



Ultrasonik Dalgaların Yüksek Kül-Kükürt İçerikli Kömürün Flotasyonunda Kullanılabilirliği

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 24.10.2023

Kabul/Accepted: 07.03.2024

Yayımlandı/Published: 29.04.2024

Utilization of Ultrasonic Waves in the Flotation of Coal with High Ash-Sulfur Content

Ercan ŞAHİNOĞLU *

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Kömür en önemli fosil yakıtlardan biri olarak kabul edilmektedir. Ancak, kömürün temizlenmeden kullanılması ciddi çevre sorunlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle kömürlerin kullanılmadan önce temizlenmesi gerekmektedir. Toz boyutlu (-0,5 mm) kömürlerin temizlenmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi flotasyondur. Flotasyon yönteminde tanelerin yüzey özellikleri farklılığından yararlanır. Kömür flotasyonunun etkinliğinin artırılması için birçok çalışma yapılmaktadır. Ultrasonik dalgaların flotasyonda kullanımı da bu çalışmalardan bir tanesidir. Oksitli kömürlerin yüzeylerinin temizlenmesi, kil minerallerinin kömürlerin yüzeyinden uzaklaştırılması, kömür yüzeyine adsorbe olmuş minerallerin kömürden ayrılması flotasyon işleminin başarılı bir şekilde yapılması için çok önemli olan faktörlerdendir. Ultrasonun kavitasyon etkisi sayesinde pek çok bilim alanında malzemelerin yüzeylerini temizleme amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Ultrasonik kavitasyon tarafından üretilen mekanik etkiler, kömür partiküllerinin hidrofobik yüzeyini eski haline getirmek için kömür yüzeyinden kil ve oksit tabakasını kaldırarak flotasyon seçiciliğinde bir artışa neden olur. Dolayısıyla ultrasonik dalgalar kömürün flotasyonunda, flotasyon işleminden önce kömürlerin yüzeylerini temizleyip kömürleri daha fazla hidrofobik yapmak amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada, yüksek kül-kükürt içerikli kömürün kimyasal reaktif kullanılmadan sadece ultrasonik dalgalar kullanılarak flotasyon yöntemiyle yüzebilirliği araştırılmıştır. Müzret kömürü farklı ultrason sürelerinde (0,5; 1; 2; 3 ve 4 dak.) ultrasonik işleme tabi tutulup flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen temiz kömürlerin yanabilir verim, kül giderimi ve verim indeksleri bulunmuştur. Maksimum yanabilir verim 4 dakika ultrason süresinde %60,49 olarak elde edilmiştir. Kül giderimi değerleri ve verim indeksi değerleri sırasıyla %77,98-79,84 ve %29,27-38,47 arasında değişmektedir. Bununla birlikte kömürün piritik kükürt içeriğinin de önemli ölçüde azaltıldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler Kömür; Flotasyon; Ultrasonik dalgalar; Yanabilir verim

Abstract

Coal is recognized as one of the most important fossil fuels. However, the use of coal without cleaning can cause serious environmental problems. For this reason, coal must be cleaned before use. Flotation is one of the methods used to clean fine-sized (-0.5 mm) coals. The flotation method utilizes the difference in surface properties of the grains. Many studies have been carried out to increase the efficiency of coal flotation. The use of ultrasonic waves in flotation is one of these studies. Cleaning the surfaces of oxidized coals, removing clay minerals from the surface of coals, and separating minerals adsorbed on the coal surface from the coal are very important factors for the successful flotation process. It is known that ultrasound is used to clean the surfaces of materials in many scientific fields thanks to its cavitation effect. The mechanical effects produced by ultrasonic cavitation cause an increase in flotation selectivity by removing the clay and oxide layer from the coal surface to restore the hydrophobic surface of coal particles. Therefore, ultrasonic waves can be used in coal flotation to clean the surface of the coals before the flotation process to make the coals more hydrophobic. In this study, the floatability of coal with high ash-sulfur content was investigated by flotation method using only ultrasonic waves without using chemical reagents. Müzret coal was subjected to ultrasonic treatment at different ultrasonic times (0.5; 1; 2; 3 and 4 minutes) and flotation experiments were carried out. The combustible recovery, ash rejection and efficiency index of the clean coals obtained were found. The maximum combustible recovery was 60.49% at 4 minutes of ultrasonic treatment. Ash rejection values and efficiency index values vary between 77.98-79.84% and 29.27-38.47%, respectively. In addition, it was determined that the pyritic sulfur content of the coal was significantly reduced.

Keywords Coal; Flotation; Ultrasonic waves; Combustible recovery

1. Giriş

Kömür, dünya üzerinde yaygın olarak dağılmış ve bol miktarda bulunan en önemli enerji kaynaklarından biridir (Wang vd. 2023). Fakat, kömürün özellikle enerji ve ısınma

amaçlı kullanımında istenilen özelliklerde kömürlerin kullanılmaması önemli hava ve çevre kirliliğine neden olabilmektedir. Bundan dolayı kömürün kullanılmadan önce istenilen özellikleri taşıması için temizlenmesi

gerekmektedir. Dünya genelinde kömürün yaygın olarak bulunması ve kömürün üretim teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak kömür üretimi yapılırken 0,5 mm tane boyutu altında oluşan toz kömür miktarı artış göstermektedir. Bu boyuttaki kömürlerin atılmadan ekonomiye kazandırılması çok önemlidir. Oluşan toz boyutlu kömürlerin kazılmasında kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden en fazla kullanılanı flotasyondur (Şahinoğlu 2012). Kömürün flotasyonu, kömürün fiziksel-kimyasal özellikleri, ekipman tipi ve işletme faktörleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin değiştirilmesi, yanabilir verim, kül giderimi ve verim indeksi açısından kömür flotasyonunun performansını olumlu yönde etkileyebilir. Flotasyonu zor olan kömürlerin flotasyon performansını iyileştirmek için fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal yöntemler kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntemlerle birlikte ultrasonik dalgaların kömür flotasyonunda kullanılması kömürün flotasyon başarısını arttırabilir (Mao vd. 2019). Ultrasonik dalgalar insanın duyabilme sınırının üzerindeki frekanslarda yayılan ses dalgalarıdır. Farklı alanlarda kullanılabilen ultrasonun güç yoğunluğu farklı olabilmektedir. Ultrason sıvı içerisinde kavitasyon olarak adlandırılan bir etki meydana getirmektedir.

Ultrasonik dalgalar kavitasyon etkisi sayesinde, pek çok bilim alanında kullanılabilir. Bu alanlardan bir tanesi de cevher/kömür hazırlamadır. Son yıllarda ultrason teknolojisi kömür flotasyonunu geliştirmek için yaygın olarak çalışılmaya başlanmıştır. Ultrasonik dalgalar, kavitasyon olayı sayesinde kömür temizleme işlemlerinde kullanılabilir (Şahinoğlu 2018). Ultrasonik dalgaların kullanılması ile kömür tanelerinin yüzeyinin temizlenmesinin yanında reaktiflerin emülsifikasyonu da sağlanabilir (Wang vd. 2020). Kang vd. (2007) yaptıkları çalışmalarında ultrasonik şartlandırmanın kömür flotasyonunda kül ve kükürt giderme performansına etkisini araştırmışlardır. Ultrasonik şartlandırmanın kömür taneleri üzerinde kırıcı bir etkiye sahip olduğunu, kömürden pirit ve diğer gang minerallerinin ayrılmasını sağladığını bulmuşlardır. Araştırmacılar, flotasyon deneyleri öncesi toz boyutlu kömürü ultrason işlemine tabi tutmanın flotasyonda kül ve kükürt uzaklaştırma işlemini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Özkan (2012) yaptığı çalışmada taş kömürü şamlarının flotasyonunda ultrasonik dalga kullanımının etkisini araştırmıştır. Ultrasonik dalga kullanımının yanabilir verimi arttığını belirlemiştir. Xu vd. (2017) çalışmalarında oksitlenmiş kömürün flotasyonunda oksitlenmiş tabakanın ultrasonik kavitasyon ile etkili bir şekilde uzaklaştırıldığını böylelikle de konsantre veriminin arttığını rapor etmişlerdir. Jin vd.

(2021) kömür flotasyonunda ultrasonik dalga kullanımının yanabilir verimi arttırdığını bulmuşlardır.

Kömür hidrofobik bir maddedir, yani kimyasal maddeler kullanılmadan doğal olarak yüzebilme özelliğine sahiptir. Özdemir vd. (2013) yaptıkları çalışmalarında kimyasal reaktif kullanmadan (kollektör ve köpürtücü) sadece tuzlu su ortamında taş kömürü tanelerinin yüzdürülmesinin mümkün olduğunu bulmuşlardır. Ancak bu doğal yüzebilirlik kömür türlerine ve kömür yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kömür oksitlendikçe ve kül oranı arttıkça doğal yüzebilirliği azalır. Bu bağlamda, ultrasonik dalgaların kullanılarak oksitli kömür tanelerinin yüzeylerinin temizlenmesi, kömür tanelerinin yüzeyindeki kilsli yapıdaki malzemelerin yüzeyden uzaklaştırılması kömürün flotasyonu için önemli faktörlerdendir. Dolayısıyla ultrasonik dalgalar flotasyonda, proses öncesi kömür tanelerinin yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada, yüksek kül ve kükürt içeren kömürün flotasyon yöntemi ile temizlenebilirliği araştırılmıştır. Araştırmada ultrasonik dalgalar kullanılarak kömür tanelerinin yüzeyleri temizlenmiş olup, hiçbir kimyasal reaktif kullanılmadan flotasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar taramalı elektron mikroskop (SEM), X-ışını difraktometresi (XRD) ve parlak kesit incelemeleriyle desteklenmiştir.

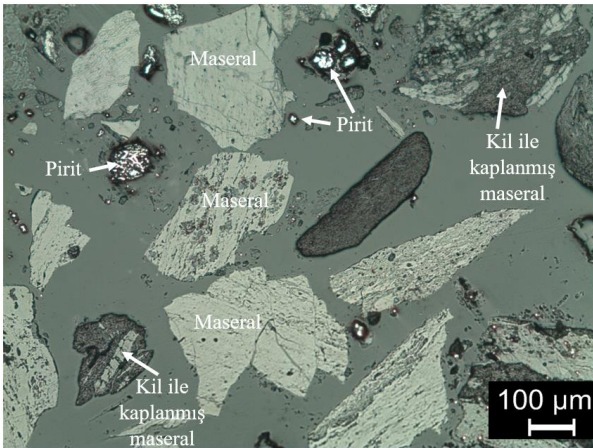
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada Müzret (Artvin-Yusufeli) kömürü kullanılmıştır. Müzret bölgesinde yeraltı işletme yöntemiyle çıkarılan kömür stoklanmakta, daha sonra değerlendirilmek üzere başka bir ile sevkıyatı yapılmaktadır. Çalışmaya konu olan kömürün alındığı işletmede ağır ortam vb. diğer yöntemlerle bir zenginleştirme yapılmamaktadır. Müzret bölgesinden alınan kömür örneğinin kırılma yapısı nedeniyle üretimi esnasında oluşan toz boyutlu (-0,5 mm) kömür içeriği oldukça fazladır. Bölgeden laboratuvara getirilen kömürün miktarı kömür hazırlama yöntemlerine uygun olarak azaltılmıştır. 0,5'lik elek kullanılarak kömür içerisindeki toz boyutlu kısmı ayrılmıştır. Deneylerde kullanılan kömürlerinde tüm ocağı temsil etmesi açısından +0,5 üstündeki kömürlerde kontrollü olarak -0,5 mm'nin altına indirilmiştir. Boyut küçültme işlemi kırıcı ve değirmen kullanılarak yapılmıştır. Malzemedan alınan temsili kömür örnekleri halkalı öğütücüde öğütülüp, kömürün kimyasal ve mineralojik analizleri yapılmıştır. Çizelge 1'de kömürün analiz değerleri verilmiştir. Mineralojik analizler için, XRD ve SEM cihazları

kullanılmıştır. XRD analizi sonucunda, kömürle birlikte kil minerallerinin (kaolinit, montmorillonit, illit), sülfür mineralinin (pirit), karbonat mineralinin (kalsit), sülfat mineralinin (jips) ve silikat mineralinin (kuvars) bulunduğu belirlenmiştir. Kömür örneğinin parlak kesit incelemesinden (Şekil 1), kömür maserallerinin farklı şekil ve boyutlarda olduğu, bununla birlikte farklı boyutta piritlerinde bulunduğu belirlenmiştir. Bazı maserallerin kil mineralleriyle kaplandığı da görülmüştür. Kömürün tane boyutu dağılımı Çizelge 2’de gösterilmiştir. Numunenin toz boyutlu kömür içeriğinin fazla olması ve bu toz boyutlu kömürlerin kazanılması amaçlandığından dolayı herhangi bir serbestleşme çalışması yapılmadan flotasyon yöntemiyle kömürün zenginleştirilmesi yapılmıştır.

Çizelge 1. Kömürün analiz değerleri.

Bileşenler	Havada Kuru	Kuru
Nem (%)	2,25	–
Kül (%)	34,85	35,65
Uçucu Madde (%)	10,73	10,98
Sabit Karbon (%)	52,17	53,37
Sülfat Kükürt (%)	0,99	1,01
Piritik Kükürt (%)	5,44	5,57
Organik Kükürt (%)	1,3	1,33
Toplam Kükürt (%)	7,73	7,91
Kalorifik Değer (kcal/kg) (Üst Isı Değeri)	4970	5084



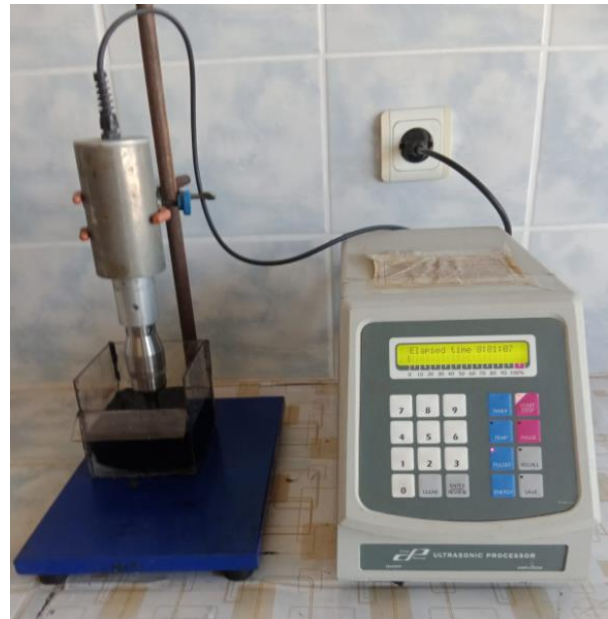
Şekil 1. Kömürün parlak kesiti.

Çizelge 2. Kömür tane boyutu dağılımı.

Kömür tane boyutu (mm)	Ağırlık (%)
-0,5+0,3	22,16
-0,3+0,212	17,54
-0,212+0,15	14,11
-0,15+0,106	10,10
-0,106+0,053	15,93
-0,053	20,16

Deneyler Denver marka flotasyon makinasında 0,5 L’lik flotasyon hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Flotasyon deneylerinde kömür tane boyutu -0,5 mm, karıştırma hızı 1200 devir/dak., katı oranı %10, örnek miktarı 50 g olarak belirlenmiştir. Deneylerde hiçbir flotasyon kimyasalı kullanılmamıştır. Flotasyon deneyine geçilmeden önce flotasyonu yapılacak kömür ultrasonik cihazla (Cole-Parmer, 750 watt güç ve 20 kHz frekans) işleme tabi tutulmuştur (Şekil 2). Bu işlem 450 ml suya 50 gr kömür koyulup 72,8 watt/cm² gücünde farklı sürelerde (0,5; 1; 2; 3; 4 dakika) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kömür-su karışımı flotasyon hücresinde 3 dakika karıştırılmış ve ortama hava verilerek 2 dakika köpük alınmıştır. Hava debisi 4 L/dak. olarak seçilmiştir. Deneylerde saf su kullanılmış olup doğal pH’da deneyler yapılmıştır. Flotasyon işlemi sonrası elde edilen konsantre vakumlu filtrede katı-sıvı ayırımı işlemine tabi tutulup, etüvde 105 °C’de kurutulmuş ve tartılmıştır. Halkalı öğütücüde öğütüldükten sonra kül ve kükürt analizine tabi tutulmuştur.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan ultrasonik cihaz.

Deneyler sonucunda elde edilen konsantrelerin yanabilir verimi (YV, %), kül giderimi (KG, %) ve verim indeksi (Vİ, %) değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır (Şahinoglu 2012).

$$YV (\%) = \left[\frac{C(100-c)}{F(100-f)} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$KG (\%) = \left[1 - \frac{C}{F} \frac{c}{f} \right] \times 100 \quad (2)$$

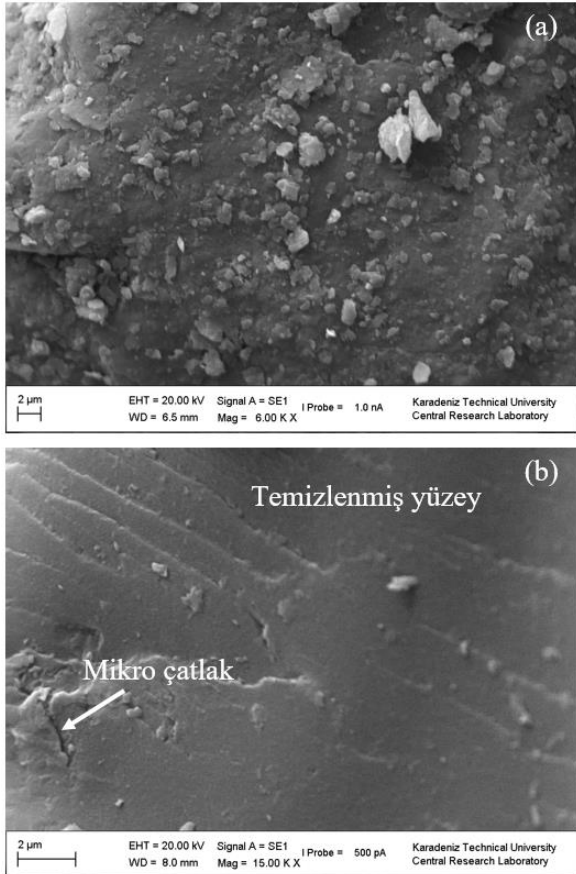
$$Vİ (\%) = [YV (\%) + KG (\%) - 100] \quad (3)$$

Burada, C, konsantrenin ağırlığı (g), c, konsantrenin kül içeriği (%); F, beslemenin ağırlığı (g); f, beslemenin kül içeriği (%)’dir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Ultrasonik Kaviteasyonun Kömürün Yüzey Özelliklerine Etkisi

Ultrasonik kaviteasyonun kömür tanelerinin yüzeylerinde yapmış olduğu etkiyi anlamak için ultrasonik dalgalarla işleme tabi tutulmamış ve işleme tabi tutulmuş tanelerinin SEM görüntüleri çekilerek ultrasonik kaviteasyonun kömür taneleri yüzeylerinde yapmış olduğu etki araştırılmıştır (Şekil 3).



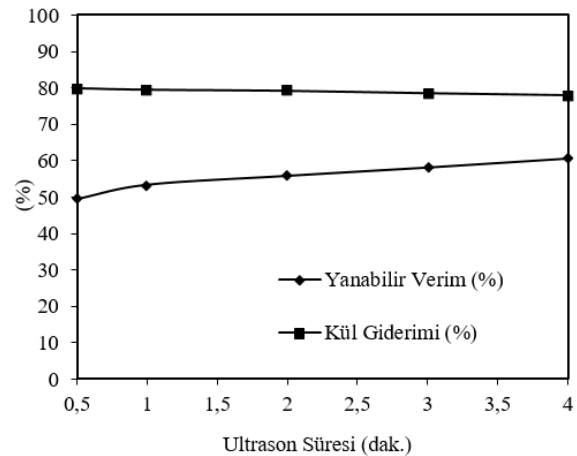
Şekil 3. Kömür tanelerinin SEM görüntüleri: (a) ultrasonik işleme tabi tutulmamış kömür tanesi yüzeyi, (b) ultrasonik işleme tabi tutulmuş kömür tanesi yüzeyi (72,8 watt/cm² güç, ultrason süresi 4 dak., kömür tane boyutu: -0,5 mm).

SEM görüntüleri incelendiğinde, ultrasonik dalgalarla işlem görmemiş kömür tanesi yüzeyinde mikro boyutta pek çok flotasyon işlemi verimini düşürebilecek malzemelerin olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ultrasonik dalgalarla işlem görmüş kömür tanesi yüzeyinin kaviteasyon kabarcıkları sayesinde temizlenmiş olduğu, yüzeyde mikro çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Kömür tanelerinin yüzeyinin temizlenmesi yeni taze yüzeyler oluşması anlamına gelmektedir. Ultrasonik kaviteasyon etkisiyle kömür tanelerinin hidrofobikliğin artması flotasyon verimi için çok önemli olan parametrelerden bir tanesidir.

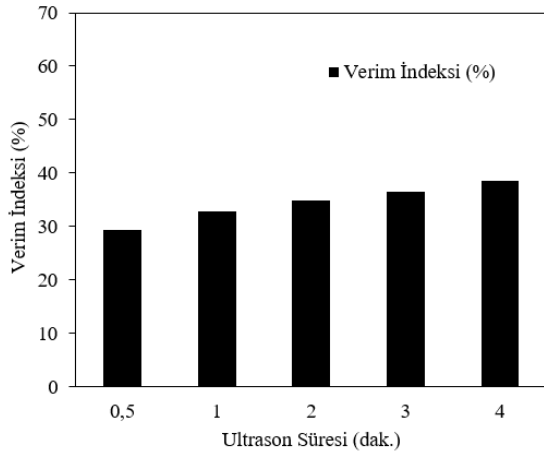
3.2. Ultrasonik Dalgaların Kömürün Flotasyonunda Kullanılması

Şekil 4'de farklı ultrason sürelerinde elde edilen flotasyon deneyi sonuçları görülmektedir. En yüksek yanabilir verim ve kül giderimi değerleri sırasıyla %60,49 ve %79,84'dir. Yanabilir verim değerleri %49,43-60,49 kül giderimi değerleri ise %77,98-79,84 arasında değişmektedir. Kömür tanelerinin ultrasona maruz kalma süresi arttıkça yanabilir verim artmıştır. Ultrason süresi 4 dakika olduğunda yanabilir verim değeri maksimum olmuştur. Bunun nedeni ultrasonik dalga kullanımı ile kaviteasyon etkisi ile kömür tanelerinin yüzeyinin temizlendiği, daha hidrofobik yüzeylerin oluştuğu, bu durumda flotasyondaki verimliliği arttırdığı söylenebilir. Beslemenin yapılan parlak kesitinden bazı maserallerin kil mineralleriyle kaplı olduğu belirlenmişti. Kil mineralleriyle kaplı maserallerin ultrasonik kaviteasyonla flotasyon işleminden önce temizlenmesi flotasyon yönteminin başarısını artırma da çok önemli rol oynamaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen kül giderimi değerleri incelendiğinde kül giderimi değerlerinin nispeten birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Şekil 5'de farklı ultrason sürelerinde elde edilen verim indeksi değerleri görülmektedir. Verim indeksi değerleri %29,27-38,47 arasında değişmektedir. Maksimum verim indeksi değeri %38,47'dir. Kömür tanelerinin ultrasona maruz kalma süresi arttıkça verim indeksinin arttığı 4 dakika ultrason süresinde maksimum olduğu görülmektedir. Verim indeksi değeri, yanabilir verim ile kül giderimi değerini birlikte değerlendiren bir sonuç olduğundan bu sonuç ne kadar fazla ise zenginleştirme/temizleme işleminin daha başarılı olduğu söylenebilir.



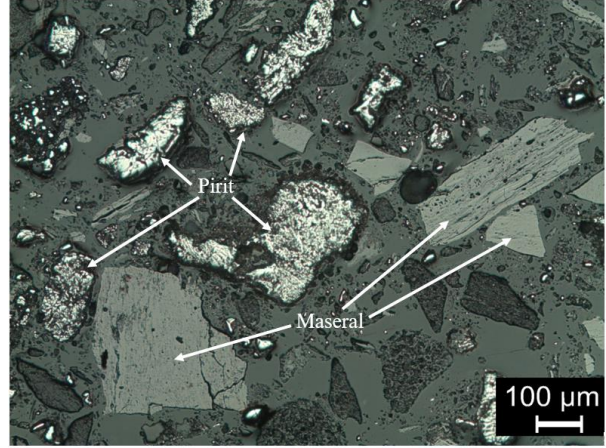
Şekil 4. Farklı ultrason sürelerinde elde edilen yanabilir verim ve kül giderimi değerlerinin karşılaştırılması (Ultrason dalga gücü 72,8 watt/cm²).



Şekil 5. Farklı ultrason sürelerinde elde edilen verim indeksi değerlerinin karşılaştırılması (Ultrason dalga gücü 72,8 watt/cm²).

Flotasyon deneyinden elde edilen atığın parlak kesitinden (Ultrason süresi 4 dak.) pirit minerallerinin çoğunlukla atığa gittiği görülmektedir. Atıktaki piritlerin farklı boyutlarda piritler olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte atığa gang mineralleriyle birlikte iri boyutlu ve küçük boyutlu kömür maserallerinin de gittiği gözlemlenmiştir (Şekil 6). Verim indeksi değeri en yüksek olan ultrason süresinin 4 dakika olduğu flotasyon deneyinden elde edilen konsantrinin piritik kükürt içeriğinin %1,85 olduğu bulunmuştur. Beslemenin piritik kükürt içeriği %5,57'den %1,85'e düşürülmüştür. Beslemenin kül içeriği ise %35,65'den %16,78'e düşürülmüştür. Ultrason ile koşullandırmanın kömür parçacıkları üzerinde kırıcı bir etkiye sahip olmasından dolayı pirit ve diğer gang minerallerinin kömürden ayrılmasını sağlayarak daha temiz konsantrilerin elde edilmesini sağlamıştır. Kil ile kaplanmış maserallerin ultrasonik dalgalarla temizlenmesi maseral yüzeylerini daha hidrofobik hale getirmektedir. Daha hidrofobik hale gelen kömür tanelerinin de flotasyon yöntemiyle kazanılması yanabilir verimi arttırmaktadır. Ultrason süresinin belli bir süreye kadar daha artırılması sonuçları daha da iyileştirebilir. Bununla birlikte ultrasonik işlemin kömür tanelerini kırma etkisi de göz önüne alındığında çok fazla süre ultrasonik işleme maruz kalacak kömür tanelerinin çok daha fazla kırılıp 53 mikron altında bulunan tane miktarını artırabilecektir. 53 mikron altındaki tanelerin kazanılmasında flotasyon işleminin başarısının azalması işlemi olumsuz yönde etkileyebilir. Diğer taraftan fazla ultrason kullanımı kömürün oksitlenmesine neden olabilir (Mao vd. 2019). Xu vd. (2017) çalışmalarında, ultrasonik ön işlem süresinin oksitlenmiş kömür flotasyonu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kömür yüzeyindeki oksitlenmiş tabaka, ultrasonik işlem süresi 10 dakikaya kadar olduğunda ultrasonik kaviteasyonun etkisiyle etkili

bir şekilde uzaklaştırıldığını ve konsantre veriminde artışa neden olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, uzun süreli ultrasonik ön işlemin kömür tanelerinin yüzeylerini tekrar oksitlediğini ve de konsantre verimini azalttığını bulmuşlardır.



Şekil 6. Atığın parlak kesit görüntüsü.

Yukarıdaki sonuçlardan görüleceği üzere Müzret kömürünün hiçbir flotasyon kimyasalı (toplayıcı, bastırıcı ve köpürtücü) kullanılmadan, ultrasonik dalgaların kullanıldığı flotasyon deneyleriyle yüzdürülebileceği görülmüştür. Bu sonuç Özdemir vd. (2013)'nin çalışmasının sonuçları ile uyumludur.

Bununla birlikte daha yüksek yanabilir verim ve kül giderimi elde edebilmek için farklı şartlarda, farklı parametrelerin denenerek flotasyon deneylerinin yapılması daha başarılı sonuçları ortaya çıkarta bilecektir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, yüksek kül-kükürt içerikli Müzret kömürünün, ultrason dalgalarının kaviteasyon etkisi kullanılarak hiçbir flotasyon reaktifi kullanılmadan flotasyon yöntemiyle yüzebilirliği araştırılmıştır.

Ultrasonik dalgaların kaviteasyon etkisi sayesinde kömür tanelerinin yüzeylerini temizleyerek yeni yüzeyler oluşturduğu, böylelikle de daha fazla hidrofobik hale gelen kömür tanelerinin flotasyonda toplayıcı ve köpürtücü kullanmadan yüzdürülebildiği görülmüştür.

Farklı ultrason sürelerinin kullanıldığı flotasyon deneylerinde 4 dakika ultrason süresinde maksimum yanabilir verim ve verim indeksi değerleri sırasıyla %60,49 ve %38,47 olarak elde edilmiştir.

Beslemenin kül içeriği %35,65'den %16,78'e, piritik kükürt içeriği ise %5,57'den %1,85'e indirilmiştir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Tüm etik standartlara uyduğumu beyan ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceğim hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

Jin, L., Wang, W., Tu, Y., Zhang, K. and Lv, Z., 2021. Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles. *Ultrasonics Sonochemistry*, **73**: 105459.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105459>

Kang, W., Xun, H. and Chen, J., 2007. Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation, *Journal of China University of Mining & Technology*, **17(3)**: 358-362.

[https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60105-9)

Mao, Y., Xia, W., Peng, Y. and Xie, G., 2019. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: a review. *Fuel Processing Technology*, **195**:106150.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106150>

Özdemir, O. Çinku, K. Uslu, T. Kılıç, E. ve Çelik, M.S., 2013. Taşkömürü ve linyit kömürlerinin tuzlu su içerisinde flotasyon davranışları, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **13**, 015801,1-14.

<https://doi.org/10.5578/fmbd.5218>

Özkan, Ş.G., 2012. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes, *Fuel*, **93**: 576-580.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.032>

Şahinoğlu, E., 2012. Kömürün yağ aglomerasyonu yöntemi ile temizlenmesinde bitkisel atık yağların ve ses ötesi dalgaların kullanılabilirliği. Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon*, 135.

Şahinoğlu, E., 2018. Ses ötesi dalgaların farklı tane boyutlarındaki kömürün flotasyonunda kullanılması, *Türkiye 21. Uluslararası Kömür Kongresi*, 11-13 Nisan, Zonguldak, Türkiye, 305-316.

Xu, M., Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Wang, D. and Wang, L., 2017. Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*, **12 (31)**: 14367-14373.

<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>

Wang, L., Tian, C., Yang, W., Wang, H., Wu, S., Ni, S. and Pan., 2023. Effects of ultrasonic and surfactant

coupling treatment on the wettability of coal. *Powder Technology*, **427**:118767.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118767>

Wang, W., Liu, D., Tu, Y., Jin, L. and Wang, H., 2020. Enrichment of residual carbon in entrained-flow gasification coal fine slag by ultrasonic flotation. *Fuel*, **278**:118195.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118195>