic waves caused significant changes in particle size. The amount of material in the -4 + 2 mm size group increased from 1.86% before applying ultrasonic treatment to the grain size of -0.038 mm to 6.97%. Microscopic examinations also show that ultrasonic waves have formed new fractures and cracks on the coal surface.

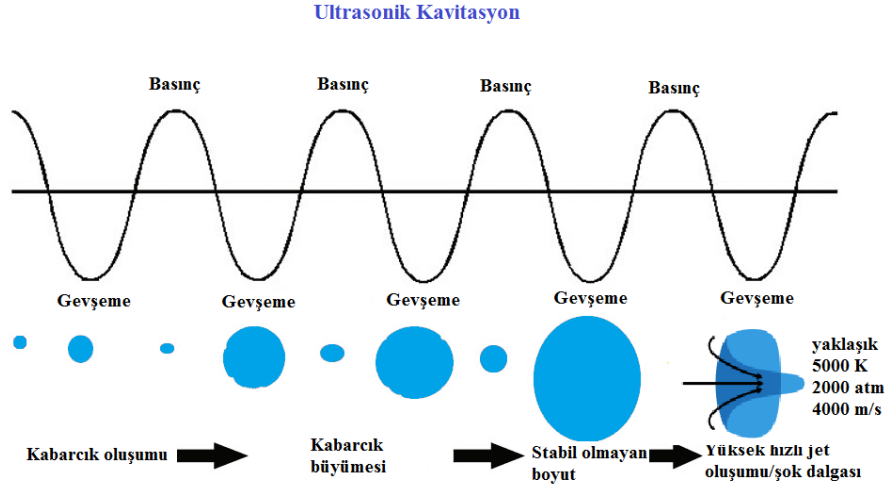
Keywords: *Ultrasonic wave, coal, particle size reduction*

1. GİRİŞ

Ultrasonik ses dalgaları, insan kulağının algılayabileceği frekanstan daha yüksek frekanstaki (> 20 kHz) ses olarak tanımlanmaktadır. Ultrasonik ses de normal ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Bu nedenle ultrasonik ses bir mekanik enerjidir. Işık, radyo dalgaları ve x-ışınları ile birçok ortak özelliğe sahiptir. Elektriksel olarak oluşturulabilmesi, bir noktaya odaklanabilmesinin mümkün olması ortak özelliklerden bazılarıdır. En büyük farklılık ise boşlukta ilerleyememesidir, ilerleyebilmesi için hava, sıvı, katı, doku gibi bir ortam gereklidir [1-4].

Ultrasonik ses dalgaları bir sıvı ortam içerisinde kavitasyon olarak bilinen bir mekanik etki meydana getirirler. Ses titreşimleri herhangi ortam içerisinde basınç ve gevşeme evrelerinden oluşan bir dalga olarak ilerlemektedir. Ultrasonik ses dalga kaynağını, sıvı içerisine batırılmış oldukça hızlı ileri-geri hareketi olan bir pistonu benzetmek mümkündür. Bu benzerlikten basınç dalgalarının, sıvı içerisindeki molekül etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde anlatılabilir [2]. Belirtilen bu hareket 10 mikro saniyeden daha kısa bir sürede meydana gelmektedir [5].

Dalganın gevşeme kısmını üreten pistonun çekme hareketidir. Piston saniyede 20000 vuruşluk bir hızla çalıştığı zaman ortamda ultrasonik ses oluşmaktadır. Eğer gevşeme evresi yeterince güçlüyse sıvıyı bağlayan moleküller arası kuvvetleri yenecek büyüklükte negatif bir basınç oluşur. Bu durumda moleküller, ortam boyunca küçük mikro kabarcıklar oluşturmak üzere birbirlerinden ayrılır. Ultrasonik kavitasyon için gevşeme dönemini izleyen bir sıkıştırma döngüsü mevcuttur. Bu mikro kabarcıkların büyük bir miktarda enerji açığa çıkararak ani olarak patlamasına yol açar (Şekil 1). 25 °C'lik sıcaklıktaki bir suda güçlü ultrasonik ses dalgaları tarafından oluşturulan kavitasyon etkisi ile kabarcıkların çökmesi yoluyla 5000 °K sıcaklık ve 1000 atmosfer basıncına yakın basınçların oluşturulduğu, ısınma hızının 109 °K/s'den daha hızlı olduğu tahmin edilmektedir [1-3,5-13].



Ultrasonik ses dalgalarının cevher ve kömür hazırlama/zenginleştirme işlemlerinde kullanımı son 10-15 yılda belirgin bir şekilde artmış, birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [16-18]. Kömür ve cevher hazırlamada ultrasonik ses dalgaları yüzey temizleme, kırık ve çatlak oluşturma, taze yüzey meydana getirme, boyut küçültme gibi fiziksel etkiler meydana getirirken, suyun belli oranlarda moleküllerine ayrılması, birbirleri içerisinde çözünmeyen sıvıların emilasyonu ve dispersiyonu gibi kimyasal etkilere de neden olmaktadır [16-20].

Bilindiği gibi boyut küçültme işlemi kömür ve cevher hazırlamanın önemli bir bölümünü oluşturan ve üzerinde çalışmaların devam ettiği bir konudur. Boyut küçültme işlemi enerji tüketiminin en yoğun olduğu uygulamadır, enerji tüketiminin düşürülebilmesini sağlayan birçok ön işlem laboratuvar ve endüstriyel ölçüde uygulanmaya devam edilmektedir. Bu ön işlemler; ısı işlem, mikrodalga ile ısı işlem, ultrasonik ses dalgaları ve termal şok olarak sıralanabilmektedir [4].

Ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisinin meydana getirdiği kırık ve tane boyutundaki küçülmenin dört aşamada meydana geldiği, bunlar sırasıyla kömür yüzeyindeki aşınma, kömür yüzeyinde çatlak/kırık oluşumu, kırık ve çatlakların genişlemesi ve derinleşmesi, kömür taneciğinin kırılması olarak belirtilmektedir [19-21]. Ultrasonik ses dalgalarının üretildiği frekans aralığı tanelerin üzerine uygulanan mekanik ve kimyasal etkinin şiddetini etkilemektedir. Düşük frekanslarda (25 kHz) tane boyutunun küçülmesine neden olan kuvvetli mekanik etki ön plana çıkarken, yüksek frekanslarda (430 kHz) mekanik etki azalmakta, kimyasal etki önemli oranda artmaktadır[22].

Ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültme amaçlı kullanım 1950'li yıllarda başlamış, ilk olarak Gartner (1953) [23] ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültmeye olan etkisini araştırmış fakat etkinin düşük seviyelerde kaldığını belirtmiştir. Daha sonra Fleischhauer ve Kröger (1969) [24] süspansiyon içindeki kömür tanelerinin ultrasonik ses dalgası ile boyutunun küçültülmesini incelemiştir. Graff (1979) [25] ise çoklu kademe stamp değirmene ultrasonik ses üreteçleri ilave ederek öğütmeye etkileri incelemiştir. Bunlar gibi çok sayıda çalışma ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültmeye olan etkilerini incelemektedir.

Şahinoğlu ve Uslu (2013) [20] Artvin-Muzret kömürleri ile yapmış oldukları çalışmada ultrasonik ses dalgalarının kömür tane boyutunda meydana getirdiği değişimi belirlemişler, ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi kırma, çatlatma ve yarık oluşturma gibi etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Aynı yazarların başka bir çalışmasında (2015) [21] artan ultrasonik ses gücü ile tane boyutundaki azalma arasında bir ilişki olduğunu, 53 mikrometrelik referans tane boyutunu dikkate alarak göstermişlerdir. Ambedkar ve diğ. (2011b) [22] Hindistan kömürleri üzerinde yaptıkları çalışmada, ultrasonik ses dalgalarının kömürden kükürt uzaklaştırmada ultrasonik ses dalgalarının liç işlemi sırasında kullanılması durumunda tane boyutunda meydana gelen değişimi tespit etmişlerdir. Düşük frekanslarda tane boyutunda daha yüksek oranda değişim meydana gelirken, yüksek frekanslarda kimyasalın kömür tanecikleri içerisine daha etkili bir şekilde nüfuz ettiğini belirlemişlerdir. Yüksek ve düşük frekanslı ses dalgalarını eş zamanlı kullanarak hem tane boyutunda küçülmenin hem de kimyasal difüzyonunun yüksek oranda gerçekleşmesini sağlamışlardır. Kang ve diğ. (2008) [26] Çin Xiazhuang kömürlerinden kükürt uzaklaştırma çalışmalarında ultrasonik ses dalgalarını kullanmış, ultrasonik ses dalgalarının tane boyutunda meydana getirdiği değişim tespit edilmiştir. Farklı boyut gruplarındaki kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgaları, iri boyutlarda daha etkili olurken, ince tane boyutlarında meydana gelen kırılma daha sınırlı seviyelerde kaldığı ifade edilmektedir. Raman ve diğ. (2008 ve 2011) [27-28] yapmış oldukları her iki çalışmada ultrasonik ses dalgalarının Alüminyum oksit tanelerinin boyutlarında meydana getirdiği değişim incelenmiş, ultrasonik ses dalgası gücü, uygulama süresi ve tane boyutunun etkileri araştırılmıştır. Artan güç ve sürenin tane boyutunda meydana getirdiği değişim hem deneysel hem de teorik olarak ortaya konulmuştur. Garreton ve diğ (2000) [29] yüksek basınçlı merdaneli değirmeni modifiye ederek ultrasonik ses dalgalarından yararlanmış, merdanelerin birine ultrasonik ses üretici ekleyerek aktive etmiş ve boyut küçültmeye olan etkilerini incelemişlerdir. Ultrasonik ses dalgalarının boyut küçültme işleminde daha düşük enerji tüketimine neden olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada, ultrasonik ses dalgalarının yüksek oranda piritik kükürt içeren kömürlerin tane boyutunda meydana getirdiği değişim incelenmiş, değişimin belirmesine yönelik olarak önce belli bir tane boyutunun altındaki kömür numunelerine, daha sonra farklı boyut gruplarına ayrılmış kömür numunelerine, farklı güç (%10-30) ve sürelerde (5-30 dak) uygulanan ultrasonik ses dalgalarının etkileri incelenmiştir. Alt bitümlü kömür grubunda olan ve kırılğan bir yapı sergileyen Gediz yöresi kömürleri ayrıca oldukça ince boyutta serbestleşen piritik kükürt (%3,55) içermektedir, bu özellikteki kömürler üzerinde ultrasonik ses dalgalarının incelendiği çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Boyutta meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak 38 mikrometre tane boyutu referans boyut olarak belirlenmiştir. Ultrasonik ses öncesi ve sonrasında elde edilen ürünlerin -38 mikrometre boyutlu malzeme miktarları belirlenmiştir. Ayrıca bu işlem sonunda elde edilen kömür numunelerinin mikroskopik incelemeler sonucu yüzeylerinde meydana gelen değişim ile birlikte kül ve kükürt oranları karşılaştırılarak kısmi zenginleştirme olup olmadığı belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüksek oranda kükürt içeren kömür numuneleri, Kütahya-Gediz-Gökler kasabasında faaliyet gösteren özel bir şirkete ait kömür ocağından alınmıştır. Temsili olarak alınan kömür numuneleri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere boyut küçültme işlemine tabi tutulmuş (-4 mm), uygun yöntemler ile azaltılmış ve özelliklerinin değişmesinin engellenmesi

amacıyla hava geçirmez kilitli poşetlerde saklanmıştır. Gediz yöresi kömürleri üzerinde yapılan analizlerden %3,3 toplam nem, %25,99 kül, %32,81 uçucu madde ve %37,90 sabit karbon içerdiği belirlenmiştir. Alt ısı değeri 5607 kcal/kg olan kömür numunesi %7,06 toplam kükürt (%3,55 piritik kükürt) içermektedir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan temsili kömür numuneleri laboratuvara getirildikten sonra çeneli kırıcıda iki kademe olarak kırılmış ve farklı boyut gruplarına ayrılmıştır. Tane boyutuna bağlı olarak kül ve kükürtte meydana gelen değişim Çizelge 1’de verilmiştir. Kül analizi Nüve marka MF120 kül fırınında, kükürt analiz ise Leco marka SC144 DR model kükürt-karbon cihazında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Çizelgeden de görüldüğü gibi tane boyutuna bağlı olarak kül oranında belirgin bir artış meydana gelirken, kükürt oranlarından çok belirgin bir değişim görülmemektedir. Bu durum kömür numunesi bünyesinde bulunan killi yapıların boyut küçültme işlemi sırasında dağılarak daha ince boyutta birikmesi ve yapılan mikroskobik incelemeler sonucu piritik kükürdün oldukça ince boyutta (5-20 μm) olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan minerolojik incelemelerden kömür numunesi içerisinde piritle beraber kuvars ve kalsitin varlığı tespit edilmiş, ikincil olarak kaolin, illit, dolomit, jibs ve markasit varlığı belirlenmiştir.

Çizelge 1. Ocaktan alınan temsili kömür numunesinin tane boyut dağılımı ve boyuta bağlı olarak kül, kükürt ve ısı değeri analizleri.

Tane Boyutu (mm)	Miktar (%)	Kül (%)	Toplam Kükürt (%)	Alt Isıl Değer (Kcal/kg)
+63	11.51	19.51	6.90	6237
-63+31.5	18.31	25.21	7.42	5683
-31.5+16	22.95	25.20	6.93	5685
-16+12.5	4.37	24.48	7.08	5754
-12.5+4	24.04	23.97	7.35	5803
-4+2	8.86	26.80	6.62	5529
-2+1	4.64	35.50	6.68	4684
-1	5.32	46.85	6.42	3582
Toplam	100	25.99	7.06	5607

Tüvenan kömür numunesi son olarak 4 mm altına kırılmış ve elde edilen ürünlerin boyut dağılımına bağlı olarak -0,038 mm boyutlu malzeme oranı sulu eleme yapılarak belirlenmiş ve çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’den de görüldüğü gibi iri boyutlu malzeme içerisinde eleme işleminden kaynaklanan ve kömürün özellikleri nedeniyle kalan -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı bulunmakta fakat oldukça düşük seviyelerdedir (%1,86). Tane boyutu küçüldükçe içerdikleri -0,038 mm malzeme miktarında belirgin artışlar meydana gelmekte fakat yine düşük seviyelerde kalmıştır. En küçük tane boyutu olan -0,25 mm içerisinde önemli oranda -0,038 mm malzeme olduğu görülmektedir (%20,08).

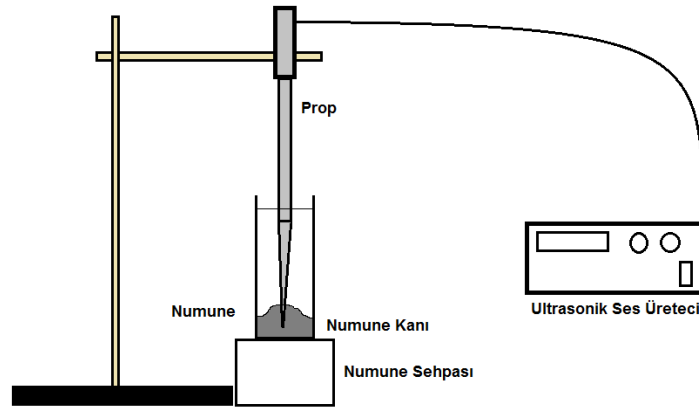
Çizelge 2. Farklı boyut gruplarındaki kömür numunelerinin içerdiği -0,038 mm boyutlu malzeme oranları.

Tane Boyutu (mm)	-0,038 mm tane oranı (%)
-4+2	1,86
-2+1	4,38
-1+0,5	5,09

-0,5+0,25	12,12
-0,25	20,08
Toplam	43,53

2.2. Yöntem

5 gr temsili kömür numunesi 10 ml su ile karıştırıldıktan sonra farklı ultrasonik ses dalgası güç (%10-30) ve sürelerinde (5-30 dak) işleme tabi tutulmuş (Şekil 2), işlem sonrasında 38 mikrometrelik elekte yaş yöntem kullanılarak elenmiştir. Ultrasonik öncesi ve sonrasındaki tane boyutunda meydana gelen değişim incelenmiştir. Tane boyutunda meydana gelen değişimin yanı sıra kömürün kül ve kükürt içeriklerinde meydana gelen değişimde takip edilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.

Deneysel çalışmalarda etkisi araştırılan ultrasonik ses dalgaları Bandelin marka HD2200 model cihaz ile elde edilmiştir. Cihaz 20kHz frekans ile çalışmakta ve 200W güce sahiptir. Cihazın gücü %-100 arasında ayarlanabilmektedir. Cihaz üzerine farklı çaplarda titanyum problar takılabilmekte, bu çalışma sırasında 3 mm çaplı titanyum prob kullanılmıştır.

Ultrasonik ses dalgalarının iki temel etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bunlardan birincisi ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi ile kömür tanecikleri üzerinde yeni kırık ve çatlaklar oluşturması, buna bağlı olarak da tane boyutunda meydana gelen değişim. Diğer ise kül yapıcı mineral maddeler ve piritik kükürtte meydana gelen değişimlerdir. Yapılan mikroskobik incelemelerde Gediz yöresi kömürleri, oldukça ince boyutta dağılmış kil mineralleri ve piritik kükürt tanecikleri içermektedir. Ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi ince boyuttaki inorganik yapıların kömür maktirksi içerisinde buldukları yerden çıkmasına neden olabilmektedir. Ayrıca mikroskobik incelemeler ile iri boyuttaki kömürlerin yüzeylerinde meydana gelen değişimlerde (kırık ve çatlak) tespit edilmeye çalışılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

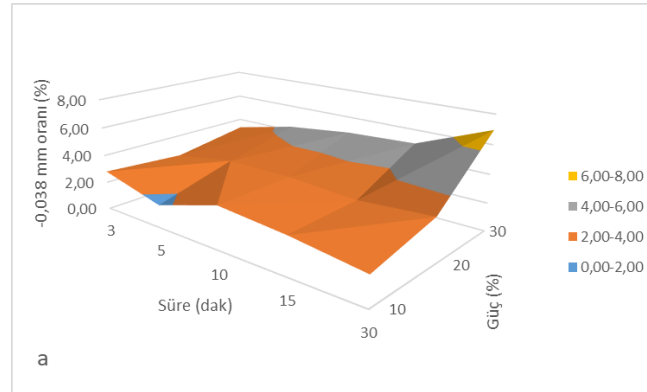
İlk olarak her bir tane boyut aralığındaki malzemeler 0,038 mm elekten yaş olarak elenerek, her boyuttaki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme oranı tespit edilmiştir (Çizelge 3). Daha sonra

yöntem kısmında da belirtildiği gibi kömür numuneleri farklı güç ve sürelerde ultrasonik ses dalgalarına maruz bırakılmış ve tane boyutunda meydana gelen değişim belirlenmiştir.

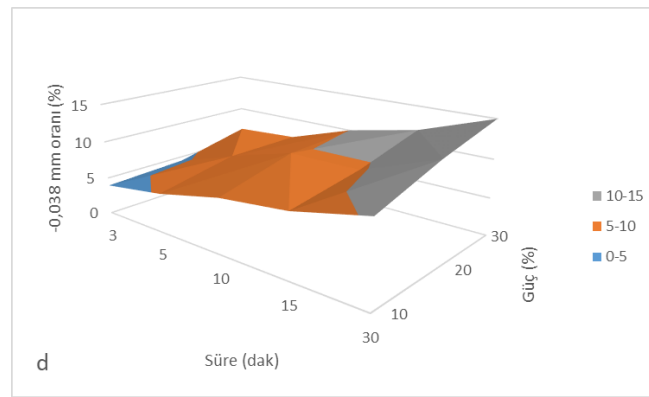
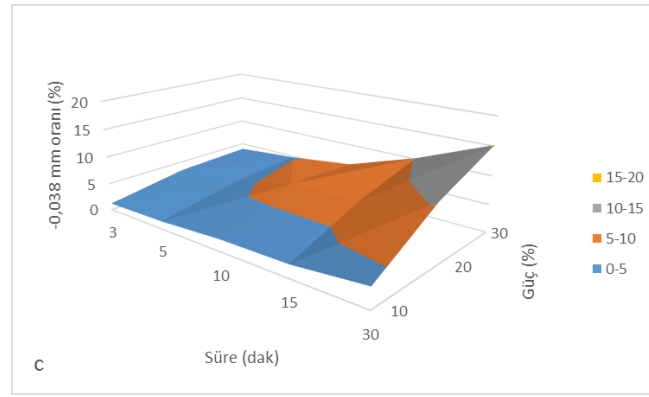
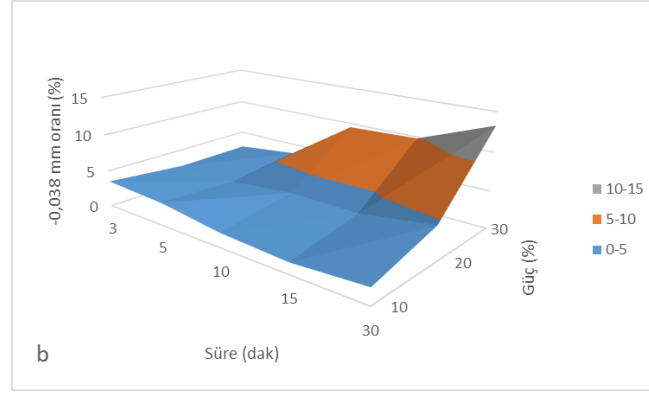
Çizelge 3. Farklı tane boyutundaki kömür numunelerinin kül, kükürt ve -0,038 mm boyutlu malzeme oranları.

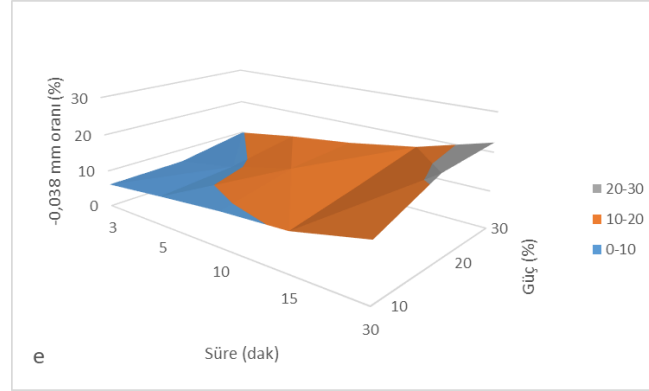
Tane Boyutu (mm)	Kül oranı (%)	Kükürt oranı (%)	-0,038 mm tane oranı (%)
-4+2	26,80	6,62	1,86
-2+1	35,50	6,68	4,38
-1+0,5	46,85	6,42	5,09
-0,5+0,25	51,20	6,72	12,12
-0,25	61,40	6,88	20,08
Besleme	25,99	7,06	43,53

Farklı tane boyutlarındaki (-4+2, -2+1, -1+0.5, -0.5+0.25, -0.25 mm) kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgalarının güç ve süreye bağlı olarak -0,038 mm tane boyutu miktarında meydana gelen değişimler aşağıdaki Şekil 3’de verilmiştir.



Demir, U., *Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 39-54, Aralık 2020.*
Demir, U., *Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 39-54, December 2020.*





Şekil 3. Farklı tane boyutlarındaki numunelere uygulanan ultrasonik güç ve sürenin etkisi (a: -4+2 mm, b: -2+1 mm, c: -1+0,5 mm, d: -0,5+0,25 mm, e: -0,25 mm).

Ultrasonik ses dalgaları, sıvı ortamdaki ilerleme hızı oldukça yüksek olduğu için, oluşum ve ilerleme aşamasında meydana gelen mekanik etkiler (kavitasyon) süspansiyon içerisindeki katı taneler üzerinde önemli deformasyonlara neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar süspansiyon içerisindeki katı tanelerin sertlik ve kırılmalık özelliklerine göre daha fazla veya daha düşük oranlarda deformasyona uğradığını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan kömür numunesi yapı itibarıyla sıkı ve kırılmalık bir özellik taşımaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numuneleri üzerine uygulanan mekanik (ufalama) etkiler kömür taneciklerinin köşeli kırılmasına ve ince boyutlarda ürün oluşturulmasına neden olmaktadır. Kömür numunesi yapılan mikroskobik incelemelerde ince dağılmış halde pirit tanecikleri içermekte, bu pirit tanecikleri uygulanan mekanik kuvvet etkisi ile kömür bünyesi içerisinde daha ince boyutlara ayrıldığı gözlemlenmiştir. Tane boyutu küçüldükçe mekanik etkiler ile serbest hale gelen pirit taneciklerinin önemli oranda artmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

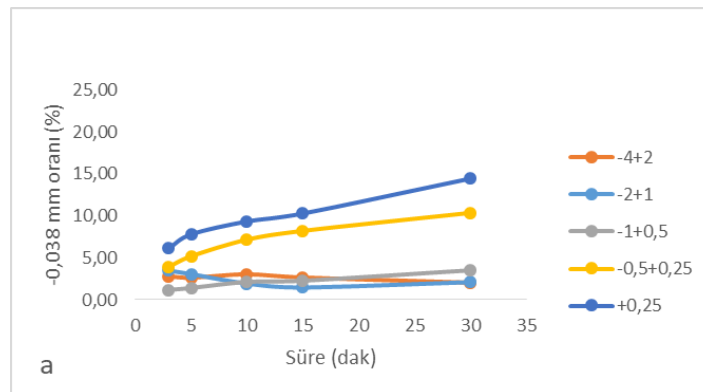
Şekil 3'deki grafikler incelendiğinde ultrasonik ses dalgalarının güç ve uygulama süresinin -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarındaki değişim net bir şekilde görülmektedir. İri tane boyutundaki numunede düşük güç seviyelerinde artan süreye bağlı olarak çok önemli bir değişim meydana gelmez iken güç arttıkça süreye bağlı olarak -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Daha önceden yapılmış çalışmalar incelendiğinde iri tane boyutlarında ultrasonik ses dalgalarının daha yüksek oranda hem yüzeyde hem de tane boyutunda belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olduğu ifade edilmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının malzeme üzerine uygulandığı güç ve süre boyutunda ve yüzeyde meydana gelecek deformasyonları ciddi şekilde etkilemektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçları destekler niteliktedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin iri tane boyutlarına uygulanan düşük ultrasonik güç seviyelerinde önemli değişimlerin meydana gelmediğini görülmektedir. Güç seviyesi ve süre artışı kömür numuneleri içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında sürekli olarak bir artışın meydana gelmesine neden olmaktadır. -4+2 mm boyut grubunda ultrasonik işlem görmemiş numune içerisindeki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı sırasıyla %1,86 iken 30 dakikalık ultrasonik işlem sonrasında -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı sırasıyla %10 güç seviyesinde %2,07, %20 güçte %3,15 ve %30 güçte %6,97'ye çıktığı belirlenmiştir. -2+1 mm boyut grubunda bu oranlar %4,57 ve %13,31 olmakta iken, -1+0,5 mm boyut grubunda ise %10,54 ve %15,19 olmuştur.

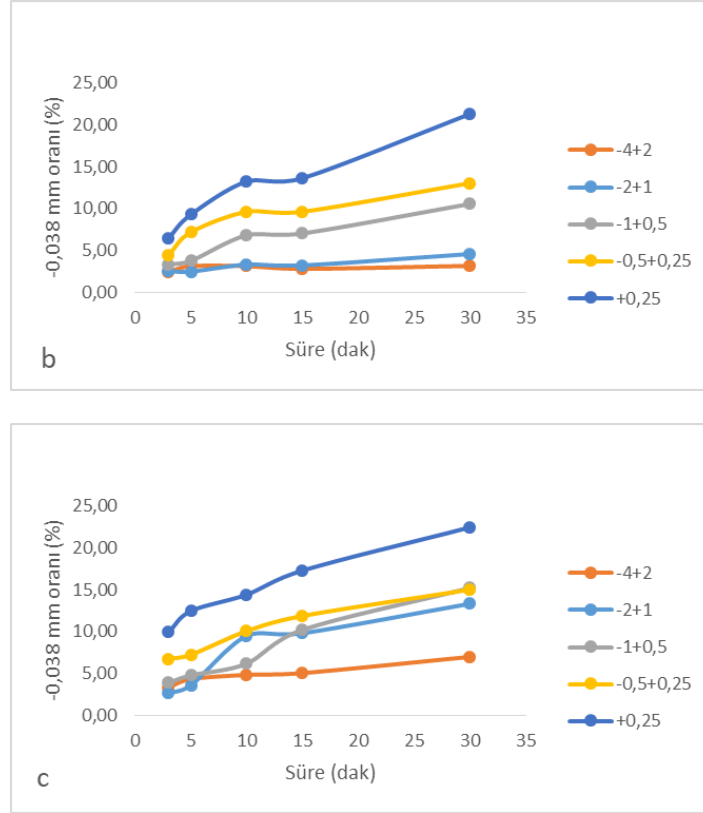
Tane boyutu daha düşük seviyelere indikçe, özellikle -2+1 ve -1+0,5 mm boyutlarda düşük güç seviyelerinde -0,038 mm boyutlu malzeme miktarı hemen hemen sabit kalmakta, güç ve süre artışının beraber olduğu durumlarda bu miktar belirgin şekilde artmaktadır.

-0,5+0,25 ve -0,25 mm tane boyutlarındaki kömür numunelerine uygulanan ultrasonik ses dalgaları, düşük güç seviyelerinden başlayarak -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında belirgin artışların olduğunu göstermektedir. Bu durum ince boyutlarda kısmi olarak serbestleşebilen pirit ve killi mineral içeren parçalardan ultrasonik ses dalgaları ile bu piritli ve killi parçaların ayrışarak daha yüksek oranda -0,038 mm boyutlu tane miktarı oluşturmaktadır.

Artan ultrasonik ses dalgası gücü ve süresi, pülp sıcaklığının da kademeli ve sürekli olarak artmasına neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında yapılan sıcaklık ölçümleri incelendiğinde ilk 20 dakikalık süre içerisinde sıcaklık sürekli olarak artmakta (%30 ultrasonik güç ve 30 dakikalık işlem süresinde sıcaklık 70,3 °C'ye kadar yükselmekte), daha sonra kademeli olarak yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Sıvı ortamın sıcaklığının artması, ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu kavitasyon kabarcıklarının (mekanik etkinin) kömür tane boyutunda meydana getirdiği değişim artmakta ve bu durum çeşitli araştırmacılar [21,28,30] tarafından şöyle açıklanmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının sıvı ortam içerisindeki kavitasyon etkisi, içerisinde olduğu sıvının sıcaklığı, yüzey gerilimi, viskozitesi ve buhar basıncı ile yakından ilişkilidir. Sıvı ortam sıcaklığı, ultrasonik ses dalgalarının neden olduğu kavitasyon eşiğinin azalmasına neden olmaktadır. Kavitasyon eşiği, kavitasyon kabarcıklarının oluşması için gerekli olan şart olarak ifade edilmektedir. Sıvı ortamın sıcaklığı arttıkça, buhar basıncı artmakta, bununla beraber sıvının yüzey geriliminde de bir azalma meydana gelmektedir. Hem buhar basıncının artması, hem de yüzey geriliminin düşmesi, kavitasyon eşiğinin azalmasına yani kavitasyon kabarcıklarının daha kolay ve şiddetli oluşmasına neden olmaktadır. Sıvı ortamın sıcaklığının artmasına paralel olarak viskozitede de belirgin oranda azalma meydana gelmektedir. Kavitasyon kabarcıklarının daha kolay oluşması sıvı ortam içerisinde bulunan katı taneciklerin ufalanma/boyut küçülmesine yani tanecikler üzerinde meydana gelen deformasyonun artmasına neden olmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının sıvı ortam içerisinde uzun süre uygulanması kademeli ve sürekli olarak sıcaklığın artmasına da neden olduğu belirlenmiştir.

Herbir ultrasonik güç seviyelerinde (%10, 20 ve 30), tane boyutunda süreye bağlı olarak, uygulama süresi de dikkate alınarak -0,038 mm tane boyutlu malzeme miktarındaki değişim Şekil 4'de verilmiştir. Bu grafiklerden ikili değişimler (süre-tane boyutu) çok daha net görülmektedir.

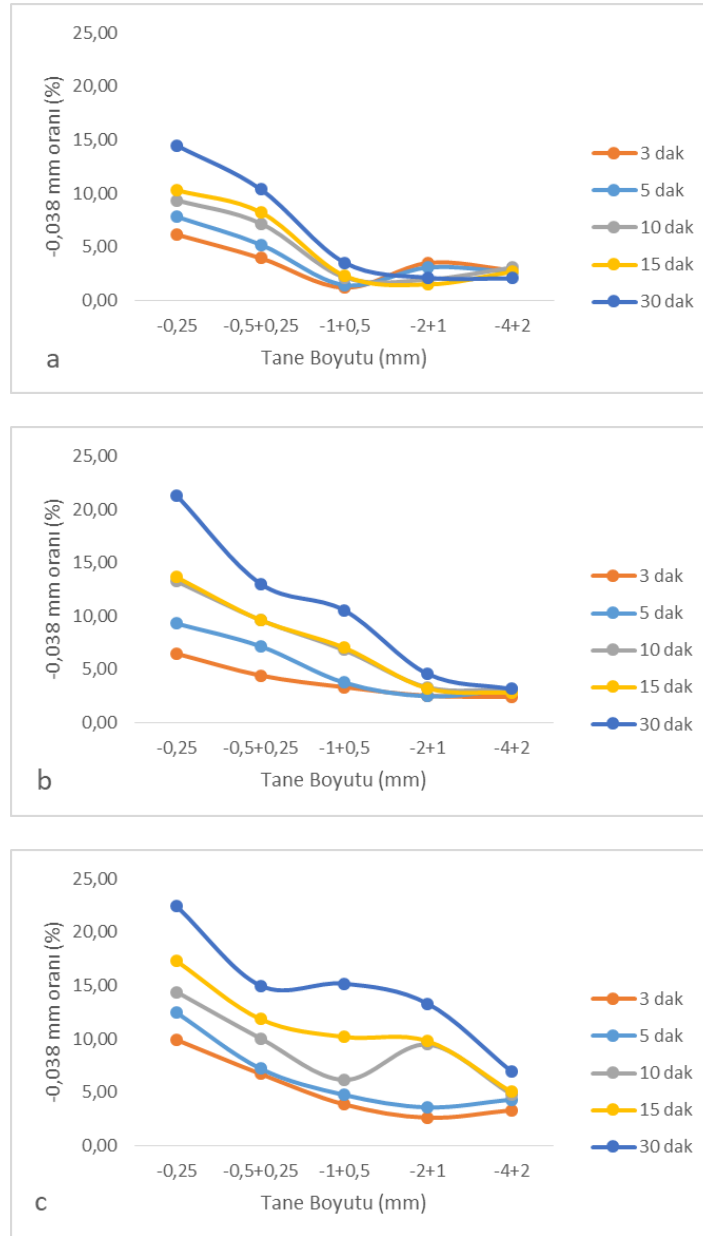




Şekil 4. Tane boyutuna bağlı olarak farklı ultrasonik güç seviyelerinin uygulama süresine bağlı olarak etkisi (a: %10, b: %20, c:%30).

Farklı tane boyutundaki kömür numunelerine uygulanan sabit ultrasonik güç seviyesinde -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarındaki değişim incelendiğinde, en düşük güç seviyesi olan %10 güçte (Şekil 4a) nisbeten iri boyutlarda (-4+2, -2+1 ve -1+0.5 mm) belirgin bir değişim tespit edilemezken, ince boyutlarda -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarında uygulama süresine bağlı olarak belirli oranda artış olduğu görülmektedir. Güç seviyesi %20'ye çıkarıldığında, bu sefer -4+2 ve -2+1 mm boyut gurunda önemli bir değişim meydana gelemez iken diğer boyutlardaki -0,038 mm tane miktarında önemli artışların olduğu görülmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının güç seviyesi %30'a çıkarıldığında ise tüm boyutlardaki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarında çok belirgin değişimlerin olduğu görülmektedir. Bu durum ultrasonik güç ve uygulama süresi ile de bağlantılı olarak değişmektedir. Ultrasonik ses dalgalarının etkisi artan uygulama süresi ile birlikte sürekli olarak artmakta, bu etki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında da sürekli olarak bir artışın olmasına neden olmaktadır. Ultrasonik ses dalgalarının oluşturduğu kavitasyon etkisi, sıvı ortam içerisindeki kömür tanelerinin yüzeyleri üzerinde önemli deformasyonlara neden olmakta, yeni kırık ve çatlak oluşturmakta, oluşan bu kırık ve çatlakların derinleşmesine daha sonra da taneciklerin boyutlarında belirgin değişimlerin olmasına neden olmaktadır. Kömür tanecikleri ve içerdiği inorganik maddeleri birbirine bağlayan kuvvetler, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile zayıflatılmakta, bir çoğu da kırılarak boyutta belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olmaktadır.

Son olarak da farklı güç seviyelerinin tane boyutuna bağlı olarak farklı sürelerde meydana getirdiği değişimlerin daha net olarak görülmesi için sonuçlar Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Aynı tane boyutunda ultrasonik ses dalgalarının farklı sürelerdeki etkileri (a: %10, b: %20, c: %30).

Şekil 5 incelendiğinde en düşük güç seviyesi olan %10 güç seviyesinde iri tane boyutlarındaki (-4+2, -2+1, -1+0.5) -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında belirgin değişimler meydana gelmez iken, ince boyutlarda (-0,25 ve -0,5+0,25 mm) ultrasonik ses dalgalarının uygulama süresi ile birlikte -0,038 mm tane boyutlu malzeme miktarında sürekli olarak bir artışın meydana geldiği görülmektedir. %20 ve %30 ultrasonik güç seviyelerinde yine artan süreye bağlı olarak tüm tane boyutlarındaki -0,038 mm boyutlu malzeme miktarında çok belirgin değişimler meydana gelmektedir. En ince tane boyutu (-0.25 mm) ve en yüksek güç seviyelerinde (%30) en yüksek oranda -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yine ultrasonik ses dalgalarının kaviteasyon etkisi sonucu oluşan mekanik etkinin taneciklerin hem yüzeylerinde hem de boyutlarında belirgin değişimlerin/deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca kömür numunelerinin içerdiği ve çok ince boyutta serbestleşen killi yapılar, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile buldukları yerden çıkmakta ve -0,038 mm boyutlu malzeme olarak ayrılmaktadırlar.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ultrasonik ses dalgaları cevher ve kömür hazırlamanın birçok aşamasında kullanılmaya başlanmış, elde edilen sonuçlardan önemli iyileştirmelere neden olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik ses dalgalarının özellikle kaviteasyon etkisi, hem fiziksel hem de kimyasal olarak önemli etkilere neden olmaktadır. Bu çalışmada yüksek oranda piritik kükürt içeren kömür tanecikleri üzerine uygulanan ultrasonik ses dalgasının boyut dağılımına olan etkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar literatürdeki verileri destekler nitelikte kömür tane boyutunun belirli oranda azaldığını göstermektedir. Ayrıca alt bütümlü kömür sınıfında ve kırılğan bir özelliği olan yöre kömürleri üzerine ultrasonik ses dalgalarının etkisinin incelendiği tek çalışma niteliğindedir. Kömür bünyesinde ince boyutlarda dağılmış vaziyette bulunan piritik kükürt, ultrasonik ses dalgalarının etkisi ile yerlerinden çıkmış ve -0,038 mm boyutlu malzeme içerisine karışmıştır.

Farklı ultrasonik güç (%10, %20 ve %30) ve uygulama süresinin (5-30 dakika) sıvı ortam içerisindeki katı taneciklerinin hem yapısal hem de yüzeysel deformasyonlara neden olduğu yapılan mikroskopik incelemelerde belirlenmiştir. Artan ultrasonik güç ve uygulama süresine bağlı olarak numune içerisindeki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme miktarı önemli oranda artmıştır. En yüksek ultrasonik gücü ve uygulama süresinde yapılan deneyler sonucunda -4+2, -2+1, -1+0.5, -0.5+0.25 ve -0.25 mm tane boyutlarındaki kömür numunelerindeki -0,038 mm tane boyutundaki malzeme oranları sırasıyla %1.86, %4.38, %5.09, %12.12 ve %20.08'den %6.97, %13.31, %15.19, %15.00 ve %22.43 yükselmiştir. Bu sonuçlar ultrasonik ses dalgalarının Gediz yöresi kömürlerinin tane boyutunda belirgin değişimlerin meydana gelmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Farklı ultrasonik güç ve sürelerde uygulanan işlem, kömür numunelerinde bulunan ve serbestleşme boyutu oldukça küçük olan killi ve piritik kükürt taneciklerinin (5-20 µm) buldukları yerden çıkmasına ve -0,038 mm boyutlu malzeme içerisine karışmasına neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında yapılan kül ve kükürt analizler de bu durumun ortaya çıktığını göstermektedir. Ultrasonik ses dalgaları ile yapılan bu işlem kısmi zenginleştirmeye neden olduğu belirlenmiş, çalışmanın bir sonraki aşamasında meydana gelen bu kısmi zenginleştirme incelenecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Pestic B., (1996), Application of ultrasound in solvent extraction of nickel and gallium, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, Idaho
- [2] Alp İ., (1998), Yüksek frekanslı ses dalgalarının cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- [3] Önal G., Özer M., Arslan F., (2003), Sedimentation of clay in ultrasonic medium, Minerals Engineering, vol:16, pp129-134
- [4] Aditya S., Nandi Tapas K., Pal Samir K., Majumder Arun K. (2017), Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices, International Journal of Mining Science and Technology 27 339–348
- [5] Kyllönen, H. Pirkonen, P. Hintikka, V. Parvinen, P. Grönroos, A. Sekki, H. (2004), Ultrasonically aided mineral processing technique for remediation of soil contaminated by heavy metals, Ultrasonics Sonochemistry 11 211–216
- [6] Teipel, U. Leisinger, K. Mikonsaari I. (2004), Comminution of crystalline material by ultrasonics, Int. J. Miner. Process. 74S p183–190
- [7] Suslick K. S., Price G. J., (1999), Application of ultrasound to materials chemistry, Annual Reviews Materials Science, vol:29, pp295-326
- [8] Farmer A.D., Collings A.F., Jameson G.J., (2000), Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles, International Journal of Mineral Processing, vol:60, pp101-113
- [9] Farmer, A.D. Collings, A.F. Jameson, G.J. (2000), The application of power ultrasound to the surface cleaning of silica and heavy mineral sands, Ultrasonics Sonochemistry 7 243–247
- [10] Kang W., Xun H., Kong X., Li M. (2009), Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation” Mining Science and Technology 19 0498–0502
- [11] Küncekk, İ. Sener S. (2010), Adsorption of methylene blue onto sonicated sepiolite from aqueous solutions, Ultrasonics Sonochemistry 17 250–257
- [12] Bang, J., H., ve S. Suslick K., S., (2010), Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials, Adv. Mater. 22, 1039–1059
- [13] Seidi, S., Yamini Y., (2012), Analytical sonochemistry; developments, applications, and hyphenations of ultrasound in sample preparation and analytical techniques, Cent. Eur. J. Chem.10(4) 938-976
- [14] Leonelli, C. Mason, T.J. (2010), Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry, Chemical Engineering and Processing 49 885–900

- [15] Turan Ö., (2007), Boraks çözeltilerinden probertit çökmesine ultrases dalgalarının etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [16] Mao Y., Xia W., Peng Y., Xie G., (2019), Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review, *Fuel Processing Technology* 195 106150
- [17] Mao Y., Chen Y., Bu X., Xie G., (2019), Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force, *Fuel* 256 115938
- [18] Demir U., (2019) Ultrasonik ses dalgalarının gümüş liçi performansına etkisinin araştırılması, DPU Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Proje No: 2016-60, Proje Sonuç Raporu
- [19] Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S., (2011), Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50 13210–13219.
- [20] Şahinoğlu, E., Uslu, T., (2013), Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment, *Fuel Processing Technology* 116 332–338
- [21] Şahinoğlu, E., Uslu, T., (2015) Effects of various parameters on ultrasonic comminution of coal in water media, *Fuel Processing Technology* 137 48–54
- [22] Ambedkar, B. Chintala, T.N. Nagarajan, R. Jayanti, S. (2011), Feasibility of using ultrasound-assisted process for sulfur and ash removal from coal, *Chemical Engineering and Processing* 50 236–246
- [23] Gartner W. (1953), Über die Möglichkeit der zerkleinerung suspendierter stoffe durch ultrashall, *Acustica* 3 124–128.
- [24] Fleischhauer, W.J. Kröger, C. (1969), *Forschungsberichte des Landes, Nordrhein Westfalen* No. 2081,
- [25] Graff, K.F. In: (1979) *Ultrasonic Comminution, Ultrasonics International '79 Proc.*, May, Graz, Austria 171–175.
- [26] Kang W, Xun H, Hu J, (2008) Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal, *Fuel Processing Technology* 89 1337-1344
- [27] Raman V., Abbas A., (2008) Experimental investigations on ultrasound mediated particle breakage, *Ultrasonics Sonochemistry* 15 55–64
- [28] Raman, V. Abbas, A. Zhu, W. (2011) Particle grinding by high-intensity ultrasound: kinetic modeling and identification of breakage mechanisms, *AICHE J.* 57
- [29] Gaete-Garreto'n L.F., Vargas-Hermandez Y.P., Velasquez-Lambert C., (2000) Application of ultrasound in comminution, *Ultrasonics* 38 345–352

Demir, U., Journal of Scientific Reports-B, Sayı 2, 39-54, Aralık 2020.
Demir, U., Journal of Scientific Reports-B, Number 2, 39-54, December 2020.

- [30] Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S., (2011) Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization, Ultrason. Sonochem. 18 718–726. 2025–2035.