



## Ultrasonik işlemin düşük dereceli kömürün kolon flotasyonu üzerine etkisi

*The effect of ultrasonic process on column flotation of low-grade coal*

Kiraz Eşmeli\*

<sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, [kesmeli@ktun.edu.tr](mailto:kesmeli@ktun.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5699-5199>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 26 Ocak 2023  
Revizyon 27 Mart 2023  
Kabul 27 Mart 2023  
Online 30 Haziran 2023

## Anahtar Kelimeler:

*kolon flotasyonu, ultrasonik enerji, temas açısı, linyit*

## ÖZ

Bu çalışmada, ultrasonik işlemin düşük dereceli linyit kömürünün kolon flotasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ultrasonun gücü ve muamele süresi flotasyon sürecini önemli derecede etkilemiş ve en iyi değerler 60 Watt ultrason gücünde ve 3 dakikalık muamele süresinde elde edilmiştir. Ultrasonik işlemin güç değerlerinin ve muamele süresinin daha fazla artması flotasyon başarısını olumsuz yönde etkilemiştir. Optimum kül içeriği ve yanabilir verim değerleri 1000 g/ton toplayıcı ve 2000 g/ton köpürtücü konsantrasyon değerlerinde elde edilmiştir. Ultrasonik işlemin uygulanması flotasyon reaktiflerinin aktivitesini artırarak flotasyon sürecini iyileştirmiştir. Ayrıca ultrasonla yapılan deneylerde temas açısı değerlerinin aynı deneysel koşullar altında klasik yapılan deneylere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, % 28,01 kül içeriğine sahip kömür, ultrasonik işlem kullanılarak % 13,94 kül içeriği ve % 76,25 yanabilir verim ile zenginleştirilmiştir.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 26 January 2023  
Received in revised form 27 March 2023  
Accepted 27 March 2023  
Available online 30 June 2023

## Keywords:

*Column flotation, ultrasound energy, contact angle, lignite*

## ABSTRACT

In this study, the influence of ultrasonic treatment on column flotation of low-grade lignite coal was investigated. In addition, the power of ultrasonic and the time of treatment significantly influenced the flotation process, and the best values were obtained at an ultrasound power of 60 Watt and a treatment time of 3 min. The increase in the power values and treatment time of the ultrasonic process had a negative effect on the flotation success. The optimum the ash content and combustible efficiency values were obtained at 1000 g/ton collector and 2000 g/ton frother concentration values. The application of ultrasonic treatment improved the flotation process by increasing the activity of flotation reagents. In addition, it was found that the contact angle values were higher in the experiments performed with ultrasound compared to the experiments performed without ultrasound under the same experimental conditions. As a result, coal with an ash content of 28.01% was enriched with an ash content of 13.94% and a combustible yield of 76.25% using ultrasonic process.

Doi: 10.24012/dumf.1242695

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

İnce boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde flotasyon, yağ aglomerasyonu ve flokülasyon yöntemleri kullanılmakta ve bu yöntemlerde organik ve inorganik bileşenlerinin yüzey özelliklerindeki farklılıklardan yararlanılmaktadır. Flotasyon işleminde, mineraller, uygun reaktiflerle muamele edildikten sonra bazı mineralin yüzdürülmesi bazı minerallerin ise bastırılarak minerallerin birbirinden ayrılması sağlanmaktadır. Kolon flotasyonunda ise zenginleştirme, ince tane boyutuna sahip minerallerin seçimliliğini artırmak için ters akım tekniğine dayanmaktadır. Ayrıca, konsantre ve artık ürünlerinin kolaylıkla kontrol altında tutulabilmesi, seçimliliğinin yüksek olması ve enerji tasarrufu sağlaması kolon flotasyonunun sağladığı bazı önemli avantajlardır [1]. Kolon hücreleri, özellikle yüksek hidrofobisiteye sahip cevherlerde oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Ultrases dalgası, nadir ve sıkıştırma döngüleri olarak sırayla yayılırken, nadir döngüde oluşan mikro kabarcıklar, sıkıştırma döngüsünde anlık bir çökmeye neden olarak lokalize bir enerji patlaması oluşturur. Buna kavitasyon denir ve ultrason işleminin en önemli özelliğidir [2-5]. Kavitasyon kabarcıkları “geçici kavitasyon” ve “stabil kavitasyon” olarak ikiye ayrılır [3]. Geçici kavitasyon kabarcıkları, boyutlarının genişlemesinden sonra pozitif basınç yarı döngüsü sırasında şiddetli bir şekilde çöker ve birçok küçük kabarcığa bölünür [3,6]. Kavitasyon kabarcıklarının yapıları, kabarcıklar ve parçacıklar arasındaki mineralizasyonun verimliliğini etkilemektedir. Son yıllarda, ince kömür parçacıklarının flotasyon performansını iyileştirmek için ultrasonik işlem kullanılmaktadır [2, 4, 5, 7-16]. Ultrases işleminin flotasyon çalışmalarında olumlu etkisinin nedeni olarak, akustik kavitasyonun partikül yüzeylerini temizlediği ve reaktiflerin etkisini kolaylaştırmak için şlam kaplamalarını en aza indirdiği ve böylece reaktif tüketimini azalttığı belirtilmektedir [17]. Ayrıca, flotasyon işlemi sırasında ultrasonik kavitasyon sonucu oluşan mikro kabarcıkların, kabarcık-kömür bağlanma verimliliğini artırdığı belirtilmiştir [7]. Bununla birlikte, ultrases işleminin fiziksel ve kimyasal etkileri henüz açıklanamamıştır. Ultrasonik işlemin farklı yoğunluklarda ve sürelerde kullanımının yanı sıra farklı yöntemlerde (ön işlem ve eşzamanlı) kullanımı da farklı sonuçlara yol açmaktadır. Ultrases işleminin ön işlem olarak kullanıldığı flotasyon çalışmalarında flotasyon başarısındaki artış, mineral yüzeyin geçici kavitasyon etkisi ile temizlenmesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin süspansiyonda daha iyi dağılmasına bağlanmıştır [9,10,13,14,18,19].

Bu çalışmada yüksek kül içerikli linyit kömürünün kolon flotasyonu ile zenginleştirilmesi ve ultrases ön işlemin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, optimum çalışma koşulları tespit edilerek ultrasonik ön işlemin kömürün yanabilir verim, kül içeriği ve temas açısı değerleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

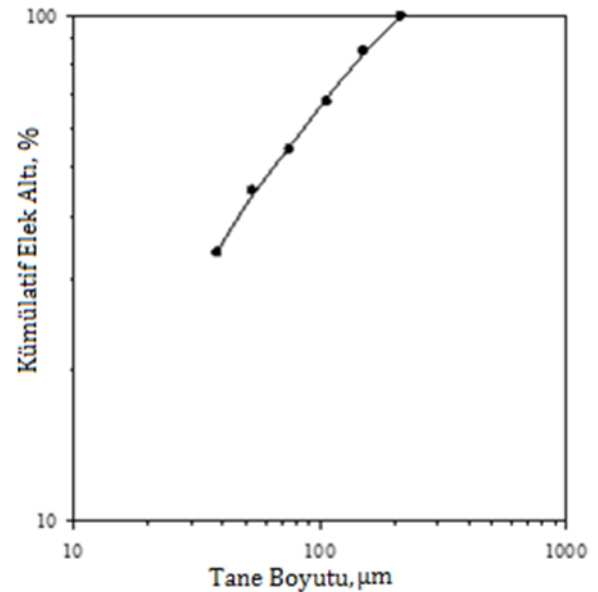
## Malzeme ve Yöntem

### Malzeme

Deneylerde Konya'nın Ilgın ilçesinden temin edilen linyit örneği kullanılmıştır. Linyit numunesinin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Nem analizi, ASTM D 3173-03 2010 Standart Test Metoduna göre yapılmıştır [20]. Kül analizi, ASTM D 3174-04 2010 Standart Test Metoduna göre gerçekleştirilmiştir [21]. Kömürün kalorifik değeri tayini standartlara uygun olarak Leco AC-350 marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir [22]. Kömür örneklerinin sabit karbon içerikleri ise; nem, kül ve uçucu madde içerikleri toplamının 100’den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Partikül boyut analizi bir lazer kırınım ölçer (Malvern Mastersizer 2000, UK) kullanılarak yapıldı ve öğütülmüş numunelerin  $d_{80}$  boyutunun 140  $\mu\text{m}$  olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1). Toplayıcı olarak kullanılan gazyağı, yerel petrol bürosundan tedarik edildi ve gazyağının yoğunluğu 0.8  $\text{g/cm}^3$  olarak bulundu. Köpürtücü olarak %98 saflık derecesine sahip Metil izobütül Karbinol (MIBC-  $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$ ) kullanılmıştır. Bu çalışmada Bandelin (Sonopuls HD 3200) marka ultrasonik cihaz kullanılmış ve cihaz 20 Khz frekansa sahiptir.

**Tablo.1.** Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri

| Kül (%) | Nem (%) | Sabit Karbon (%) | Kalori Değeri (MJ/kg) |
|---------|---------|------------------|-----------------------|
| 28.01   | 24.5    | 16.9             | 14.1                  |



**Şekil 1.** Öğütülmüş numunenin tane boyut dağılımı

### Kolon flotasyon deneyleri ve ultrasonik işlem

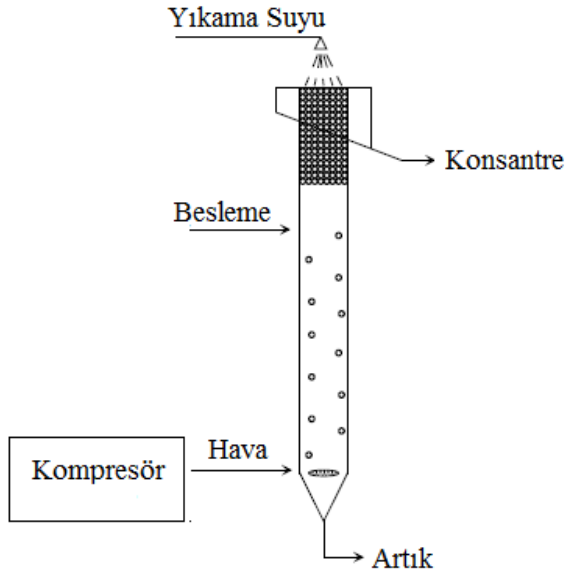
Flotasyon deneylerinin yapıldığı kolon 1 L hacminde ve 40 cm yüksekliğindedir. Kolon içerisine hava bir kompresör yardımıyla verilmekte ve verilen havanın debisi 300

<sup>3</sup> cm<sup>3</sup>/dak'dır. Flotasyon deneyleri için süspansiyon cam silindirik bir beherde 5 g kömür numunesi ve 100 cm<sup>3</sup> damıtılmış su kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon manyetik karıştırıcı ile 1000 dev/dak karıştırma hızında 3 dakika karıştırıldı. Daha sonra gazyağı yağı süspansiyona eklendi ve süspansiyon 5 dakika tekrar karıştırılarak sistem durdurulmuştur. Kolon flotasyonu hücresine köpürtücü ilave edildikten sonra hazırlanan süspansiyon sabit bir hızla kolona verilmiştir. Yüzen ürün alınarak filtre edilip, kurutulduktan ve tartıldıktan sonra yanabilir verim denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Yanabilir verim ( % )

$$= 100 \times \frac{A(100 - A_{Kül})}{B(100 - B_{Kül})} \quad (1)$$

Burada, A= Temiz kömür yüzdesi,  $A_{Kül}$  = temiz kömür kül içeriği, B= besleme yüzdesi, ve  $B_{Kül}$  = besleme kül içeriği



Şekil 2. Kolon flotasyonu deney düzeneği

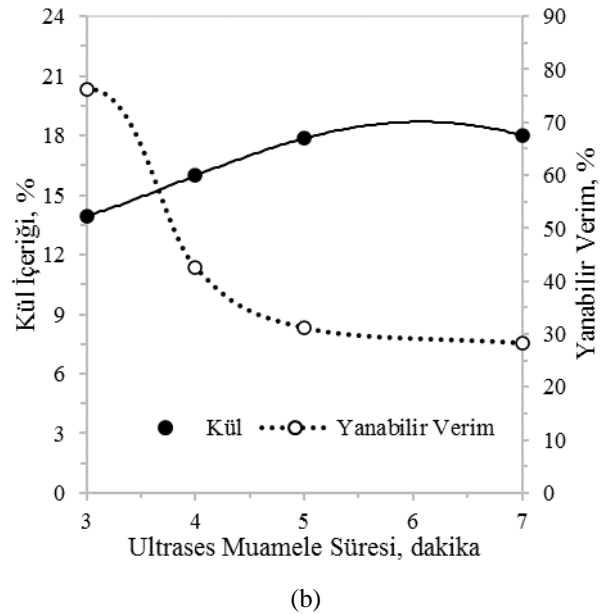
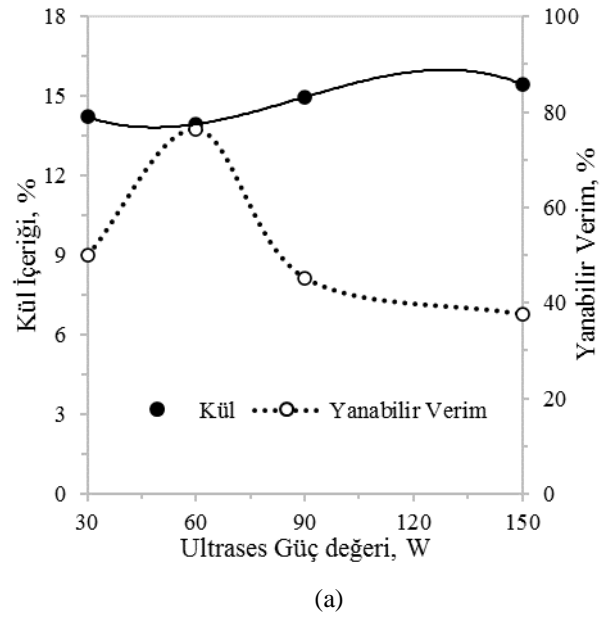
### Temas açısı ölçümleri

Flotasyon deney sonucunda yüzen malzeme filtrelenip, kurutulduktan sonra 0.4 gram numune alınarak hidrolik pres yardımıyla 25 MPa basınç uygulayarak pürüzsüz yüzeyli peletlere dönüştürülmüştür. Özel bir şırınga ile katı yüzeylere bir damla su konularak ve elde edilen açı otomatik temas açısı ölçer (KSV ,CAM 101) ile ölçülmüştür.

### Bulgular ve Tartışma

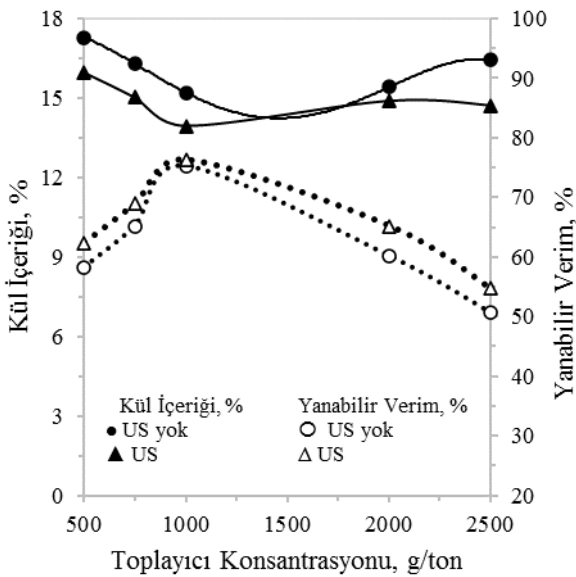
Ultrasesin güç değerleri ve muamele sürelerine bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi üzerindeki etkisi Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 3'a da görüldüğü gibi ultrasesin belirli bir güç değerine (60 W) kadar kömürün kül içeriği azalmakta, yanabilir verim artmaktadır, fakat daha yüksek güç değerlerinde kül içeriği değerleri artmış, yanabilir verim değerleri azalmıştır. Öte yandan, ultrases muamele süresin artması kömür kül içeriğini ve yanabilir verim değerlerini olumsuz etkilemiştir. Flotasyon üzerine

yapılan çalışmalarda da işlemin başarısının ultrases güç değerleri ve muamele süresine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir [18,23-25]. Uzun süreli ultrases muamelesinin verimi azaltması, ultrasonik işlemin kömür parçacıklarını parçalaması, parçacıkların boyutlarındaki azalmaya bağlı olarak yüzey alanlarını artırması ve bunun sonucunda kullanılan toplayıcı miktarının yetersiz kalmasına bağlanabilir. Birçok çalışmada, kömür boyutundaki azalmanın verimde bir azalmaya yol açtığını belirtilmiştir [8,26-31]. Ayrıca, özellikle korna tipli ultrasonik cihazlarının kaviteasyon kabarcıklarının çökmesi sonucu çok güçlü bir fiziksel kesme kuvveti oluşturduğu ve bu kuvvetin flotasyon işlemleri sırasında kabarcık-parçacık bağlanmasını azalttığı kaydedilmiştir [16,18,32]. En iyi sonuçlar, 60 Watt'lık bir ultrases güç değerinde ve 3 dakikalık bir işlem süresinde elde edilmiştir.



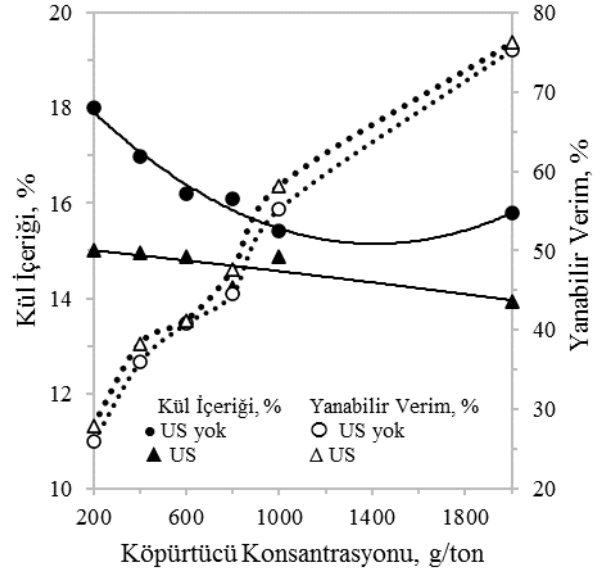
Şekil 3. Ultrasesin güç ve muamele süresine bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkisi

Şekil 4, ultrasonik işlemin toplayıcının farklı konsantrasyonları için linyit süspansiyonunun kolon flotasyonu üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Tüm deneylerde kül içeriği değerleri belirli bir gazyağı konsantrasyonuna (1000 g / ton) kadar azalmış ve ardından gazyağı konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır. Öte yandan, ultrasen işleminin kullanıldığı deneylerde de kül içeriği değerleri toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak benzer şekilde değişmekle birlikte, daha düşük kül içeriği değerleri elde edilmiştir. Ultrasen muamelesinin uygulandığı deneylerde kül içeriğindeki azalma ultrasonik işlemin temizleme etkisine bağlanabilir. Mao ve diğerleri (2019b), tarafından yapılan flotasyon çalışmasında da benzer sonuçlar kaydedilmiştir [14]. Bu çalışmada ultrasonik ön işlemin geleneksel flotasyona göre kül içeriğini daha fazla azalttığını belirtmişlerdir. Çelik (1989) tarafından yapılan çalışmada ultrasonik ön işlemin hidrofobik katı yüzey üzerinde temiz yüzeyler ve mikro kabarcıklar oluşturduğunu ve kabarcık-partikül bağlanmasında artışa neden olduğunu belirtmiştir. Ghadyani ve diğerleri (2018), ultrasonik ön işlemin yüksek kül içerikli kömürün flotasyon üzerindeki etkisini araştırdılar ve SEM analizi sonuçlarına göre, organik olarak zengin parçacıkların yüzeyinin, işlenmemiş numunelere kıyasla görünüşte daha temiz olduğunu göstermişlerdir [10]. Xu ve diğerleri (2017), kömür yüzeyindeki hidrofilik oksitlenmiş tabakanın, kömürün flotasyonunu ve verimini iyileştiren ultrasonik işlemin kaviteasyon etkisiyle uzaklaştırıldığını belirtmişlerdir [9]. Öte yandan, kömür süspansiyonunun yanabilir verim değerleri 1000 g/ ton toplayıcı konsantrasyonunda en yüksek değerine ulaşmış, ancak daha yüksek toplayıcı konsantrasyonlarında ise azalmıştır. Şekil 4 den görüldüğü gibi ultrasen muamelesi kömür süspansiyonunun yanabilir verim değerlerini artırmıştır. Flotasyon çalışmalarında, ultrasen ürettiği kaviteasyon etkisiyle birçok küçük kabarcıkların oluştuğu ve bu kabarcıkların flotasyon işlemine yardımcı olarak flotasyon verimliliğinde artışa neden olduğu belirtilmiştir [13-15,33,34].



Şekil 4. Ultrasonik işlemin toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verim üzerine etkisi

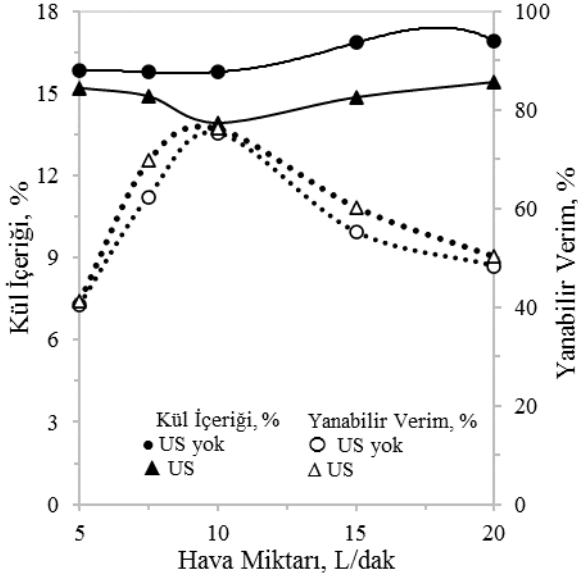
Şekil 6, ultrasonik işlemin, köpürtücü konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak kömür süspansiyonunun flotasyon üzerindeki etkisini göstermektedir. Klasik flotasyon deneylerinde, köpürtücü dozajına bağlı olarak kül içeriği değerleri azalmış ve yanabilir verim değerleri artmıştır. Ultrasonik işlem kullanılarak yapılan deneylerde, köpürtücü dozajının kül içeriği ve yanabilir verim değerleri üzerindeki etkisi benzerdi, ancak daha başarılı sonuçlar elde edildi. Köpürtücü konsantrasyonuna bağlı olarak ultrasonik işlemin yanabilir verimi artırması köpürtücünün süspansiyon içerisinde daha iyi dağılmasına bağlanabilir. Ultrasonik işlem uygulanan flotasyon deneylerinde flotasyon başarısındaki artış, mineral yüzeyin geçici kaviteasyon etkisi ile temizlenmesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin süspansiyonda daha iyi dağılım sağlamasına bağlanabilir [9,10,13,14,18,19].



Şekil 5. Ultrasonik muamelesinin köpürtücü konsantrasyonuna bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi üzerine etkisi

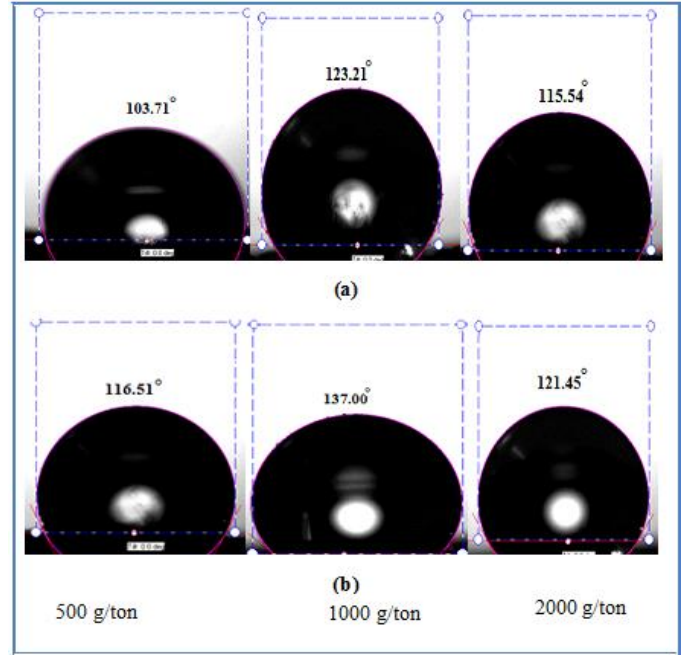
Şekil 6. Hava hızının kolon flotasyonu üzerindeki etkisini sunmaktadır. Kolon flotasyonunda, flotasyon başarısını etkileyen parametrelerden biri hava hızıdır. Şekilden görülebileceği gibi, 10 L/dak hava hızına kadar kül içeriği değerleri azalmış, yanabilir verim değerleri artmıştır. Ancak hava hızının daha yüksek seviyelere çıkarılması kül içeriğinin artmasına dolayısıyla yanabilir verimin de azalmasına yol açmıştır. Yüksek hava hızlarında yanabilir verimin azalması, kolon içerisinde fazla hava nedeniyle kabarcıkların birleşmesine ve kabarcık yüzey alanının azalmasına bağlanabilir. Literatürden, hava hızı artmasıyla verimin maksimum noktaya ulaştığı, ancak kritik bir noktadan sonra aşırı kül artması nedeniyle azaldığı bilinmektedir [35-38]. Sonuç olarak sistem için en uygun hava hızı 10 L/ dak'dır. Bu hava hızında yanabilir madde verimi en yüksek değerini almış olup, %76,25 olarak bulunmuştur. Ultrasonik işlem kullanılarak yapılan deneylerde, hava hızına bağlı olarak kül içeriği ve yanabilir verim değerleri eğrisi benzer şekilde değişim göstermekle

birlikte daha yüksek verim ve daha düşük kül içeriği değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6. Hava hızına bağlı olarak kömürün kül içeriği ve yanabilir verimi

Şekil 7, (a) ultrasonik işlem uygulanmamış ve (b) ultrasonik işlem uygulanmış kömür süspansiyonunun farklı toplayıcı konsantrasyonu değerleri için temas açısı ölçüm sonuçlarını vermektedir. Kömür süspansiyonunun temas açısı değerleri, gazyağı konsantrasyonuna bağlı olarak artmıştır, ancak bu artış, ultrases muamelesinin uygulandığı deneylerde daha yüksek olmuştur. Şekil 7'de görüldüğü gibi, klasik deneylerde temas açısı değeri 123.21 ° iken, 1000 g/ton gazyağı konsantrasyonunda ultrasonik işlem ile 137 °'ye yükselmiştir. Benzer sonuçlar, Güngören ve diğerleri (2020), tarafından da elde edilmiş ve bu çalışmada ultrasonik işlemin belirli çalışma koşullarında temas açısını artırdığını belirtmişlerdir. Ultrasonik işlemin galen flotasyonu üzerindeki etkisi Güngören ve diğerleri (2020) tarafından araştırılmış ve 2 dakikalık kondisyonlama süresi boyunca ultrases kullanılmadan yapılan deneylerde 43° olan temas açısı değerinin kondisyonlama sırasında ultrases uygulanması ile 55 °'ye yükseldiğini kaydetmişlerdir [39]. Xu ve diğerleri (2017), oksitlenmiş kömürün temas açısının belirli bir ultrasonik ön işlem süresinin uygulanmasıyla arttığını, ancak işlem süresinin uzamasından olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir [9]. Ultrasonik muamele ile temas açısındaki artışın nedeni literatürde henüz ayrıntılı bir şekilde açıklanmamıştır, ancak bu artış, toplayıcı ile mineral yüzey arasında köprü oluşturan kaviteasyon kabarcıklarına bağlanabilir. Zhou ve diğerleri (2009), tarafından yapılan flotasyon çalışmasında hidrodinamik kaviteasyon ile üretilen küçük kabarcıkların katıların temas açılarını artırdığını ve oksit tabakasını çıkararak reaktif tüketimini azalttığını tespit etmişlerdir [40]. Kurşun ve Ulusoy (2015, ayrıca hidrofobik partiküllere yapışan kaviteasyon kabarcıklarının temas açısını artırarak kabarcık-partikül çarpışma verimliliğini artırdığını ve böylece flotasyon veriminde de artışa neden olduğunu belirtmişlerdir [41].



Şekil 7. Ultrases muamelesinin toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak temas açısı üzerine etkisi

## Sonuçlar

Bu çalışmada ultrasonik enerjisinin yüksek kül içerikli linyit kömürünün kolon flotasyonu performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ultrasonik ön işlemin kolon flotasyonunda uygulanması kömürün kül içeriği değerlerini azaltmış ve yanabilir verim değerlerini artırmıştır. Ayrıca, ultrases güç değerleri ve muamele süreleri, kömürün kolon flotasyonu başarısını önemli ölçüde etkilemiş ve düşük güç değerinde kısa süreli ultrasonik işlem ile daha olumlu bir etki elde edilmiştir. Optimum gazyağı konsantrasyonunun 1000 g/ton olarak bulunmuş ve yüksek konsantrasyonlarda gazyağı kullanımını kül içeriğinde artışa ve yanabilir verimde azalmaya yol açmıştır. En düşük kül içeriği ve en yüksek yanabilir verim, 2000 g/ton köpürtücü konsantrasyonunda elde edilmiştir. Ultrasonik işlem köpürtücü ve toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak flotasyon başarısını iyileştirmiştir. Bu iyileşme, ultrasonik işlemin mineral yüzeyini kaviteasyon etkisi ile temizlemesine ve dolayısıyla flotasyon reaktiflerinin aktivitesinin artmasına ve süspansiyonda daha iyi dağılmasına bağlanmıştır. Kolon flotasyonu için 10 L/dak hava hızı yeterli olmuş, ancak daha yüksek hava hızları kömür süspansiyonunun kül içeriğini artırmış ve yanabilir verim değerlerini azaltmıştır. Kömür süspansiyonunun temas açısı değerleri, toplayıcı konsantrasyonun artmasıyla artmıştır ve ultrasonik işlem ile daha yüksek temas açısı değerleri elde edilmiştir. Temas açısı ölçümleri kolon flotasyon sonuçlarını desteklemektedir.

## Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Bu makalenin yazarı bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

## Yazar Katkıları

Yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

## Kaynaklar

- [1] B. Yarar, "Flotation," *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, vol B2, pp 23-28. 1988.
- [2] M.S. Celik, "Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena", *Sep. Sci. Technol.*, vol. 24 pp.1159–1166, 1989.
- [3] T.G. Leighton, "The Acoustic Bubble", Academic Press, London, 1994.
- [4] S.G. Ozkan, and H.Z. Kuyumcu, "Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation", *Int. J. Miner. Process.*, vol. 81, pp. 201–203, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011>
- [5] S.G. Ozkan, and H.Z. Kuyumcu, "Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 14, pp. 639–645, 2007 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001>
- [6] M. Ashokkumar, "The characterization of acoustic cavitation bubbles – an overview", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 18, pp. 864–872, 2011.
- [7] S.G. Ozkan, "Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes", *Fuel*, vol. 93, pp. 576–580, 2012.
- [8] S.G. Ozkan, "Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation", *Minerals*, vol. 7, p.177, 2017. <https://doi.org/10.3390/min7100177>
- [9] M. Xu, Y. Xing, X. Gui, Y. Cao, D. Wang, and L. Wang, "Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation", *Energy Fuels*, vol. 31, pp. 14367–14373, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
- [10] M. Ghadyani, S. Noaparast, and S.Z. Tonkaboni, "A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics a study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics", *Int J Coal Prep Util.*, vol. 38, pp. 374-391, 2018. <https://doi.org/10.1080/19392699.2016.1277210>
- [11] Y. Peng, Y. Mao, W. Xia, and Y. Li, "Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism", *Fuel*, vol. 220, pp. 558–566, 2018.
- [12] Y. Mao, Y. Peng, X. Bu, G. Xie, E. Wu, and W. Xia, "Effect of ultrasound on the true flotation of lignite and its entrainment behavior", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 40, pp. 940–950, 2018.
- [13] Y. Mao, W. Xia, Y. Peng, and G. Xie, "Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review", *Fuel Process. Technol.*, vol. 195, p.106150, 2019a.
- [14] Y. Mao, Y. Chen, X. Bu, and G. Xie, "Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force", *Fuel*, vol. 256, p. 115938, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938>
- [15] Y. Mao, X. Bu, Y. Peng, F. Tian, and G. Xie, "Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite", *Fuel*, vol. 259, p. 116270, 2020.
- [16] Y. Chen, G. Xie, J. Chang, J. Grundy, and Q. Liu, "A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound", *Fuel*, vol. 248 pp. 38–46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.030>
- [17] A.R. Videla, R. Morales, T. Saint-Jean, L. Gaete, Y. Vargas, and J.D. Miller, "Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery", *Miner. Eng.*, vol. 99, pp. 89–95, 2016.
- [18] Y. Chen, V.N.T. Truong, X. Bu, and G. Xie, "A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 60, p. 104739, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
- [19] P. Kopparthi, S. Balamurugan, and A.K. Mukherjee, "Effect of ultrasonic pre-treatment time on coal flotation". *International Journal of Coal Preparation & Utilization*, vol. 40, pp. 807-823, 2020. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1417268>
- [20] ASTM D 3173–03, 2010, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, 3.
- [21] ASTM D 3174–04, 2010, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, 5.
- [22] ASTM D 5865–10a, 2010, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, 14.
- [23] N.E. Altun, J.Y. Hwang, and C. Hicyilmaz, "Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment", *Int. J. Miner. Process.*, vol. 91, pp. 1–13, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003>
- [24] C. Gungoren, O. Ozdemir, X. Wang, S. Ozkan, and J. Miller, "Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system", *Ultrason. Sonochem.*, vol. 52, pp. 446–454, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.023>
- [25] S.A. Hassanzadeh, S.A. Sajjadi, H. Gholami, S. Amini, and S.G. Ozkan, "An Improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and cleaner stages of copper flotation", *Minerals*, vol. 10, p. 619, 2020. <https://doi.org/10.3390/min10070619>
- [26] W.Z. Kang, H.X. Xun, and J.T. Chen, "Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation". *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 17, pp. 358-362, 2007. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60105-9)
- [27] E.Y. Yazıcı, H. Deveci, I. Alp, and T. Uslu, "Generation of hydrogen peroxide and removal of cyanide from solutions using ultrasonic waves". *Desalination*, vol. 216, pp. 209–221, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.018>
- [28] B. Ambedkar, T.N. Chintala, R. Nagarajan, and S. Jayanti, "Feasibility of using ultrasound- assisted process for sulfur and ash removal from coal". *Chem. Eng. And Process: Process Intensif*, vol. 50, pp. 236–246, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.008>
- [29] B. Ambedkar, "Ultrasonic coal-wash for de-ashing and de-sulfurization: Experimental investigation and

- mechanistic modeling”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [30] M.M. Royaei, E. Jorjani, and S.C. Chelgani, “Combination of microwave and ultrasonic irradiations as a pretreatment method to produce ultraclean coal”. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 32, pp. 143–155, 2012. <https://doi.org/10.1080/19392699.2012.663024>
- [31] H.X. Zhang, H.J. Bai, X.S. Dong, and Z.Z. Wang, “Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sono electrochemical method”. *Fuel Processing Technology*, vol. 97, pp. 9–14, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.005>
- [32] Q. Cao, J. Cheng, Q. Feng, S. Wen, and B. Luo, “Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite”, *Powder Technol.*, vol. 311, pp. 390–397, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.069>
- [33] K. Yasuda, H. Matsushima, and Y. Asakura, “Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation”. *Chemical Engineering Science*, vol. 195, pp. 455–461, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>
- [34] H. Wang, W. Yang, X. Yan, L. Wang, Y. Wang, and H. Zhang, “Regulation of bubble size in flotation: A review”. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, p. 104070, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104070>
- [35] J.A. Finch, and G.S. Dobby, “Column flotation”, Pergamon Pres, Oxford. 1990.
- [36] D. Tao, G.H. Luttrell, and R.H. Yoon, “A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles”, *International Journal of Mineral Processing*, vol.59, pp.25-43, 2000.
- [37] H. Sutcu, T. Toroglu, and O. Dalahmetoglu, “Recovery of coal from waste fines by column flotation”, *Journal of Solid Waste Technology and Management*, vol.29, No.3, pp.168-178, 2003.
- [38] H. Hacifazlıoğlu, and H. Sutcu, “Optimization of some parameters in column flotation a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance”, *Journal of The Chinese Institute of Chemical Engineers*, vol.38, pp.287- 293i 2007.
- [39] C. Gungoren, Y. Baktarhan, I. Demir, and S.G. Ozkan. “Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 30, pp. 1102–1110, 2020. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65281-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65281-5)
- [40] Z.A. Zhou, Z. Xu, J.A. Finch, J.H. Masliyah, and R.S. Chow, “On the role of cavitation in particle collection in flotation – A critical review”. II, *Miner. Eng.*, vol. 22, pp. 419–433, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.010>
- [41] H. Kursun, and U. Ulusoy, “Zinc recovery from a lead–zinc–copper ore by ultrasonically assisted column flotation”, *Particul. Sci. Technol.*, vol. 33, pp. 349–356, 2015. <https://doi.org/10.1080/02726351.2014.970314>