

Ultrases Dalgasının Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme İşlemlerinde Uygulamaları

Kiraz EŞMELİ^{1*}

¹ Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye
*¹ kesmeli@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 06.02/2024;

Kabul/Accepted: 25/02/2024)

Öz: Ultrases dalgası, maddesel bir ortama ihtiyaç duyarak insan işitme limitinin üzerindeki frekanslarda yayılan bir ses dalgasıdır. Ultrases dalgası sıvılar içerisinde yayıldığında kavitasyon adı verilen kabarcıklar oluşturur. Kavitasyon kabarcıkları ultrasonik işlemin en önemli özelliğidir. Ultrases dalgası, endüstrinin birçok alanında kullanılmasının yanısıra cevher hazırlama ve zenginleştirme de kullanım alanı bulmuştur. Ultrases dalgası başta flotasyon olmak üzere öğütme, liç, katı-sıvı ayırımı, aglomerasyon, flokülasyon gibi cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde kullanılmıştır. Literatürde ultrasonik işlem farklı cihazlar, frekanslar, yöntemler kullanılarak flotasyonun değişik aşamalarında ve farklı minerallerin flotasyonunda uygulanmıştır. Flotasyon ile yapılan çalışmaların çoğu kömür flotasyonu üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada ultrases dalgalarının özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, literatürde yer alan ultrasonik işlemin cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde kullanımı ile ilgili daha önceki çalışmalar derlenmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ultrases, kavitasyon, flotasyon, liç, sedimentasyon.

Applications of Ultrasound Wave in Mineral Preparation and Processing

Abstract: Ultrasound, a sound wave that spreads at frequencies above the human hearing limit, requiring a material medium. When ultrasound is propagated in liquids, it creates bubbles called cavitation. Cavitation bubbles are the most important characteristic of ultrasonic processing. In addition to being used in various fields of industry, ultrasonics has also found application in ore preparation and mineral processing. Ultrasound is a sound wave that propagates at frequencies above the limit of human hearing and requires a material medium. When ultrasound is propagated in liquids, it creates bubbles called cavitation. Cavitation bubbles are the most important characteristic of ultrasonic processing. In addition to being used in various fields of industry, ultrasonics has also found application in ore preparation and enrichment. Ultrasonic processing has been used in ore preparation and enrichment processes such as flotation, grinding, leaching, solid-liquid separation, agglomeration, and flocculation. In the literature, ultrasonic processing has been applied to different stages of flotation and flotation of different minerals using different devices, frequencies, and methods. Most of the studies on flotation have been conducted on coal flotation. In this study, the properties of ultrasound waves were studied in detail. In addition, previous studies on the use of ultrasonic processing in ore preparation and enrichment processes in the literature have been compiled and their results have been interpreted.

Keywords: Ultrasound, Cavitation, Flotation, Leaching, Sedimentation.

1. Giriş

Yeni madencilik rezervlerinin keşfi ve maden yataklarının ekonomik olarak işletilmesi, cevher hazırlama teknolojilerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Madenlerin ekonomik olarak işletilmesi cevher hazırlama teknolojisine bağlıdır. Ülkelerin ekonomik gelişimi doğal kaynakların yüksek katma değerle kullanılmasına ve madencilik üretimlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, cevher hazırlama ve zenginleştirme sürecinin önemi artmaktadır; çünkü bu süreç, cevherdeki mineralleri endüstrinin ihtiyaçlarını karşılayacak hale getirmek için yapılan işlemleri kapsar [1]. Bu nedenle, zenginleştirme işlemlerinin geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır ve ultrasonik işlem kullanımı da bu çalışmalar içerisinde kendine yer bulmuştur.

Ses dalgaları, madde içinde titreşim hareketi yaparak ilerler. Bu titreşim hareketinin frekansı, insan kulağının duyabilme yeteneğini belirler. İnsan kulağının duyamadığı frekanslardaki ses, ultrasonik, ultrases veya sesötesi olarak adlandırılır. 20 kHz'nin üzerinde frekansa sahip mekanik titreşim dalgasına ultrasonik dalga denir; ultrasonik kavitasyon etkisi, minerallerin özelliklerini veya durumunu değiştirmektedir. Ultrasonik titreşim genellikle malzemelerin fiziksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılırken, aynı zamanda tıbbi tasarımlarda,

* Sorumlu yazar: kesmeli@ktun.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5699-5199.

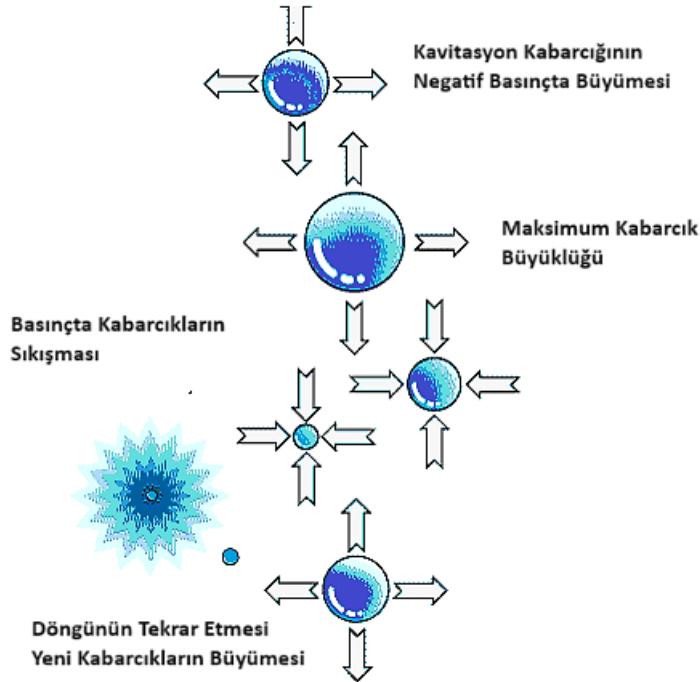
malzeme test yöntemlerinde, temizleme süreçlerinde, kaynak (eritme) süreçlerinde ve birçok endüstride emülsiyonlarda parçacık stabilitesi sağlamak için de kullanılır [2,3].

Son yıllarda, mineral zenginleştirme alanında ultrasonik işlem kullanımı daha fazla dikkat çekmiş ve özellikle kömür flotasyonu üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır [4-17]. Akustik kavitasyonun, kolektör etkisini artırarak parçacık yüzeylerini temizlemesi ve böylece şlam kaplamalarını azaltması, ultrasonik işlemin flotasyon çalışmalarında başarılı olmasının nedenlerinden biri olarak belirtilmiştir [18-20]. Ayrıca, ultrasonik kavitasyon sonucu oluşan mikro kabarcıkların kömür-kabarcık yapışma verimini artırmak için potansiyel olduğu da belirtilmektedir [5]. Öte yandan, ultrasonun fiziksel ve kimyasal etkileri henüz açıklanmamıştır. Farklı ultrasonik yoğunluklar ve sürelerle ve farklı yöntemlerle (ön işlem ve eşzamanlı) kullanımı farklı sonuçlara yol açmıştır.

Bu çalışmada öncelikle ultrasonik ses dalgaları ve özellikleri hakkında bilgi verilecek, ardından ultrasonik işlemin cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde kullanımı ile ilgili yapılmış literatürde bulunan önceki çalışmalar derlenip, yorumlanıp, sonuçlar karşılaştırılacaktır.

2. Ultrasonik Kavitasyon Kabarcıkları

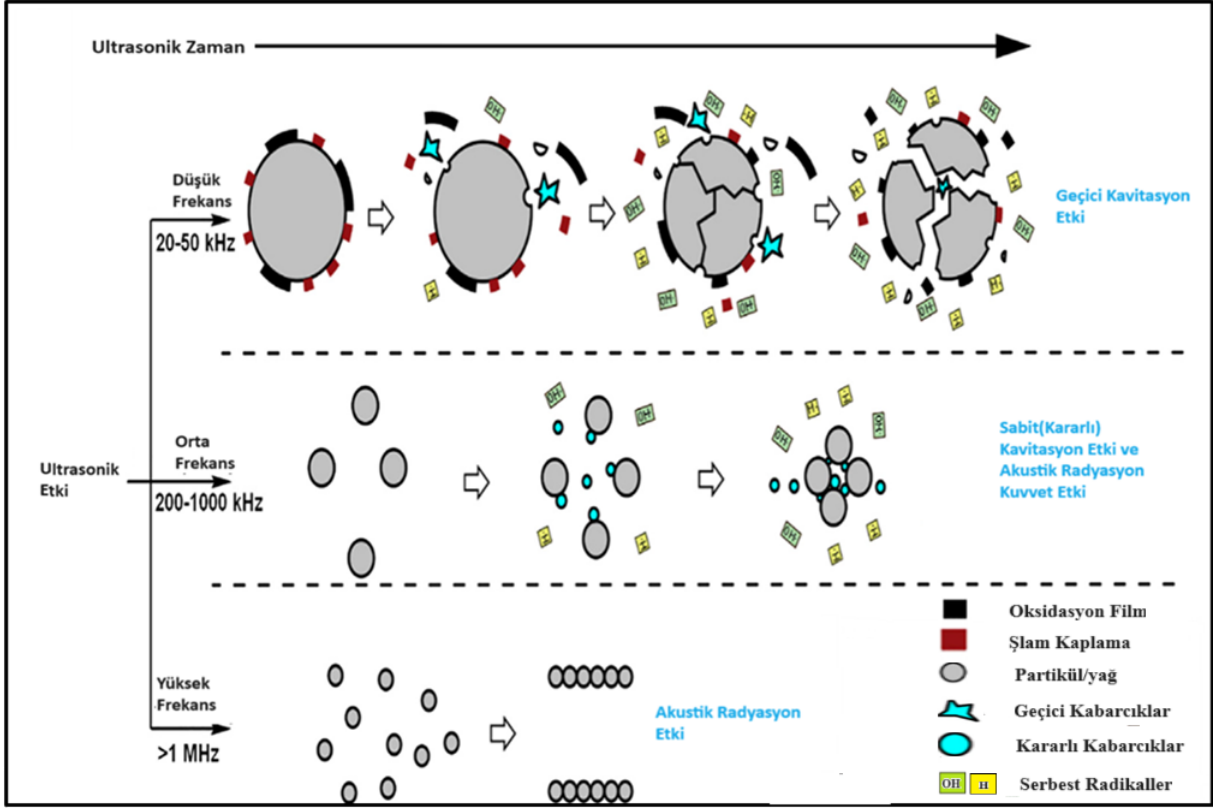
Ultrases dalgası, ardışık sıkıştırma ve seyreltme döngülerinden oluşan üç boyutlu bir basınç dalgasıdır. Seyreltme döngüsü negatif basınca sahiptir ve takip eden sıkıştırma döngüsü pozitif basınca sahiptir. Seyreltme döngüsü, sıvıyı bir arada tutan ara moleküler kuvvetleri aşarak mikro kabarcıkların oluşumuna neden olur, ardından sıkıştırma döngüsü anlık olarak lokalize bir enerji patlaması meydana getirir. Bu olay, kavitasyon olarak adlandırılmaktadır [20-22].



Şekil. 1. Kavitasyon Kabarcıklarının Oluşumu [23]

Kavitasyon kabarcıkları "geçici kavitasyon" ve "kararlı kavitasyon" olmak üzere iki türe ayrılır [24]. Geçici kavitasyon kabarcıkları, boyutları genişlemesinden sonra pozitif basınç yarı döngüsünde şiddetli bir şekilde çöker ve birçok küçük kabarcığa bölünür. Kararlı kavitasyon kabarcıkları ise bir çekirdek olarak başlar ve difüzyonu düzeltmeyle büyür. Kavitasyon kabarcıklarının yapısı, kabarcıklar ile partiküller arasındaki mineralizasyon verimliliği açısından önemlidir [24,25]. 20 ila 40 kHz frekans aralığındaki düşük frekansta ultrasonik, özellikle

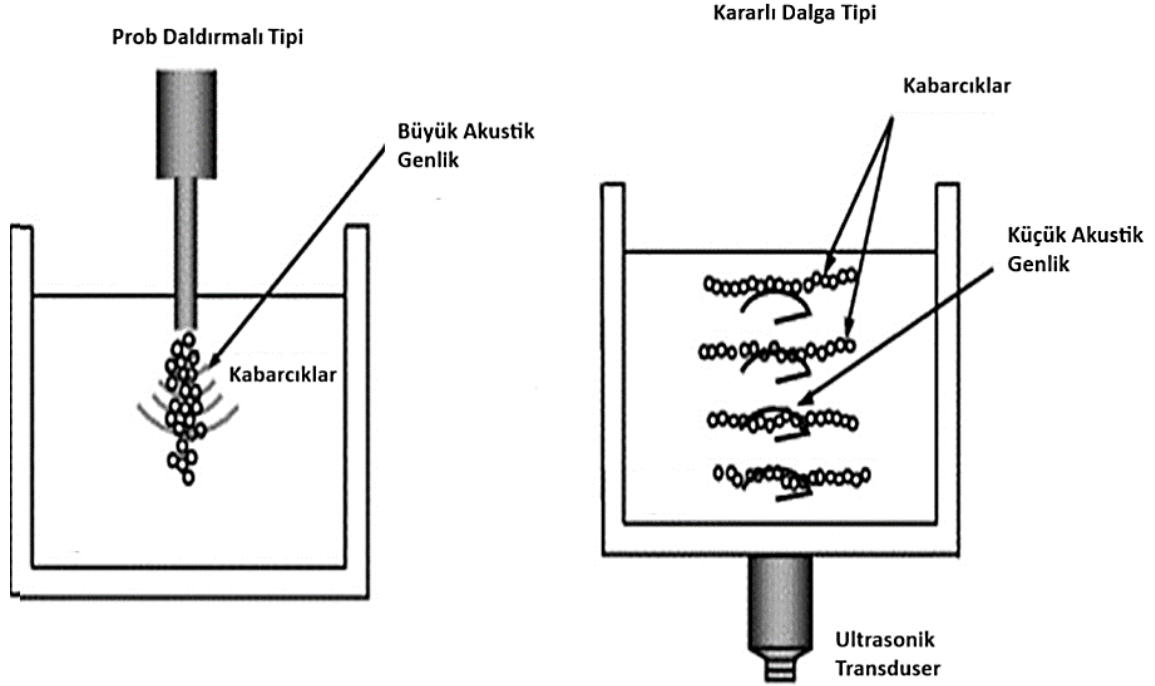
kavitasyon etkisiyle işlem sonuçlarına etki ederken, 400 kHz ve 1 MHz üzerindeki akustik akıntı etkisi belirleyici bir rol oynar. Literatürde yapılmış çalışmalara göre, düşük frekanslı bir ultrasonik işlem, küçük hacimlerde akustik enerjiyi yoğunlaştırma özelliği nedeniyle cevher zenginleştirme süreçlerinde etkin olabileceği belirtilmiştir [26]. Bu nedenle, kavitasyon, ince kömürün flotasyon performansını artırmak için başlıca mekanizma olarak kabul edilmektedir.



Şekil. 2. Kavitasyon Kabarcıkları [17]

2.1. Ultrasonik işlem cihazları ve uygulama metotları

Ultrasonik işlem pratikte ultrasonik problar ve banyolar olmak üzere iki farklı cihaz ile uygulanır. Ultrasonik prob tarafından üretilen ses dalgaları, korna tipi dalgalar olarak da adlandırılan trompet benzeri görünürler. Dalgaların türü, prob konumunda en yüksek genliği üretir ve bu nedenle çok güçlü mekanik ve kimyasal etkiler elde edebilir (Şekil 3a). Ultrasonik banyolarda ise ultrasonik dönüştürücüler genellikle banyo haznesinin alt kısmına konumlandırılmıştır [25,27-29]. Prob tipi ultrasonik ekipmanla karşılaştırıldığında, banyo tipi ultrasonik ekipmanın en büyük özelliği, sensör tarafından üretilen duran dalgaların paralel yayılım olmasıdır. (Şekil 3b).



Şekil 3. Farklı ultrasonik cihazlar tarafından üretilen dalga formları [29]

Ultrasonik ön işlem ve eşzamanlı muamele minerallerin flotasyonunun iyileştirmek için kullanılan iki yaygın yöntem olarak bilinmektedir. Ultrasonik ön işlem tekniği, flotasyondan önce ön koşullanma sürecinde uygulanmaktadır. Mineral tanecığının yüzeyi geçici kavitasyon etkisi ile temizlenmekte ve süspansiyon içine eklenen flotasyon reaktifleri, mineral yüzeyi ile daha iyi bir bağ oluşturmak için yeterince dağılma sağlayarak flotasyon başarısını artırmaktadır. Flotasyondan önce ultrason uygulaması, kabarcıkların yükselmesi için orta derecede bir akış alanı sağlamaktadır. Flotasyondan bağımsız bir süreç olan ultrasonik ön işlem yönteminde, ultrasonik uygulama süresi ve yoğunluğu kolayca ayarlanabilmektedir. Ultrasonik işlem eş zamanlı uygulama yöntemi ultrasonik ön işlem ile karşılaştırıldığında, ultrasonik işlemin geleneksel flotasyon kabarcıkları üzerindeki etkisi daha belirgin olmaktadır [17,29]. Ultrasonik eş zamanlı uygulama tekniği, geleneksel flotasyon kabarcıklarını daha küçük bir boyuta böler, bu da ince partiküllerin flotasyonunu artırmaya yardımcı olmaktadır. Ancak, ultrason yoğunluğu aşırı büyük olduğunda kabarcıklar, reaktif ve tanecikler arasındaki ayrılma olasılığı da önemli ölçüde artmaktadır. Bu yöntemin daha çok kimyasal kollektör adsorpsiyon gerektiren mineral flotasyonu için faydalı olduğu belirtilmiştir [15,16].

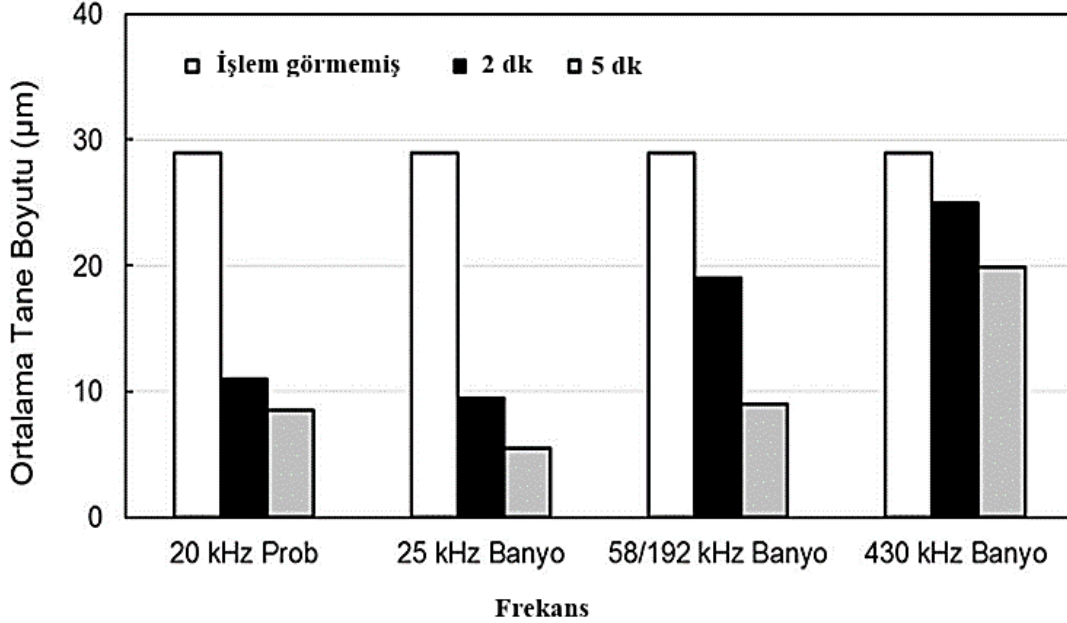
3. Ultrasesin Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme İşlemlerinde Kullanımı

3.1. Öğütme işleminde kullanımı

Yerkovic vd. [30] yaptıkları çalışmada, Şili porfiri bakır cevherinin ultrasonik işlem etkisi altında öğütülmesi konusunda farklı sonuçlara ulaşmışlardır. Araştırmada, kömür ve kireçtaşı gibi yumuşak malzemelerin yanı sıra, daha sert olan bakır cevherlerinin de ultrasonik merdaneli öğütücüyle başarılı bir şekilde öğütebileceği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, bakır cevherlerinin öğütülmesi için umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Gaeto- Garretton vd. [31] tarafından yapılan çalışmada, araştırmacılar öğütme işlemi için ultrasonik titreşimin kullanılabilirliğini incelemiştir. Ultrasonik enerji uygulamasıyla normal öğütme koşulları karşılaştırıldığında, ultrasonik titreşimin daha az enerji harcadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ambedkar vd. [26] çalışmalarında ultrasonik işlemin farklı frekans değerlerine bağlı olarak kömür tane boyutuna etkisini araştırmışlar ve düşük frekanstaki ultrasonik işlemin kısa sürelerde uygulanmasıyla ortalama tane boyutunu azalttığını belirtmişlerdir. (Şekil 4).



Şekil 4. Ultrasonik frekansın farklı sürelerde kömür tane boyutu üzerine etkisi [26]

Kömür üzerinde yapılan başka bir çalışmada Kang vd. [32] ultrasonik işlemin tane boyutuna etkisini saptamak amacıyla ultrasonik işlemden önce ve sonra elek analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak, ultrasonik enerjinin kömürün tane boyutunu küçültmede daha etkili olduğunu not etmişlerdir.

Toraman [33] tarafından yapılan çalışmada, ultrasonik işlem kullanılarak kalsit cevheri üzerinde yapılan muamelelerin, partikül büyüklüğünün azaltılmasında başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen ince partiküllerin daha homojen, düşük boyutlu ve yüksek yüzey alanına sahip olduğu belirtilmiştir. Ultrasonik işlemin kalsit cevherinin öğütülmesini kolaylaştırdığı ve endüstriyel uygulamalarda avantaj sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

3.2. Susuzlandırma işlemlerinde kullanımı

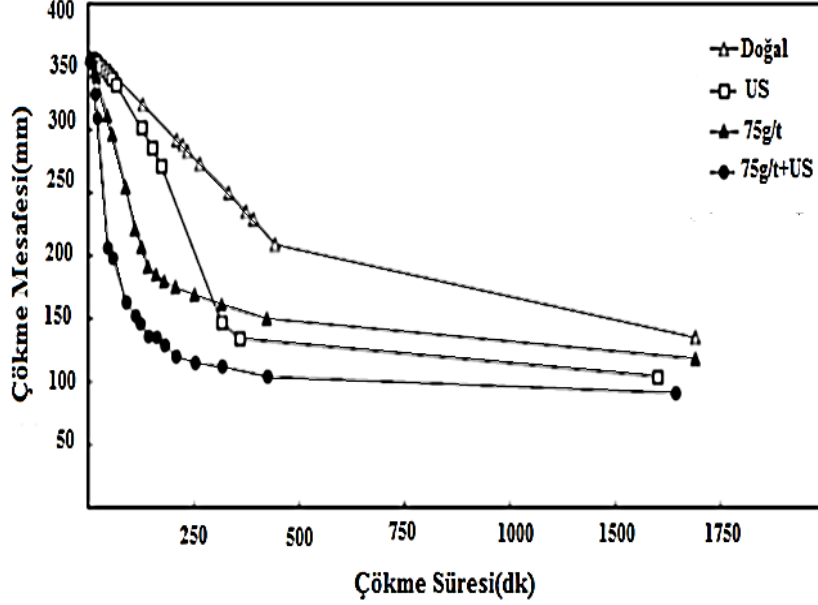
Singh [34], vakum filtrasyonunda ince kömür susuzlandırma verimini artırmak için sonik dalgaların etkileri üzerine bir araştırma yapmıştır ve optimum koşullar altında, atık kek neminin azaldığını ve filtrasyon hızının da arttığını belirtmiştir.

Swamy vd. [35] çalışmalarında, susuzlandırma öncesi taneli örneklerin ses dalgalarının etkisiyle nem içeriğinden arındırılabilmesi araştırılmıştır. Bu çalışmada, manyezit, kalsiyum karbonat, kum ve talaş örnekleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, ultrasonik titreşimin kullanıldığı durumlarda nem içeriğinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, ses dalgalarının taneli örneklerin kurutulmasında etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir.

Riera-Franco de Sarabia vd. [36] tarafında yapılan çalışmada, ince parçacıkları gaz ve sıvı ortamlardan ayırmak için yüksek yoğunluklu ultrasonik kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçları, yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşimin parçacıkların ayrılmasında geleneksel yöntemlere göre daha etkili olduğunu göstermektedir.

Önal vd. [20] tarafından yapılan çalışmada, killerin sedimantasyonu için ultrasonik enerji, flokülant ilavesi ve pülp yoğunluğu gibi faktörlerin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, farklı yerlerden alınan kil örnekleri kullanılmış ve bu örnekler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ultrasonik işlemin sedimantasyon süresini kısalttığını göstermiştir. Yani, kil örnekleri ultrasonik enerjiye maruz kaldığında, çökelme işlemi daha hızlı gerçekleşmiştir. Ayrıca, flokülant ilavesi ve pülp yoğunluğunun da sedimantasyon süresi üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Bu çalışma, killerin susuzlaştırılması sürecinde ultrasonik işlemin kullanımının faydalı

olduğunu ortaya koymaktadır. Ultrasonik enerji, kilin sedimentasyonunu hızlandırarak süreci daha verimli hale getirmektedir. Bu bulgular, sanayide killerin susuzlaştırılması sürecinde ultrasonik işlemin kullanılmasının avantajlı olabileceğini göstermektedir.

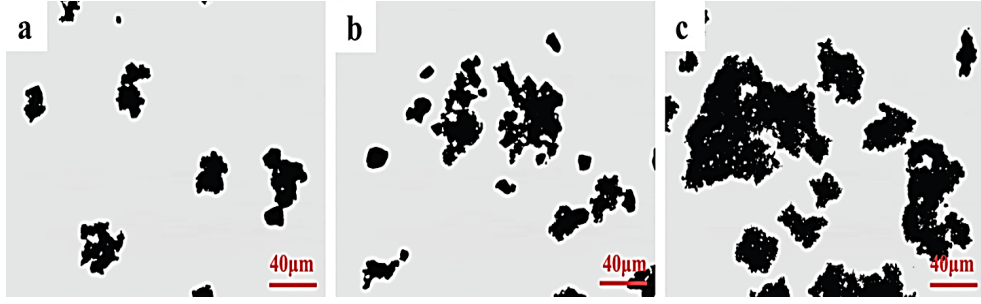


Şekil 5. Kil sedimentasyonu üzerine ultrasonik işlemin etkisi (Flokülant varlığında ve yokluğunda karşılaştırılması [20]).

3.3. Flokülasyon ve yağ aglomerasyonu işlemlerinde kullanımı

Katı sıvı sistemlerinde büyük etkiler gerçekleştiren ultrasonik titreşimin, flotasyon işlemlerinin yanında seçimli flokülasyon ve yağ aglomerasyonu işlemlerinde kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Burat vd. [37], yüksek frekanslı bir titreşimli elek kullanarak ince kömür partiküllerinin susuzlandırmasında ultrasonun etkilerini araştırdılar ve ultrasonik işlem ile daha düşük nem içeriği elde ettiler.

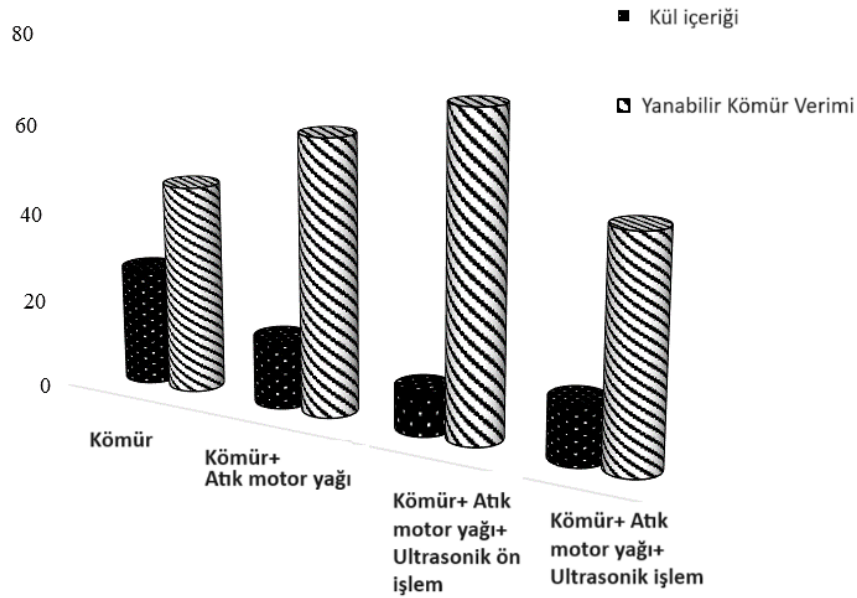
Demir vd. [38] çalışmalarında, Türkiye'nin Ağildere ve Hisarcık bölgelerinin bor atıklarının flokülasyon üzerindeki etkisini, anyonik, katyonik ve non-iyonik flokülantların varlığında incelemiştir ve flokülasyona destek amaçlı ultrasonik işlem kullanılmıştır. Sonuçlar, ultrasonik uygulamanın her iki numunenin çökeltme oranını düşürmesine rağmen, ultrasonik işlem varlığında daha kompakt bir çökelti yatağının oluşması nedeniyle Hisarcık numunesi için daha düşük tortu yatağı yüksekliklerinin elde edildiğini göstermiştir. Ding vd. [39] yaptıkları çalışmada ultrasonik ön muamelesinin flok boyutunda bir artışa (Şekil 6) neden olduğunu, böylece kömür şlam suyunun çökmesini artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ultrasonik ön işlemin, yeni bir aktif yüzey oluşturarak, flokülantın kömür şlam parçacıklarının yüzeyine adsorpsiyonunu artırarak ve parçacık istikrarsızlaşmasını destekleyen parçacık potansiyelini azaltarak kömür şlam parçacıklarının flokülasyonuna ve çökmesine katkıda bulunduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 6. Ultrasonik işlemden önce ve sonra kömür şlam floklarının karşılaştırılması (a: 0 dk, b: 4 dk, c: 8 dk) [39].

Ozkan ve Esmeli [40] kolemanit süspansiyon kararlılığı üzerine ultrasonik işlemin etkisini araştırmışlardır. Deneysel bulgular sonucunda, ultrasonik uygulamanın süspansiyon kararlılığını azalttığını; yani, ultrasonik işlemin kolemanit süspansiyonunun flokülasyonunu arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ozkan ve Esmeli [41] selestitin kollektörlerle gerçekleştirilen makaslama flokülasyon işleminde ultrasonik enerji kullanımını araştırmışlar ve ultrasonik işlemin mineral süspansiyonları için ön faz olarak kullanılması durumunda, ince mineral parçacıklarının flokülasyonunun iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Ancak, ultrasonik işlemin doğrudan aglomerasyon aşamasına uygulandığında (yalnızca ultrason kaynaklı çökeltme), selestit parçacıklarının flokülasyon sürecinin olumsuz etkilendiğini kaydetmişlerdir.

Şahinoğlu ve Uslu'nun [42] çalışmasında, 9.5-72.8 Watt/cm² arasındaki ultrasonik güç değerlerinin kullanıldığı durumlarda, kül uzaklaştırma oranlarının arttığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ultrasonik işlem uygulanan numunenin morfolojik analizi yapılmış ve kömür yüzeyinde bulunan çatlak ve kırıkların ultrasonik muameleden sonra azaldığı kömür yüzeyinden kil ve diğer mineral maddelerin uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, ultrasonik işlemin kavitasyon etkisiyle kömür yüzey üzerindeki oksitlenmiş tabakayı azalttığı ve daha temiz kömür yüzeyleri ve boşlukları oluşturduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlar, daha yüksek ultrasonik güç değerlerinin daha etkili kül uzaklaştırma sağladığını göstermektedir. Esmeli [43] tarafından yapılan atık motor yağı ile kömür aglomerasyon çalışmasında da benzer bulgular kaydedilmiş, yüksek güç değerinde ultrasonik ön işlem uygulanmasının kömür süspansiyonunun kül içeriğini azaltırken, yanabilir verim de de azalmaya yol açtığı kaydedilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verimi [43]

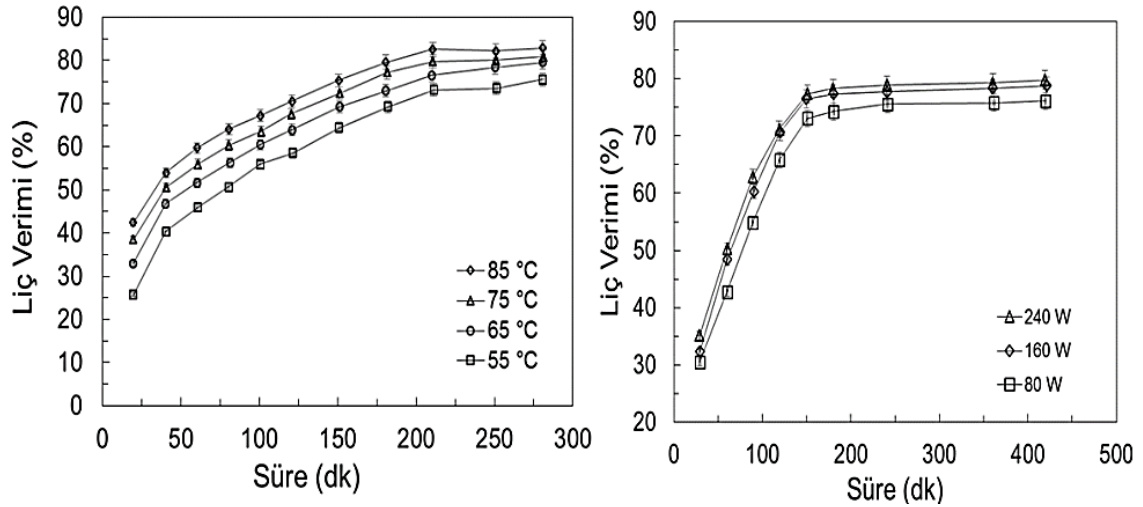
Esmeli [44] çalışmasında ultrasonik işlemin barit cevherinin yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır ve ultrasonik işlemin, baritin yağ aglomerasyonu sürecinde bir ön işlem olarak uygulanması durumunda baritin aglomerasyon verimini arttırmanın yanı sıra oleat ve gazyağı tüketimini de azalttığını kaydetmiştir. Ayrıca ultrasonik işlemin temas açısı değerlerini ultrasonuz yapılan deneylere kıyasla artırdığı belirtilmiştir.

3.4. Liç işlemlerinde kullanımı

Slaczka [45], tarafından yapılan çalışma, karbonatlı çinko cevherlerinin amonyak liçinde ultrasonik enerjinin kullanılmasının etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Ultrasonik alanın uygulanması, liç edilen cevherin yüzeyindeki difüzyon tabakasının kalınlığını azaltarak liçin daha hızlı gerçekleşmesini sağlamıştır. Swamy vd. [46], nikel cevherinin mikrobiyal liç işlemine ultrasonik titreşimin etkisini incelemiştir. Ultrasonik işlem ile gerçekleştirilen mikrobiyal liç işlemi, sıradan asit liçlerinin kullanıldığı işlemlerle karşılaştırılmıştır. Nikel veriminin ultrasonik işlem ile daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ultrasonik titreşimin mikrobiyal liç işleminde etkin bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Ultra ses destekli liç teknolojisi, kalkopirit [47], çinko oksit cevheri [48], nikel laterit cevheri [49], nadir toprak cevheri [50], refrakter altın cevheri [51], refrakter gümüş cevheri [52], kuvars kumu [53], sfalerit [54,55] gibi metal cevherlerinden değerli metallere çıkarılmasında yaygın olarak uygulanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda, ultra ses destekli liçin, geleneksel mekanik karıştırmaya kıyasla, liç verimini artırma, liç süresini kısaltma, kimyasal reaktif tüketimini azaltma vb. konularda büyük potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Wang vd. [56] tarafından yapılan çalışmada ultrasonik etkisinin sülfirik asit liçi üzerine etkisi araştırılmıştır. Şekil 8’ de görüldüğü gibi, liç süresi ve sıcaklığı liç verimini etkilemiştir ve ultrasonik işlemin güç değerlerine bağlı olarak verim de artmıştır.



Şekil.8. Ultrason süresinin liç verimine etkisi [56]

3.5. Flotasyon işlemlerinde kullanımı

Tablo 1, ultrasonik işlemin mineral flotasyonuna etkisi üzerine yapılmış çalışmaları özetlemektedir. Flotasyon çalışmalarında, ultrasonik işlemin olumlu etkisi, ultrasonik işlemin reaktiflerin süspansiyon içerisinde daha homojen dağılım sağlayarak reaktiflerin performanslarını arttırmasına bağlanmıştır [4,20]. Başka bir etki ise akustik kaviteasyonun partikül yüzeylerini temizlemesi ve şlam tabakaların oluşmasını en aza indirgeyerek reaktiflerin etkisini kolaylaştırması ve buna bağlı olarak reaktif tüketimini azaltması olarak açıklanmaktadır.

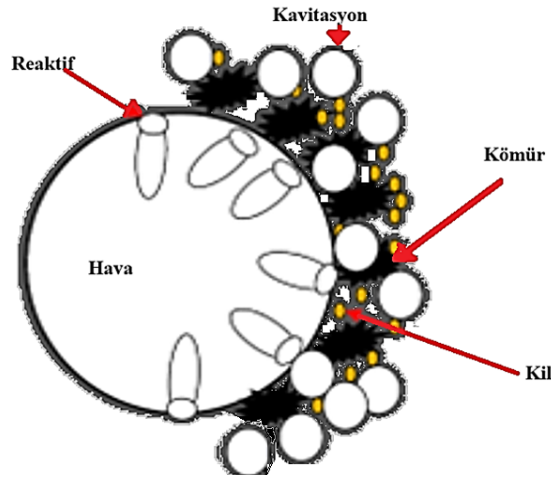
Tablo1. Ultrasonik işlemin mineral flotasyonuna etkisi üzerine yapılmış çalışmalar

Kullanılan cevher	Metot	Sonuç	Referans
Barit-florit-kuvars cevherinden baritin kazanımı flotasyonu	Ultrasonik işlem	Çalışmalar sonucunda, ultrasonik ön işlemin baritin seçimliliğini arttırdığı bulunmuştur.	[46]
Bakır cevheri flotasyonunda	Ultrasonik işlem	Bu çalışmada ultrasonik işlem ile metal veriminde % 6 oranında daha fazla bir iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır.	[57]
Kolemanit flotasyonu	Ultrasonik işlem	Ultrasonik işlem, kolemaniti kaplayan kil taneciklerinin seçimli olarak ayrılmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir.	[4]
Manyezit şamlarının flotasyon ile kazanılması	Ultrasonik eş zamanlı flotasyon	Ultrasonik işlemin köpük alma zamanını ve köpük kararlılığını arttırdığını belirlemiştir.	[58]
Arsenopirit flotasyonu	Ultrasonik ile ön koşullandırma	Ultrasonik işlemin oksitli arsenopiritin oksit tabakasını uzaklaştırarak verimi arttırdığı sonucuna varmışlardır.	[59]
Kuvars -kalsit barit - pirit -galen flotasyonu	Ultrasonik işlem	Ultrasonik işlemin, kalsit, galen ve barit flotasyon verimi üzerinde olumlu etkisi olurken, kuvars flotasyon verimini üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.	[60]
Bakır-demir sülfür cevheri	Ultrasonik eş zamanlı flotasyon	Ultrasonik işlem sayesinde flotasyon seçiciliğinde ve veriminde önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir.	[61]
Barit ve kalkopirit flotasyonu	Köpük bölgesinde ultrasonik işlem	Ultrasonik işlemin mineral seçiciliği üzerine etkisi olduğu ve ultrasonik işlem uygulanmış deneyler ile uygulanmayan deneyler arasında kabarcık dağılımı arasında anlamlı bir fark olduğu ileri sürülmüştür.	[62]
Kolemanit flotasyonu	Ultrasonik ön işlem	Ultrasonik ön muamele sonucunda %49 tenörlü %80 verim değerine sahip kolemanit konsantresi elde edilebilmiştir.	[63]
Kurşun-çinko-bakır cevheri	Ultrasonik ön işlem	Ultrasonik ön işlemin, ultrasonik temizleme banyosunda üretilen kaviteasyon kabarcıkları tarafından salınan enerji nedeniyle çinko flotasyonunda tenörü ve verimi artırmıştır.	[64]
Kuvars-amin flotasyonu	Ultrasonik işlem	Ultrasonik güç değerinin artmasıyla flotasyon verimi %45'ten sırasıyla %64 ve %66'ya çıkmıştır.	[65]
Bakır flotasyonu üzerine ultrasoniğin etkisi	Ultrasonik eş zamanlı flotasyon	Atıklardan bakırın geri kazanılmasında ultrasonik işlem ile % 3.5 artış elde edilmiştir.	[66]
Oksitli Pirit cevheri	Ultrasonik eş zamanlı flotasyon	Ultrasonikasyon, ultrasonun sadece flotasyon sırasında kullanıldığı piritin geri kazanımını önemli ölçüde iyileştirdi. Ek olarak, ultrasonikasyon, flotasyon hücresinde pirit flotasyonu için de faydalı olan ince kabarcıkların oluşumunu artırmıştır.	[67]
Grafit	Ultrasonik ön işlem	Grafit şlamından grafit cevherinin geri kazanımını önemli ölçüde arttırabildiğini buldu.	[68]
Siderit varlığında kuvars flotasyon	Ultrasonik işlem	Kuvars flotasyon verimini ultrasonik işlemle sonra yaklaşık %50 oranında artırmıştır.	[69]
Pirotit-klorit flotasyonu	Ultrasonik ön işlem uygulaması	Ultrasonik ön işlem ile pirotitin kloritten flotasyon ayrımını artırmıştır.	[70]

Zhou vd. [71] çalışmalarında, kavitasyonun ince minerallerin flotasyonu üzerindeki olumlu etkisini iki faktöre bağlamıştır. Birincisi: Kavitasyonun, kabarcıklar arasında köprü oluşturarak tane boyutunun büyümesine sebep olduğunu ve bunun da tane/kabarcık çarpışma olasılığını artırmasıdır. İkinci faktörü ise; Yüzeylerine küçük kabarcıklar yapışmış tanelerin, flotasyon kabarcıklarına daha kolay tutunmasıyla ve mineral tanesine küçük kabarcıkların yapışmasından sonra tane-küçük kabarcık ikilisinin flotasyon boyutundaki kabarcığa tutunup birleşmesiyle açıklamaktadır.

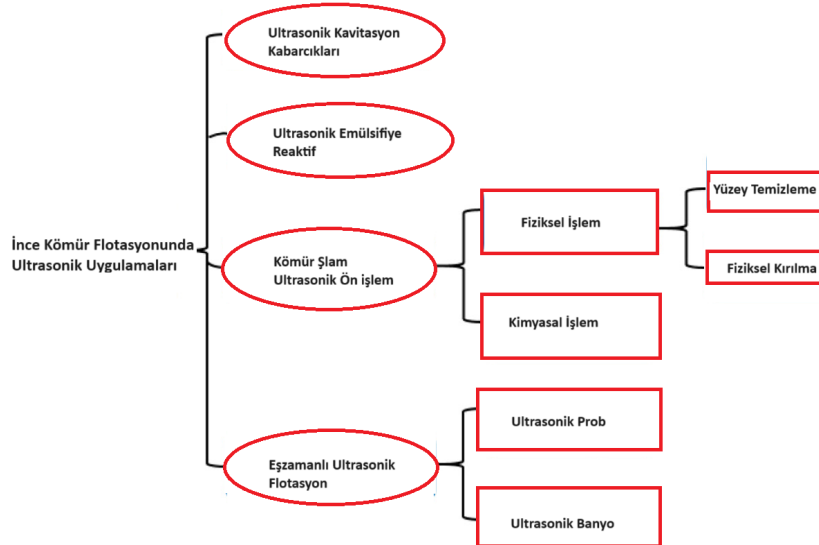
3.5.1. Kömür flotasyonu üzerine ultrasonik işlemin etkisi

Kömür flotasyonunda, ayrılma süreci büyük ölçüde hava kabarcıklarının mineralizasyon düzeyine bağlıdır. Ultrasonik kavitasyonun flotasyon kabarcık boyutu veya köpük tabakası üzerindeki etkisi birçok bilim insanı tarafından da rapor edilmiştir. Ultrasonik etkisi ile oluşan kavitasyon kabarcıklarının kömür üzerindeki fiziksel mekanizması Şekil 9'da gösterilmektedir. Kavitasyon kabarcıkları ikincil bir kollektör görevi yaparak partiküllerin tutunma olasılığını arttırmakta, ayrılma olasılığını ise azaltmaktadır [72].



Şekil 9. Kavitasyon ile ultrason destekli kabarcıkların önerilen mekanizması [72]

Çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen kömür flotasyonunda ultrasonik işlem kullanımına ilişkin çalışmalar Şekil 10'da gösterildiği gibi, ultrasonik kavitasyon kabarcıkları, ultrasonik emülsiyonlaştırılmış reaktif, ultrasonik ön işlem (yüzey temizliği, fiziksel işlem ve kimyasal işlem) ve eş zamanlı gerçekleştirilen ultrasonik flotasyon (ultrasonik prob veya banyo kullanılarak) gibi çalışma alanlarını kapsamaktadır.



Şekil 10. İnce kömür flotasyonunda ultrason uygulaması [13].

Mao vd. [14] tarafından yapılan flotasyon çalışmalarını, ultrasonik ön işlem flotasyonu ve ultrasonik eş zamanlı flotasyonu kapsamaktadır ve ultrasonik ön işlem flotasyonunun geleneksel flotasyona göre kül içeriğini azalttığı, ancak verimde kayda değer bir değişim olmadığı belirtilmiştir. Ancak, ultrasonik eş zamanlı flotasyon yöntemi ile hem kül içeriğinde hem de verimde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca, kömür partiküllerinin pürüzlü yüzeyindeki küçük kabarcıkların kavitasyon davranışı nedeniyle kül içeriğini azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, ultrasonun yüksek güç etkisi nedeniyle kabarcıkların birleştiğini ve küresel şekillerini koruduğu belirlenmiştir ve bu kabarcıklardaki değişikliğin verimde iyileşmenin nedenlerinden biri olabileceğini öne sürmüşlerdir. Özkan ve Kuyumcu [6], eşzamanlı ultrasonik flotasyon sırasında hava kabarcığının, geleneksel flotasyona kıyasla daha homojen ve daha ince olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, kavitasyondan etkilenen kabarcık büyüklüğü ile flotasyon performansı arasındaki ilişki henüz araştırılmamıştır. Li vd. [73] ise ultrasonik eş zamanlı kok kömürü flotasyonunu araştırmış ve geleneksel flotasyona kıyasla daha yüksek yanabilir verim ve daha düşük kül içeriği bulmuşlardır. Ayrıca, taramalı elektron mikroskopuyla ultrasonun, kömürün yüzeyine yapışmış şlamı azalttığını ortaya koymuşlardır.

Xu vd. [9], oksitlenmiş kömür flotasyonu üzerine ultrason ön işleminin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, kömür veriminin başlangıçta arttığını daha sonra artan ultrasonik işlem süresi ile azaldığını belirtmişlerdir. Kömür veriminin başlangıçta artması, oksijenli tabakanın uzaklaştırılmasıyla açıklanmıştır, ancak ardından gelen verim azalmasını, uzun süreli ultrasonik işleme maruz kalması nedeniyle kömür yüzeyinin tekrar oksitlenmesine bağlamışlardır. Kang vd. [74], ultrasonik ön koşullandırmanın yüksek kükürt içerikli kömür flotasyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, ultrasonik işlemin kömür pülpünün yüzey yapısını ve kömürün yüzey yapısını değiştirerek kömür flotasyonunda kükürt giderimini artırdığı belirlenmiştir.

Fan vd. [72] çalışmalarında nano kabarcıkların flotasyona etkilerini, tane boyutu, tane yoğunluğu ve yüzebilirlik özelliklerine bağlı olarak araştırmıştır. Bu çalışmada, mekanik ve kolon flotasyonunda nano kabarcık kullanımının flotasyon verimini %8 ile %27 değerleri arasında bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Peng vd. [8], kavitasyon tarafından üretilen mikro-kabarcıkların varoluşsal durumunu nitel olarak analiz etmişlerdir. Ultrasonik uygulama ve köpürtücü eklenmeksizin yapılan deneyler ile ultrasonik uygulaması olmayan deneyler arasında kabarcık durumu açısından önemli bir fark olmadığını bulmuşlardır. Ancak, flotasyon hücresine köpürtücü eklenmesi durumunda ultrasonik işleme birçok stabil mikro-kabarcık üretildiği tespit edilmiştir. Kömür şlamında, kavitasyon tarafından üretilen bu mikro-kabarcıkların kömür yüzeyine yapışarak ve kabarcık-parçacık bağlanmasında bir köprü vazifesi görerek flotasyon konsantrisinde kül miktarının azalmasına yol açtığı belirtilmiştir. Prozorov vd. [75] yaptıkları çalışmada ultrasonik işlem uygulanan ortamda tanelerin çarpışmasını araştırmışlardır. Kavitasyon kabarcığının patlaması sırasında oluşan şok dalgalarının tanelerin yüksek hızda çarpışmasına sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. Bu çarpışmalar sırasında çarpışma noktasında oluşan yüksek ısılardan birçok katı-sıvı reaksiyonunu artırdığını belirtmişlerdir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Ultrasonik işlem, cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde yüzey temizleme ve verimi artırmak için kullanılabilir. Ultrasonik uygulama, ön işlem veya eş zamanlı olarak proseslerde uygulanabilmektedir. Ultrasonik işlemin etkilerini etkileyen faktörler arasında cihazın özellikleri, uygulama şartları, uygulama aşaması ve ortam sıcaklığı yer almaktadır. Ayrıca ultrasonik cihazın uygulanma süresi ve frekans değerleri de etkileyici faktörler arasında yer almaktadır. Ultrasonik işlem özellikle flotasyon olmak üzere öğütme, liç, katı-sıvı ayrımı, aglomerasyon, flokülasyon gibi cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinde kullanılmıştır. Flotasyon çalışmalarında, ultrasonik işlemin olumlu etkisi, reaktiflerin süspansiyon içinde daha homojen bir dağılım sağlayarak performanslarını artırmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte, akustik kavitasyonun partikül yüzeylerini temizleyerek ve şlam tabakalarının oluşmasını en aza indirgeyerek reaktiflerin etkisini kolaylaştırması ve reaktif tüketimini azaltması gibi başka bir etkisi de vardır. Dolayısıyla, ultrasonik işlemin yüzey temizleme ve şlam uzaklaştırma yeteneği sayesinde flotasyon üzerinde olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra, ultrasonik işlemin mineral-kollektör arasındaki zayıf bağları kırarak olumsuz etkilerinin olabileceği de düşünülmektedir. Cevher zenginleştirme proseslerinde ultrasonik işlem kullanımı genellikle laboratuvar ölçeğinde denenmiş olup pilot ve endüstriyel ölçeklerde denemelerin yapılması, farklı frekans ve güç seviyelerinde ultrasonik enerji destekli zenginleştirme cihazlarının tasarlanmasıyla zenginleştirme tesislerinde ultrasonik işlemin kullanılması yaygın hale getirilebilir.

Teşekkür

K.E., fikir sahibi olup sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Erdemoğlu M, Göktaş M. Mermer artıklarından katma değeri yüksek seramik tozlarının üretimi. Mermer ve Çevre Çalıştayı, Muğla, Turkey ,2018
- [2] Fuchs F. Ultrasonic cleaning: fundamental theory and application, www. blackstone-ney. com/pdfs, 2002
- [3] Duran K, Perinçek D, Körlü E, Bahtiyari M. Ultrason teknolojisinin tekstilde kullanım olanakları. Tekstil ve konveksiyon 2007; 162- 166.
- [4] Celik MS. Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. Sep. Sci. Technol. 1989; 24:1159–1166,
- [5] Ozkan ŞG, Kuyumcu, HZ. Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. Int. J. Miner. Process. 2006; 81:201–203.
- [6] Ozkan ŞG, Kuyumcu HZ. Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. Ultrason. Sonochem. 2007; 14: 639–645,
- [7] Ozkan,ŞG. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. Fuel 2012; 93:576–580
- [8] Ozkan ŞG. Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. Minerals 2017; 7: 177
- [9] Xu M, Xing Y, Gui X, Cao Y, Wang D, Wang L. Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation, Energy Fuels 2017;31: 14367–14373, 2017.
- [10] Ghadyani M, Noaparast S, Tonkaboni SZ. 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 2018;38: 374-391.
- [11] Peng Y, Mao Y, Xia W, Li Y. Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism. Fuel 2018;220:558–566
- [12] Mao Y, Peng Y, Bu X, Xie G, Wu E, Xia W. Effect of ultrasound on the true flotation of lignite and its entrainment behavior. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2018;40: 940–950.
- [13] Mao Y, Xia W, Peng Y, Xie G. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. Fuel Process. Technol. 2019a; 195: 106150,
- [14] Mao Y, Chen Y, Bu X, Xie G. Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force. Fuel 2019b ;256:115938.
- [15] Mao Y, Bu X, Peng Y, Tian F, Xie G. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite. Fuel 2020;259: 116270, 2020.
- [16] Chen Y, Xie G, Chang J, Grundy J, Liu Q. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound. Fuel 2019;248: 38–46, 2019.
- [17] Chen Y, Truong VNT, Bu X, Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. Ultrason. Sonochem.2020; 60: 104739, 2020.
- [18] Kopparthi P, Balamurugan S, Mukherjee AK. Effect of ultrasonic pre-treatment time on coal flotation. International Journal of Coal Preparation & Utilization 2020;40: 807-823, 2020.
- [19] Videla AR, Morales R, Saint-Jean T, Gaete L, Vargas Y, Miller JD. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. Miner. Eng. 2019;99: 89–95,
- [20] Önal G, Özer M, Arslan F Sedimentation of clay in ultrasonic medium. Miner. Eng 2003;16(2):129–134,
- [21] Altun NE, Hwang JY, Hıçyılmaz C. Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. Int. J. Miner. Process.2009; 91(1-2): 1–13.
- [22] Zbik MS, Du, J, Pushkarova RA, Smart R St C. Observation of gaseous films at solid–liquid interfaces: Removal by ultrasonic action. J. Colloid Interface Sci. 2009;336(2) :616–623.
- [23] Alp İ. Yüksek Frekanslı Ses Dalgalarının Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Dokora Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1998.
- [24] Leighton TG. The Acoustic Bubble, Academic Press, London, 1994.
- [25] Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles – an overview. Ultrason. Sonochem. 2011; 18:864–872
- [26] Ambedkar B. Ultrasonic Coal-Wash for De-Ashing and De-Sulfurization: Experimental Investigation and Mechanistic Modeling. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [27] Suslick KS, Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. J. Wiley & Sons: New York, 26, 517-541, 1998.
- [28] Mason TJ. Chemistry with ultrasound, Society of Chemical Industry, London, , 1990;195.
- [29] Yasui K, Tuziuti T, Iida Y. Dependence of the characteristics of bubbles on types of sonochemical reactors. Ultrason. Sonochem. 2005;12 (1): 43–51,
- [30] Yerkovic C, Menacho J, Gaete L. Exploring the ultrasonic comminution of copper ores. Minerals engineering 1993; 6, (6):607-617
- [31] Gaete-Garretón L, Vargas-Hernandez Y, Velasquez-Lambert C. Application of ultrasound in comminution. Ultrasonics 2000; 38: 1-8, 345-352,
- [32] Kang W, Xun H, Hu J. Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal. Fuel Process. Technol. 2008;89(12):1337–1344.
- [33] Toraman ÖY. Experimental investigations of preparation of calcite particles by ultrasonic treatment. Physicochemical Problems of Mineral Processing 2017;53(2):859-868, 2017.
- [34] Singh B. Ultrasonically assisted rapid solid-liquid separation of fine clean coal particles. Minerals engineering, 1999;12(4): 437-443.
- [35] Swamy K, Rao A, Narasimhan K. Acoustics aids dewatering. Ultrasonics 1983;21(6):280-281,

- [36] Riera-Franco de Sarabia E, Gallego-juarex JA, Rodrigez-Corral G, Elvira-Segura L, Gonzalez-Gomez I. Application of high-power ultrasound to enhance fluid solid particle separation processes. *Ultrasonics* 2000;38(38):642-646,
- [37] Burat F, Sirkeci AA, Önal G. Improved fine coal dewatering by ultrasonic pretreatment and dewatering aids. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 2014;36, (2):129–135
- [38] Demir I, Gungoren C, Yücel Y, Ünver M, Çinku IK, Özkan Ş.G. Ultrasonic supported flocculation of borate tailings with differently charged flocculants. *Boron*. 2021;6 (3) :348–58. <https://doi.org/10.30728/boron.971892>
- [39] Ding S, Pan F, Zhou S, Bu X, Alheshibri M. Ultrasonic-assisted flocculation and sedimentation of coal slime water using the Taguchi method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023;45:4, 10523-10536, <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2247363>
- [40] Özkan A, Eşmeli K. Improvement of Colemanite Flocculation with Collectors by Ultrasound Treatment. Part. Sci. Technol 2022; 40:272–280.
- [41] Özkan A, Eşmeli K. Use of ultrasonic treatment as a pre-phase in the shear flocculation process. *Ultrasonics* 2023;107052
- [42] Şahinoğlu E, Uslu T. Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment. *Fuel Process. Technol.* 2013a ;116: 332–338.
- [43] Eşmeli K. Improvement of lignite oil agglomeration by ultrasound process using waste engine oil. *Particulate Science and Technology* 2023; 41:544–554.
- [44] Eşmeli K. The effect of ultrasound treatment on oil agglomeration of barite. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 2023;44: 189–200.
- [45] Slaczka AS. Effect of ultrasound on ammonium leaching of zinc from galmei ore. *Ultrasonics*. 1986;24(1):53-55.
- [46] Swamy KM, Sukla LB, Narayana KL, Kar RN, Panchanadikar VV. Use of ultrasound in microbial leaching of nickel from laterites. *Ultrasonics Sonochemistry* 1995;2 (1): 5-9.
- [47] Turan MD, Silva JP, Sâri ZA, Nadirov R, Toro, N. Dissolution of chalcopyrite in presence of chelating agent and hydrogen peroxide. *T. Indian. I. Metals*. 2022; 75 (1): 273–280.
- [48] He HP, Cao J, Duan N. Synergistic effect between ultrasound and fierce mechanical activation towards mineral extraction: a case study of ZnO ore. *Ultrason. Sonochem.* 2018;48 :163–170.
- [49] Zhang LB, Li HY, Peng JH, Srinivasakannan C, Li SW, Yin SH. Microwave and ultrasound augmented leaching of complicated zinc oxide ores in ammonia and ammonium citrate solutions. *Metals-Basel*. 2017;7 (6): 216
- [50] Cetintas S, Bingol D. Performance evaluation of leaching processes with and without ultrasound effect combined with reagent-assisted mechanochemical process for nickel recovery from Laterite: Process optimization and kinetic evaluation. *Miner. Eng.* 2020;157: 106562.
- [51] Yin SH, Pei JN, Jiang F, Li SW, Peng JH, Zhang LB, Ju SH, Srinivasakannan C. Ultrasound-assisted leaching of rare earths from the weathered crust elution-deposited ore using magnesium sulfate without ammonia-nitrogen pollution. *Ultrason. Sonochem.* 2018; 41: 156–162,
- [52] Hu YT, Guo P, Wang SX, Zhang LB. Leaching kinetics of antimony from refractory gold ore in alkaline sodium sulfide under ultrasound. *Chem. Eng. Res. Des.* 2020;164: 219–229.
- [53] Ladola YS, Chowdhury S, Roy SB, Pandit AB. Application of cavitation in uranium leaching. *Desalin. Water. Treat.* 2014;52 (1–3): 407–414.
- [54] Ma JY, Zhang YF, Qin YH, Wu ZK, Wang TL, Wang CW. The leaching kinetics of K-feldspar in sulfuric acid with the aid of ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 2017; 35:304–312.
- [55] Cilek EC, Ciftci H, Karagoz SG, Tuzci G. Extraction of silver from a refractory silver ore by sono-cyanidation. *Ultrason. Sonochem.* 2020;63: 104965.
- [56] Wang X, Srinivasakannan C, Xin-hui D, Jin-hui P, Da-jin Y, Shao-hua J. Leaching kinetics of zinc residues augmented with ultrasound. *Separation and Purification Technology* 2013;115: 66-72.
- [57] Djendova S, Mehandjiski V. Study of the effects of acoustic vibration conditioning of collector and frother on flotation of sulphide ores. *International journal of mineral processing* 1992;34(3): 205-217.
- [58] Özkan ŞG. Beneficiation of magnesite slimes with ultrasonic treatment. *Minerals Engineering* 2002;15: 99-101.
- [59] Misra M, Raichur AM, Lan AP. Improved flotation of arsenopyrite by ultrasonic pretreatment. *Miner. Metal. Process.* 2003;20 (2): 93–96,
- [60] Gürpınar G. Ses ötesi dalgaların cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 108, 2007.
- [61] Cilek EC, Ozgen S. Effect of ultrasound on separation selectivity and efficiency of flotation. *Miner. Eng.* 2009;22: 1209–1217.
- [62] Cilek EC, Ozgen S. Improvement of the flotation selectivity in a mechanical flotation cell by ultrasound. *Sep. Sci. Technol.* 2010; 45:572–579.
- [63] Özkan Ş.G, Güngören C. Enhancement of colemanite flotation by ultrasonic pre-treatment. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2012;48: 455–462.
- [64] Kursun H. A study on the utilization of ultrasonic pretreatment in Zinc flotation. *Sep. Sci. Technol.* 2014;49: 2975–2980.
- [65] Güngören C, Erbek TM, Özdemir O, Özkan ŞG. Effect of simultaneous ultrasonic treatment on quartz-amine flotation system. XVI Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, 2015;483-490.
- [66] Videla AR, Morales R, Saint-Jean T, Gaete L, Vargas Y, Miller JD. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Miner. Eng.* 2016;99: 89–95.

- [67] Cao QB, Cheng JH, Feng QC, Wen SM, Luo B. Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite. *Powder Technol.* 2017;311: 390–397.
- [68] Barma SD, Baskey PK, Rao DS, Sahu SN. Ultrasonic-assisted flotation for enhancing the recovery of flaky graphite from low-grade graphite ore. *Ultrason. Sonochem.* 2019; 56:386–396,
- [69] Yin W, Cai L, Ma Y, Wang Y. Mechanism of ultrasonic cavitation to improve the effect of siderite on quartz flotation. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2023; 59(2): 165930,
- [70] Liao Y, Zhao G, Feng B, Yan H, Wu H, Hu W, Zhu D, Qiu T. Application of ultrasonic pre-treatment for flotation separation pyrrhotite from chlorite. *Colloid Surf. A* 2023;669: 131507.
- [71] Zhou Z A, Zheng X, Finch JA, Hu H, Rao SR. Role of hydrodynamic cavitation in fine particle flotation. *International Journal of Mineral Processing* 1997;51: 139-149.
- [72] Fan M, Tao D, Honaker R, Luo Z. Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part iv): Mechanical cells and specially designed column flotation of coal. *Mining Science and Technology* 2010;20 (5): 641-671
- [73] Li Y, Xia W, Mao Y, Ma G, Peng Y, Xie G. Enhancement in selectivity of coking coal flotation by ultrasound simultaneous Treatment, *Current Works in Mineral Processing* 2020;2 (1): 1-9.
- [74] Kang W, Xun H, Kong X, Li M. Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. *Min. Sci. Technol.* 2009;19(4): 498–502.
- [75] Prozorov T, Prozorov R, Suslick KS, High velocity interparticle collisions driven by ultrasound, *J. Am. Chem. Soc.* 2004;126 (43): 13890–13891.