

## ULTRASONİK İŞLEMLERİN FLOTASYON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

### THE EFFECTS OF ULTRASONIC TREATMENTS ON FLOTATION

Şafak Gökhan ÖZKAN

İ. Ü., Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü,  
34850, Avcılar/İstanbul

**ÖZ:** Son yıllarda yapılan araştırmalar göstermiştir ki, flotasyon işleminin farklı aşamaları bazı durumlarda mekanik titreşimler, ses dalgaları ve bu iki fiziksel davranışın ortak etkisiyle olumlu olarak etkilenebilmektedir. Cevher hazırlama ve üretim metalurjisindeki bazı ultrasonik işlem uygulamaları, akustik ortamların verimler üzerinde pozitif etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Geçmişte yapılan çalışmaların büyük bir kısmında flotasyon reaktiflerinin emülsifiye edilmesi ve minerallerin adsorbe olmuş reaktif tabakalarından uzaklaştırılması gibi ultrasonun flotasyon öncesindeki etkisi üzerinde durulurken, son yıllardaki araştırmalarda ultrasonik işlemin flotasyon esnasındaki ve/veya sonrasındaki etkileri incelenmiştir. Genel olarak, ultrasonik titreşimlerin etkinliğinin minerallerin doğal yapıları ve ultrasonun uygulama yöntemine bağlı olduğu bulunmuştur.

Bu makalede vibroakustik ve/veya ultrasonik işlemlerin flotasyon üzerindeki etkileri literatürden derlenerek, bu çalışmaların tarihçesi ve günümüzdeki uygulama alanları araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ultrasonik, vibroakustik, flotasyon, ses dalgaları, mekanik titreşimler.

**ABSTRACT:** Recent studies have shown that the separate elements of the flotation process could in some cases be favourably influenced by mechanical vibrations, by the acoustic wave process or by the joint manifestation of these two physical phenomena. Some applications of ultrasonic treatment in mineral processing and extractive metallurgy show that acoustic fields can produce significant positive effects on recoveries. Most of the past studies examined the effects of ultrasound prior to flotation, i.e. removal of adsorbed layers of reagents from minerals and emulsification of flotation reagents, while other recent work has studied the effect of ultrasonic treatment during and/or after the flotation process. It was found that the effectiveness of ultrasonic vibration is generally dependent on the nature of the mineral and also the application method of the ultrasound.

In this paper, the effects of vibroacoustic and/or ultrasonic treatments were studied from the literature and the current applications of ultrasound in flotation processes were investigated.

**Keywords:** Ultrasonics, vibroacoustics, flotation, sound waves, mechanical vibrations.

### GİRİŞ

Ultrasonik işlemler maden ve metal endüstrilerinde genellikle yüzey temizleme işlemlerinde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Ultrasonik temizlemenin yüzey kirleticilerin uzaklaştırılması için kullanılan diğer yöntemlere göre ana avantajları şöyle sıralanabilir; yüksek kalitede temizleme, güce dayalı işçiliğin ortadan kalkması ve alev alabilen ve zehirli çözücülerin eliminasyonu. Prosesin basitliği ve sorgulanamaz teknolojik etkinliği Rusya, A.B.D., İngiltere, Almanya ve Japonya gibi bir çok endüstri ülkesinde ultrasonik temizleme ekipmanları üretiminde hızlı artışlara yol açmıştır. Bununla birlikte ekipmanların dizaynı bir ülkeden diğerine farklılıklar gösterebilmektedir, Stoev ve Martin (1992).

Ultrasonik dalga uygulanan bir yüzey temizleme işleminin ivme kazanmasına yol açan ana etkenler, katı-sıvı ara yüzeyi ve sıvının kendisinde oluşan kavitasyon ve akustik akış olarak ifade edilebilir. Ultrasonik işlem uygulandığında, malzeme yüzeyindeki film tabakası kavitasyonla oluşan hava kabarcıkları sonucu bozularak ortamdan uzaklaşmaktadır. Kavitasyona ve oluşan hava kabarcıklarının oluşumuna sebebiyet veren etmenler literatürde detaylı bir şekilde incelenmektedir, Agranat ve diğerleri (1973).

Bazen vibroakustik adıyla da bilinen ultrasonik işlemler kimya, inşaat, robotik ve ziraat endüstrilerindeki çeşitli proseslerde kullanılmaktadır. Bu işlemlerden yararlanan proseslerin önemli avantajları arasında daha

yüksek verimlilik, daha kaliteli ürün eldesi, daha az enerji ve su tüketimi ve otomasyona olan uygunlukları sayılabilir. Madencilik endüstrisinde ve özellikle cevher hazırlamada vibroakustik işlemler genel olarak iletim oluklarının boşaltılması, besleme, taşıma, eleme, öğütme, cevher yıkama ve sallantılı masalarda zenginleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Vibroakustik kırıcılar, üreteçler ve kurutucular gibi ekipmanlar da bu işlemlerden yaygın olarak yararlanmaktadır.

Cevher hazırlamanın bir konusu olan minerallerin birbirlerinden ayrılması işlemlerinde vibroakustik veya ultrasonik tekniklerin kullanımı son yıllarda yaygın hale gelmiştir. Bu konuda yapılan bir kaç araştırmada ses titreşimlerinin flotasyon üzerinde olumlu etkiler yaptığı vurgulanmıştır. Pülp ve reaktiflerin hazırlanması, köpüklerin oluşturulması ve davranışı, köpük tabakasındaki ikincil zenginleştirme, reaktiflerin daha etkin bir şekilde mineral yüzeylerine bağlanması, öğütme ve flotasyonun bir arada başarılabilmesi gibi flotasyon işleminin farklı aşamalarında ses titreşimlerinin olumlu etkilere yol açtığı bilinmektedir, Pryor (1965), Wills (1992).

#### ARAŞTIRMALARIN TARİHÇESİ

Vibroakustik etkileşimler maden ve metal endüstrilerindeki akla gelebilecek her türlü mekanik prosesin ses titreşimleri yoluyla verimli hale getirilmesini amaçlamaktadır. Proseslerde oluşan titreşimlerin sisteme olan etkileri dolaylı ya da doğrudan olmak üzere iki alt grupta toplanabilir. Titreşimlerin dolaylı yoldan etkileri dikey graviteye bağlı yer değiştirme olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin kamyonların veya diğer malzeme taşınmasına yarayan araçların boşaltılmasında, yaş veya kuru malzemelerin kompaktlanmasında, eleme işleminde ve numune almak için kullanılan delicilerde mekanik titreşimler etkili olmaktadır. Titreşimlerin doğrudan etkileriyle ise kırma, öğütme, eleme, sınıflandırma, özgül ağırlığa dayalı cevher zenginleştirme yöntemleri, flotasyon, dozajlama, taşıma, kesme, karıştırma, kurutma, soğutma, kavurma ve yüzey aşındırma gibi proseslerde karşılaşılmaktadır, Stoev ve diğerleri (1992).

Stoev (1993) tarafından yapılan bir çalışmada ise cevher hazırlamada havalı sınıflandırma olarak bilinen bir prosesin titreşimli ve sesli eylemlerin bileşimi kullanılarak, hava akışı olmadan 40 mikron ile 1,5 mm arasında sınıflandırma işlemini gerçekleştirebileceğine değerlendirilmiştir. Tabakalı ve lifsi mineraller için üst sınır daha büyüktür. Aynı çalışmada frekansı 25-150 Hz, genliği 0,25-1,5 mm olan bir titreşim uygulanarak havalı sınıflandırma işleminde % 85'lik bir teknolojik verimin ekolojik sorun yaratmadan sağlanabileceği de vurgulanmıştır.

Flotasyon, günümüzde cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında yer almaktadır. Bir çok ülkenin mineral ekonomisi için özel bir önemi olan flotasyon yöntemi,

pek çok sayıdaki araştırmacıların çabaları sayesinde devamlı gelişmekte olup, bugün kolaylıkla tüm mineral karışımlarının ayırımında kullanılabilir hale gelmiştir. Günümüzde flotasyonu teknolojik ve ekonomik yönden geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amacın başarılması için en yeni ve etkin yollardan biri flotasyon yöntemiyle minerallerin birbirlerinden ayrılmasında vibroakustik işlemlerin kullanılmasıdır. Bu konu üzerinde çalışan bir çok araştırmacı, flotasyon işleminin farklı elemanlarının ya titreşimler ya ses dalgaları ya da bu iki fiziksel davranışın ortak etkisiyle olumlu olarak etkilendiğini göstermişlerdir. Bu araştırmalarda düşük ve yüksek frekanslardaki pozitif bir etkinin koşulları saptanmaya çalışılmıştır. Vibroakustik veya ultrasonik etkilerin sonuçları ne kadar olumlu olursa olsun, ses dalgalarını üreten cihazın yüksek enerji tüketmesi, yüksek frekanslardaki pratik uygulamaları kısıtlamaktadır. Bu yüzden geçmişte yapılan çalışmaların bir çoğunda düşük frekanstaki titreşimlerin flotasyon üzerindeki etkilerine ve ileriye ışık tutacak kesin sonuçlara yer verilmiştir, Stoev ve diğerleri (1992).

Vibroakustik tekniklerden yararlanan flotasyon makinalarının sabit bir eksen etrafında dönen mekanizmalarının olmayışı öğütme ve flotasyonun tek bir mekanik üniteye yapılmasına izin vermektedir. Stoev ve diğerleri (1992) tarafından yürütülen çalışmalarda vibroakustik titreşimleri kullanan bir flotasyon cihazı dizayn edilerek, barit-demir cevheri üzerinde denenmiş ve sonuç olarak flotasyon süresinin azaldığı, konsantr miktarı ve veriminin arttığı gözlenmiştir. Böylelikle, konvansiyonel flotasyon makinalarında elde edilen sonuçlara oranla daha olumlu sonuçlara ulaşıldığı öne sürülmüştür.

Flotasyon ortamının pülple birlikte titreşime tabi tutulması sonucu (toplam titreşim) ise barit-demir cevherlerinin flotasyonundan laboratuvar ölçeğinde daha olumlu sonuçlar alınmıştır. Bununla birlikte, yüksek enerji tüketimi ve oluşan aşırı sesi ve gürültüyü önleme gereksinimi gibi ekonomi ve çevre ile ilgili koşullar göz önüne alındığında, toplam titreşimin mümkün gözükmemesi yüzünden bu çalışmalar laboratuvar çapında kalmıştır.

Bu bulguların ışığında, titreşimi sağlayan cihazın pülpün içerisinde yer alması halinde pülpün titreşiminin daha etkin olacağı saptanmıştır. Bu yöntemle çalışan bir flotasyon hücresi içerisindeki pülpün hava kabarcıklarıyla birlikte titreşimi dışarıya doğru oluşmakta ve böylece hücrenin titreşimi için enerji tüketimi ve gürültünün oluşumu engellenmektedir. Barit-demir cevherleriyle yapılan deneylerden olumlu sonuçlar alınması bu tür flotasyon makinalarının kullanımının umut verici olduğunu ortaya koymuştur.

Hali hazırda kullanılan flotasyon makinalarında hücrelere hava verilirken ses yaratılması yoluyla hava kabarcıklarının titreşiminin sağlanması da ses titreşimlerinin proses üzerindeki olumlu etkilerini gözler önüne sermektedir. Talk, barit, kömür ve bakır cevherleri üzerinde yapılan denemelerde kazanma verimleri ve konsantr tenörleri bu yolla artırılmaktadır.

Vibroakustik işlemler aracılığıyla köpükte yüzebilecek bileşenlerin ikincil konsantrasyonu, daha yüksek tenörde ara ve son ürün eldesine müsaade etmektedir. Köpüğün yeterli miktarda titreşiminin su püskürtme işleminden daha iyi sonuçlar verdiği ve ayrıca daha az sulu bir köpük eldesinin avantajlı olduğu saptanmıştır. Bulgaristan'daki Kırcaali cevher zenginleştirme tesisinde kurşun kazanımındaki köpüğün titreşime tabi tutulmasının olumlu etkisi üretim koşullarındaki laboratuvar deneyleriyle doğrulanmıştır. Araştırmalar ayrıca bakır-molibden kaba konsantresinin yeniden öğütülmesi ve reaktiflerin titreşim yoluyla verilmesi kombinasyonundaki olumlu etkileri ortaya koymuştur. Sonuçlar konsantrenin titreşimle buharlaştırılmasında da ultrasonik tekniklerin etkili olduğunu göstermiştir.

Kömür flotasyonunda reaktiflerin titreşimle emülsifiye edilmesiyle olumlu sonuçlar alınmasının yanı sıra, barit-demir, bakır ve polimetalik cevherlerin flotasyonunda kullanılan reaktif çözeltilerinin ses titreşimi yoluyla ortama verilmesinin yararlı olacağı saptanmıştır. Sonuçlar Bulgaristan'daki Tvarditsa (kömür), Kremikortsi (barit-demir cevheri), Mirkovo (bakır cevheri) ve Kırcaali (polimetalik cevher) zenginleştirme tesislerine de uyarlanmıştır, Stoev ve diğerleri (1992).

### GÜNÜMÜZDEKİ UYGULAMALAR

Son yıllarda Djendova ve Mehandjski (1992), Nicol ve diğerleri (1986) tarafından yürütülen araştırmalar göstermiştir ki, yoğun ultrasonik titreşimler dispersiyon, koagülasyon ve emülsifikasyon, çözünme oranının değişmesi ve kristalizasyon, kimyasal dönüşümlerin oluşması ve çok fazlı kimyasal işlemlerin hızlanmasına yol açarak ses dalgalarına maruz bırakılan malzemenin durumunu etkin bir şekilde değiştirebilmektedir. Flotasyon işlemi genel olarak mineral yüzeyinin durumuna bağlıdır ve bu yüzden yukarıda sayılan faktörler flotasyon işlemi sırasında malzeme üzerinde değişikliklere yol açmaktadır. Ultrasonik enerjinin flotasyon sistemine verilmesi bu sistemdeki kalitatif ilişkilerde ve flotasyon kinetiğinde de değişimlere yol açabilmektedir, Slaczka (1987).

Stoev ve Martin (1992) tarafından da belirtildiği üzere ilmenit, rutil ve zirkon gibi minerallerin flotasyonunda kısa bir süre için bile olsa ultrasonik ön işleme tabi tutulmasının konsantre verim ve tenörlerinde olumlu değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Bu değişikliklerin mineral yüzeyinin şlam tabakasından etkin bir şekilde temizlenmesine bağlı olduğuna inanılmaktadır. Aynı çalışmalarda zinober-antimonit, kömür-kül, barit-fluorit, sfalerit-pirit-kalkopirit, galen-kuars, mangan oksitler, jarosit-ilmenit-ferromolibdenit ve bakır-molibden konsantrelerinin flotasyonunda da ultrasonik ön işlem yardımıyla çok yüksek verimlere ulaşılabildiği belirtilmektedir.

Stoev ve diğerleri (1992) tarafından ortaya atılan diğer ilginç bir durum ise flotasyon esnasında oluşan hava

kabarcıklarının ses dalgalarından pozitif bir şekilde etkilenmeleridir. Flotasyon sırasında oluşan köpük yüzeylerinin fiziksel özellikleri, minerallerin oluşan bu köpüğe yapışmasını sağlayan önemli bir etkidir. Hidrasyon tabakalarının inceltilmesi ve yok edilmesi enerji bariyerini azaltır ve bunun bir sonucu olarak yapışma olayı oluşur ve ivme kazanır. Bu yüzden ses dalgalarının etkisi ile köpük oluşumu özel bir öneme sahiptir. Burada amaç titreşim yoluyla köpük yüzeylerini oluşturmak ve böylece parçacıkların yapışmasının gelişmesini ve köpük yüzeylerini mekanik olarak oluşmuş hidrofil tanelerden ve zayıf bağlanmış ara yüzeylerden temizlemeyi başarmaktır.

Çelik (1989) ise ultrasonik ön işlemlerin oksitlenmiş galen ve kömürün yüzebilirliğine etkisi üzerinde araştırmalarda bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda kollektör konsantrasyonu, şlam atımı ve ultrasonik dalgaının uygulama süresinin kömür ve galenin flotasyon davranışına olan etkisi üzerinde durulmuştur. Sonuçta ultrasonik dalgaların kimyasal etkisinin kavitasyona bağlanabileceği ve basınç ve sıcaklık değerlerinde ultrasonik etkileşim sonucu artışlar olabileceğine değinilmiştir. Flotasyon denemelerinde kömür ve galen yüzeylerinde ultrasonik işlem sonucu reaktiflerin daha etkin bir şekilde adsorplandığı saptanmıştır.

Özkan (1994), (1996) tarafından yapılan araştırmalarda ise ülkemiz için çok önemli bir bor minerali olan kolemanitin flotasyonunda oluşan şlam kaplanmalarını önleyebilmek için uygulanan ultrasonik ön işlemler ve eşzamanlı ultrasonik işlemler iki ayrı kademede incelenmiş ve ultrasonik ses dalgalarının flotasyon üzerindeki etkileri saptanmaya çalışılmıştır. - 0.020 mm tane boyutundaki şlamları klasik eleme yoluyla alınmış - 0.210 mm tane boyutundaki kolemanit cevher numunesine ultrasonik ön işlem uygulanmış ve şlam atılması işlemi tekrar edilmiştir. Sonuçta ultrasonik işlemden sonra şlamları yeniden atılan kolemanit numunelerinin çok yüksek tenör ve verimle flote edilebileceği ve ayrıca uygulanan ultrasonik ses dalgaları artışının verimler üzerinde fazla bir değişikliğe yol açmadığı saptanmıştır. Ayrıca, AP825 (alkil sülfonat tipi kollektör), CA927 (alkil sülfosaksinamat tipi kollektör) ve AF70 (alkol tipi köpürtücü) gibi reaktiflerin kullanıldığı kolemanit flotasyonunda numunelerin eşzamanlı ultrasonik işleme tabi tutulması, konsantrelere ait verim ve tenörlerde olumlu artışlara yol açmıştır.

Ultrasonik işlemlerin şlamların uzaklaştırılması için en etkin yöntemlerden biri olduğu saptanmıştır. Etkin şlam uzaklaştırılması olayının muhtemelen ultrasonik dalgaların mineral yüzeylerini çok etkin bir şekilde çok düşük boyutlu film tabakasından temizlemesi gerçeğine dayandığı ortaya konmuştur, Crozier (1992), Glombotskii (1963), Leja (1982).

Araştırmacılar tarafından ultrasonik tekniklerin flotasyona olan etkilerinin teorik ve pratik açıdan incelenmesi araştırmalarına halen devam edilmekte olup, yakın gelecekte bu konuya olan ilginin artması beklenmektedir.

## SUMMARY

Previous studies have shown that the separate elements of the flotation process could in some cases be favourably influenced by mechanical vibrations, by the acoustic wave process or by the joint manifestation of these two physical phenomena, Stoev and Martin (1992).

Various vibroacoustic effects on separate stages of the flotation process have been outlined as preparation of the pulp and reagents, formation and behaviour of the bubbles, secondary concentration in the froth layer, desorption of the reagents and joint accomplishment of grinding and flotation, Stoev et al. (1992). The effects of vibroacoustics have been examined in the same study either on flotation, in general, or on individual components of the flotation system; some devices for generating the desired high frequency vibrations have also been discussed. It was found that by means of vibrations it is possible

- to facilitate the attachment of mineral particles to air bubbles,
- to increase the recovery of valuable components,
- to improve selectivity and, correspondingly, achieve a rise in the quantity of valuable components in the concentrate,
- to increase flotation rate,
- to form air bubbles with appropriate dimensions,
- to achieve a desorption of reagents from the mineral surfaces,
- to emulsify flotation reagents,
- to destroy viscous and resilient froths, etc.

Various studies, Çelik (1989), Djendova and Mehandjski (1992), Nicol et al. (1986), have revealed that intensive ultrasonic vibrations could effectively alter the state of a material in an acoustic field, causing dispersion, coagulation and emulsification, changing the rate of dissolution and crystallisation, bringing about chemical conversions and accelerating multi-phase processes. The flotation process is mainly dependent upon the state of the mineral's surface, thus factors which affect the state of the interface cause changes during the flotation process. The introduction of ultrasonic energy into a flotation system could produce changes in the qualitative relationships in the sistem and cause a change of flotation rates, Slaczka (1987).

Previous researchers, Stoev and Martin (1992) stated that acoustic or ultrasonic pre-treatment of minerals, such as ilmenite, rutile and zircon, even for a short time, considerably increased their flotation response and gave significant changes in recovery and grade values. These improved values were believed to be due to the effective cleaning of particle surfaces from film coatings, namely

slimes. These studies also showed that separations of cinnabar-antimonite, coal-ash, barite-fluorite, sphalerite-pyrite-chalcopyrite, galena-quartz, manganese oxides-jarosite-ilmenite-ferromolybdenite and copper-molybden bulk concentrates could easily be achieved by froth flotation with the help of an acoustic or ultrasonic treatment.

## DEĞİNİLEN BELGELER

- Agranat, B. A. ve diğerleri, 1973**, Ultrasonic cleaning, Rozenberg, L. D., ed., Physical Principles of Ultrasonic Technology, Vol. 1, Plenum Press, New York, A. B. D.
- Crozier, R. D., 1992**, Flotation Theory, Reagents and Ore Testing, Pergamon Press, Londra, İngiltere.
- Çelik, M. S., 1989**, Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena, Separation Science and Technology, 24 (14) 1159-1166.
- Djendova, S. ve Mehandjski, V., 1992**, Study of the effects of acoustic vibration conditioning of collector and frother on flotation of sulphide ores, International Journal of Mineral Processing, 34 (3) 205-217.
- Glembotskii, V. A. ve diğerleri, 1963**, Flotation, Primary Sources, New York, A.B.D.
- Leja, J., 1982**, Surface Chemistry of Froth Flotation, Plenum Press, New York, A.B.D.
- Nicol, K. S. ve diğerleri, 1986**, Fine particle flotation in an acoustic field, International Journal of Mineral Processing, 17 (1) 143-150.
- Özkan, Ş. G. ve Veasey, T.J., 1996**, Effect of simultaneous ultrasonic treatment on colemanite flotation, 6. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu, Kuşadasi, Aydın, 24-26 Eylül.
- Özkan, Ş. G., 1994**, "Flotation Studies of Colemanite Ores from the Emet Deposits of Türkiye", Doktora Tezi, The University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, İngiltere.
- Pryor, E. J., 1965**, Mineral Processing, 3rd ed., London, İngiltere.
- Slaczka, A., 1987**, Effect of an ultrasonic field on the flotation selectivity of barite from a barite-fluorite-quartz ore, International Journal of Mineral Processing, 20 (2) 193-210.
- Stoev, S. M., 1993**, Pneumatic vibroacoustical classification, Türkiye 13. Madencilik Kongresi, TMMOB, Maden Müh. Odası, İstanbul.
- Stoev, S.M. ve Martin, P.D., 1992**, The Application of vibration and sound in minerals and metals industries, Bonney, C.F., ed., A Technical Review, Series No:8, MIRO, Lichfield, İngiltere.

Stoev St. ve diğeri, 1992, Vibroacoustic improvements of froth flotation, Mavros, P. and Matis, K.A., eds., Innovations in Flotation Technology, NATO ASI Series, Vol: 208, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda, pp. 383-407.

Wills, B.A., 1992, Mineral Processing Technology, 5th ed., Pergamon Press, Oxford, İngiltere.

Makalenin geliş tarihi: 16.12.1997

Makalenin yayına kabul tarihi: 04.05.1998

Received December 16, 1997

Accepted May 04, 1998