



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BAZI CEVHER VE ATIKLARIN CEVHER HAZIRLAMA
VE FLOTASYONUNDA ULTRASONİK DALGALARIN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Maden Müh. Arda ONUR
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman
Doç.Dr. Şafak G. ÖZKAN**

Haziran, 2004



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BAZI CEVHER VE ATIKLARIN CEVHER HAZIRLAMA
VE FLOTASYONUNDA ULTRASONİK DALGALARIN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Maden Müh. Arda ONUR
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman
Doç.Dr. Şafak G. ÖZKAN**

Haziran, 2004

Bu çalışma/...../ 2004 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anabilim Dalı programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Şafak G. ÖZKAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ali KAHRİMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK
İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi

Doç. Dr. İsmail BOZ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. İsmail AYDIN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tez çalışması yapma olanağı sağlayan merhum hocam **Prof. Dr. Bedri İPEKOĞLU**'na, danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve tecrübesiyle destek olan, her türlü yardımı gösteren Cevher Hazırlama Anabilim Dalı Başkanı Sayın **Doç. Dr. Şafak G. ÖZKAN**' a, Bölüm Başkanımız Sayın **Prof. Dr. Ali KAHRİMAN**'a, Deneysel çalışmalarım, Almanya "**Georg Agricola, Technische Fachhochschule zu Bochum**" Üniversitesinin laboratuvarlarını açan ve bana her türlü imkanı sağlayıp, tüm çalışmalarım ile çok yakından ilgilenen, Üniversitenin AR-GE Rektörü ve "Verfahrenstechnik" Bölüm Başkanı Sayın **Prof. Dr. Rainer LOTZIEN**'e, deneysel çalışmalarım ile bizzat kendisi ilgilenen, bana her türlü malzemeyi sağlayan, ve deney sonuçlarımın yorumlanmasında yardımcı olan, İngiltere "**Maelgwyn Mineral Services**" Mühendislik Direktörü **Dr. Rainer IMHOF**'a, deneysel çalışmalarım da hiçbir yardımlarını benden esirgemeyen, Almanya "Georg Agricola, Technische Fachhochschule zu Bochum - Verfahrenstechnik" bölümü araştırma görevlisi **Dirk HANSEL**'e ve Almanya "Maelgwyn Mineral Services"ten Maden Mühendisi **Franz-Josef PUDER**'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteği veren, yardımı esirgemeyen ve bu seviyeye gelmemi sağlayan Babam **Metin ONUR**, Annem **Nazmiye ONUR**, Ablam **Funda ONAR**, Eniştem **Murat ONAR** ve her an yanımda olup bana destek olan kızarkadaşım **Beste TIKNAZ**'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran, 2004

Arda ONUR
Maden Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2. 1. Ultrasesle İlgili Tanımlar.....	3
2. 1. 1. Ultrases Spektrumu.....	3
2. 1. 2. Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması.....	4
2. 2. Ultrases Dalgaları.....	4
2. 2. 1. Dalga Hareketi.....	4
2. 2. 2. Dalga Uzunluğu ve Frekans.....	6
2. 2. 3. Dalga Çeşitleri.....	8
2. 2. 3. 1. Boyuna Dalga.....	8
2. 2. 3. 2. Enine Dalga.....	10
2. 2. 3. 3. Yüzey Dalgaları.....	10
2. 2. 3. 4. Yayınma Hızları.....	11
2. 3. Ultrases Enerji Şiddeti.....	11
2. 4. Akustik Empedans.....	12
2. 5. Ultrases Basıncı.....	12
2. 6. Ultrases Demeti.....	13
2. 6. 1. Demetin Geometrisi.....	13
2. 6. 2. Demet İçinde Enerji Dağılımı.....	13
2. 6. 2. 1. Eksenel Enerji Dağılımı.....	14
2. 6. 2. 2. Radyal Enerji Dağılımı.....	15
2. 7. Ultrases Zayıflaması.....	16
2. 8. Doppler Etkisi.....	17
2. 9. Darbe Etkisi.....	18
2. 10. Kaviteasyon (Oyuklama) Etkisi.....	18
2. 10. 1. Kaviteasyon ve Ses Ortamı.....	20
2. 10. 2. Kaviteasyon Kabarcık Modelleri ve Tipleri.....	25
2. 10. 3. Kaviteasyonu Etkileyen Faktörler.....	30
2. 10. 3. 1. Çözücünün Fiziksel Özellikleri.....	30
2. 10. 3. 2. Reaksiyon Sıcaklığı.....	32
2. 10. 3. 3. Ses Alanı.....	32
2. 10. 3. 4. Çözünmüş Gazların Varlığı.....	33
2. 10. 3. 5. Tepkime Sisteminin Temizliği.....	34
2. 10. 3. 6. Çevre Basıncı.....	34
2. 10. 3. 7. Arayüzeyin Etkisi.....	34

2. 10. 4. Kaviteasyonun Katı Yüzeyindeki Etkileri	35
2. 11. Ultrases Üretilmesi Ve Kullanım Alanları.....	39
2. 11. 1. Ultrases Kaynakları.....	39
2. 11. 1. 1. Ark Sesi.....	40
2. 11. 1. 2. Kornalar.....	40
2. 11. 1. 3. Sirenler.....	40
2. 11. 1. 4. Mekanik Titreştiriciler.....	40
2. 11. 1. 5. Piezoelektrik Titreştiriciler.....	41
2. 11. 1. 5. 1. Kristal Piezoelektrikler.....	41
2. 11. 1. 5. 2. Seramik Piezoelektrikler.....	47
2. 11. 1. 6. Manyetostriktif Titreştiriciler.....	50
2. 11. 1. 7. Elektrostriksiyon.....	57
2. 11. 1. 8. Titreşim Üreteci Dizaynı.....	57
2. 11. 2. Ultrasesin Kullanıldığı Yerler.....	57
2. 12. Ultrasonik İşlemlerinkullanıldığı Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Uygulamaları.....	61
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	79
3. 1. Kömür Külü Numuneleri.....	79
3. 2. Flotasyon Yöntemi.....	80
3. 3. Ultrasonik Dalga Üreteçli Bir Flotasyon Düzeneği.....	85
3. 4. Flotasyon Deneylerinde Kullanılan Parametreler.....	89
4. BULGULAR.....	92
4. 1. Farklı Pülpte Katı Oranlarının Denendiği Konvansiyonel Flotasyon Deney Sonuçları.....	93
4. 2. Farklı Pülpte Katı Oranlarının Denendiği Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	96
4. 3. Sabit Pülpte Katı Oranında Konvansiyonel ve Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	99
4. 4. Sabit Pülpte Katı Oranında Kademeli Konvansiyonel ve Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	103
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	106
6. KAYNAKLAR.....	109
7. ÖZGEÇMİŞ.....	112

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Ultrases Spektrumu.....	3
Şekil 2.2	: Titreşim Hareketinin Dalgasal Gösterimi.....	5
Şekil 2.3	: Ses Dalgaları İçin Frekans, Hız ve Dalga Boyunu Veren Bir Abak.....	7
Şekil 2.4	: Sesötesi Dalga Çeşitleri.....	8
Şekil 2.5	: Sesötesi Demetinin Geometrisi.....	13
Şekil 2.6	: Demet Eksenini Boyunca Ses Basıncının Uzaklıkla Değişimi..	14
Şekil 2.7	: Demetin Uzak Alanının Radyal Kesitinde Ses Basıncının Değişimi.....	15
Şekil 2.8	: Demet Uzak Alanı İçinde Ses Basıncının Radyal Dağılımdaki Değişimi.....	16
Şekil 2.9	: Dairesel Kaynak Demetinin Ses Basıncının Eksenel ve Radyal Dağılımları.....	16
Şekil 2.10	: Ultrasesin Enerjisinin Zayıflaması.....	18
Şekil 2.11	: Karbon Tetra Klorürün Çekme Gerilmesi.....	21
Şekil 2.12	: Kaviteasyon Başlangıç Eşiği.....	22
Şekil 2.13	: Blake'e Göre Teorik Kaviteasyon Eşiği.....	23
Şekil 2.14	: Bir Kabarcığın Maksimum Boyuta Büyüyerek Çökmesi.....	24
Şekil 2.15	: Bir Oyuğun Lineer Rezonans Frekansı.....	26
Şekil 2.16	: Geçici Bir Oyuğun Çökmesi.....	27
Şekil 2.17	: Ses Basınç Genliklerinin Büyük Değerleri İçin Çap-Zaman Eğrileri.....	28
Şekil 2.18	: Çökme Hızının Sıkıştırılabilirliğe Göre Değişimi.....	31
Şekil 2.19	: Çeşitli Frekanslarda Kaviteasyon Oluşumu.....	33
Şekil 2.20	: Çözünmüş Gazların Varlığında Oluşan Kaviteasyonun Yastıklanması.....	34
Şekil 2.21	: Sıcaklığın Bir Fonksiyonu Olarak Erozyonun Değişimi.....	39
Şekil 2.22	: Kuvarsın Kristal Yapısı ve Silika Tetrahedri.....	42
Şekil 2.23	: C Eksenine Dik Düzlemde Si ve O Hegzagon Üçgenleri.....	43
Şekil 2.24	: Yük Altındaki Kuvarsta Elektrik Yük Merkezlerinin Oluşumu.....	44
Şekil 2.25	: Çeşitli Kristaller ve Kesme Yönleri.....	44
Şekil 2.26	: Piezoelektrik Titreştiricilerin Verici ve Alıcı Olarak Çalışması.....	46

Şekil 2.27	: Piezoelektrik Transduserin Mümkün Olabilen Farklı Titreşimleri.....	48
Şekil 2.28	: Piezoelektrik Kristalin Tank Yüzeyine Montaj Şekli.....	49
Şekil 2.29	: Ferromanyetik Materyallerin Manyetostriksiyonu.....	51
Şekil 2.30	: Ferromanyetik Nikelin Sıcaklığa Bağlılığı.....	52
Şekil 2.31	: Manyetostriksiyon Prensibine Dayalı Olarak Çalışan Bir Ultrases Vericisi.....	54
Şekil 2.32	: Çeşitli Tip Ultrasonik Trasduserlerin Verimi.....	55
Şekil 2.33	: Çözünabilir Kirleticilerin Ultrasonik Sistem Yardımı İle Yüzeyden Uzaklaştırma Mekanizması.....	60
Şekil 2.34	: Çözünmeyen Kirleticilerin Yüzeyden Uzaklaştırılması.....	61
Şekil 3.1	: Elek Altı – Elek Üstü Eğrisi.....	80
Şekil 3.2	: Deney Düzeneğinin Şematik Görünümü.....	86
Şekil 3.3	: Deney Düzeneği.....	87
Şekil 3.4	: Kullanılan Transduserin Selüle Monte Edilmiş Hali.....	88
Şekil 3.5	: Modifiye Edilmiş “Sonorex” Marka Ultrasonik Jeneratör.....	90
Şekil 3.6	: Kademeli Flotasyon Akım Şeması.....	89
Şekil 4.1	: Deney Seti – 1, % Kül içeriği.....	94
Şekil 4.2	: Deney Seti – 1, % Yanabilir Verim.....	94
Şekil 4.3	: Deney Seti – 2, % Kül içeriği.....	97
Şekil 4.4	: Deney Seti – 2, % Yanabilir Verim.....	97
Şekil 4.5	: Deney Seti – 3, % Kül içeriği.....	101
Şekil 4.6	: Deney Seti – 3, % Yanabilir Verim.....	101
Şekil 4.7	: Deney Seti – 4, % Kül içeriği.....	104
Şekil 4.8	: Deney Seti – 4, % Yanabilir Verim.....	105

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Çeşitli Ortamlarda Akustik Hızlar.....	9
Tablo 2.2	: Bağlı Yankı Yükseklikleri ve Karşılık Gelen Desibel Değerleri.....	17
Tablo 2.3	: Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri.....	47
Tablo 2.4	: Ultrases Uygulama Alanları.....	58
Tablo 2.5	: Ultrases Kullanan Bazı Endüstriler.....	59
Tablo 3.1	: Uçucu Kül Numunelerinin Bazı Önemli Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	79
Tablo 3.2	: Uçucu Kül Numunelerinin Tane Boyut Dağılımı.....	79
Tablo 3.3	: Farklı Deney Tasarımlarına Göre Değişken Koşullar.....	91
Tablo 4.1	: Farklı Pülpte Katı Oranlarının Denendiği Konvansiyonel Flotasyon Deney Sonuçları.....	93
Tablo 4.2	: Farklı Pülpte Katı Oranlarının Denendiği Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	96
Tablo 4.3	: Sabit Pülpte Katı Oranında Konvansiyonel ve Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	100
Tablo 4.4	: Sabit Pülpte Katı Oranında Kademeli Konvansiyonel ve Ultrasonik Flotasyon Deney Sonuçları.....	104

ÖZET

BAZI CEVHER VE ATIKLARIN CEVHER HAZIRLAMA VE FLOTASYONUNDA ULTRASONİK DALGALARIN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada ultrasonik ses dalgaları incelenerek uçucu kül flotasyonu işlemlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla numune olarak Almanya'daki bir termik santralden elde edilen uçucu kül (fly ash) seçilmiştir. Numunelere uygulanan flotasyon deneyleri 4 farklı tasarım olarak sınıflandırılabilir. İlki farklı pülpte katı oranlarında konvansiyonel flotasyon, ikincisi farklı pülpte katı oranlarında ultrasonik flotasyon, üçüncüsü sabit pülpte katı oranında sırasıyla; “konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon”, “ultrasonik koşullandırma ve konvansiyonel flotasyon”, “konvansiyonel koşullandırma ve ultrasonik flotasyon”, “ultrasonik koşullandırma ve flotasyon”, dördüncü ve son tasarımda ise sabit bir pülpte katı oranında kademeli olarak “konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon” ve “ultrasonik koşullandırma ve flotasyon” olarak gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik ses dalgaları sıvı ortam içinde kavitasyon olarak bilinen bir olay meydana getirmektedir. Bu olay ses dalgalarının sıvı içinde ilerlerken oluşturduğu basınç ve gevşeme evrelerinde, sıvı moleküllerin ayrılarak oyuklanması ve hızla büzülerek dağılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu sırada, oyuk içerisinde çok yüksek basınç ve sıcaklık değerleri meydana gelmektedir. Oyuğun çökmesi ile şok dalgaları ve sıvının yüksek hızlı mikrojetleri oluşmaktadır. Şok dalgaları ve sıvı jetleri herhangi bir yüzey üzerinde darbe etkisi yaparak aşınmaya sebep olmaktadır. Bu etki sayesinde ultrasonik ses dalgalarının cevher hazırlamada birçok uygulama alanı bulması ihtimali ortaya çıkmaktadır.

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.

Ultrasonik işlemlerin flotasyondaki etkilerinin sonuçları konvansiyonel flotasyonla karşılaştırılmıştır. Neticesinde, verim değerleri de ultrasonik işlemlerin pozitif etkisini

desteklemektedir. Verim ve kül içeriği bazında konvansiyonel ve ultrasonik flotasyon karşılaştırıldığında, en iyi değerler ultrasonik koşullandırma ve flotasyon yapıldığında sağlanmıştır. Bu çalışma sonunda açıktır ki, ultrasonik tekniklerin kullanımı kömür külünün yüzdürülebilirliğini pülpte katı oranı, ultrasonik yöntemin uygulanma şekli ve benzeri kıstaslara bağlı olarak etkilemektedir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF USE POSSIBILITY OF ULTRASONIC WAVES ON MINERAL PROCESSING OF SOME ORE AND WASTE SAMPLES

In this study, ultrasonic sound waves and their usability in fly ash processing have been investigated. For this aim, fly ash from a power plant in Germany was selected as samples. Flotation experiments for samples can be grouped into four different categories. The first is conventional flotation on different concentrations, the second is ultrasonic flotation with ultrasonic pre-treatment on different concentrations. The third consists “conventional pre-treatment and flotation”, “ultrasonic pre-treatment and conventional flotation”, “conventional pre-treatment and ultrasonic flotation” and finally “ultrasonic pre-treatment and flotation” on fixed concentration. The last one consists “conventional pre-treatment and flotation” and “ultrasonic pre-treatment and flotation” on fixed concentration.

Ultrasonic sound waves cause an effect in liquid medium, called as cavitation. This appears as a result of turning apart of liquid molecules in rarefaction stages and collapsing of cavity in compression stage, both of which formed by propagating of sound waves through the liquids. This releases high degree of pressure and temperature in the cavity. After collapsing of the cavity, shock waves and high velocity microjets of liquid are formed. These cause impacts on solid surfaces, thus erode them. These effects reveal the probability of use of ultrasonic sound waves in many applications of mineral processing.

Recent studies have shown that the separate stages of the flotation process could be 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.

The results of ultrasonic treatment for flotation were compared to the results of conventional flotation. Consequently, recovery values also supported the positive effect of ultrasonic treatment. When conventional flotation was compared to the ultrasonic flotation, the best results in terms of ash contents and recovery were obtained by use of ultrasonic pre-treatment and flotation. As a result of this study, it is obvious that, use of

ultrasonic techniques certainly affects the floatability of fly ash under certain conditions, such as concentration, how ultrasonic treatment is applied etc.

1. GİRİŞ

Madencilikte, yeni rezervlerin bulunması, maden yataklarının ekonomik olarak işletilmesi cevher hazırlama teknolojilerinin uygulanması ile mümkün hale gelmektedir. Ülkemizde, cevher hazırlama teknolojisinin yeterince gelişmemiş olması, madenlerin ekonomik olarak işletilmesini engellemektedir. Ülkemizin geleceği, katma değeri yüksek olan doğal kaynaklarının değerlendirilmesine ve madencilik üretimlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu süreçte Cevher Hazırlama'nın önemi açıktır. Cevher hazırlama; bir cevherdeki çeşitli mineralleri endüstrinin gereksinimlerine uygun hammadde haline getirmek, ekonomik değer taşıyanları ekonomik değeri olmayanlardan ayırmak ve ekonomik değeri olanların değerini daha da arttırmak için yapılan işlemleri kapsar. Ülkemizde bulunan cevher hazırlama tesislerinin önemli bir bölümü düşük performansla işletilmektedir. Bu duruma tesislerdeki teknolojinin çok eski olmasının yanısıra, cevher hazırlama bilgisinin eksikliği ve yetişmiş eleman azlığı neden olmaktadır. Son yıllarda mevcut temel yöntemlere yeni birisi eklenmemesine karşın eski yöntemlerin uygulama tarzı, kullanılan ekipman ve reaktiflerin geliştirilmesi, her bir cevher için özel çalışma şartlarının geliştirilmesi gibi yenilikler devamlı olarak uygulanmaktadır. Ülkemiz rezervlerini daha ekonomik değerlendirebilmek için yeni cevher hazırlama yöntemlerinin araştırılması, mevcut yöntemlerin geliştirilerek işletilen cevher yatağının özelliklerine göre modifiye edilmesi gerekmektedir [1].

Ses dalgalarının cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde yeni bir yöntem veya yardımcı bir sistem olarak kullanılabilirliğinin araştırılması düşünülebilir. Ses dalgaları maddesel ortamda titreşim hareketi olarak ilerlemektedir. Bu titreşim hareketinin frekansı, insan kulağı tarafından algılanabilirliğini tayin etmektedir. Duyma sınırının üzerinde kalan frekanslardaki ses; ultrasonik, ultrases veya sesötesi şeklinde adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, uygulanacak sistemin daha kolay yorumlanabilmesi için öncelikle ultrasonik dalgalarının oluşum ve hareket mekanizması ortaya konularak sıvı ve katılar üzerindeki çeşitli etkileri araştırılmıştır. Daha sonra cevher zenginleştirme yöntemlerinden biri olan

flotasyon üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için pülpte katı oranı değiştirilmiş ve ortama ultrases dalgaları uygulanarak ya da uygulanmadan deneyler yapılmıştır.

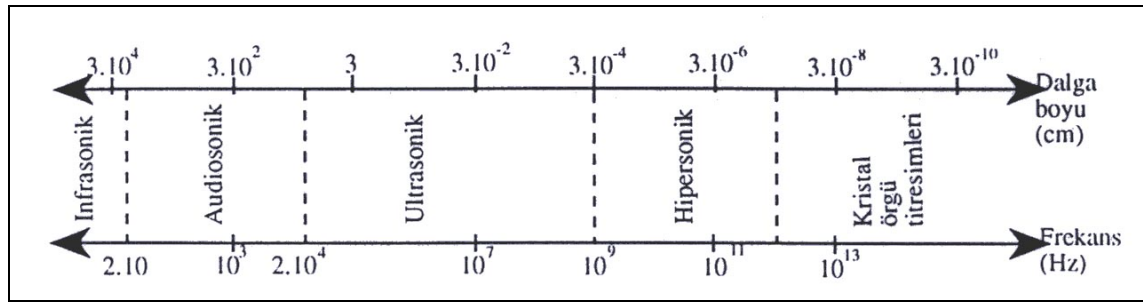
Deneyel çalışmalarda, konvansiyonel olarak uygulanan flotasyon yönteminin seçilmiş olan kömürden külün uzaklaştırılmasına olan etkileri araştırılmış ve yeni bir teknik olarak son yıllarda cevher hazırlama ve zenginleştirme uygulamalarında sıkça karşılaşılan ultrasonik dalgaların uzaklaştırma üzerindeki etkileri, seçilen uçucu külün ve uygulanan yöntemlerin incelenmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2. 1. ULTRASESLE İLGİLİ TANIMLAR

2. 1. 1. Ultrases Spektrumu

Ses maddesel ortamın titreşim hareketi olarak tanımlanmaktadır. Ses yalnızca maddesel ortamda vardır. Boşlukta ses veya ultrases oluşamaz. Ultrases, insan kulağı tarafından işitilmeyen ses demektir. Dalga boyu gözönüne alındığında kulağımızın duyarlılığı dışında kalan seslere ultrases ismi verilmiştir. Ultrasese ait spektrum şekil 2.1 de verilmiştir.



Şekil 2.1: Ultrases spektrumu [1].

İnsan kulağı 16 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara duyarlıdır. Kulak bu frekansların dışında kalan frekansları algılayamaz. Sesötesi, aynen ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi olarak yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Atomların veya moleküllerin denge konumları etrafında titreşimidir. Dolayısıyla sesötesi bir mekanik enerjidir. Aynı zamanda ışık, radyo dalgaları ve x-ışınlarıyla bir çok ortak özelliklere sahiptir. Dalga boyları dikkate alındığında ultrases dalga boyunun, ışık dalga boyunun altında fakat çok yakınında olduğu görülür. Elektriksel olarak oluşturulabilmesi ve bir noktaya odaklanabilmesinin mümkün olması ışık dalgalarına benzer davranışlarıdır. Farklılığı, moleküllerin mekanik titreşimleriyle ilerleyebilmesinden dolayı boşlukta ilerleyememesidir. İlerleyebilmesi için hava, sıvı, katı, doku gibi bir ortam gereklidir. Ultrasonik dalgalar ışık, x-ışını gibi elektromanyetik dalgaların tersine, bir malzemenin atomsal veya moleküler partiküllerinin denge

pozisyonundan itibaren titreşimi ile meydana gelen mekanik dalgalardır ve katı, sıvı, gaz, elastik ortamlarda yayılabilirler [1].

2. 1. 2. Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması

Sesin bir titreşim enerjisi olduğu ve bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirerek ses üretilebildiği bilinmektedir. Sesi algılamak de aynı prensip sözkonusudur. Havadan gelen ses dalgaları kulağın veya mikrofonun zarını titretir. Örneğin mikrofonda zarın titreşim enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek algılanır. Ultrasonik frekansları üretmek için yine bir titreşim hareketi üretmek ve algılamak için de titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek gerekir. Fakat oluşan fiziksel olaylar ve kullanılan araçlar çok farklıdır. Düşük frekanslarda ultrasonik enerji üretme de manyetostriktif olaydan yararlanır. Bazı malzemeler, örneğin nikel, nikel alışımları, kobalt, çelik ve ferritler manyetik etki ile boyut değiştirirler [1].

Maddenin boyundaki değişim; maddenin cinsi ve manyetik alanın şiddetine bağlıken, yönüne bağlı değildir. Üzerinden alternatif akım geçen bir bobinin içine konan nikel çubuğun boyu akım yön değiştirdikçe uzar veya kısalır. Manyetik alan sinüzoidal olarak değişirse çubuğun serbest uçları frekansı alan frekansının iki katına eşit olan bir titreşim yapar. Çubuğa tatbik edilen akım yüksek frekansa çıktığında çubuk aynı frekansla titreşir. 20-40 kHz frekansları ve gittikçe azalan verimle 100 kHz'e kadar olan frekanslar bu metodla üretilebilir. Malzemelerde manyetostriksiyon özelliği sıcaklık arttıkça zayıflar ve Curie ısı derecesinde tamamen kaybolur. Manyetostriktif problemler ucuz olurlar ve dış etkenlere dayanıklıdır. Bu nedenle betonun ve kayaların muayenesinde, denizaltı sonar sistemlerinde ve düşük ultrasonik frekanslar gerektiren diğer uygulama alanlarında manyetostriktif problemler tercih edilirler [2, 3].

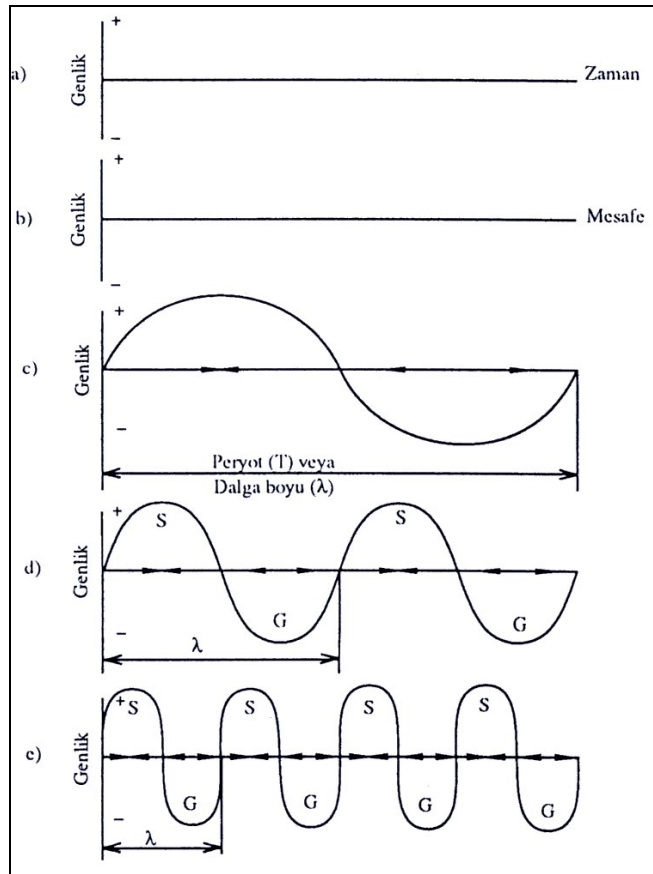
2. 2. ULTRASES DALGALARI

2. 2. 1. Dalga Hareketi

Sesi yaratabilmek için bir maddesel ortam titreşime zorlanmalıdır. Bir parçacığın titreşimi onun denge konumu etrafında gidip-gelme hareketidir. Bu hareket zaman ekseninde açılarak bir dalga halinde resmedilir. Dalga hareketi, titreşen parçacığın zamana göre titreşim genliğinin bir maksimum ile minimum arasında salınımını yani

zamanla değişimini gösterir. Katı ve sıvı ortamlarda atomlar birbirine elastik kuvvetlere bağlıdırlar. Dolayısıyla hiçbir atom komşularından bağımsız olarak titreşemez. Bir atomun titreşimi yanaşık atomları da etkiler. Ortam içinde başlayan bir titreşim hareketi bütün atomlara iletilir. Bütün atomlar titreşime geçer. Bir doğru çizgi üzerine düşen atomların aynı andaki genlikleri çizilirse bir dalgalı hareket resmedilmiş olur [4].

Tek bir atomun akıp giden zaman içerisindeki hareketini gösteren dalga eğrisi ile, bir doğru çizgi üzerinde yer alan çok sayıda atomun bir andaki genliklerini resmeden dalga eğrisi aynıdır. İki çizim arasındaki tek fark, yatay eksenin birinci halde zamanı, ikinci halde ortam içinde doğrusal uzaklığı göstermesidir. Şekil 2.2.a da tek bir atom için eksen takımı, 2.2.b de çok sayıda komşu atom için eksen takımı, 2.2.c de her iki eksen takımında titreşim hareketinin dalgalı görünümü, 2.2.d ve 2.2.e de ise frekansın iki kat artması halinde dalgalı değişimin görüntüsü verilmiştir [1].



Şekil 2.2: Titreşim hareketinin dalgalı gösterimi (G = Gevşeme, S = Sıkışma) [1].

2. 2. 2. Dalga Uzunluğu ve Frekans

Periyot bir tam titreşim hareketinin tamamlanması için geçen zamandır. Birim zamandaki periyot sayısına frekans denir.

Frekansla periyodun çarpımı 1'i verir ($f \cdot T = 1$). T saniye biriminde olduğundan

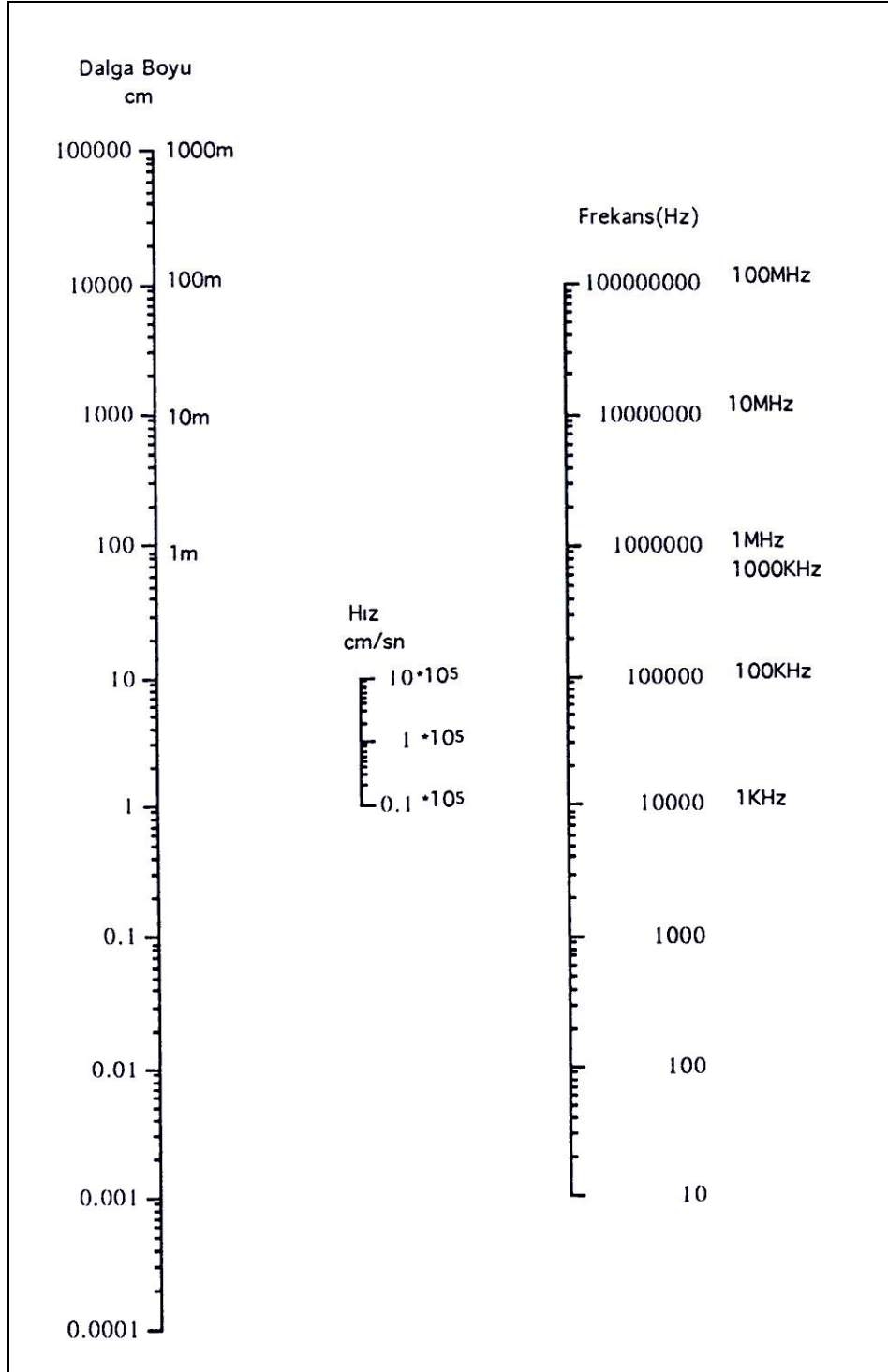
$$f = \frac{1}{\text{Saniye}} = 1 \text{ Cycle} = 1 \text{ Hertz (Hz) birimli olacaktır.}$$

Titreşim hareketinin bir periyodu dalga boyuna eşittir. Bir diğer deyimle dalgasal hareket bir periyoda karşılık olan bir zaman zarfında ortam içerisinde bir dalga boyu kadar yol kateder. Bu nedenle frekansla dalga boyunun çarpımı sesin ortam içinde birim zamanda katettiği yolu, yani ses hızını verir.

$$V = f \cdot \lambda \quad \text{m/s} \quad (2.1)$$

Burada V (m/s) ses hızını, f frekansı (Hz) ve λ dalga boyunu belirtmektedir.

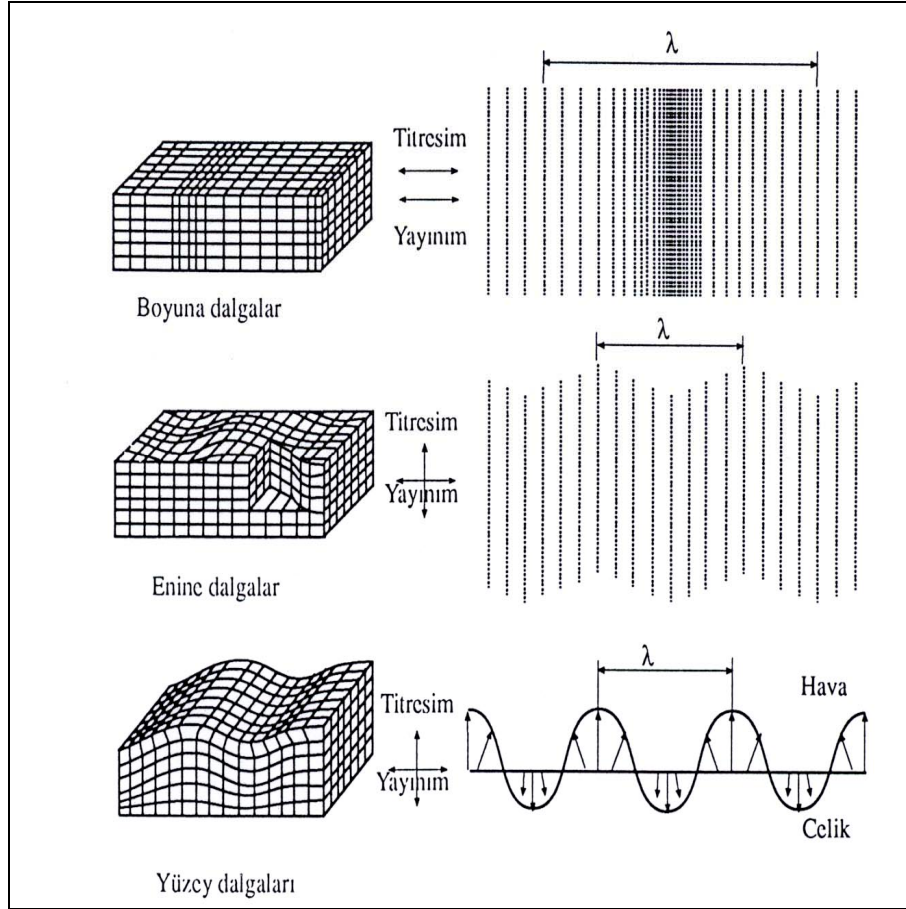
Frekans ve periyot, sesi üreten noktanın titreşim hızı ile ilgilidir ve o titreşim hareketi için sabittirler. Aynı titreşim hareketi havanın moleküllerini titreştirerek çevreye yayınırken de frekans ve periyodu hep aynı kalır. Dalga boyu bir periyot zarfında ve ses hızı birim zamanda sesin ortamda yayınım uzaklıkları olarak ortamın cinsine bağlı büyüklüklerdir. Ses dalgaları her ortamda değişik hızlarda yayılır. Eşitliğe göre ses hızı farklılaştığı zaman yani ses bir ortamdan diğer bir ortama geçerken frekansı aynı kaldığı halde, ses hızı değişeceğinden dalga boyu değişmek zorunda kalacaktır. Böylece dalga boyu ortama göre kısılır veya uzayabilir. Şekil 2.3 te frekans, dalga boyu ve hız için bir abak verilmiştir [1].



Şekil 2.3: Ses dalgaları için frekans, hız ve dalga boyunu veren bir abak [1].

2. 2. 3. Dalga Çeşitleri

Ultras ses dalgaları bir ortam içerisinde yayılırken ortam parçacıklarını çeşitli yönlerde hareket ettirirler. Ultras ses dalgaları; ilerleme yönüne ve ortam parçacıklarının hareket durumuna göre üç grupta ele alınır. Bunlar enine, boyuna ve yüzey dalgalarıdır. Şekil 2.4 te 3 tür dalga gösterilmektedir [1, 5].



Şekil 2.4: Sesötesi dalga çeşitleri [1]

2. 2. 3. 1. Boyuna Dalga

Ultras ses dalgaları ortam içinde ilerlerken parçacıkları kendi ilerleme doğrultusu boyunca hareket ettiriyorsa bu tip dalgalara boyuna ultras ses dalgaları denir. Yani boyunca ultras ses dalgası için dalga yayılma doğrultusu ile parçacık hareket doğrultusu aynıdır. Bu tip dalgalara basınç dalgası da denir. Dalga ortamda ilerlerken ortamda sıkışma ve gevşemeler meydana gelir. İki sıkışma ve gevşeme arasındaki uzaklık λ dalga boyu kadardır. Boyuna dalganın yayılma hızı eşitlik (2.1)'e uyar.

Ortamda yayılan ultrases dalgasının yayılma hızı sabit olursa frekansın değiştirilmesi ile dalga boyu değiştirilebilir. Boyunda dalgalarda parçacık titreşimleri dalga yayılma doğrultusu ile aynı olduğundan parçacıklar arası bağ ne kadar zayıf olursa olsun boyuna dalgalar sıvı, gaz ve katı ortamlarda yayılabilirler. Tablo 2.1 de bazı ortamlar için boyuna dalga yayılma hızları verilmiştir [1].

Tablo 2.1 : Çeşitli ortamlarda akustik hızlar [1].

Malzeme	Akustik Hız	Yoğunluk	Akustik Empedans
	$V(\text{cm/sn}) * 10^5$	$\rho (\text{g/cm}^3)$	$\rho, V * 10^6$
<i>Hava</i>	0,343	1,205	0,000000413
<i>Etan</i>	0,308	1,357	0,000041
<i>Etilen</i>	0,317	1,260	0,000040
<i>Metan</i>	0,430	0,717	0,0000308
<i>Hidrojen</i>	1,28	0,090	0,000011
<i>Oksijen</i>	0,316	1,42	0,0000452
<i>Su</i>	1,43	1,00	0,143
<i>Alkol</i>	1,44	0,79	0,11
<i>Gliserin</i>	1,90	1,26	2,42
<i>Polisitrin</i>	2,67	1,10	0,294
<i>Motor yağı</i>	1,25-1,74	0,88-1,02	1,1-1,7
<i>Petrol</i>	1,33	0,70	0,93
<i>Ağaç</i>	4,17	0,5-0,8	0,17-0,35
<i>Naylon</i>	1,8-2,2	1,00-1,20	1,8-2,7
<i>Pleksiglas</i>	2,73	1,18	3,20
<i>Lastik</i>	1,48	1,30-2,10	1,9-3,1
<i>Bakalit</i>	2,59	1,4	0,363
<i>Cam</i>	3,40-5,90	2,5-5,9	1,2-2,1
<i>Porselen</i>	5,6-6,2	13-14	2,40
<i>Granit</i>	3,90	2,75	1,09
<i>Mermer</i>	3,80	2,65	1,01
<i>Bakır</i>	4,60	8,93	4,11
<i>Pirinç</i>	4,25	8,55	3,61
<i>Çelik</i>	5,81	7,80	4,76
<i>Kalay</i>	3,32	7,29	1,99
<i>Demir</i>	5,85	7,87	4,07
<i>Alüminyum</i>	6,22	2,65	1,70
<i>Gümüş</i>	3,80	10,50	3,90
<i>Altın</i>	3,24	19,32	3,92
<i>Kurşun</i>	2,13	11,40	2,73
<i>Tungsten</i>	5,46	19,30	8,32

Boyuna dalgalara, “basınç dalgası” adı da verilir. Titreşen atomlar bir periyodun yarısında birbirlerine yaklaşarak sıkışırlar, periyodun diğer yarısında ise birbirlerinden uzaklaşarak kendi aralarında bir çekme kuvvetinin doğmasına neden olurlar. Böylece malzeme içinde, elastik sınırlar dahilinde kalan ve alternatif olarak değişen basınç ve çekme kuvvetleri doğar. İnsan kulağının nitelediği ses bu türdendir ve diğer dalga kuvvetlerine göre daha hızlı yayılır [5].

2. 2. 3. 2. Enine Dalga

Bu türde ise titreşim doğrultusu yayılım doğrultusuna diktir. Buna aynı zamanda “kayma dalgası” adı da verilir. Atom düzlemleri birbirini sıkıştırarak değil birbirlerine göre kayarak titreşim hareketini iletirler. Atomları arasında bağ kuvveti olan atomlar, yani katılar içinde kayma gerilmesi doğabilir. Dolayısıyla enine dalgalar ancak katı ortamlarda yayımlanabilirler, sıvı ve gaz ortamlarda yayılamazlar. Enine dalganın malzeme içindeki yayınma hızı her malzemeye göre farklı olup aynı zamanda sabittir. Enine dalgaların katı ortamda yayınma hızı boyuna dalgaların yaklaşık yarısıdır. $V_e \cong V_b/2$

Dalga trendinin herhangi bir andaki statik durumunu ele alırsak kütle parçacık yüzeylerinin birbirlerinden eşit uzaklıkta bulunduğunu ve ayrıca yüzeylerin deney parçasının yüzeyine paralel olarak hareket ettiklerini görürüz. Yüzeye eş uzaklıkta olan noktalar birleştirilerek parça içinde tabakalar oluştururlarsa, tabakaların yüzeyden muhtelif uzaklıkta olanları incelersek bazılarının tepecikler, bazılarının çukurlar halinde ortaya çıktıkları görülür. Dalga trendinin dinamik hareketi incelendiğinde, dalga tepecik ve çukurlarının test parçası boyunca hareketleri süresinde sabit bir mesafeyi korudukları görülür. Birbiri ardına gelen iki dalga çukuru veya dalga tepeceği arasındaki mesafe enine dalganın dalga boyudur [1, 5].

2. 2. 3. 3. Yüzey Dalgaları

Enine ve boyuna dalgaların bileşimi olan yüzey dalgalarında ortam parçacıklarının hareketi dalga yayınma doğrultusuna dik elipsler şeklindedir. Boyuna dalgaların yüzeye paralel ve yayınma doğrultusunda, enine dalgaların yüzeye ve yayınma doğrultusuna dik hareket ettirmek istediği parçacık yayınma doğrultusuna dik eliptik hareket yapar.

Yüzey dalgalarının genliği yüzeyden itibaren aşağıya doğru üstel olarak azalır ve bir dalga boyunda sıfırlanır. Bu nedenle yüzey dalgalarıyla yalnız cisimlerin yüzeyleri

incelenir. Sesötesi yüzey dalgalarına “Rayleigh dalgası” da denmektedir. Yüzey dalgalarının hızı enine dalgalardan biraz daha küçüktür. Çelikte $V_y = 0,92 \times V_e$ [1, 26].

2. 2. 3. 4. Yayınma Hızları

Sesötesi enerjinin bir ortamdaki yayınma hızı dalga şekline göre değişir. Ayrıca yayınma hızı ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Çeşitli dalga boylarının aynı ortamda farklı hızlara sahip olmaları dalga boylarında farklı olmaları sonucunu doğurur. E elastisite modülü (Mpa), γ poisson oranı ve ρ (g/cm^3) yoğunluk olduğunda, bir katı ortamda sesötesi dalga hızlarını veren denklemler şu şekilde yazılabilir ;

$$V_b = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\gamma}{(1+\gamma) \cdot (1-2\gamma)}} \quad (2.2)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\gamma)}} \quad (2.3)$$

$$V_y = V_e \cdot \frac{0.87 + 1.12\gamma}{1-\gamma} \quad (2.4)$$

Gaz ve sıvılarda sadece boyuna dalgalar yayınabilir. Bu durumda genellikle titreşimlerin ısı değişimi ile çok hızlıca oluştuğu kabul edilir. Her ikisi için hız ;

$$V = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho \cdot \beta_{is}}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta_{ad}}} \quad (2.5)$$

2. 3. ULTRASES ENERJİ ŞİDDETİ

Ultrases ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi gibi yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Atom, molekül veya parçacıkların denge konumları etrafında titreşimidir. Bu nedenle sesötesi bir mekanik enerjidir. Ses ötesi enerji şiddeti ile titreşen atomun veya molekülün genliği arasında şu basit bağıntı vardır ;

$$I = \frac{1}{2} \cdot W \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad (2.6)$$

Örneğin, 2 MHz frekanslı ve 10 W/cm²'lik enerji şiddetli bir ultrases üretici ile çalışılan işlerde 46,5 10⁶ (kg/m².sn) empedanslı bir çelikte atomların yer değiştirmesi yani genlik 51 10⁻¹⁰ m = 51 Å bulunur. Bir atom çapının 1 Å olduğu düşünüldüğünde 51 atom boyu bir genlik bulunmuş olur. Bu mikroskopik ölçekte çok büyük bir yer değiştirmedir [1, 6, 7].

2. 4. AKUSTİK EMPEDANS

Ortamların ses yayınımına gösterdiği dirence akustik empedans denir. Kısaca ses direnci de denir. Ortamın yoğunluğu ile bu ortamdaki ses hızının çarpımına eşittir.

$$w = \rho \cdot V \quad (2.7)$$

Akustik empedansları yüksek olan malzemelere “sese karşı sert”, akustik empedansları düşük olanlara da “sese karşı yumuşak” malzemeler denir.

2. 5. ULTRASES BASINCI

Sesin yarattığı titreşim, yayıldığı ortamlarda bir basınç oluşturur. Buna kısaca ses basıncı denir. Aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$P = w \cdot \omega \cdot A \quad (2.8)$$

Burada P (kg/cm²) akustik basıncı, w akustik empedansı, A (cm²) ise alanı göstermektedir.

(2.6) ve (2.8) denklemler birbirlerinin yerine konulduğu zaman aralarında şu şekilde bir bağıntı olduğu bulunur.

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{w} \quad (2.9)$$

Ses basıncı duyularımızla algılayabildiğimiz ve bu nedenle günlük hayatta bildiğimiz bir kavramdır. Şiddetli bir gürültü kulak zarını zorlar, sıvı içine konan bir ses kaynağının çevresinde bir akış başlar, sıvı içinde asılı duran parçacıklar bu akıntı ile kaynağından uzaklaşır. Katı atomları veya molekülleri yer değiştiremediklerinden ses enerjisi bunlar içinde basınç ve çekme gerilmeleri doğurur.

2 MHz frekansta 10 W/cm^2 şiddetindeki ultrasonik enerjisinin çelik içinde yarattığı basınç:

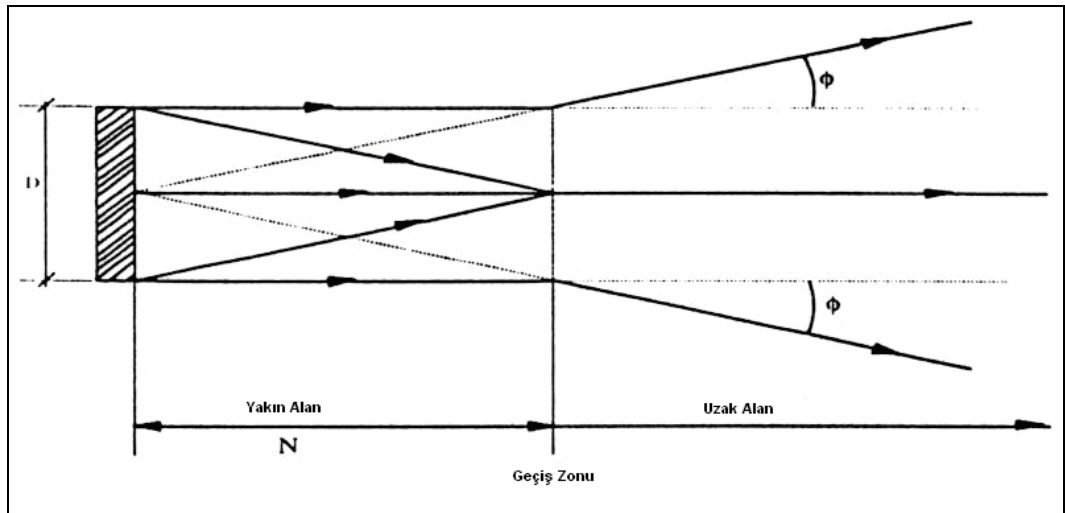
$$P = w \cdot \omega \cdot A = 3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 30 \text{ kg/cm}^2 \text{ gibi büyük bir değer olarak bulunur [1, 7, 8].}$$

2. 6. ULTRASES DEMETİ

2. 6. 1. Demetin Geometrisi

Sesötesi kaynağının ürettiği enerji yönlendirilmiş bir demet şeklinde yayılır. Demetin çapı kaynağın yani piezoelektrik kristalin çapı kadardır. Boyu ise şartlara bağlı olarak değişir. Sesötesi demetinin geometrisi şekil 2.5 te verilmiştir [1].

Dairesel kesitli bir üreteçten (transduser) çıkan demet bir süre silindir şeklinde uzandıktan sonra, koni şeklini alır. Böylece iki bölge oluşur. Silindirik alana “yakın alan” ve konik alana da “uzak alan” adı verilir. Bu iki alan yalnız geometriler bakımından değil aynı zamanda enerjik bakımından da birbirlerinden önemli ölçüde farklıdır. Silindir şeklindeki yakın alanın çapı ses kaynağının çapına eşittir. Boyu ise bir taraftan kaynağın frekansına diğer taraftan ortamın ses hızına bağlıdır. Uzak olan konisinin tepe açısı da yine aynı değişkenlere bağlıdır [1, 6, 7].



Şekil 2.5: Sesötesi demetinin geometrisi [1].

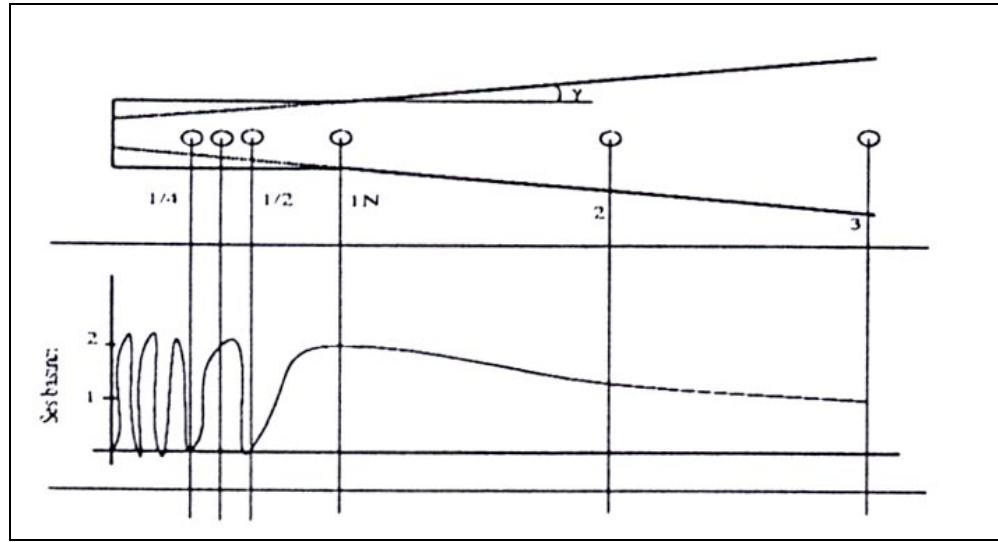
2. 6. 2. Demet İçinde Enerji Dağılımı

Demet içinde eşit enerji dağılımı idealdir. Gerçekte ise demet karışık bir enerji dağılımına sahiptir. Karışıklığın nedeni girişim olayıdır. Kaynağın yakınında, yani

demetin başlangıcında girişim olayı fazladır. Kaynaktan uzaklaştıkça girişim azalır. İki bölge, girişim olayı ve dolayısıyla enerji dağılımı yönünden büyük farklılık gösterir. Yakın olan girişimli bölge, uzak olan girişimsiz bölgedir.

2. 6. 2. 1. Eksenel Enerji Dağılımı

Şekil 2.6 da demet eksenü üzerine ses basıncının uzaklıkla değişimini göstermektedir. Eksen boyunca ses basıncı bir maksimum değerle sıfır arasında salınır. Maksimum ve minimumlar başlarda pek sıktır, fakat giderek araları açılır. Son minimum $N/2$ 'de yani yakın alanın ortasında ve son maksimum N 'de yani yakın alanın sonundadır. Ondan sonra ses basıncı uzak alan içinde sürekli azalarak gider [1].



Şekil 2.6: Demet eksenü boyunca ses basıncının uzaklıkla değişimi [1].

Yakın alanda ses basıncını veren matematiksel bağıntı oldukça karışık matematiksel denklemlerle ifade edilebilmektedir. Uzak alanda eksenel ses basıncının değişimi ise aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir;

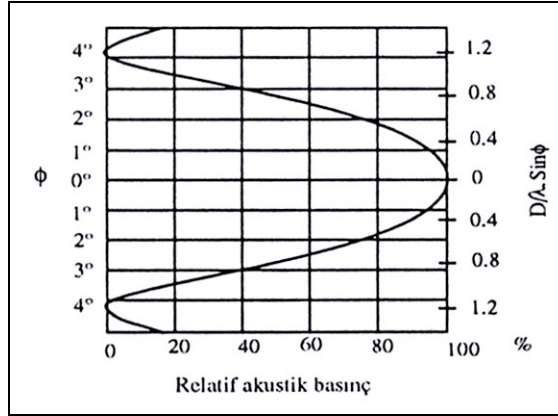
$$P(x) \cong P_0 \cdot \frac{N}{x} \pi \quad (2.10)$$

Bu denklemin geçerli olduğu bölgede, eksenel ses basıncı uzaklıkla ters orantılı olarak değişir. Girişim olayının ortaya koyduğu maksimumlarda bu anlamda uzak alanın başlangıç noktasında eksenel ses basıncı P_0 başlangıç değerinin iki katı olur. Girişim olayı kaynağın farklı noktalarından gelen titreşim enerjilerinin birbirine vektörel olarak eklenmesidir. Aynı fazla gelmişlerse toplam basınç bu noktada iki misli olur. 180° faz

farkı ile geldikleri noktalarda birbirlerine yok ederler, yani toplamları sıfır olur. Ara fazlarla geldikleri noktalarda basınç bu sınırlar içinde kalan ara değerleri alır [1].

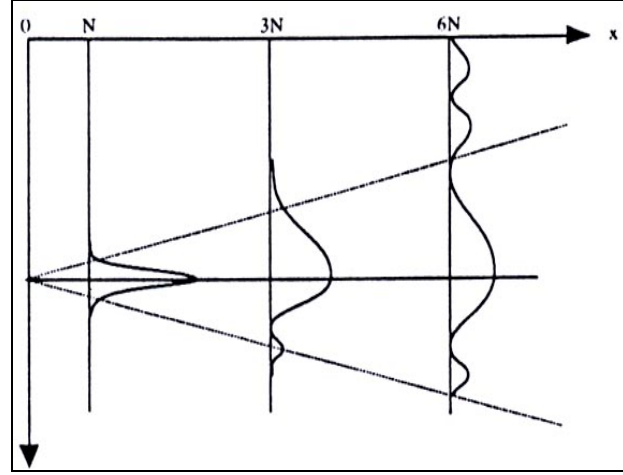
2. 6. 2. 2. Radyal Enerji Dağılımı

Demetin genişliğini tayin eden radyal enerji dağılımıdır. Aslında bir enerji alanından başka bir şey olmayan demetin sınırı kuramsal olarak ses basıncının sıfıra indiği yerdir. Pratik olarak eksendeki ses basıncının onda bir değerine düştüğü sınır olarak kabul edilir. Şekil 2.7 de demetin uzak alanının radyal kesitinde ses basıncının değişimi görülmektedir.

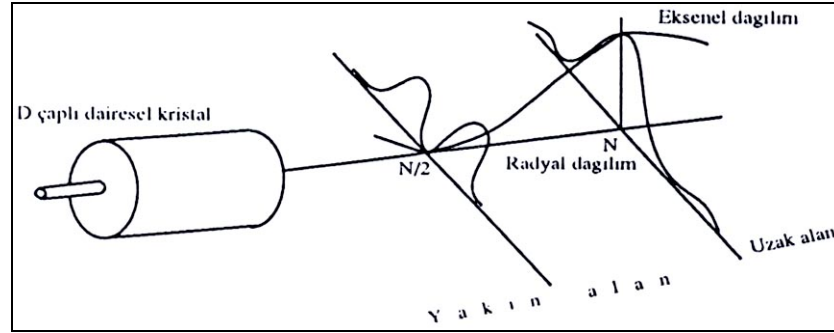


Şekil 2.7: Demetin uzak alanının radyal kesitinde ses basıncının değişimi [1].

Görüldüğü gibi enerji ekseninde en büyüktür ve çevreye doğru azalır. Şekil 2.8 de ise uzak alan içinde demetin radyal profilinin mesafe ile giderek yatıklaştığı ve genişlediği görülmektedir. Enerjinin korunumundan bunu anlamak kolaydır. Kaynağın yaydığı sesötesi enerji giderek daha büyük kesitlere yayılmakta ve dolayısıyla şiddeti azalmaktadır. Şekil 2.9 da ise her iki dağılım bir arada ve perspektif olarak görülmektedir. Yakın alanın birinci kısmı ile uzak alanın başlangıç kısmı gösterilmiştir [1].



Şekil 2.8: Demet uzak alanı içinde ses basıncının radyal dağılımdaki değişimi [1].



Şekil 2.9: Dairesel kaynak demetinin ses basıncının eksenel ve radyal dağılımları [1].

2. 7. ULTRASES ZAYIFLAMASI

Ultrases ortamlarda yayılırken ve arayüzeylerden geçerken büyük ölçüde zayıflar. Zayıflamanın başlıca nedenleri şunlardır;

- Yol kayıpları (soğurulma ve saçılma)
- Demetin genişlemesi
- Arayüzey kayıpları

$$\text{Desibel dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (2.11)$$

denklemler ile tanımlanan logaritmik bir ifadedir. Burada A_1 ve A_2 yankı yüksekliklerini gösteren büyüklüklerdir. A_1/A_2 oranı ise iki yankı yüksekliğinin birbirine göre bağıl büyüklüğüdür. dB iki yankı yüksekliğinin birbirine oranının 20 ile çarpılmış logaritmik

ifadesidir. Buna göre 1 dB fark demek yankı yükseklikleri arasında %12 fark demektir. 6 dB fark yankı yüksekliklerinden biri diğerinin yarısı demektir. Tablo 2.2 de bağıl yankı yükseklikleri ve bunlara karşılık gelen desibel değerlerini göstermektedir. Zayıflama katsayısı db/mm birimi ile verilir. 1 db/mm demek sesötesinin 1 mm mesafede %12 zayıfladığı anlamına gelir [1, 7].

Tablo 2.2 : Bağıl yankı yükseklikleri ve karşılık gelen desibel değerleri [1].

dB	0	1	2	4	6	8	10	12	18	20	30	40	50	60	80
A ₁ /A ₂	1	1,12	1,26	1,59	2,0	2,51	3,16	3,98	7,94	10,0	31,62	100	316,2	1000	1000

Kazanç (gain); birbirleri ile mukayese olunan iki büyüklükten küçük olanı büyüğün seviyesine çıkarmak için kaç kez büyütülmesi gerektiğinin ifadesidir. $A_2/A_1=0,5$ ise küçük olan A_2 genliği büyük olan A_1 genliği düzeyine çıkarmak için gerekli kazanç 2'dir veya bunu desibel cinsinden ifade edersek 6 dB'dir.

2. 8. DOPPLER ETKİSİ

Bir ultrases dalgası, uzunluğu zamanla değişen bir mesafe boyunca iki tansduser arasında yol alırsa, alıcıdaki frekans göndericidedekinden

$$f = 2f_0 \cdot \frac{A}{V} \quad (2.12)$$

miktarına göre farklıdır. Açısal bir hareket söz konusu olduğu zaman doppler etki;

$$f = 2V (\cos \theta) \frac{f_0}{V} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu şekilde bir yapıdan yansıyan devamlı ultrases dalgalarının frekansının değişimi hareketin hızını ölçmek için kullanılır [6, 7, 8].

Burada A (cm²) alanı, V (m/s) hızı ve f (Hz) alıcı frekansı ve f_0 (Hz) gönderici frekansını ifade eder.

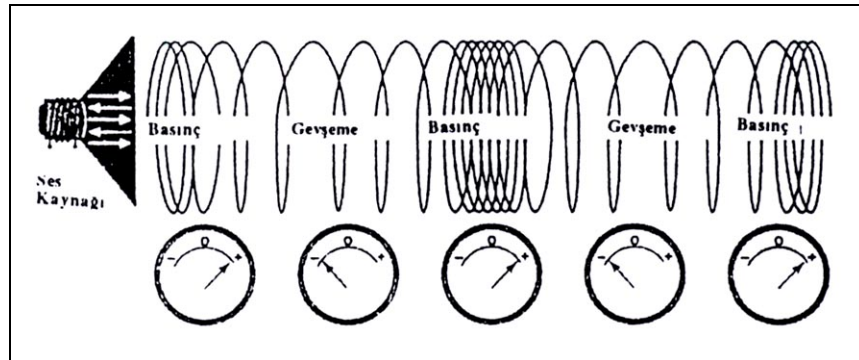
2. 9. DARBE ETKİSİ

Aynı frekanslı iki ultrases, kaynağı birbirine göre fiziksel olarak uygun şekilde yerleştirilerek bir nokta üzerinde darbe etkisi üretilebilir. İki dalganın enerjisi eklenir. Sonuçta dalga, birbirine eklenerek elde edilen değerde genliğe sahip olur.

2. 10. KAVİTASYON (OYUKLAMA) ETKİSİ

Güçlü ultrases dalgaları bir sıvı ortamda oyuklanma olarak bilinen bir etki meydana getirirler. İlk olarak geçen yüzyılın sonlarında Sir John Thornycroft ve Sidney Barnby tarafından karakterize edilen bu olay gemi pervanelerindeki aşınmanın nedenleri araştırılırken gözlenmiştir. Pervanelerin su içinde hızlı hareketi sonrasında, tarakların arka yüzeyinde büyük bir basınç düşmesi oluşarak küçük köpükler üretilmiştir. Düzgün olarak yerleştirilen pervaneler bile oyuklanma etkisi nedeniyle erozyona maruz kalmıştır. Oyuklama o kadar güçlü olmuştur ki pervanenin yapımında kullanılan en iyi pirinç alaşımlar bile normal kullanımda erozyondan etkilenmiştir. Bu aynı oyuklanma köpükleri suyun güçlü ultrases ile muamelesi sayesinde üretilebilir. Bu kabarcıkların dağılması sonucu oluşan enerji kimyasal işlemlerde büyük çaptaki kimyasal hızlanma ve değişimlere sebep olabilir. Ses titreşimleri, herhangi bir sıvı içerisinde basınç ve gevşeme evrelerinden oluşan bir dalga olarak ilerlemektedir. Ultrases dalga kaynağını sıvı içerisine batmış çok küçük fakat oldukça hızlı vuruşları olan bir piston olarak düşünebiliriz. Bu analogiden basınç dalgalarının, sıvı içerisine molekül etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde olduğu anlaşılır [1, 6, 7, 8, 9].

Şekil 2.10 da ses dalgalarının oluşturduğu sıkışma ve gevşeme evreleri görülmektedir.



Şekil 2.10: Ses dalgalarının oluşturduğu sıkışma ve gevşeme evreleri [1].

Dalganın gevşeme kısmını üreten pistonun çekme hareketidir. Piston saniyede 20.000 vuruşluk bir hızla çalıştığı zaman ortamda ultrases oluşturulur. Eğer gevşeme evresi yeterince güçlüyse sıvıyı bağlayan moleküller arası kuvvetleri yenecek büyüklükte negatif bir basınç oluşur. Bu durumda moleküller ortam boyunca küçük mikro kabarcıklar oluşturmak üzere birbirlerinden ayrılır. Ultrases oyuklanması için gevşeme dönemini izleyen bir sıkıştırma döngüsü mevcuttur. Bu mikro kabarcıkların büyük miktarda enerji açığa çıkararak ani olarak dağılmasına yol açar. 25°C sıcaklıktaki bir suda güçlü ultrases tarafından yaratılan oyuklanma kabarcıklarının çökmesi yoluyla 5000°K bir sıcaklık ve 1000 Atm değerlerine varan basınçların yaratıldığı tahmin edilmektedir.

Ses dalgaları sıvı içinde ilerlerken, titreşimlerin oluşturduğu hareket eden bir akustik basınç (P_A) yaratır. Bu akustik basınç, ortamda zaten var olan hidrostatik basınca (P_h) ek olarak sisteme verilecektir. Çoğu laboratuvar reaksiyonları için detaylı varsayımlardan kaynaklanacak olan herhangi bir ilave hidrostatik basınç ihmal edilebilir. Bir titreşimin efektif basınç değeri zamana bağlıdır ve şu şekilde verilmektedir:

$$P_a = P_A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.14)$$

Burada P_a efektif basıncı, P_A akustik basıncı, f (Hz) frekansı ve t (s) zamanı belirtmektedir.

Ses dalgası sıvı içerisinde ilerledikçe moleküllerin duyarlı pozisyonları etrafında titreşimini teşvik eder ve sahip oldukları enerjiyi bir anlık olarak artırır. Prensipte olarak bu enerji elastik çarpışmalar yoluyla diğer moleküllere iletilir. Toplam enerji artmasına rağmen kayıplar nedeniyle enerji kaybı oluşacaktır.

Yukarıda açıklandığı gibi ses dalgasının basınç azalma döngüsü içerisinde gelişen net negatif basınç (P_c), moleküller arası uzaklığın sıvı bütünlüğünü korumak için gerekli uzaklığı aştığı değere ulaştığı zaman sıvı parçalanacak ve oyuklanma boşlukları yaratılacaktır.

$$P_c = P_a - P_h \quad (2.15)$$

Yani oyuklanma kabarcıkları oluşturulacaktır. Sıvı için kritik uzaklığın 10^{-5} cm olduğunu farzederek çekme gerilmesi veya ihtiva edilen basınç 10.000 Atm olarak hesaplanabilir.

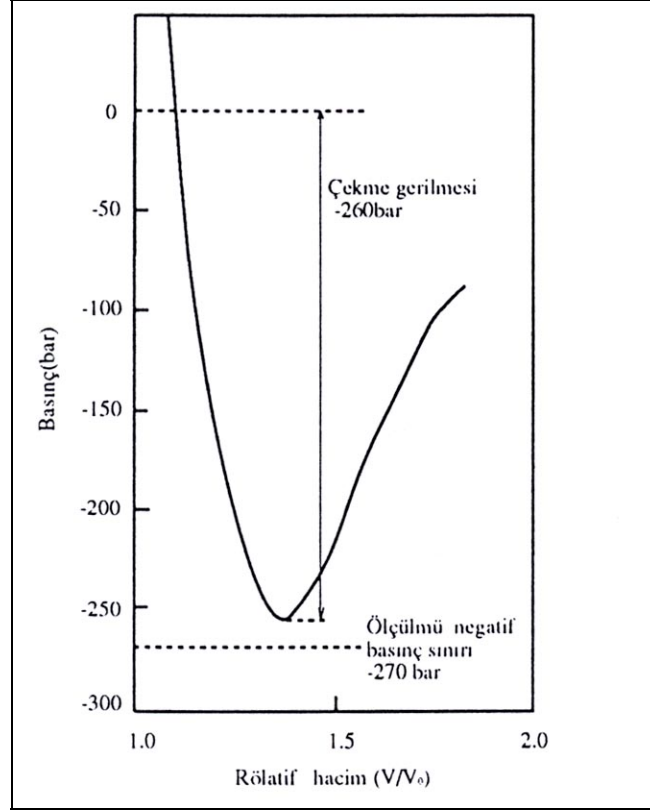
$$P_c \cong \frac{2\Gamma}{R} \quad (2.16)$$

Burada, “ Γ ” sıvı – gaz arayüzeyindeki yüzey gerilimidir. Bu hesaplama suyun tamamıyla saf olduğunu farzeder. Pratikte bir sıvının oyuklanma işlemini yapabilmesi için gerekli basınç bu hesaplamaların farz ettiğiinden önemli ölçüde daha düşük olan akustik basınçlarda olur. Bu çekme gerilimini düşüren zayıf noktaların sıvı içerisinde var olmasından kaynaklanır [1, 6, 7, 8, 9].

2. 10. 1. Kavitasyon ve Ses Ortamı

Kavitasyonun üretilebileceği akustik basınç genliğinin doğal bir üst limiti vardır. Bu limit homojen bir sıvının çekme dayanımı olarak adlandırılır. Basınç genliği bir sıvının çekme dayanımı seviyesinde olduğunda şiddetli terimini alırken daha düşük genlikli ses ortamı kuvvetli veya ılımlı olarak adlandırılır.

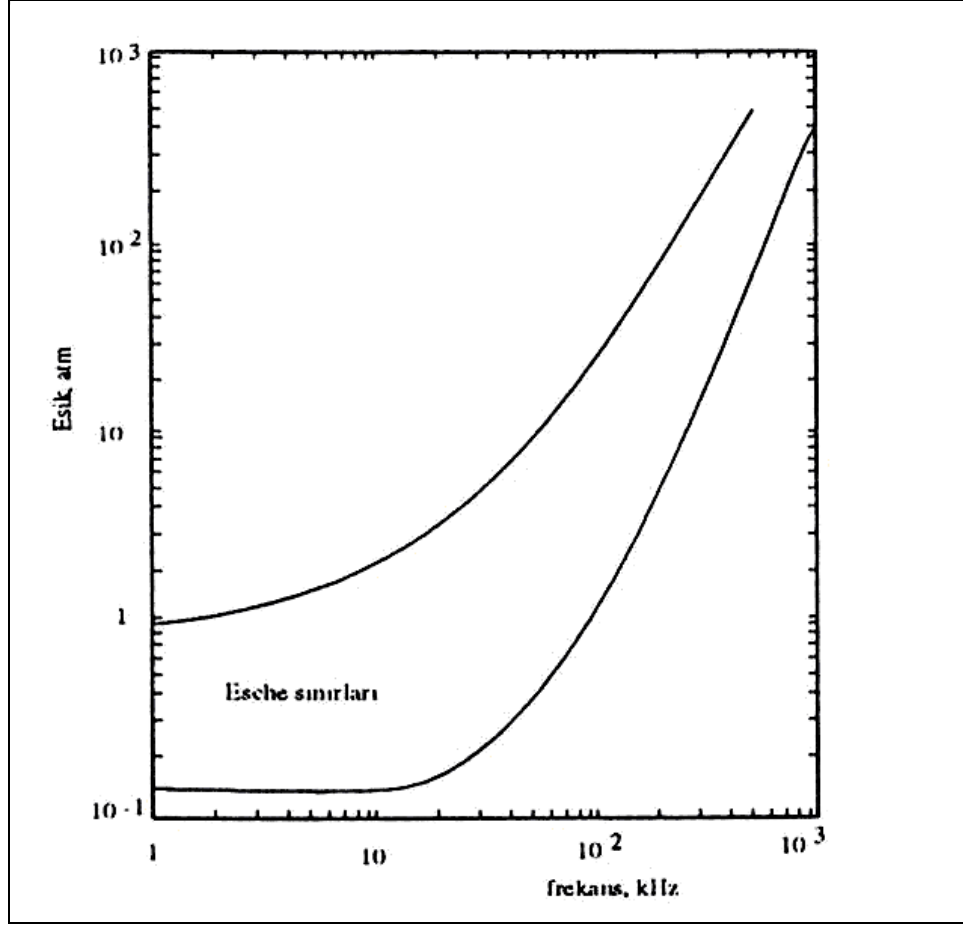
Bir homojen sıvının çekme dayanımı negatif basınç sınırı olarak veya pozitif gerilim olarak adlandırılır. Yani bu gerilim sıvının yeni bir stabil fazı oluşturabilmek için parçalara ayrılmadan veya kopmadan önce gösterdiği mukavemettir. Bu durum sıvı için P-V diyagramında gösterilebilir. Lennard-Jones ve Devonshire tarafından geliştirilen eşitlik yardımıyla Wentorf'un karbon tetra klorür için önerdiği eğri Şekil 2.11 de görülmektedir. Bu eğriye göre polar olmayan bu sıvı için -260 barlık bir gerilme direnci tahmin edilmektedir. Bu değer Lyman Briggs tarafından rapor edilmiş -270 barlık deneysel bulgu ile uyumludur. Benzer olarak Briggs, su için bu değeri -275 bar olarak bulmuştur.



Şekil 2.11: Karbon tetra klorürün çekme gerilmesi [1].

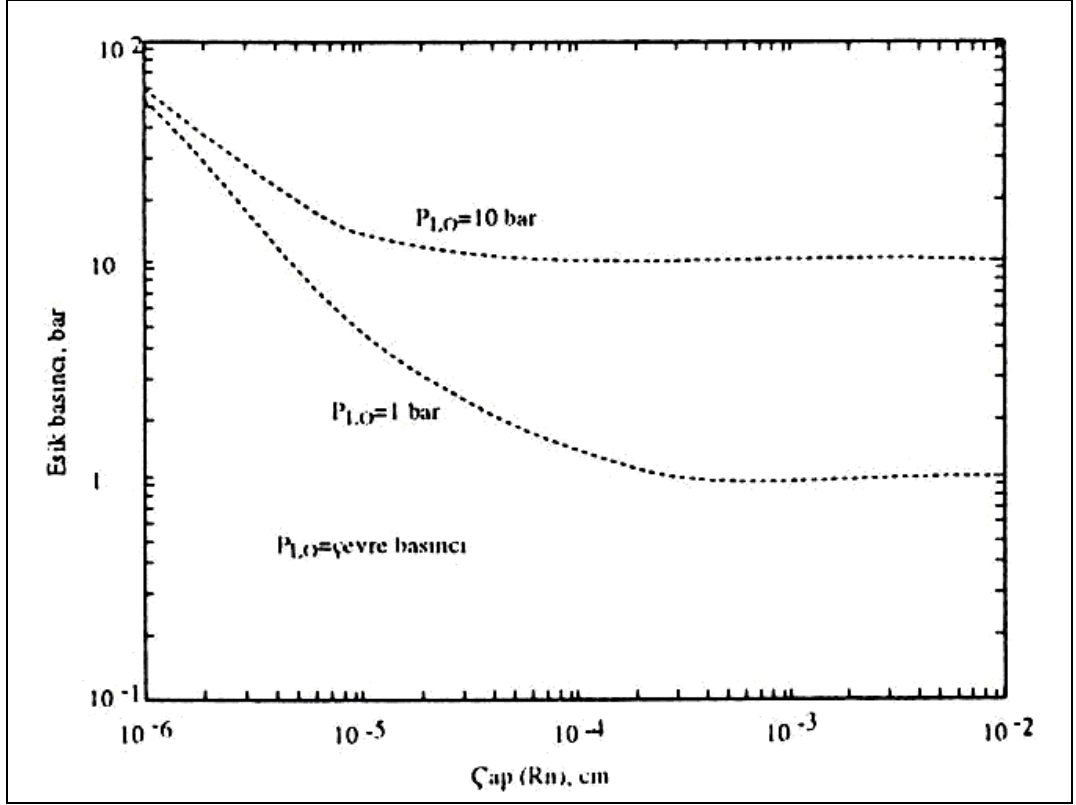
Ses ortamı ile oluşturulan basıncın genliği 100 barın üzerinde olduğunda şiddetli, 10-100 bar arasında kuvvetli ve 0,1-10 bar arası ılımlı olarak adlandırılabilir. Daha düşük değerler büyük kabarcıklar üreten köpürme olayını oluşturarak sıvının yüzeyine hızlıca yükselerek önemli etkiler oluşturmazlar. L. D. Rosenberg tarafından 600 barın üzerinde basınç genliği üretebilen ve ortalama 30.000 W/cm^2 akustik şiddetinde bir akustik üreteç imal edilebilmiştir [6, 7, 8].

Rosenberg'in çalışması her frekansta akustik kavitasyonun karakteristik özelliklerini maksimuma getiren bir ses basınç genliğinin olduğunu göstermiştir. Bu, optimum basınç genliğinin sıvının çekme dayanımının üst limitinin daha altında kalabilmesine neden olur. Çoğu deneylerde 10 ile 100 bar arasındaki ses basınçlarında kavitasyon üretilmiştir. Bu sıvının homojen olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu homojensizlikler çekirdek veya mikro kabarcık olarak isimlendirilirler.



Şekil 2.12: Kaviteasyon başlangıç eşiği [1].

Bu çekirdekler; buhar ve gaz karışımı ile dolmuş, sıvının içerisinde hareketli serbest küçük küresel kabarcıklardır. Bu model kaviteasyondaki bir çok olayı açıklamaya yeterlidir. Mikrokabarcıklar birkaç saniye içinde sıvının yüzeyine yani ses ortamı dışına çıkacak kadar büyük olmamalıdır. Bu boyutun pratik bir üst limiti 2×10^{-2} cm olarak alınabilir ve bu boyutta kabarcık yükselme hızı 5 cm/sn'dir. Birkaç saniye bekletilen musluk suyunda çekirdekler 5×10^{-3} cm, birkaç saat bekletilen suda 5×10^{-4} cm olacaktır. 5×10^{-5} cm'den daha küçük çekirdekler muhtemel olarak su içerisinde asılı olarak kalır. Bu mikrokabarcıkların yanısıra fiziksel homojensizlikler de kaviteasyon için çok önemli rol oynar. Şekil 2.13 te Blake'e göre teorik kaviteasyon eşiği grafiği görülmektedir [1].

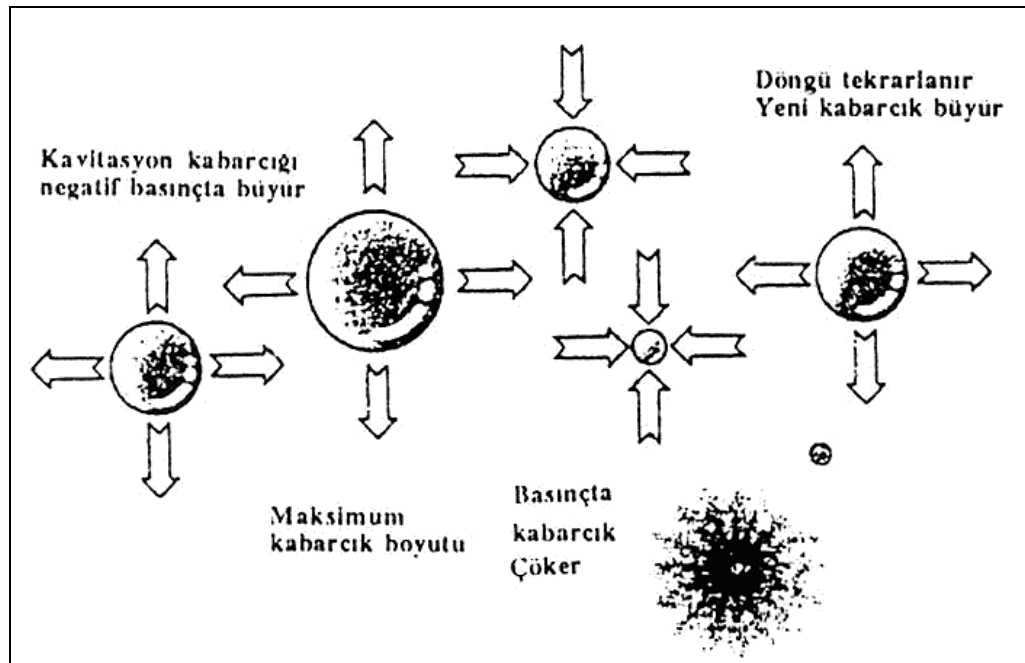


Şekil 2.13: Blake'e göre teorik kavitasyon eşiği [1].

Kavitasyon, ses ortamının düşük enerji yoğunluğunu çöken bir kabarcık içine veya civarına konsantre ettiğinden dolayı, enerji konsantre etmek için etkin bir mekanizma olarak kabul edilebilir. Böyle bir çökmede kabarcık içinde çok yüksek basınç ve sıcaklıklar üretilirken ara yüzeyde şok dalgaları oluşur ve sıvı içerisine yayılır. Serbest hidroksil kökleri gibi aktif kimyasal maddeler sıvı içine ara yüzeyi boyunca göç edebilir ve polimerizasyon gibi bazı kimyasal reaksiyonları başlatabilir.

Araştırmalar bir sıvı içindeki mikrokabarcıkların nasıl daim olduğu, onların bir ses ortamının etkisi altında nasıl maksimum boyuta büyüdüğü ve sonra nasıl aniden çöktüğünü açıklamaya yönelik yapılmıştır. Araştırmalara göre oyuklanma kabarcıkları; ani olarak çöken geçici oyuklar ve titreşerek duyarlı olarak kalan kalıcı oyuklar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Blake tarafından yapılan araştırmada 60 kHz ses ortamında oluşan kavitasyon kabarcıkları 3 farklı türe ayrılmıştır. İlki çok düşük basınçlarda büyük kabarcıkların köpürmesi ile oluşan kabarcıklanmadır. Bu kabarcıklar ses üretmemişlerdir. Daha yüksek basınçlarda oluşan uzun süre dayanıklı olarak kalabilen kabarcıklar ise ikinci türü oluşturmaktadır. Bu kabarcıklar kızarma sesi veya yumuşak bir ısıyla birlikte gelişir. Ses ortamının merkezinde küçük kabarcıkların bir akışı olarak

gözlenmiştir. Kabarcıkların oluşum hızı ses basınç genliğindeki değişimlere hassas olduğundan bu tipin başlangıç eşiği kolaylıkla bulunabilmektedir. Bu tip oyuklanma, fazla miktarda çözünmüş gaz içeren sıvılarda olduğundan gazlı kaviteasyon adını da alır. Üçüncü tip ise gazsızlaştırılmış sıvı içinde açıkça duyulabilen vurma sesi üretirek büyüme ve çökme evrelerinin doruğuna ulaşan, çok kısa ömürlü oyuklanma kabarcıklarının oluşumudur. Bu tip kaviteasyona ise buharlı kaviteasyon adı verilmektedir. Eşik değerindeki genliğinin %15 değişimi ya hiç kaviteasyonun olmamasına ya da 5 katı daha fazla kaviteasyon oluşmasına neden olmuştur [1, 6, 7, 8, 9]. Şekil 2.14 te bir kabarcığın maksimum boyuta büyüyerek çökmesi görülmektedir.



Şekil 2.14: Bir kabarcığın maksimum boyuta büyüyerek çökmesi [1].

G. W. Willard, 2,5 MHz'lik bir ses ortamında yaptığı incelemelerde, çekirdeğin onu çok büyük titreşimlere başlatan bir ses basınç bölgesi içinde elde edildiğini ve bu titreşim içinde maksimum boyutuna genişleyip ve sonra ani olarak çöktüğünü bulmuştur. Çökme boyunca kabarcık bir şok dalgası yayınlamıştır ve bu dalga çevredeki daha küçük hacimli çekirdekleri sıkıştırmak için yeterli olmuştur. Şok dalgasının geçişinden sonra bu küçük çekirdekler infilak etmiştir. Bu yüzden titreşerek çöken kabarcık sonrasında küçük çekirdekler patlatılırken relatif olarak büyük çekirdeklerin de tekrarlanmasını sağlar. Blake'nin kısa ömürlü kabarcıkları yani yalnızca bir kere büyüyen ve çöken kabarcıklarla zıt olarak büyüme ve çökme işlemleri birbirini izleyebilmektedir [1].

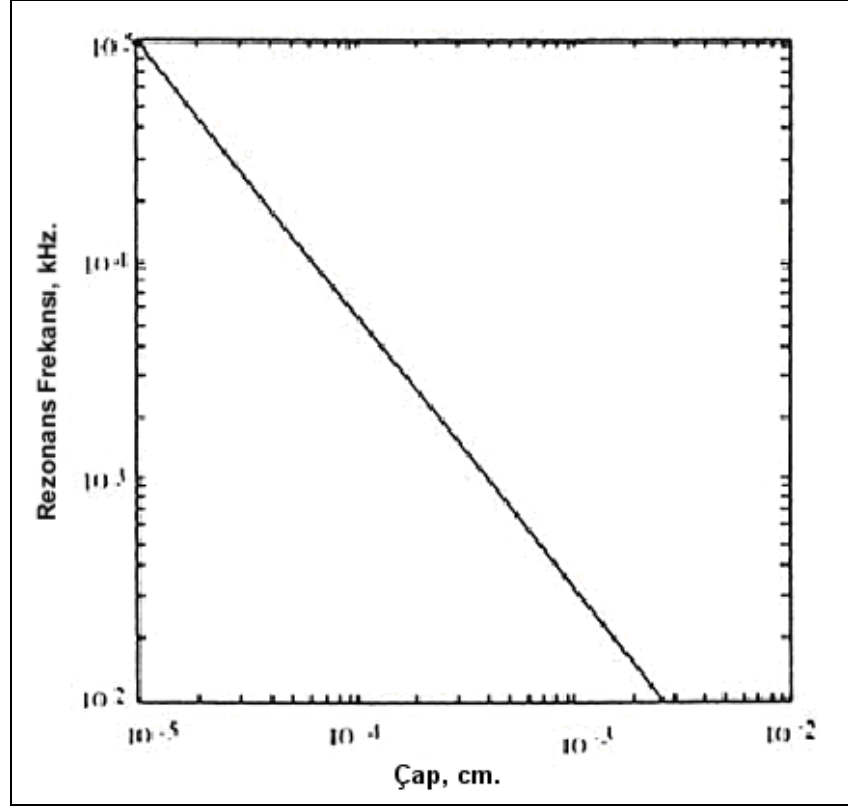
2. 10. 2. Kavitasyon Kabarcık Modelleri ve Tipleri

Kavitasyonu tanımlayan bir çok model içinde Lord Rayleigh'in modeli en basit olanıdır. Bir kabarcık sıvı içinde yaratıldığı zaman hemen çökmeye başlar. Bu modelde kabarcık içindeki basınç çevre basıncından daha düşüktür. Kabarcık belli bir noktaya kadar büzülerek sabit bir basınçta kalmaktadır. Böyle bir harekette onun içindeki hareketi kesmek için oyuk içeriğinin sıkışmaya başlamasına kadar hızlıca artacaktır. Buna rağmen fiziksel bir kabarcığın hareketinin bir çökme olup olmadığını belirlemek zordur. Basınç değişimi ve büzülme hızı ölçülebilir büyüklükler değildir [1].

Kavitasyon kabarcıkları statik olarak bir sıvı ile dengede kısa bir zaman periyodu için var olabilen gaz veya buhar dolu mikrokabarcıklardır. Bir ses ortamı uygulandığı zaman böyle bir mikrokabarcık titreşmeye başlar. Mikrokabarcık onun çapına eşit lineer olarak titretebildiği gibi lineer olmayan bir hareketle titreterek maksimum boyutuna genişler ve çökerek hızlıca büzülür. Böylece oyuklanmayı ikiye ayırabiliriz:

- a) Geçici oyuk; maksimum boyuta büyüyüp aniden büzülerek patlayarak dağılır.
- b) Duraylı oyuk; lineer olarak çapına eşit olarak titreşir.

Şekil 2.15 te Bir oyuğun lineer rezonans frekans grafiği görülmektedir [1].



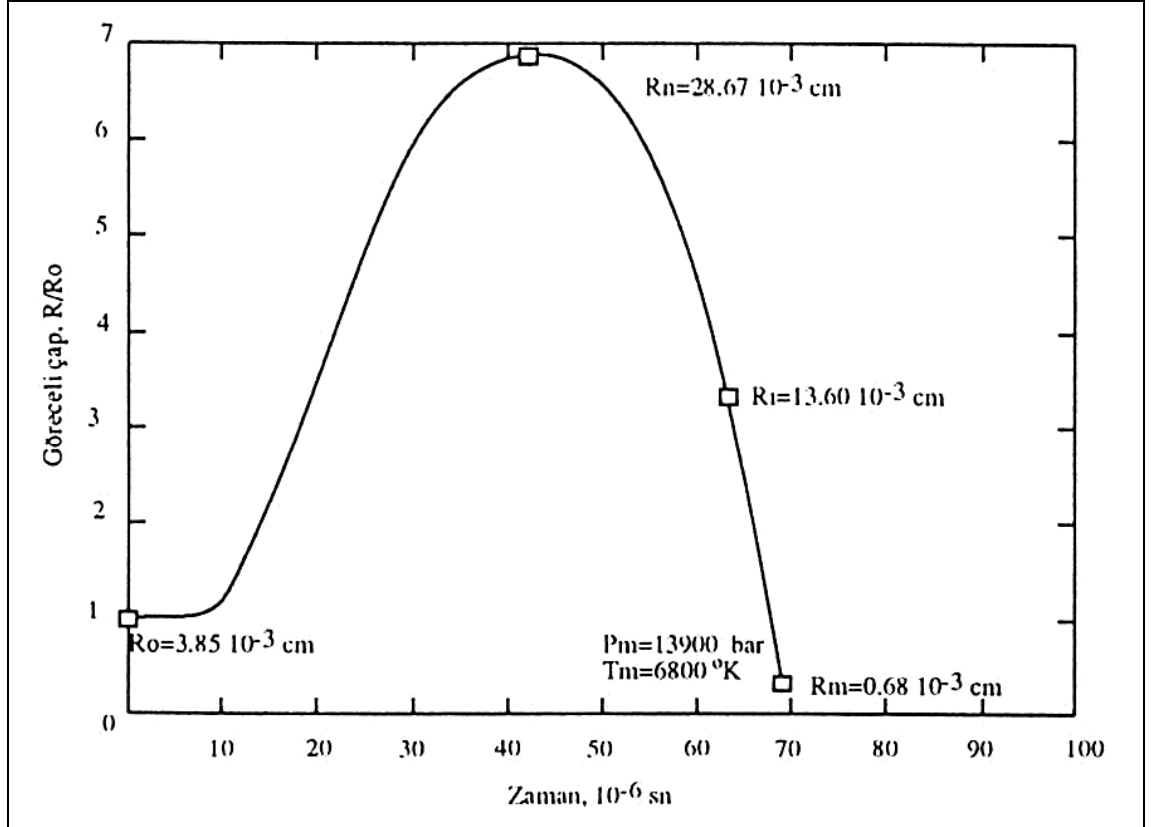
Şekil 2.15: Bir oyğun linear rezonans frekansı [1].

Kabarcık şekli olan küre şeklindeki bir duraysızlıktan dolayı her iki tür kabarcık daha küçük kabarcıklara parçalanarak benzer titreşim türlerine devam edebilirler. Fakat duraylı oyukta bu parçalanmaya kadar geçen süre çok fazladır. Geçici oyukta ise bu süre çok kısa olup aniden büzülerek devrin tekrarı için parçalanması ile sonuçlanır.

Hem stabil oyuk hem de geçici oyuk çap-zaman eğri eksenlerinde tanımlanırlar. Bir çekirdek, akustik basınç genliği yeterince küçük olduğu zaman stabil bir oyuk olarak davranır. Fakat çevre basıncından daha büyük basınç genliğindeki bir ses alanındaki sıvı içinde mikrokabarcıklar bir periyot boyunca negatif basınçla denge boyutlarının birkaç katına genişletilebilir ve hızlıca çökmeye başlar.

Kavitasyonun can alıcı diğer bir noktası bir periyot boyunca genişleyen ve hızlıca büzülen kabarcıkların içerdikleri gaz buhar karışım kompozisyonunun belirlenmesidir. Stabil oyuklar içinde gaz-buhar karışımlarının kompozisyonu onların hareketleri boyunca değişmez. Geçici oyuklarda ise buharlaşma ve yoğunlaşmadan dolayı kütle transferinin etkileri iki tür geçici oyucu tanımlayabilir.

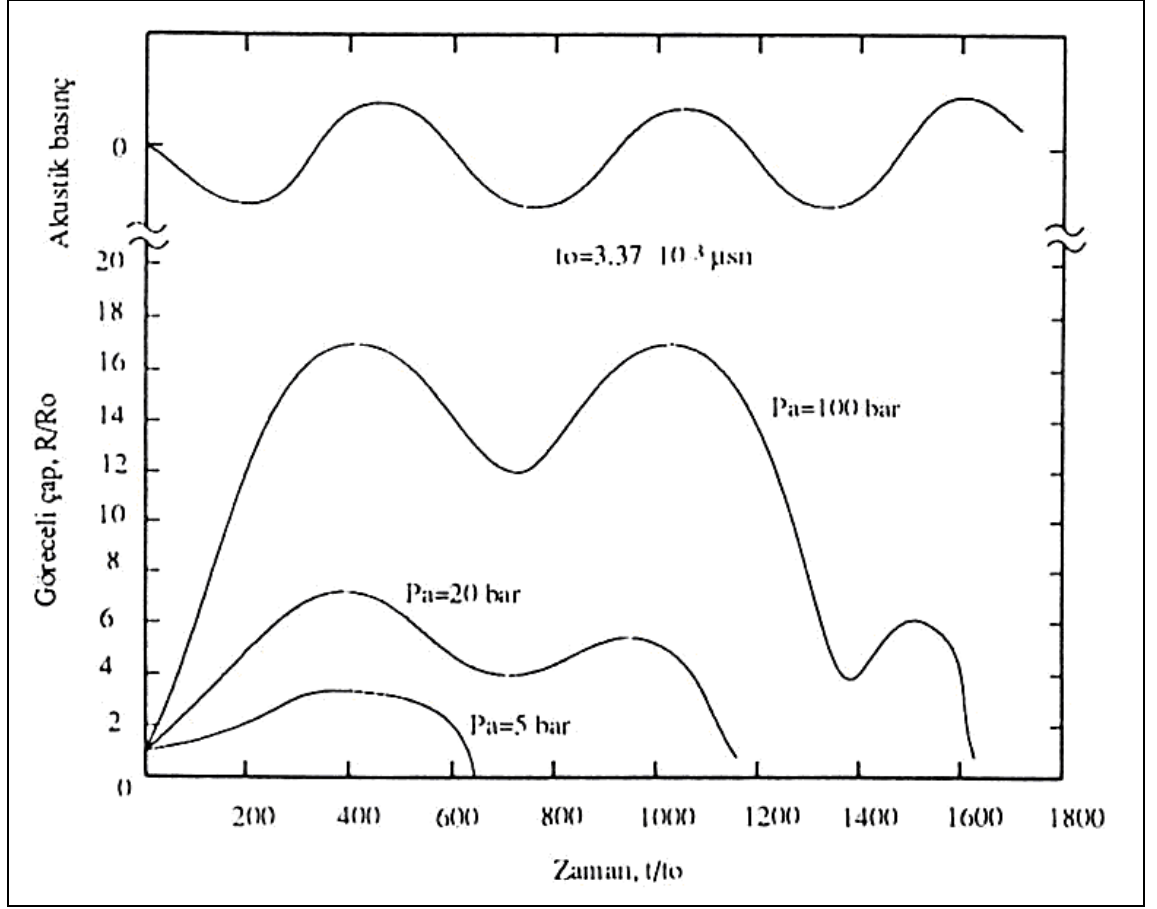
- Gazlı geçici oyuk: Bir pulsasyon süresince, içindeki gaz ve buharın relatif miktarları sabit kalan yani arayüzeyde yoğunlaşma ve buharlaşmanın olmadığı geçici oyuktur.
- Buharlı geçici oyuk: Bir pulsasyon süresince içindeki gaz ve buharın relatif miktarları değişen geçici oyuktur.



Şekil 2.16: Geçici bir oyuğun çökmesi [1].

Şekil 2.16 da geçici bir oyuğun çökme grafiği görülmektedir [1].

Şekil 2.17 de ses basınç genliklerinin büyük değerleri için çap-zaman eğrileri görülmektedir. [1]



Şekil 2.17: Ses basınç genliklerinin büyük değerleri için çap-zaman eğrileri [1].

Oyuklanma, ses ortamı tarafından üretilmiş kabarcık ve kabarcıkların hareketi olan bir fiziksel olay olduğundan formüle edilebilir. Gözlenebilir etkileri laboratuvar çalışmaları ile ölçülerek değerlendirilebilir. Örneğin bir şok dalgası bir basınç sıçraması olarak belirlenebilir ki, o ses hızından daha büyük bir hızla yayılır. Basınç sıçraması ve yayılım hızı, şok dalgasının en önemli özelliklerindedir ve laboratuvarında ölçülebilir. Böylece hidrolik bir ortamdaki oluşan kavitasyon belirlenebilir. Böyle bir sistemde basıncın azalması ile sıvıda kabarcıklar oluştuğu zaman kavitasyon oluşmaktadır [1].

Ses tarafından üretilmiş kabarcık ortamını tanımlayabilmenin iki yolu vardır. Birinci yol kabarcıkların hareketi yoluyla oluşturulan fiziksel etkilerdir. İkincisi kabarcıkların kendi kendilerine hareketi yoluyla oluşur. Bir kere kabarcıklar bir sıvı içinde bir ses alanı tarafından üretilmişse, onların sonraki etkileri erozyon, kimyasal reaksiyon, ses ışınlama, lüminesans ve benzer etkilere sebep olabilir. Böyle bir etki ölçülerek yani kalitatif olarak aktivite ölçülerek stabil ve geçici kavitasyonların oluşumu belirlenebilir. Stabil oyuklara dönüşen kabarcıklar canlı organizmaların hücre duvarlarını koparabilir ve

böyle bir kırılma tarafından serbest bırakılan proteinin miktarı kantitatif olarak belirlenebilir. Bu fiziksel etki stabil kabarcık alanı ile ilişkili olarak bir aktivite ölçüsü olarak nitelenebilir [1].

Gazlı kavitasyonda sıvı içinde bir kabarcık akışı ortaya çıkararak yumuşak bir kızarma sesi veya ıslık sesi yayar. Buharlı kavitasyonda kabarcıklar patlayarak büyür ve sonra duyulabilir bir vurma sesi veya çıtırtı ile aniden büzülür. Stabil kabarcık alanı için yumuşak, zayıf, yalancı, sahte, gazsızlaştırılmış isimlerini verebilirken, geçici kavitasyon için sert, kuvvetli, gerçek ve doğru isimleri verilebilir.

Yeni oluşmuş kavitasyon mikro kabarcıklarının çökmesi basınç döneminde olur. Çözücü, çözücü buharı veya gazın kabarcık içine akması, büyüme periyodu süresinde yeterli zamanın var olup olmamasına, yani onların boyutuna bağlıdır. Bazı kavitasyon kabarcıkları birkaç dönem için bozulmayabilir. Duraylı bir kabarcık 20 kHz'lik ortam içinde sadece 0,05 sn'lik bir ömre sahiptir.

Geçici oyuklanma kabarcıkları boştur, veya buhar dolu kabarcıklardır, 10 W/cm²'yi aşan ses şiddetlerinde üretilir. Bu kabarcıklar başlangıçtaki boyutların en fazla iki katı bir çapa büyür ve en çok birkaç periyotta var olurlar. Çökelerek daha küçük kabarcıklara ayrılıp dağılabilir ve böylece daha ileri oyuklanma için çekirdek oluştururlar. Geçici oyuklanma kabarcıklarının patlaması çok serttir. Çünkü kabarcık içine gaz veya buharın difüze olacak kadar zamanı yoktur.

Eşitlik (2.17) ve (2.18), çökme anında kabarcık içinde gelişen maksimum basınç ve maksimum sıcaklığı belirlemek için geliştirilmiştir. 20°C su içinde nitrojen ($\kappa=1.33$) içeren bir kabarcığın patlaması için bu eşitlikler yardımı ile P_{\max} ve T_{\max} ; 4200°K ve 975 bar olarak bulunmuştur [1].

$$T_{\max} = T_0 \left(\frac{Pm(\kappa - 1)}{P} \right) \quad (2.17)$$

$$P_{\max} = P \left(\frac{Pm(\kappa - 1)}{P} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (2.18)$$

Burada; T_0 ; çevre (deney) sıcaklığı, κ ; gaz karışımı (gaz-buhar) özgül ısı oranı; P ; Maksimum boyuttaki kabarcık içindeki basınç olarak alınır ve sıvının buhar basıncı (P_v)'na eşit kabul edilir [1].

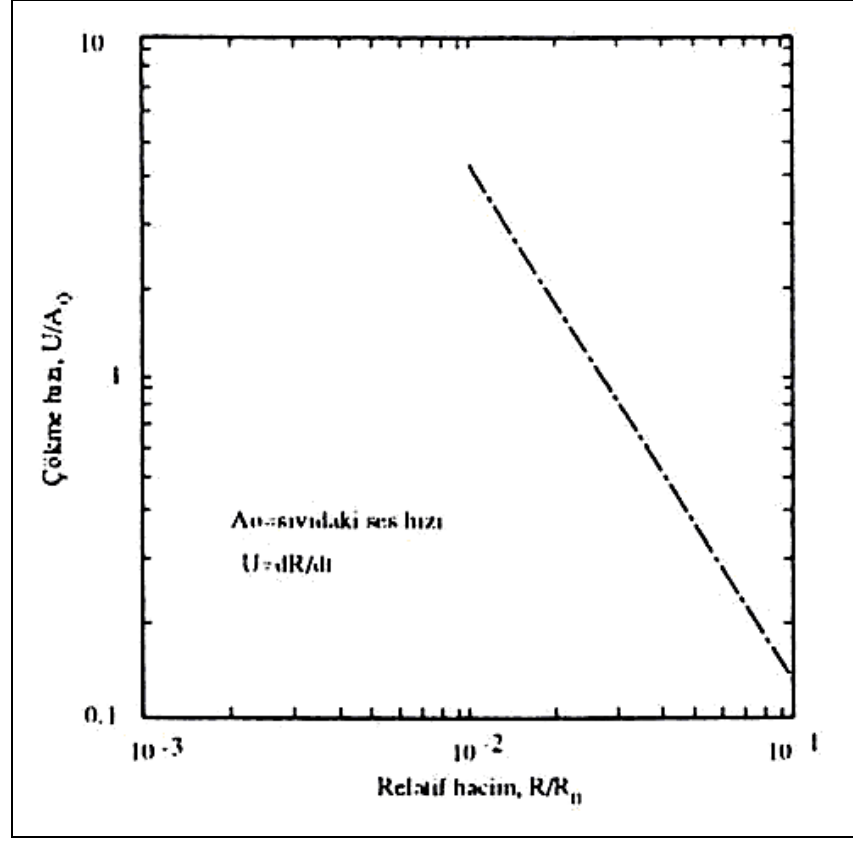
Güçlü ultrases ile sebep olunan kimyasal reaktivitelerin bir çoğu geçici kabarcıkların içindeki var olan bu çok yüksek sıcaklık ve basınç ile temel olarak açıklanabilir. Örneğin basıncın serbest bırakılması, çevre ortamı boyunca bir şok dalgası olarak, polimer dağıtılmasına sebep olan faktörlerden biridir. Duraylı oyuklanma kabarcıkları relatif ömürlerine bağlı olarak temelde gaz ve biraz buhar içerir. Hafifçe düşük şiddetlerde ($1-3 \text{ W/cm}^2$) üretilir. Bu kabarcıklar içinde gelişen sıcaklıklar ve basınçlar geçici kabarcıkların çökmesi üzerine gelişenlerden daha az olmasına rağmen çok daha uzun süre için var olduklarından reaktiviteyi etkilemek için daha fazla zamanları vardır. Ultrasesin yıkıcı mekanik etkilerinden, oyuklanma kabarcıklarının çevresinde oluşan şiddetli bölgesel zorlamalar sorumludur. Bunlar reaksiyon aktiviteleri üzerinde çeşitli etkilere de sahiptir [5, 6, 7, 8].

2. 10. 3. Kaviteasyonu Etkileyen Faktörler

2. 10. 3. 1. Çözücünün Fiziksel Özellikleri

Sıvının termodinamik durumu çevre denge basıncı P_{L_0} ve onun sıcaklığı T_n tarafından tayin edilmektedir. Genellikle T_n , sıvının kaynama noktasından çok daha küçüktür. Diğer bir sıvı özelliği de onu sıkıştırılabilirliğidir. Normalde basıncın bir fonksiyonu olarak ses hızı veya basıncı tarafından belirlenir. Örneğin, sıkıştırılabilirlik bir geçici oyuğun çökmesinin maksimum hızını onda bir veya daha fazla seviyede azaltabilir.

Şekil 2.18 de çökme hızının sıkıştırılabilirliğe göre değişim grafiği görülmektedir [1].



Şekil 2.18: Çökme hızının sıkıştırılabilirliğe göre değişimi [1].

Diğer taraftan sıvının viskozitesi kavite dinamiğinde küçük bir rol oynar. Sıvının viskozitesinin minimuma getirilmesiyle kavite etkileri maksimum yapılabilir. Visköz sıvılar kavite kabarcıklarının oluşumu ve ani patlaması için gerekli hızlarda karşılık veremezler. Bir çok sıcaklıkla viskozite düşmektedir. Sıvının termal iletkenliği de aynı şekildedir. Sıvı kabarcığa göre çok büyük olduğundan çökmenin oluşması esnasında bir büyük ısı rezervuarı olarak hareket eder.

Her bir çözücü kendine ait özel çözme parametrelerine sahiptir. Pentan ve su örnekleri için kavite özelliği farklılık gösterir. Bu sıvılar içindeki moleküller arası kuvvetler oldukça farklıdır. Su, Van der Waals kuvvetleri tarafından tutulan hidrojen bağından dolayı pentana göre çok daha fazla kuvvetli kohezyona (moleküller arası çekim kuvveti) sahiptir. Ayrıca suyun yüzey gerilimi yüksektir ve buhar basıncı pentanındakinden daha düşüktür. Bu suya pentandan çok daha düşük bir kavite başlangıç eşiği verir [1, 9].

2. 10. 3. 2. Reaksiyon Sıcaklığı

Sıcaklık, kavitasyon şiddetini maksimize etmek için dikkat edilecek en önemli parametredir. Bu, kavitasyonu etkileyen bir çok özelliğin sıcaklıkla ilgili olarak değişebilmesinden kaynaklanır. Sıcaklığın değişmesi vizkozite, gaz çözünürlüğü, gaz difüzyon hızı ve buhar basıncı gibi özellikleri değiştirir. Sıcaklığın yükselmesi vizkoziteyi artırırken çözülmüş gaz miktarını da azaltır. Aynı zamanda gaz difüzyon hızını da arttırarak gassızlaştırmayı hızlandırır. Saf suda kavitasyon etkisi yaklaşık 70°C’de maksimuma gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda etki azalarak kaybolur. Bu sıvı ortamının kaynamasına sebep olduğu düşük basınç zonlarının oluşumundan ve kavitasyon kabarcıklarının çözücü buharı ile hemen doldurulmasından dolayıdır. Basınç devresi süresinde bu buhar dolu kabarcıkların çökmesini yastıklar. Bu sonikleştirme şartları altında kabarcıklar tamamen çökmezler [1].

2. 10. 3. 3. Ses Alanı

Bir ses alanı ile bir oyuğun etkileşimi genellikle oyuğun çapı, sıvıdaki sesin dalga boyu ile karşılaştırılacak kadar küçük olarak kabul edilmesiyle basitleştirilir. Ses ortamı zaman bağımlılığı sinüzoidal olarak alınırsa ses basınç genliği ve onun frekansı ile ifade edilebilir.

Ses frekansı: Ultrasonikle kavitasyon oluşturmak için genelde 20-50 kHz arasında frekanslar kullanılır. Bunun iki amacı vardır. Birisi geleneksel olarak kullanılan ekipmanlar bu aralıkta çalışmaktadır. Diğeri ise yüksek frekanslarda kavitasyonun başarılmasının oldukça zor olmasıdır. Çok yüksek frekanslarda bir akışkana uygulanan basınç dalgaları ve bu akışkanın moleküllerinin cevabı arasında doğal bir gecikme olacaktır. MHz seviyesindeki frekanslarda daha şiddetli bir dalga kullanımı ile bu gecikme telafi edilmelidir. Böylece moleküllerin efektif olarak çekilip ayrılması daha büyüktür. Maalesef gerekli titreşim şiddetlerinde çok yüksek frekanslı transduserleri çalıştırmak bir mühendislik problemidir [1].

Ses Şiddeti: Şiddetteki her artış genelde kimyasal etkide bir artış sağlayacaktır. Fakat P_A basınç genliğinin çok fazla artması ile kabarcıklar genişleme döneminde o kadar büyüyebilir ki, çökme için kullanılacak zaman bulamaz. Eğer bu kabarcıklar ses kaynağının yüzeyinde oluşursa yastık kabarcık oluşturur. Bu ses enerjisinin sisteme

etkin iletimini azaltacaktır. Genellikle $0,3 \text{ W/cm}^2$ 'yi geçen güçlerde kavitasyon olayı başlamaktadır. Şekil 2.19 da çeşitli frekanslarda kavitasyon oluşumu görülmektedir [1].

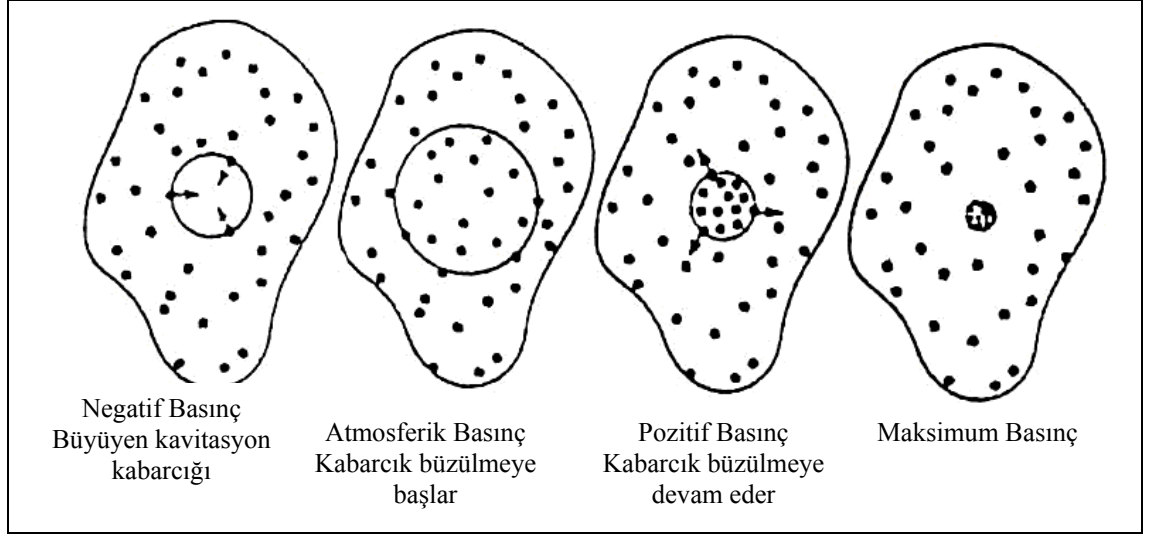


Şekil 2.19: Çeşitli frekanslarda kavitasyon oluşumu [1].

2. 10. 3. 4. Çözünmüş Gazların Varlığı

Ses dalgalarının negatif basınç döneminde sıvı ayrılarak kavitasyon kabarcığı oluşmaya başlar. Kabarcık içinde negatif basınç gelişirken sıvı içindeki çözünmüş gazlar kabarcık içine sınır boyunca difüze olmaya başlar. Ses dalgalarının alçak basınç devresinin geçmesi ve atmosferik basınca ulaşmasından dolayı negatif basınç azalırken kavitasyon kabarcığı büzülmeye başlar. Ses dalgasının basınç dönemi boyunca kabarcık içindeki difüze gazlar sıkışarak tekrar sıvı içine difüze olmaya çalışacaktır. Fakat bu difüzyon ilk durumdaki gibi kolaylıkla gerçekleşemez. Çünkü bir kere büzülmüş oyuğun yüzey alanı daha küçülmüştür. Sonuç olarak gaz içeren sıvı içinde oluşan kavitasyon kabarcığı tamamen çökerek patlayamaz. İçerideki gaz yastıklama etkisi yapar. Gelecek gevşeme fazı kabarcık içine daha çok gaz çekecektir. Bu kabarcık gaz dolu bir paket halinde kalarak yüzebilir hale gelir ve yüzeye yükselerek sıvıyı gazsızlaştıracaktır [1].

Kabarcık içindeki gazın özgül ısı oranı çok önemli bir faktördür. Çökme sıcaklığı ve basıncı gözönüne alındığı zaman bu oran tek atomlu gazlar için en yüksektir. Ses sistem boyunca daha iyi iletilebilir ve tek atomlu gaz kabarcıklarıdır. Çözünür bir gazla emdirilmiş bir sıvı içinde oluşturulan mikro kabarcıklar bu gazın bolca bir miktarını içereceğinden ultrases sıvının gazsızlaştırılması için kullanılabilir. Şekil 2.20 de çözünmüş gazların varlığında oluşan kavitasyonun yastıklanması görülmektedir. [1].



Şekil 2.20: Çözünmüş gazların varlığında oluşan kavitasyonun yastıklanması [1].

2. 10. 3. 5. Tepkime Sisteminin Temizliği

Çözücü içinde var olan bütün zerre ve taneler oyuklanma için tohum görevi yapar. Böyle tanelerin yarık ve girintilerinde tuttuğu gazlar oyuklanma kabarcıklarının yeniden oluşumu için çekirdek olarak görev yapar. Homojensizliklerin varlığı sıvının çekme gerilmesinden daha az ses basınç genliklerinde akustik oyuklanmanın üretimini sağlar. Buna rağmen bu homojensizliklerin tayini zordur. Çekirdek veya mikro kabarcıklar kavitasyonun ortaya çıkması için var olmak zorundadır. Çapı belli olan küresel bir mikro kabarcığın hareketi serbest mikrokabarcık olarak kabul edilerek tartışılabilir. İstatistiksel olarak bu çap için ortalama bir değer bulunabilir. Bu, sıvının hazırlanması ile ses ortamının uygulanması arasındaki bekleme süresine bağlı olarak değişecektir [1].

2. 10. 3. 6. Çevre Basıncı

Dış basıncın artması sistemin oyuklama eşiğini artırır. Bunu gevşeme fazı içinde daha büyük negatif basınç gerektirmesi ve çözücü ile reaksiyon unsurlarının buhar basıncını düşürmesi ile sağlar. Bu oyuklanmayı başarmak için gerekli olan ultrases şiddetini artırır. Şiddetin artırılması ise çökmenin daha da kuvvetli olmasına neden olacaktır. İlave basınç artışının gerçek etkisi oyuklanma çökmesinin etkin gücünü arttıracaktır.

2. 10. 3. 7. Arayüzeyin Etkisi

Oyuk içeriği ile sıvı arasındaki ara yüzey ile ilgili en önemli parametre onun şeklidir. Genel olarak arayüzeyin küresel olduğu ve bütün aşamalar boyunca öyle kaldığı kabul

edilmektedir. Arayüzeyin küresel şekilden sapması mutlak olmasına rağmen matematiksel hesaplamalarda bu gözönüne alınmaz.

Arayüzeyle ilgili diğer en önemli parametre yüzey gerilimidir. Yüzey gerilimli bir ses alanının kavitasyonu başlatmasında önemli bir rol oynar. Yüzey gerilimi geçici oyuk çökmesinin kuvvetli şekilde şiddetini etkiler. Hesaplamalarda nadiren elektrik şarjı da dikkate alınabilir. Çoğu kabarcık yüzeyi serbest şarj tabakası taşır ve çekirdeğin devamlılığında önemli rol oynar.

Oyuk bir gaz ve buhar karışımını içerir. Böyle bir oyuğun dinamiklerinin çalışmasında başlangıç noktası oyuk denge basıncı P_n ve çevre denge basıncı P_{lo} da başlangıç anıdır. O zaman bir oyuk, oyuk içindeki gazın miktarı, sıvıdaki buhar basıncı ve yüzey gerilimi tarafından belirlenmiş bir denge çapı R_n 'ye sahiptir. Diğer taraftan eğer oyuğun çapı R_n tayin edilirse oyuğun içindeki basınç P_c belirlenebilir:

$$P_c = P_n + P_v = P_{lo} + \frac{2\Gamma}{R_n} \quad (2.19)$$

Burada P_n : gazın başlangıçtaki basıncı, P_v , T_n de denge buhar basıncı ve Γ ; yüzey gerilimidir [1, 8].

Başlangıçta gaz ve buhar karışımı bir ideal gaz gibi davranacaktır. Fakat eninde sonunda geçici oyuğun çökmesi ile karışım oldukça hızlı sıkışmanın sonucu olarak yoğunluk, sıcaklık ve basınç büyük oranda artacaktır. Karışımdaki moleküller ayrışacak ve belki de iyonize olacaklardır. Ara yüzeye karşı enerji ve kütle transferi kavitasyon dinamiğinde önemli bir rol oynar. Sıkışma boyunca artan sıcaklık oyuk dışına doğru akar. Bu yüzden difüzyon sabitlerinin belirlenmesi gerekir.

2. 10. 4. Kavitasyonun Katı Yüzeyindeki Etkileri

Teorik çalışmalarda kavitasyon olayının katı yüzeyinden uzakta sıvı içinde meydana geldiği kabul edilir. Fakat çoğunlukla sıvı içinde bulunan bir katının yüzeylerinde veya sınırlarında kavitasyonun şiddetli etkileri meydana gelir. Bir sıvıdaki ses ortamı; yüzeyde kalıcı değişiklik ve hasarı oluşturan (erozyon ve korozyon), tanecik ve yüzey

filmlerini uzaklaştıran (temizleme) ve bazı yüzey etkilerini hızlandıran kabarcık ortamları oluşturabilir [1].

Akustik kaviteasyonun teknik uygulamalarının çoğunda bu yüzey etkilerinden faydalanılmaktadır. Gemi pervanelerindeki aşınma problemini inceleyen Rayleigh; gözlemlenen ortam içinde gerçekleşen oyuklanma hasarının bir fiziksel olay olduğunu ve elektriksel, kimyasal ve mekanik faktörlerin bir bileşkesinden kaynaklanabileceğini düşünmüştür. Kaviteasyon hasarının mekanik olarak açıklamanın mümkün olduğunu göstererek bu hasarın ana sebebinin kabarcık hareketinden meydana gelen mekanik bir stres olduğunu bulmuştur. Yüzeğe hasar veren bu olay korozyon kelimesi ile ifade edilebilir. Geçici oyuklara benzeyen kabarcıkların varlığı erozyonun üretilmesi için yeterli olarak gözükse de, yüzey duyarsızlıklardan meydana gelen yüksek hızlı jetlerde erozyona sebep olabilir. Bu duyarsızlıklar geçici kaviteasyonda olduğu gibi duraylı kaviteasyon tarafından da oluşturulabilmektedir [4].

Araştırmalar oyuklanma hasarının birincil sebebi olarak bir kabarcığın hareketinden meydana gelen mekanik gerilme olduğunu göstermektedir. Ellis ve Plesset 18-24 kHz'lik ses ortamı ile polikristalin ve monokristalin materyaller üzerinde akustik dalgalar tarafından oluşturulan oyulma etkilerini çalışarak, x-ray difraksiyonu ve mikrofotografılarla kaviteasyon hasarının var olduğu her yerde plastik deformasyon oluştuğunu bulmuşlardır. Genel mekanizma tekrarlanan stresler tarafından materyal yüzeyinin sertleştirilip zayıflatılarak yıpratılmasının sebep olduğu deformasyonun üretilmesidir. Bu çalışmalarda ayrıca farklı kimyasal özelliklere sahip maddelerin benzer plastik deformasyonlar gösterdiği bulunmuştur. Bu oyuklanma hasarı üzerine kimyasal etkilerin olmadığına bir delil olmuştur. Saf titanyum, nikel ve pirinç gibi bazı yumuşak materyallerde, kaviteasyon varlığında plastik deformasyon ortaya çıkmıştır. Bu maddelerin oyuklanabilmesi için 3500 barlık bir kuvvet gerekir. Tungsten ve titanyum alaşımları gibi materyallerde 10000 barlık bir çekme gerilmesine sahip olduklarından plastik deformasyon çok yavaş oluşmaktadır. Aynı araştırmacılar çöken geçici oyuklar tarafından bir yüzeyde 3500-10000 bar arasında gerilmelerin oluşturması gerektiğini önermişlerdir [1, 3, 4].

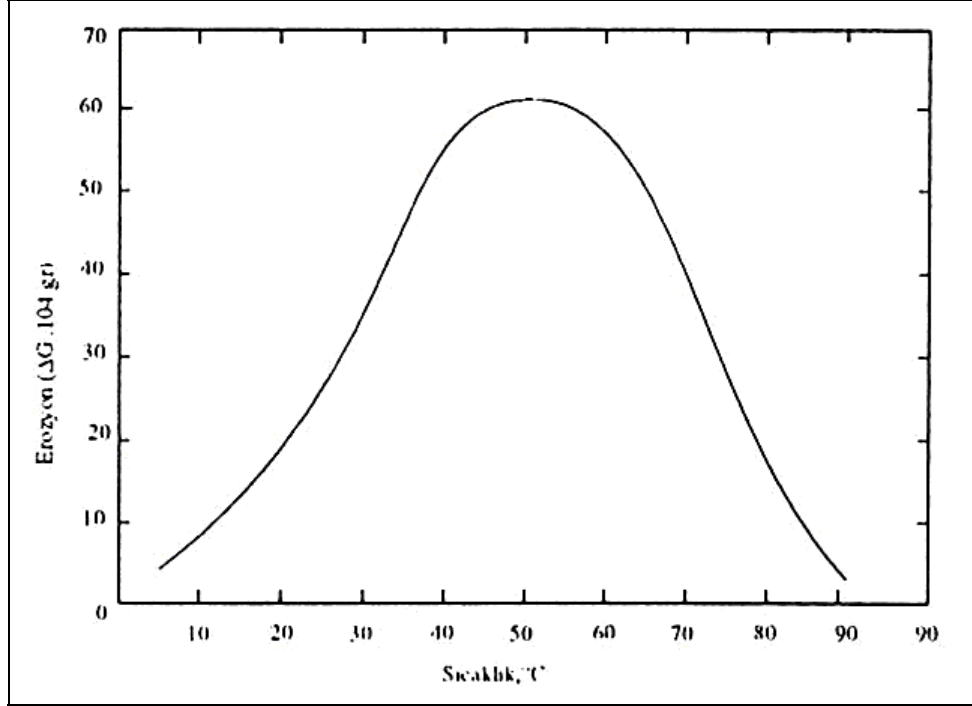
Çökelen bir kabarcığın bir katı yüzeyinde yüksek bir stres meydana getirebilmesinin iki yolu vardır. İlki; oyuk yüzeyden çapının birkaç katı uzaklıkta sıvı içinde bir çekirdeğin büyümesi yoluyla oluşarak çökmektedir. Böylece yüzeye ulaştığı zaman hasar meydana getiren bir şok dalgası yaymaktadır. İkincisi ise, oyuk yüzeyde büyümekte ve çöktüğü zaman içinde oluşan yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın etkisiyle veya arayüzeyin bir darbe etkisi üretmesiyle yüzey hasarını oluşturmasıdır.

Araştırmalar yayılan bu şok dalgasının bu hasarı oluşturabileceğini göstermiştir. Yüzeyden çapının birkaç katı uzaklıkta oluşan oyuğun yaydığı şok dalgası yüzeye ulaştığında hala birkaç bin atmosferlik bir maksimum basınca sahip olacaktır. Yayılan şok dalgası uzaklıkta orantılı olarak zayıflayacaktır. Noud ve Ellis; katı yüzeyinden değişik uzaklıklarda sıvı içerisinde kıvılcımla çapı maksimum 0,4 cm olan kabarcıklar üreterek, bu kabarcıkların çökmesi ile yüzeyde oluşturulan şok basıncını 90 bar olarak ölçmüştür. Bu kabarcıklar kavitasyon kabarcıklarından çok daha fazla gaz içerdiklerinden, bu kabarcıkların oyuklanma hasarının oluşmasında önemli bir rol oynayabileceğine ihtimal vermemişlerdir. Ayrıca içlerinde oluşan yüksek basınç ve sıcaklığın da bu işlemi yapamayacağını önermişlerdir [1].

Kornfeld ve Eisenberg yüzeyde oluşan kabarcığın simetrik olmayan çökmesinde ara yüzeyde jetlerin oluşabileceğini ve maksimum boyuta ulaşmadan önce yüzeye vuracağını bulmuşlardır. Alüminyum üzerinde yapılan deneylerde bunun maksimum boyutun 1/16 kadarı olduğu bulunmuştur. Yüksek hızlı jetleri üreten yüzey duraysızlıkları çökelen geçici oyuklarda olduğu kadar titreşen duraylı oyuklarda da ortaya çıkmaktadır. Oyuklanma erozyonunun sıcaklığa bağımlılığı kimyasal reaksiyon ve lüminesans ile ortaya konabilmektedir. Sıvının sıcaklığı yükselirken oyuklanma erozyonu ilk önce artarak bir maksimuma ulaşmaktadır. Daha sonra sıcaklığın artmaya devam etmesiyle azalmaya başlamaktadır. Gazlarda sıcaklık artarken termal iletkenlik artacağından büzülme hızında da bir artış meydana gelecektir. Sıcaklığın daha da artması çözülmüş gaz içeriğini daha da azaltacak ve kavitasyonun oluşması için uygun çekirdek sayısındaki azalmaya sebep olacak ve oyuklanma hasarında azalmaya sebep olacaktır [1].

Schumb ve arkadaşları 9 kHz'de çalışan manyetostriktif bir transduser ile alüminyumun erozyonunu çalışırken su ve karbon tetra klorür için de benzer pikleri bulmuşlardır. Bebhuck; su, etil alkol ve karbon tetra klorür için de 8 kHz'de alüminyum erozyonunu çalışırken, çevre sıcaklığı artarken bütün bu sıvılarda bir maksimum pikinin meydana geldiğini bulmuştur (Şekil 2.21). Burada maksimum değer yaklaşık 50°C'de oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar bu maksimumu 10°C daha aşağıda bulunmuştur. Bebhuck, kavitasyon erozyonu tarafından gerçekleşen metaldeki ağırlık kaybının su içinde organik sıvılara göre daha büyük olduğunu bulmuştur. Su içindeki maksimum erozyon, etil alkol ve karbon tetra klorür içindekinin 8 katı kadardır. Bunun nedeni gaz çözünürlüğüdür. Gaz çözünürlüğü ne kadar yüksekse kavitasyon erozyonu o kadar az olmaktadır. Düşük gaz çözünürlüğüne ilave olarak su, etil alkolün 3 katı ve karbon tetra klorürün 6 katı termal iletkenliğe sahiptir. Hem termal iletkenliğin artışı hem de gaz çözünürlüğünün azalması geçici oyukun daha şiddetli çökmesine sebep olur. Çözünürlük yalnızca büyüme için gerekli çekirdeklerin sayı ve boyutunu etkiler. Sıcaklıkla gaz içeriğinin değişmesi meydana gelen maksimumu açıklayabilir. Bebhuck ve arkadaşları alüminyumu kavitasyon ile aşınmaya maruz bıraktıklarında, hasar miktarının yayılan ses basınç genliğinin karesi ile arttığını bulmuşlardır [4].

Bir sıvı içinde ses alanı tarafından katı yüzeyinden taneciklerin ve filmlerin uzaklaştırılması endüstride yaygın olarak kullanılan ultrasonik temizleme teknolojisinin temelidir. Duraylı ve geçici oyuklanmanın yokluğunda yüzeylerdeki maddeleri uzaklaştırmak için karıştırma kuvveti yetersiz kalmaktadır. Yalnızca hareketlendirme kuvvetinin cam üzerinden reçinenin uzaklaştırmasını bile başaramadığı gösterilmiştir.



Şekil 2.21: Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak erozyonun değişimi [1].

2. 11. ULTRASES ÜRETİLMESİ VE KULLANIM ALANLARI

2. 11. 1. Ultrases Kaynakları

Ses, titreşim enerjisi yani mekanik bir enerjidir. Ses üretmek için titreşim enerjisi üretilmesi gerekir. Bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirmek günlük hayattan bildiğimiz ses üretimi yöntemleridir. Bütün ses üretim araçları bu prensibe dayalı olarak çalışır. Bu yöntemler ve araçlarla işitilebilir frekans aralığında ses üretilebilir ve algılanabilir.

Yine bir titreşim hareketi olan ultrasonik frekansları üretmek ve algılamakta yararlanılan fiziksel olaylar ve araçlar daha farklıdır. Hızlı talaş kaldırma (taşlama, delme, tornalama, fırçalama) işlemleri sırasında duyulabilir frekansta seslerin yanısıra ultrasonik frekansta titreşimler de oluşabilir. Bu titreşimler rastgele olduğu için faydalı bir işte kullanılamazlar [6, 7, 8].

Ultrases üretmek için kullanılan sistemler; kornalar, sirenler, mekanik, hidrodinamik, piezoelektrik, manyetostriktif, elektrostriktif titreştiriciler, alev sesi (ark) olarak sıralanabilir.

2. 11. 1. 1. Ark Sesi

Bir ark üzerine hava içeren bir tüp yerleştğinde tüp havasında ses dalgaları oluşmaktadır. Tüp üzerinde de dalgalar oluşabilir. Fakat bu gerekli değildir ve olay ark içinde gazın hareketini zamanın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkarır. Yine bilinmektedir ki, ses dalgaları alevin yer değiştirmesine neden olacağından sonik dalgaların varlığının basit bir göstergesi olarak da kullanılabilir. Yüksek elektrik voltajları ile kontrollü ve güçlü arklar oluşturularak böbrek taşlarının kırılmasında kullanılmaktadır [1].

2. 11. 1. 2. Kornalar

Ses bir kenar üzerine veya bir delik boyunca sıvı veya gazın geçirilmesiyle üretilebilir. Bu aletler korna olarak bilinir ve uygun bir enerjinin üretimi için yeterlidir. Gazın geçişi bir ses dalgası gibi yayılan periyodik olarak aralıklı girdaplar oluşturur. Bir basit dairesel delik bu amaç için kullanılabilirken daha stabil sonuçlar farklı yollarla elde edilebilir. Bu aletler gaz veya sıvı kullanabilirler. İşaret edildiği gibi bir bıçak ağzı üzerinden veya bir açıklık boyunca akan gaz veya sıvı ile üretilen ultrasonik enerji onun tarafından üretilen ve ortam boyunca hareket eden girdaplar tarafından oluşturulur. Bu girdaplar periyodiktir ve frekansları üretilen ses dalgalarının da frekansındır [1].

2. 11. 1. 3. Sirenler

Çoğu standart tip ultrasonik üreteç, hava veya gazda yüksek basınç genlikli dalga üretmek için yeterli değildir. Bunu gerçekleştirmenin bir yolu sirenlerdir. Sirenler temel olarak hava kompresörü gibi, çalışan sabit bir stator ve gaz yolları boyunca havayı karıştıran bir rotordan oluşur. 300-1200 W'lık bir çıkış yaklaşık 133 devir/dk ile dönen rotor ile meydana getirilir. Frekans 3-30 kHz arasındadır. Yaklaşık 60 ft³/dk'lık bir hava desteği gerekir ve eşit olarak kanallara verilir. Yüksek frekanslı sirenler maksimum etkinliğinin %50'si kadarına sahiptir ve temel olarak saf bir frekans üretir. Düşük frekansları üreten sirenler ise daha verimlidir (%81-%100) [1].

2. 11. 1. 4. Mekanik Titreştiriciler

İlk bakışta ultrases üretiminin mekanik olarak sağlanması basit olarak görülür. Fakat bağlantı zorlukları bu yaklaşımların çoğunu imkansız kılar. Şekilde bu aletlerden birisi gösterilmektedir. Bu alet dairesel bir testereden sürülen titreşen bir kamışı içerir. Bir kamış dönen bir dişli teker üzerinde ona dayanarak titreşim yapmaktadır. Frekans yaklaşık 10 kHz'dir. Eksantrik hareketli şaftlar da düşük frekansları üretmek için

metalurjik uygulamalar için kullanılmışlardır. Genelde bu tip yaklaşımlar enerjiyi kullanılabilir bir forma elde etmek zor olduğu için başarılı olamamıştır [1, 6].

2. 11. 1. 5. Piezoelektrik Titreştiriciler

Piezoelektrik titreştiriciler, piezoelektrik etki gösteren materyallerden yapılırlar. Piezoelektrik etkinin kullanımıyla yapılan titreştiriciler, her iki enerji türünü de birbirine çevirebilir. Uygun frekans bölgesi 20 kHz'den 10 GHz'e kadar uzanır.

Piezoelektrik olay, temel olarak kristallerin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi işlemidir. Bir piezoelektrik maddenin üzerine mekanik bir yük uygulandığında yüzeylerinde elektrik yükleri oluşur. Buna direkt piezoelektrik olay denir. Piezoelektrik etkiyi görmek için bu işlemin tersi yapılabilir. Piezoelektrik maddeye bir potansiyel fark uygulandığında, madde mekaniksel şekil değişimine uğrar. Bu olaya ise ters piezoelektrik olay denir.

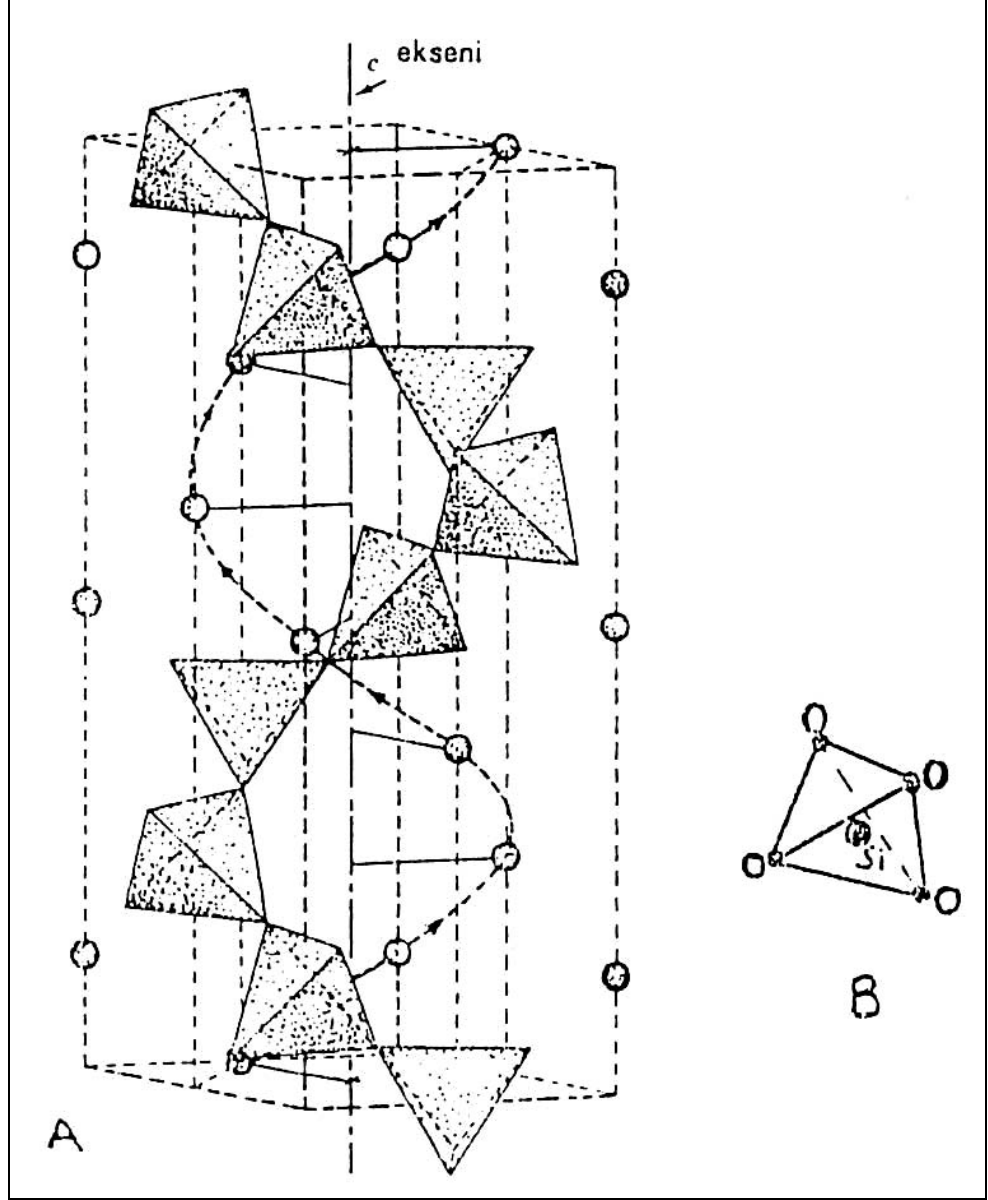
Kuvars, Turmalin, Lityum sülfat, Kadmiyum sülfid, Çinko oksit, Rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Baryum titanat, Kurşun zirkonat titanat gibi doğada bulunan tek kristal polar eksenine sahip maddelerde bu etki görülür. Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), Lityum fosfat (LP), Etilen diammin tartarat (EDT), Dipotasyum tartarat (DPT) gibi suni kristallerde daha az oranlarda olmakla beraber ultrases kaynağı yapımında kullanılır. Piezoelektrik maddeler, kristal piezoelektrikler ve seramik piezoelektrikler olarak iki kısımda ele alınabilir [1, 6, 7, 8].

2. 11. 1. 5. 1. Kristal Piezoelektrikler

Curie kardeşler uygun biçimde yönlü basınca maruz kalan kuvarsın a eksenlerinin ucunda (-) ve (+) elektrik yüklerinin meydana geldiğini bulmuşlardır. Teorik olarak simetri merkezi olmayan bütün maddelerin piezoelektrik olması gerekmektedir. Ancak pratikte, bu tür maddelerin çoğunda bu özellik zayıf niteliktedir. Fiziksel ve kimyasal kararlılığı ve kolay bulunabilme özelliği yüzünden kuvars en çok kullanılan maddedir.

Çerçeve silikatları da denen tektosilikatlardan olan kuvars, Şekil 2.22 den de görüleceği üzere Si ve O tarafından oluşturulan silika tetrahedronlarından oluşmaktadır. Hegzagonal sistemde kristalenen kuvars kristallerinde silika tetrahedronları optik eksen

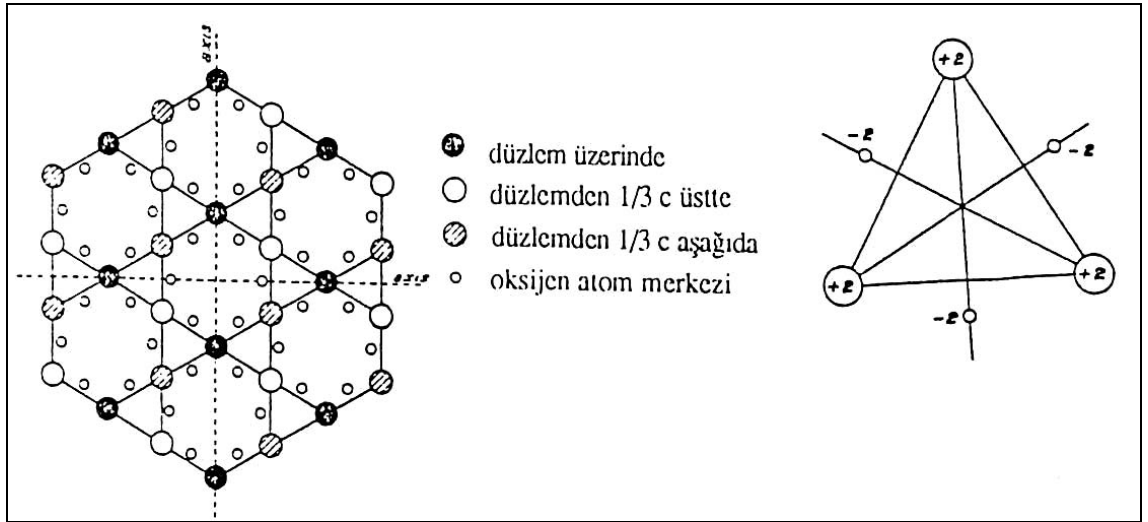
(c)'ye göre 120° 'lik açılarla sarmal bir şekilde birbirine bağlandıktan sonra bu yapılar içiçe girmektedir.



Şekil 2.22: Kuvarsın kristal yapısı ve silika tetrahedri [1].

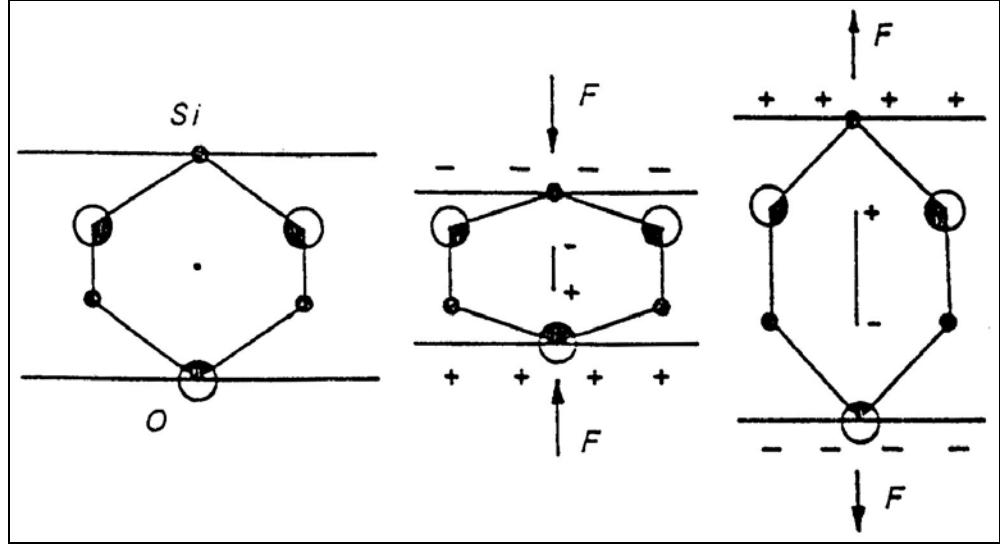
Kuvars kristalinin c eksenine dik olarak kesiti alındığında yani a ve b eksenlerine paralel olan düzlem üzerinde atomların hepsi aynı seviyede değildir. Si ve O atomları ayrı ayrı hegzagonlar oluşturmuşlardır. Bu hegzagonlar sarmal tetrahedron zincirlerinin kesit görünüşü gibi düşünülebilir. Oluşan bu hegzagonların ortasında Si ve O üçgenleri oluşturmaktadır. Elektrik şarjı olarak dengede olan yapıya dışarıdan bir basınç veya çekme uygulandığında elastiklik nedeniyle esnemeye neden olur. Bu yerdeğişimi, Si

üçgeninin ağırlık merkezini $0,3 \cdot 10^{-22}$ m seviyesinde değiştirirken, O üçgeninin ağırlık merkezini $6,3 \cdot 10^{-22}$ m. kadar değiştirebilir. Böylece pozitif ve negatif şarjlar arasındaki yer değiştirme farkı $6 \cdot 10^{-22}$ m. olur. Bu fark iki uçta + ve - bir elektrik yüklenmesini yaratmaktadır. Meydana gelen olay atomların birbirleri ile oluşturdukları bağların incelenmesi ile daha iyi anlaşılabilir. Atomlar, yüklerinin değeri ve atom çaplarına göre birbirlerine göre belli mesafelerde bulunarak dışa karşı nötr bir durumda kimyasal bağlarla birbirlerine bağlanırlar. Dışarıdan verilecek herhangi bir elektrik yükü bu dengeyi bozacak ve elastikliğin de yardımı ile atomlar yeni bir konuma geçecek yani birbirlerine yaklaşıp uzaklaşarak bu yeni durumu dengeleyeceklerdir. Bu etki sayesinde uygulanan gerilimle uzayıp daralma gibi fiziksel değişikliklere elde edilecektir [1]. Şekil 2.23 te C eksenine dik düzlemde si ve o hegzagon üçgenleri görülmektedir.



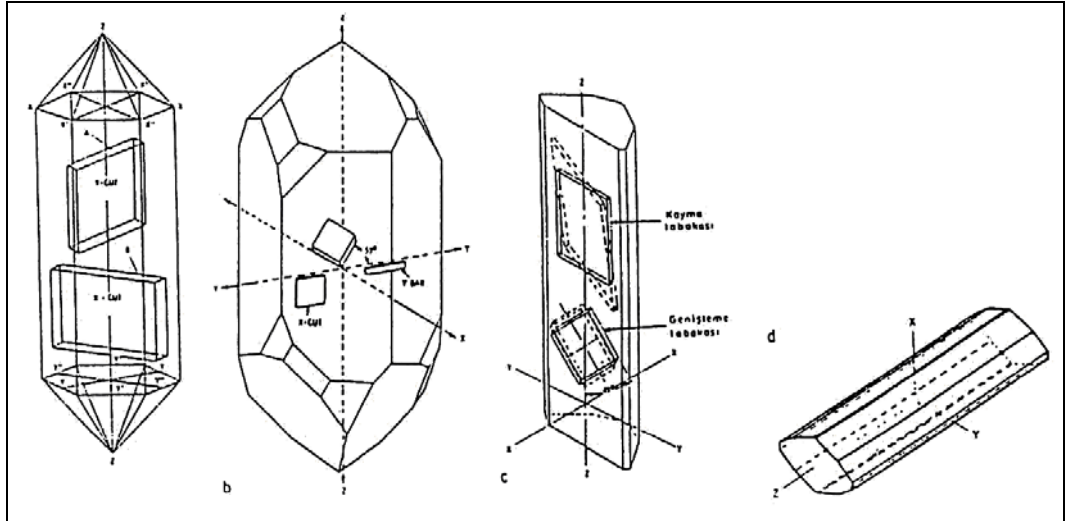
Şekil 2.23: C eksenine dik düzlemde Si ve O hegzagon üçgenleri [1].

Şekil 2.24 te yük oluşum şematize edilmiştir. Kristal sıkıştırılmadan önce pozitif ve negatif yüklerin merkezleri üst üste gelmiştir. Kristal sıkıştırıldığında bu merkezler birbirlerine göre yer değiştirirler ve böylelikle kristal içinde elektriksel dipol dolayısıyla yüzey yükleri oluşur. Oluşan yüzey yükleri, polarizasyon voltajının yönü ile ilgilidir. Piezoelektrik maddeye polarizasyon voltajının tersine bir voltaj uygulanırsa piezoelektrik malzeme kısalmak; polarizasyon yönünde bir voltaj uygulanırsa bu kez malzeme uzayacaktır. Piezoelektrik maddeye alternatif akım uygulanırsa maddenin şekil değiştirmesi periyodik olacaktır. Bu uzayıp kılma şeklindeki değişimler, uygulanan alternatif akımın frekansında olacaktır.



Şekil 2.24: Yük altındaki kuvarsta elektrik yük merkezlerinin oluşumu [1].

Şekil 2.25 te çeşitli kristaller ve bu kristallerdeki kesim eksenleri gösterilmektedir. Kuvars kristalinde X ile gösterilen eksen optik eksen, Y ile gösterilen eksen mekanik eksen, Z ile gösterilen eksen ise elektriksel eksen olarak adlandırılır. Kristallerde dilimlerin kesim yönleri önemlidir. Dolayısıyla kristal dilimleri kesildikleri yönlere göre adlandırılır. Kesilecek kristal dilimi yüzey normali hangi eksene paralel ise kristal o eksenin adını alır.



Şekil 2.25: Çeşitli kristaller ve kesme yönleri [1].

X kesimli bir kuvars levhanın, x eksenine dik yüzeylerine u_x gibi bir alternatif potansiyel uygulanırsa kristalin x boyutunda;

$$dx = d \cdot u_x \quad (2.20)$$

gibi bir değişim olur. Piezoelektrik malzemenin üzerine tatbik olunan voltaj başına kalınlığındaki değişmeye Piezoelektrik modül adı verilir. Buradaki d piezoelektrik modüldür. Kristalin y eksenindeki uzama ve daralması ise;

$$dy = d \cdot u_x (x/y) \quad (2.21)$$

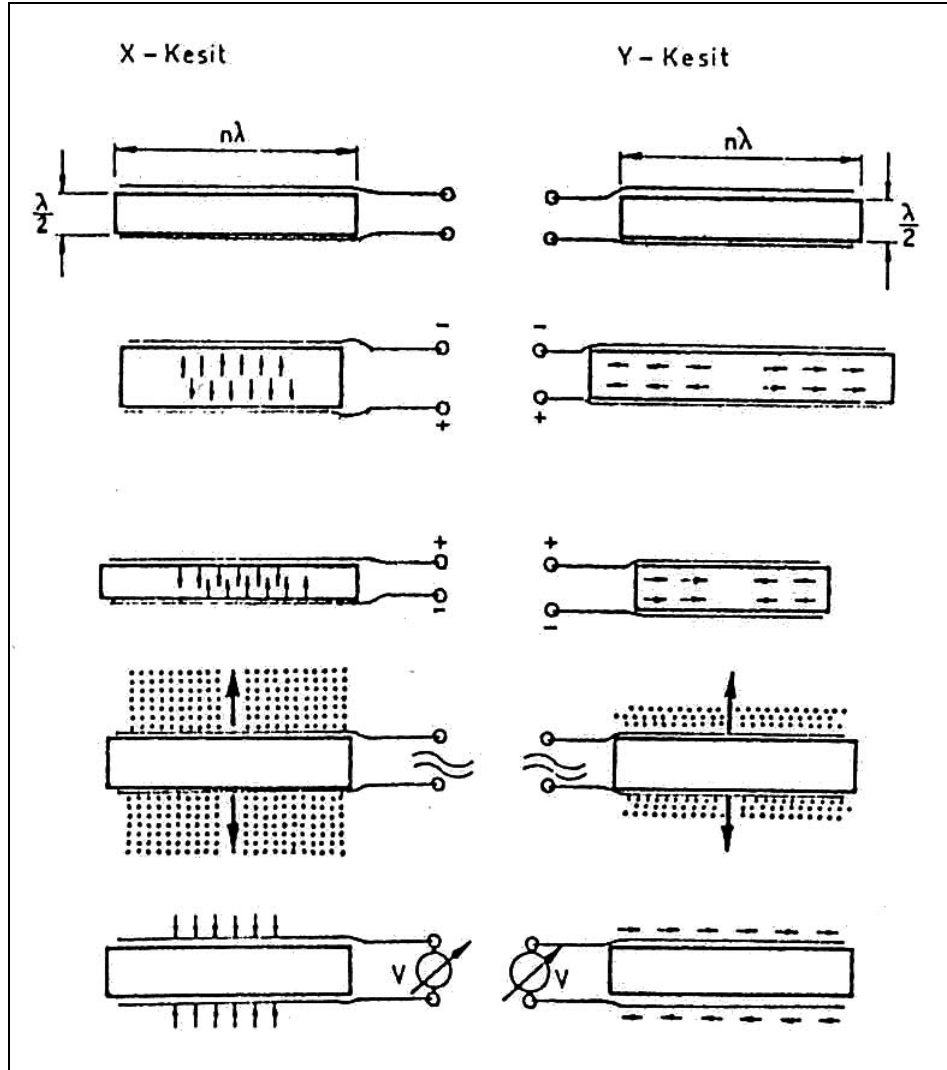
Boyuna ultrases dalgaları elde etmek için X, enine dalgalar elde etmek için ise Y kesimli kuvars levhalar kullanılır. Kristaldeki salınımlar kesim metoduna ve kristalin doğasına bağlıdır. Piezoelektrik özellik gösteren kristallerin titreşim yapabilmesi için iki yüzü iletken bir metalle kaplanır. Genel olarak bu amaçla altın, gümüş ve alüminyum kullanılır. Kaplamada en iyi metod, metalin boşlukta buharlaştırılarak kaplama yapılmasıdır.

Kuvars kristali için piezoelektrik sabitinin değeri $2.3 \cdot 10^{-12}$ metre/volt'dur. x kesimli L kalınlıklı bir kuvars kristaline alternatif bir potansiyel uygularsak L kalınlığı dL kadar değişir. Kristalin kalınlığı L ve oluşan titreşim dalga boyu ise λ olmak üzere şu ifade yazılabilir: ($L = \lambda/2$ ve $f \cdot \lambda = V$ olduğundan)

$$f = \frac{V}{2L} \quad (2.22)$$

Burada V = sesin malzeme içindeki yayılma hızı, L = karakteristik uzunluktur. Kuvars kristalinde ses dalgalarının hızı 5740 m/s olduğu düşünülürse L kalınlığındaki bir kuvars kristalinin temel frekansı, L(m) cinsinden olmak üzere; $f = (5740 / 2 \cdot L) = (2870 / L)$ Hz'dir. Örneğin 1 mm'lik bir kesimle 2.87 MHz'lik kristal elde edilir.

Şekil 2.26 da piezoelektrik kristalin çalışması gösterilmektedir. (a) şeklinde kristal normal boyutlardadır. (b) kristal kalınlık titreşime başlamıştır. En büyük kalınlığa ulaştığı andır. Elektrotlarda (+) ve (-) voltajlar üretmiştir. (c) kristalin titreşim sırasında en ince halidir. Kutuplardaki voltaj yön değiştirmiştir. (d) şekilde kristal verici olarak çalışmakta ve Piezoelektrik özelliğe sahip malzeme üzerine kuvvetli bir elektrik darbesi verildiğinde bu malzeme kalınlık titreşimle başlar. Ortada yassı bir dikdörtgen olarak görülen piezoelektrik malzemeler elektrik yalıtkandır [1].



Şekil 2.26: Piezoelektrik titreştiricilerin verici ve alıcı olarak çalışması [1].

2. 11. 1. 5. 2. Seramik Piezoelektrikler

Piezoelektriğin keşfi 1880 yılında olmasına rağmen bu özelliği gösteren doğal maddelerin az sayıda bulunması nedeni ile uzun bir süre bu konuda gelişme sağlanamamıştır. Saf kuvarsın bulunma zorluğu ve mekanik dayanımının düşük olması piezoelektrik özellik gösteren seramik üretilmesine neden olmuştur. 1940'lı yıllarda yapay baryum titanatta piezoelektrik özellik görülmesi sonucu bu konuda araştırmalar yeniden yoğunlaşmış ve çok çeşitli malzemeler geliştirilmiştir. Suni olarak imal edilen piezoelektrik seramikler tek kristalli olmayıp polikristalin yapısındadır. Bu materyaller birbirine bağlı birçok küçük kristalcikten oluşur. İstenilen ölçülerde ve şekillerde kalıplara dökülerek fırında sertleştirilir. Üretilen bu ürün seramik formundadır. Bu seramikleri uygun formlarda üretmek mümkün olduğu için ultrasesi odaklama yeteneğine sahip konkav transduserler bile kolaylıkla üretilebilmektedir. Piezoelektrik malzemelerin bu fiziksel özellikleri Tablo 2.3 de verilmiştir.

Tablo 2.3 : Piezoelektrik malzemelerin özellikleri [1].

	Malzeme	Piezoelektrik Modül	Dielektrik Sabiti	Young Modülü
		Coulomb/Newton (metre/volt)*10 ⁻¹²	ϵ	$E*10^9$ N/m ²
Doğal	Kuvars	2.3	4.5	80
	Turmalin	1.9-2.4	6.6	160
Seramik	Kurşun Zirkonat Titanat	265	1500	79
	Kurşun Metaniobat	80	250	47

Piezoelektrik seramiklerde titreşimin modu plaka içerisindeki polarizasyonun bilinmesi ile saptanır. Başlangıçta, malzemelerin yerel bölgelerdeki alanların yönelimi keyfi olduğundan net bir polarizasyon yoktur ve plaka çok az piezoelektriktir. Alanlar için tercih edilen yönelimler, plakanın sıcaklığının Curie noktasına yükseltilmesi ve büyük elektrik alanı (Poling) ile sağlanır. Seramiklerde, sıcaklık ve uygulanan elektrik alanı; alanların anlamlı olarak ayrılıp elektrik alana paralel olarak sıralanmasına neden olur. Böylece net bir polarizasyon oluşur.

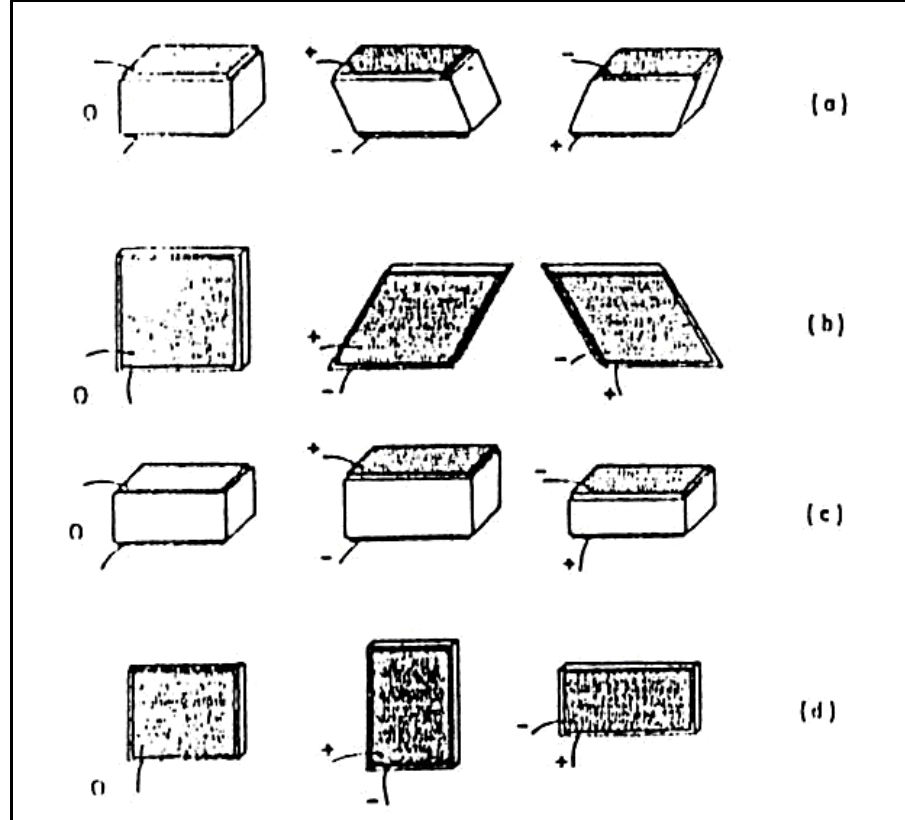
Darbelerin frekansını, yani üretilen sesötesi enerjinin frekansını, Piezoelektrik kristalin kalınlığı tayin eder. Transduser üzerine uygulanan voltaj darbesi (puls) ile rezonans

titreşimleri yapar. Transduserin kalınlığı rezonans titreşiminin yarı dalga boyuna eşittir. 2 MHz frekans üretebilen baryum titanat malzemenin kalınlığı 1.1 mm. olarak bulunabilir. Yüksek frekanslı transduserler daha incedir. İncelmesi onun dayanımını azalttığı için çok yüksek frekanslı transduser yapımının pratik bir sınırı vardır.

Baryum titanat için piezoelektrik modül; $d = \frac{\Delta x}{U} = 0,2 \cdot 10^{-9}$ m/volt'dur.

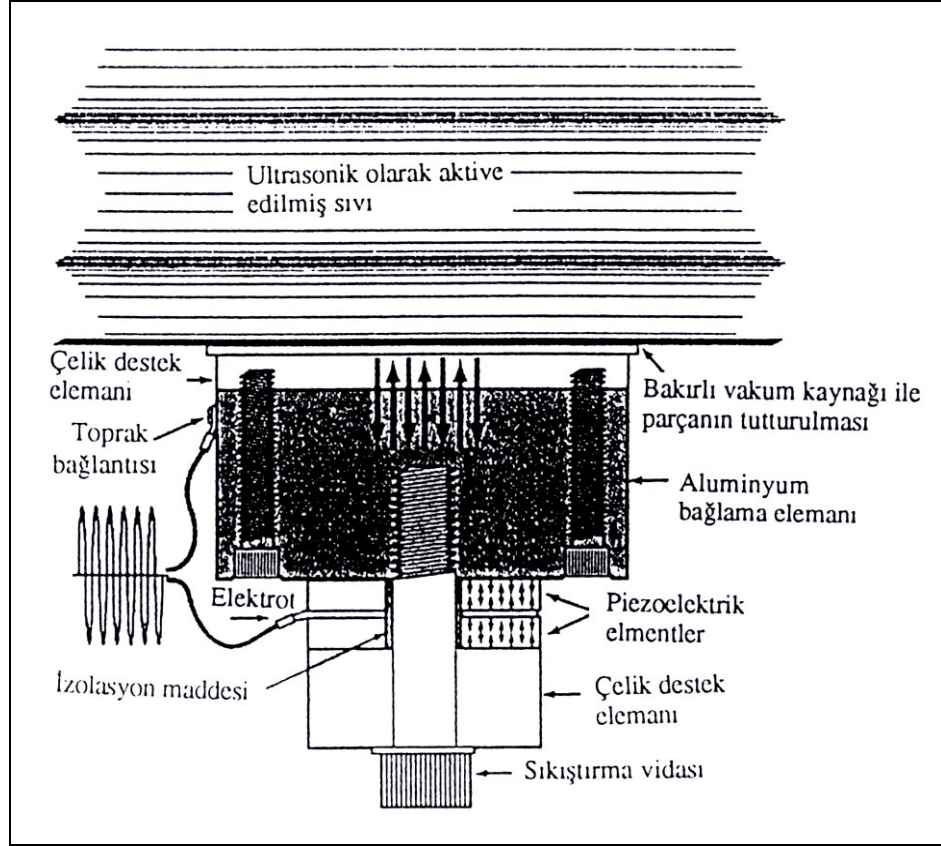
Sözle ifade etmek gerekirse, baryum titanat bir volt gerilim altında 0,001 mikron boy (kalınlık) değişimi gösterir. Sesötesi üretimlerinde Piezoelektrik transduser üzerine $U=10^3$ volt mertebesinde elektrik darbesi vermek olağandır. Dolayısıyla baryum titanat kristalin ses ötesi enerji üretirken yaptığı titreşimin genliği; $\Delta x = 0,2$ mikron mertebesindedir [5].

Piezoelektrik seramiklerde titreşimin modu plaka içerisindeki polarizasyonun yönüne göre değişik şekillerde gerçekleştirilebilir. Şekil 2.27 de mümkün olabilen bazı titreşim şekilleri verilmektedir.



Şekil 2.27: Piezoelektrik transduserin mümkün olabilen farklı titreşimleri. a,b açısal yerdeğiştirme; c,d boyut değişimi titreşimleri [1].

Günümüzde piezoelektrik seramikler elektronik sanayiinde özel ve önemli kullanım alanlarına sahiptirler. Elektronikte algılayıcı, dönüştürücü ve filtre elemanı olarak kullanılan bu seramikler, ultrasonik uygulamaların vazgeçilmez malzeme türünü oluştururlar. Şekil 2.28 de piezoelektrik kristalin, su dolu bir tankın yüzeyine nasıl yerleştirildiği görülmektedir.



Şekil 2.28: Piezoelektrik kristalin tank yüzeyine montaj şekli [1].

Piezoelektrik seramikler baryum titanat ($BaTiO_3$), kurşun zirkonat titanat (PZT) ve niyobatlar olmak üzere üç grupta toplanırlar. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan Pb ($ZrO_{52}-O_{57} Ti_{0,46-0,48}$) O_3 formülü ile ifade edilen PZT'ledir. Değişik kullanım alanlarında farklı özellik istenildiğinden, bu formüllerden değişik bileşimler geliştirilmektedir.

Piezoelektrik seramikler genellikle klasik seramik üretim yöntemlerine göre üretilirler. Seçilen bileşimin metal oksitler veya karbonatları hammadde olarak kullanılırlar. Bunların en az %99.5 saflıkta olması gereklidir. Bileşime göre hesaplanan hammaddeler tartılır ve zirkonya bilyalı lastik kablı kavanozlarda sulu olarak öğütülür. Öğütme

sonrası kurutulmuş hammaddelerden 150 kg/cm^2 basınçta kekler hazırlanır. Kekler baryum titanat için 1150°C de, PZT için $850\text{-}950^\circ\text{C}$ de kalsine edilerek istenilen fazların oluşması sağlanır. Kalsinasyon sonrası kekler tekrar öğütme işlemine tabii tutulurlar. Öğütme, maddenin en az %90'i 5 mikronun altında kalacak biçimde nemlendirilir ve çelik kalıplarda 1000 kg/cm^2 basınç altında genellikle disk biçiminde preslenir. Bundan sonra malzeme yüksek sıcaklıkta sinterlenir. Sinterleme işlemi baryum titanat için hava atmosferinde $1300\text{-}1600^\circ\text{C}$ 'de PZT'lerde $1200\text{-}1300^\circ\text{C}$ de kurşun kaybı denetlenerek yapılır. Sinterlenen disk biçimindeki malzemelerin yüzeyleri paralel taşlanır ve gümüşle elektrotlanır. Elektrotlanan malzemenin dipolleri 100°C 'de $30\text{-}40 \text{ KV/cm}$ A.C. voltaj akımı altında yönlendirilir. Bu işlemden 24 saat sonra malzemenin piezoelektrik özellikleri ölçülür [5].

2. 11. 1. 6. Manyetostriktif Titreştiriciler

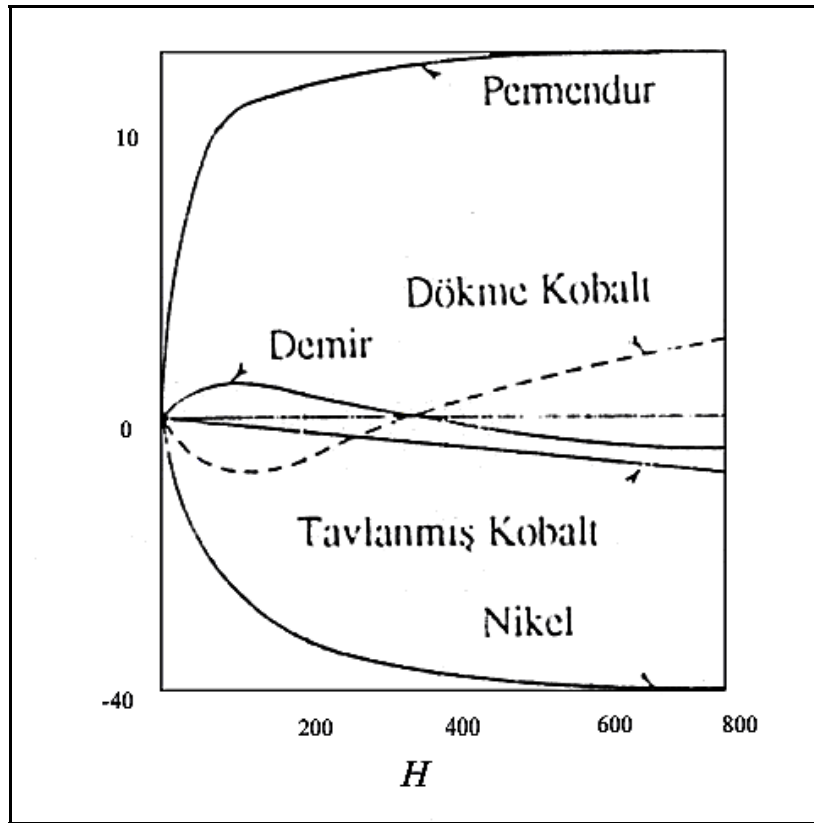
Bu yöntemle $20\text{-}40 \text{ kHz}$ frekanslara ve hatta verim düşük olmakla birlikte 100 kHz 'e kadar ultrasonik titreşimler elde etmek mümkündür. Manyetostriktif problar ucuz ve dış etkenlere dayanıklıdır. Bu nedenle betonun ve kayaların muayenesinde, denizaltı sonar sisteminde ve düşük ultrasonik frekansları gerektiren uygulamalar için manyetostriktif problar tercih edilir.

Çok sayıda metal ve alaşım bir manyetik alan içine getirildiğinde boyutlarında değişme görülür. Nikel, demir, krom, kobalt, İnvar (%36 Ni), Stoik metal (%30 Ni, %64 Fe), Monel (%68 Ni, %28 Cu) ve Permroll (%45 Ni, %55 Fe) gibi metal ve metal alaşımlarında daha belirli olarak görülen bu olaya manyetostriksiyon denir. Piezoelektrik olay gibi manyetostriksiyon da tersinirlik özelliği gösterir. Yani sözü edilen maddelere uygulanacak bir sıkıştırma ve genişletme sonucu maddenin manyetik özelliklerinde değişmeler olur ve buna bağlı bir manyetik alan ortaya çıkar. Aynı maddeler bir manyetik alana girdiğinde boyutlarında değişmeler gözlenir.

Etrafına bobin sarılmış manyetik bir çubuğun basınç ve gerilme ile boyu değiştirilirse bobin üzerinde bir voltaj oluşacaktır. Çubuk belli bir AC frekansında titreştirilirse aynı frekansta bir akım bobin üzerinde oluşur. Voltajın büyüklüğü titreşim genliği ile orantılı olur. Bu özellik tersinirdir. Yani bobin üzerine belli bir frekans ve voltajla gerilim uygulanırsa bu frekans ve voltaja uygun olarak çubuk titreşmeye başlar. Böylece çubuk ses dalgaları üretmeye başlar. Her iki durumda çubuk ortadan desteklenir. Böylece

ikinci bir titreşim noktasına sahip olur. Çubuk uygulanan voltajın frekansının iki katı frekansta titreşir. Çalışılan çubukların manyetik olması gerektiği olağandır. Eğer malzeme manyetizmayı etkili olarak tutamıyorsa küçük kalıcı bir mıknatıs belli mesafede yerleştirilerek çubuğun manyetizması sağlanır.

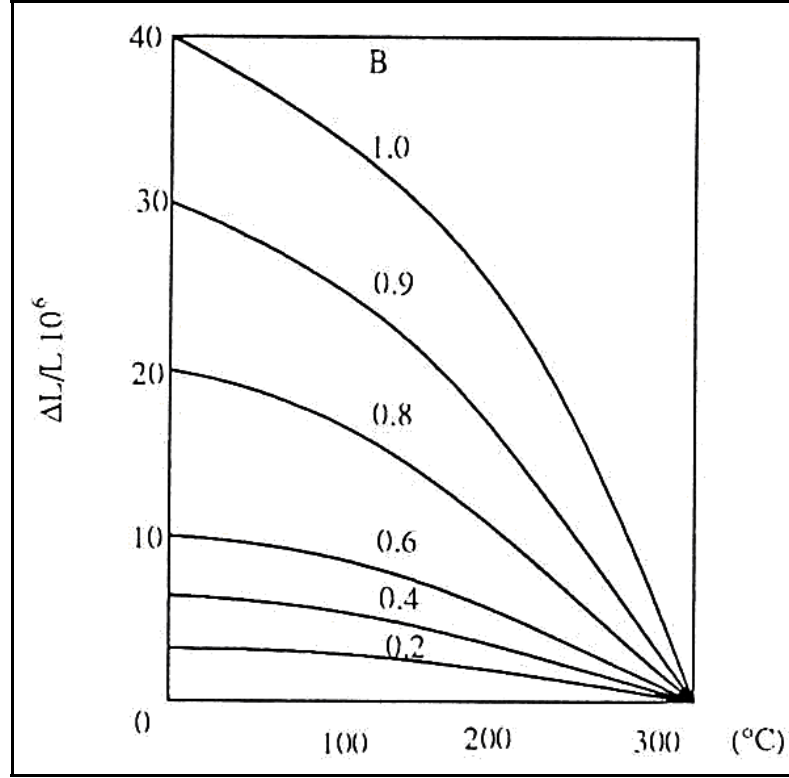
Görülen boyut değişimlerinin en önemlisi boyuna manyetostriksiyon veya Joule olayı denilen uzunlukça şekil değişimleridir. Bazı ferromanyetik materyallerin manyetik alanda gösterdikleri boyuna manyetostriksiyon Şekil 2.29 da görülmektedir. Demirin zayıf manyetik alanda uzama, kuvvetli manyetik alanda kısalma göstermesine karşılık, nikelde, alan şiddetiyle artan bir kısalma gözlenir. Dökme kobalt ve tavlanmış kobalt alan değişimlerinde farklı davranırlar. Nikel ve Permroll birbirine ters etki üreterek birisi uzarken diğeri kısalır [1, 10, 11].



Şekil 2.29: Ferromanyetik materyallerin manyetostriksiyonu [1].

Ferromanyetik metaller sıcaklığa bağlı olarak manyetik özelliklerini değiştirirler. Şekil 2.30 da nikelin sıcaklığa bağlı manyetostriksiyonunun değişimi görülmektedir. Sıcaklık değişimleri bu çubuklarda yüksektir ve çeşitli metodlarla düşürülebilir. Sıcaklığa bağlı olarak frekanstaki değişim elastisite üzerinde etkilidir. Manyetostriktif sistemlerdeki

ortaya çıkan sapma transduserin sıcaklığa duyarlılığına bağlıdır. Bu yüzden transduser soğutma ile korunmalıdır. Sıcaklık artışının bir diğer etkisi malzeme içindeki ses hızının değişimine bağlı olarak frekansında saptmaya sebep olmasıdır. Sıcaklık artışı ile bir manyetostriktif malzeme aktivitesini aşamalı olarak bir noktaya kadar yavaş sonrada hızlı olarak kaybeder. Hızlanmanın olduğu bu sıcaklık Curie sıcaklığı olarak bilinir.



Şekil 2.30: Ferromanyetik nikelin sıcaklığa bağlılığı [1].

Manyetostriksiyon, Weiss bölgeleri teorisi ile açıklanabilir. Bir atom manyetik özellikleri onun dış elektron düzenine bağlıdır. Bir çok atom da elektronların manyetik etkileri birbirini hemen hemen nötrleştirir. Atomları bir manyetik momente sahip bazı metallerde ise, bu manyetik momentlerin uzayda gelişi güzel yönelmesi, atom gruplarının toplam manyetik momentlerini sıfır kılar. Ferromanyetik materyaller bu bakımdan bir ayrıcalık gösterirler. Bu sistemlerde $10^{-8} - 10^{-9} \text{ cm}^3$ lük hacim elemanları içerisinde atomik manyetik momentler birbirine paraleldir. Weiss bölgelerinin konumu bir dış manyetik alanla düzenlenebilir ve bu maddenin kristal yapısına bağlı bir yönde daha kolay yapılabilir.

Manyetik akı yoğunluğunun B_0 gibi bir değerden bir B değerine değişmesi halinde τ gerilimi $B_0 B$ ile orantılıdır. Akı yoğunluğu weber/m² cinsinden alınırsa nikel için,
 $\tau = 0,002 B_0 .B$

eşitliği yazılabilir. 0,002 katsayısı piezoelektrik modülü gibi hakiki bir sabit olmayıp B_0 'a bağlıdır. Yukarıdaki eşitlikte $B_0 = 0,5$ weber/m² dir. En genel halde gerilme,

$$\tau = mB \quad (2.23)$$

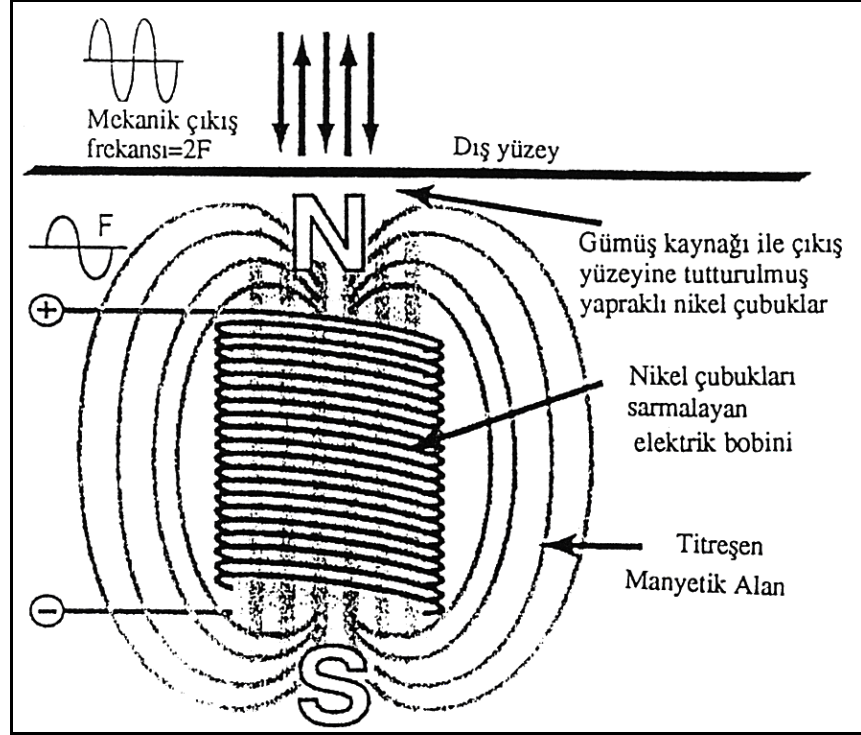
bağıntısıyla ifade edilir. Burada m , manyetostriktif sabittir.

En basit manyetostriktif verici, manyetostriksiyon özelliği gösteren bir metal çubuğu bir selenoid içine yerleştirmek suretiyle yapılabilir. Sarımlara uygulanan sinüzoidal alternatif gerilim çubuğu boyuna titreşime zorlar. Manyetik alan frekansının çubuğunun frekansı ile rezonansa gelmesi ile yüzey titreşim genliği maksimum olur. Böylece, çubuğun ucu bir ultrases kaynağı haline geçer. Çubuk bir ucundan sabitlendiğinde çubuğun boyuna titreşim frekansı uyarıcı frekansın iki katı olur.

Temel frekansta çubuğun L boyu ile λ dalga boyu arasındaki bağıntılar $L = \frac{\lambda}{2}$ ve $T = \frac{1}{f}$ olduğundan bu tip transduserlerin temel frekansı şu şekilde bulunabilir,

$$f = \frac{V}{2L} \quad (2.24)$$

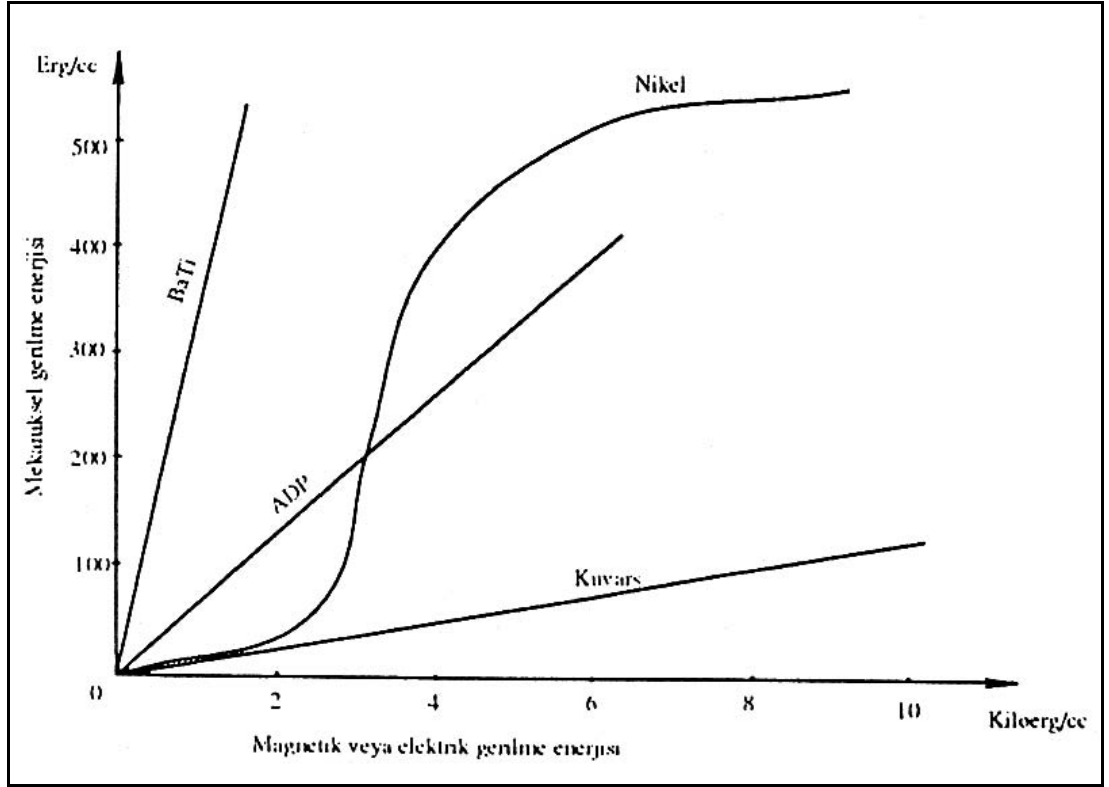
Örneğin nikelli bir verici için öz titreşim frekansı; $f = (237 / L)$ kHz olacaktır.



Şekil 2.31: Manyostroksiyon prensibine dayalı olarak çalışan bir ultrases vericisi [1].

Şekil 2.31 de manyostroksiyon prensibine dayalı olarak çalışan bir ultrases vericisi görülmektedir [1].

Manyetrostriktif metodu diğerlerine göre daha az verimli bir metoddur. Çünkü bu uygulamada malzeme ısınır ve hiseresis kayıpları oluşur. Dört ayrı materyal için bu gerilmeler arasındaki bağıntı Şekil 2.32 de gösterilmiştir. Bağıntı üç yapı için lineerdir ve manyetrostriktif nikel için S biçimindedir. Baryumtitanatın üstünlüğü çok belirgin olarak görülmektedir [1].



Şekil 2.32: Çeşitli Tip Ultrasonik Trasduserlerin Verimi [1].

Ferromanyetik malzemelerin manyetik alan içindeki fiziksel değişimleri deneylerle izlenmiştir. Malzemenin manyetik özelliklerindeki değişimler, harici kuvvetler ile meydana gelen değişimlere çok benzer. Bu değişimler genellikle “Manyetostriktif tesirler” adı altında tanımlanmışlardır. Manyetik alan değişim halinde iken uygulanan manyetik alanın ekseni boyunca malzeme uzunluğunda değişim olacaktır. Hacim ve şekilsel değişimler de olur fakat pek önemli değildir. Birçok ferromanyetik materyaller büyük veya küçük derecede manyetostriktif etkiler gösterirler. Örneğin, bakır, manganez ve kalaydan meydana gelen Hensler alaşımları ve permendur adı ile bilinen Demir – Kobalt alaşımlarının nitelikleri iyidir. Gadolinyum ve krom da bunlar kadar iyidir. Sinterlenmiş ferritler ve seramik bağlayıcılar yakın bir gelecekte düşük güçlü ultrasonik jeneratörlerde kullanılma imkanları olacak manyetostriktif malzemelerdir.

Hali hazırda orta veya yüksek güçlü ultrasonik transduser’ler için umumiyetle manyetostriktif nitelikleri bilinen saf nikel veya demir-kobalt alaşımları kullanılmaktadır. Manyetostriktif olay, kısaca izah edilemek istenirse; bir atomik sistem içinde esas manyetik parçacık, küresel elektrondur. Bununla beraber birçok sistemlerde manyetik etkiler hemen hemen tesirsiz kılınmışlardır. Bir katı içerisindeki

atomların gelişigüzel değişimlerinden beklenen manyetik momentler, bağımsız atom grupları için geçerli değildir. Bu sistemler içinde bir değişim kuvveti mevcuttur ki bu kuvvet atomik manyetik alanlara sebep olur ve bir hacim içerisinde 10^{-8} veya 10^{-9} cm^3 hacminde paralel şekilde uzanmışlardır [1].

Bu sahalardaki manyetik momentler bir harici manyetik alan tesiri ile sıraya konulabilir. Herbir manyetik alan doymuş derecededir. Fakat malzemenin kristal yapısına göre bağımlıdır. Manyetik alan “Kolay Manyetizasyonun Yönleri” adı ile bilinen her hangi bir sabit yönde olabilir. Örneğin kübik demir veya nikel kristalinde altı yön vardır. Bir harici manyetik alan mevcudu ile tek kristal içindeki bütün atomlar bir sıfır alanı meydana getirmeye yöneleceklerdir ve polikristal içinde ekseriyetle gelişigüzel doğrultularda yönlenme olacaktır. Bir harici manyetik alanın büyütülmesi ile alan şiddeti gittikçe artar ve her bir kristal içindeki sıfır alanı, manyetik alana paralel oluncaya kadar döner. Bu işlem esnasında malzeme genişler veya daralır.

Bu işlem esnasında nikel, yüzde uzunluk olarak en büyük değişimi gösterir. Fakat miktar olarak hakiki değişim milyonda otuz veya 30 cm^3 'e 9 cm oranındadır. Eğer malzeme mekanik rezonansta ise değişim oranı binde bir kadar yüksek olabilir. Fakat bu oran malzemedeki yorgunluk sebebi ile limit olacaktır. Statik kuvvet, metalin elastikiyet modülü ile boyca değişim bağıntısından tesbit edilecektir. Nikel için bu değer 2926 kg/cm^2 dir. Alan şiddeti arttıkça nikelin kısalmaları kullanılmayacak derecede azalmaktadır. Bütün manyetostriktif materyaller ısıya karşı hassastır. Sıcaklık Curie noktasına kadar eriştiği zaman, bütün manyetik özellikler kaybolur. Ultrasonik titreşim üreteçleri geniş sıcaklık aralıkları için dizayn edilirlerse bu değişimler önemli olacaklardır. Saf nikel, ultrasonik titreşim üretici dizaynında kullanılan belli başlı elemandır. Fakat bazı uygulamalar için dezavantajları da vardır. Nikelin Curie sıcaklığı yani para manyetik hale dönüşüm noktası 360°C dir. Yüksek güçlü üreteçlerde bu sıcaklığa gelinebileceğinden üretici soğutma işlemi de gerekecektir. Nikelin yorulmaya karşı direnci diğer manyetostriktif malzemelere göre azdır. Demir-Kobalt alaşımlarından permendur adı ile bilinen alaşım geniş manyetostriktif değerler gösterir ve ultrasonik titreşim üretici malzemesi olarak büyük ölçüde kullanılır. Bu alaşımın kompozisyonu Fe 49, Co 49, V 2% ağırlık değerindedir. Permendur ile metallerde çok iyi çalışma karakteristikleri elde edilmiştir [1, 11].

2. 11. 1. 7. *Elektrostriksiyon*

Bütün dielektriklerde bu olay gözlenir. Manyetostriktif olaya benzer. Bu özelliğe sahip cisimlere belirli bir doğrultuda elektrik alan tatbik edilirse mekanik uzama veya daralma olur. Bu boyca değişme, tatbik edilen alanın karesi ile orantılıdır. Alanın yönüne tabi değildir. Sinüzoidal titreşim veren bir elektrik alan içine getirilirse frekansı, bu alan frekansının iki katına eşit bir frekansta titreşim oluşur. Bu titreşimin sinüzoidal olması için madde polarizlenir. Madde, Curie sıcaklığının üstüne kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta elektrostriksiyon kaybolur. Sonra kuvvetli bir elektrik alanda yavaş yavaş soğutulur. Bu alan, tatbik edilecek olan alan doğrultusundadır. Polarizasyon alanından küçük olmalıdır. Polarize edilmiş olan ferroelektrik kaynaklar, piezoelektrik kaynakları gibi çalışırlar. Baryum titanat ve kurşun zirkonat bu sınıfın belli başlılarından. Böyle bir kaynak hazırlama tekniğinin esasları şöyledir: Ferroelektrik olan küçük kristaller uygun bir madde ile yapıştırılarak istenilen şekilde seramik yapılır. Bu kaynakların piezoelektrik kaynaklardan üstünlüğü bunların elastik izotrop oluşudur. Özel bir eksen boyunca kesmeğe lüzum yoktur. Bunlardan konkav kaynaklar yapılarak ultrases enerjisi bir tek noktada toplanabilmektedir [1].

2. 11. 1. 8. *Titreşim Üreteci Dizaynı*

Üreteçler uygun teklif esaslarına göre birçok şekillerde yapılabilirler. Önceleri nikel çubukları veya boruları enerji verici bobinler olarak hazırlanmıştır. Fakat bu şekilde akımın rotasyon etkisi ve diğer kayıplar çok fazladır. Sonraları nikel boru üzerinde dikey dörtgen delikler açılarak kayıplar azaltılmıştır. Bu kayıpların tesiri ile metal yüksek güçle yüklendiği zaman çatlama ve kırılmalara sebep olur. İki çubuğun karşılıklı olarak birleştirilmesi yolu ile bazı ilerlemeler kaydedilmiştir. Son olarak akımın rotasyon kayıplarının malzemedeki tesiri, lamellerden meydana gelmiş pencere şeklindeki yığın üreteçler ile azaltılmıştır. Uygalanan tüm bu yöntemler optimum dizaynı oluşturmada etkindirler.

2. 11. 2. **Ultrasesin Kullanıldığı Yerler**

Ultrasonik titreşim, malzemelerin fiziksel özelliklerini karakterize etmek amacıyla kullanımı çok yaygın olmakla birlikte, tıbbi tasarımlarda, malzeme test yöntemlerinde, çatlak bulma, okyanus geometrisinde, temizleme işlemlerinde, gıdaların korunması işlemlerinde, akışkan akış ölçümleri alanında yüzey açma, kaynak (ergitme) ve plastiklerin montajı işlemlerinde, emülsiyonlarda partikül dispersiyon stabilitesini

sağlamak amacıyla bir çok endüstri dalında kullanılmaktadır. Madencilik endüstrisinde ve özellikle cevher hazırlamada ise; iletim oluklarının boşaltılması, besleme, taşıma, eleme, öğütme, cevher yıkama ve sallantılı masalarda zenginleştirme işlemlerinde kullanım alanı bulmuştur. Vibroakustik kırıcılar, düz yüzey zenginleştiriciler, çimentolama araçları, üreteçler ve kurutucular gibi ekipmanlar da bu işlemlerden yaygın olarak yararlanmaktadır. Ultrases frekansına göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar tablo 2.4 te verilmiştir. Ultrasesi kullanma şekline göre bu uygulamaları; ultrasesden haberci (veri toplarken ultrasesden yararlanan) olarak yararlanan uygulamalar ve enerji olarak yararlanan uygulamalar olmak üzere iki temel gruba ayırmak mümkündür. Ultrases olarak tanımlanan alan kendi içerisinde frekans veya gücüne göre de yüksek frekanslı veya tını ultrasesi (2-10 MHz) frekans aralığında, ve düşük frekanslı veya güç ultrasesi (20-100 kHz) olarak ikiye ayrılabilir [12, 13, 14].

Tablo 2.4 : Ultrases uygulama alanları [1].

Frekans (kHz)	Uygulama Alanı
3-10	Gaz üretme, köpük söndürme, delme, gazsızlaştırma, kaynak
1-100	Metalurjik etkiler
20	Hırsız alarmı
20-100	Depolimerizasyon
20-40	Endüstriyel temizleme
300	Rezonans testi
100-500	Fotoemisyon ve emülsiyon
150	Su yağ karıştırma
300	Fiziksel ve biyolojik etkiler
330	Virüs muamelesi
450	Civanın bastırılması
500-15000	Puls testi, katılaştırken çinko üzerine etkileri
200-200	Halojen – gümüş üzerine etkileri
1.000.000	Ulaşılabilen en yüksek frekans

Ultrasesden haberci olarak yararlanan uygulamalar genellikle boyut ölçümü, özelliklerinin tayini ve süreksizliklerin tayini gibi amaçlara yöneliktir. Ultrases dalgalarının geçtiği ortamlarda değişen özelliklerinden ve gidiş-geliş sürelerinin tespit

edilmesiyle bu uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Denizaltı sonar sistemi, körler için kılavuz aletler, iç organların muayenesi ve herhangi bir metalurjik yapıdaki değişimlerin algılanması ultrasesden haberci olarak yararlanan uygulamalara örnek olarak verilebilir.

Tablo 2.5 de ise güç ultrasesin bazı endüstriyel uygulama alanlarının özeti verilmiştir. Güç ultrasesinin en önemli ve yaygın uygulama alanı ise ultrasonik temizleme banyolarıdır. Yıkama tankı içerisindeki sıvıya 20-40 kHz frekanslı ultrases enerjisi verilerek kavitasyon etkisi oluşturulmaktadır. Meydana gelen şiddetli alternatif basınç kuvvetli bir ovma etkisi de yapmaktadır. Yıkacak yüzeylerden pislikler, kavitasyon ve aşınma yardımı ile uzaklaştırılmaktadır. Kimyasal temizleyiciler işlem hızlandırmaktadır [1, 13, 14].

Tablo 2.5 : Ultrases kullanan bazı endüstriler [1].

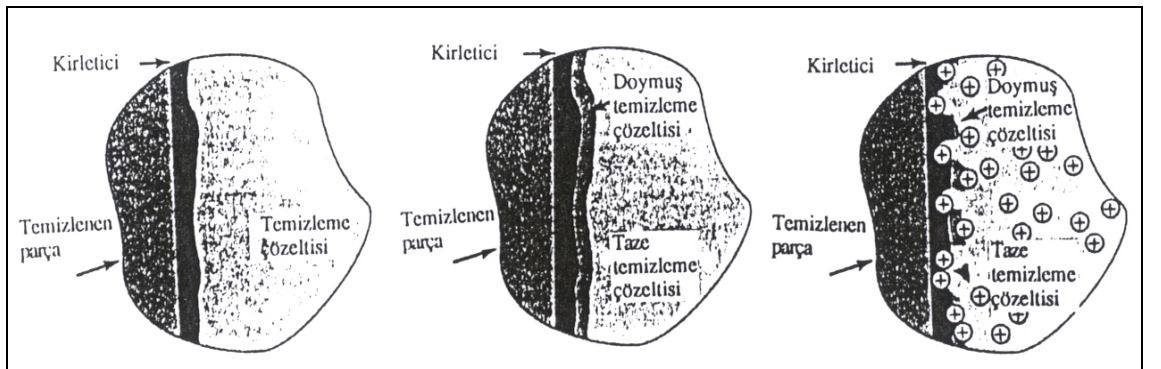
Alan	Uygulama
Biyoloji, Biyokimya	Hücre içeriklerini serbestleştirmek için biyolojik hücre duvarlarını kırma, purifikasyonsuz enzimatik değişim
Mühendislik	Delme, kesme, öğütme, cam ve seramik gibi sert ve kırılğan malzeme üretimi, plastik ve metal kaynaklama, temizleme
Endüstri	Boya, mürekkep ve reçine içinde pigment ve katıların dağıtılması, Parçaların banyo içinde temizlenmesi ve yağdan arındırılması, Akustik filtrasyon, kurutma, atomizasyon, kristallendirme, gazsızlaştırma ve elektrokaplama
Tıp	Teşhis ve tedavide görüntüleme, fizkoterapide masaj etkisi, kas gerilmelerinin özel muameleleri
Plastik ve Polimerler	Termoplastiklerin kaynağı, küresel bir polimerizasyonu başlatmada, yeni oluşan polimerlerin önlenmesi

Makine parçalarının temizlenmesinde ultrasonik banyoların pek çok uygulaması mevcuttur. Seri üretim yapan fabrikalarda, sürekli olarak kirlenen parçalarının kontrol ve kullanım için temizlenmesi gereken uzay araştırma merkezlerinde gittikçe gelişen

uygulama alanları bulmaktadır. Ultrasonik temizleme geleneksel temizleme metodlarına göre daha ekonomik ve daha pratik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Uygulamasının kolay olması hastane, laboratuvar gibi küçük birimlerde de kullanımına imkan vermektedir. Örneğin yüksek hızlarda çekilmesi gereken tellerin temizlenmesi üretimin aksamaması için 0,5-10 sn. içinde temizlenmek zorundadır. Bu hız uygun dizayn edilmiş ultrases banyoları ile kolaylıkla başarılabilir. Diğer ilginç bir örnek ise, NASA ve KSC (Kennedy Space Center)'de parçaların temizlenmesindeki uygulamasıdır. Yakın zamana kadar çeşitli temizleyici kimyasalların kullanıldığı bu merkezler çok daha ekonomik ve pratik olmasından dolayı ultrases temizleme sistemlerine geçmişlerdir. Kullanılan reaktiflerin ozon tabakasına zararlı olması da bu tercihi etkilemiştir.

Temizleme işlemlerinde iki ayrı durum söz konusu olmaktadır. İlki parça yüzelerindeki kirleticilerin bir temizleyici kimyasalla çözünbildiği durumdur. Bu işlemde yüzeyde kirletici ile doymuş bir temizleyici tabakası oluşmakta ve temizleme işlemi zayıflamaktadır. Ultrasesin uygulanması ile oluşan kavitasyon kabarcıkları oluşan bu tabakayı bozarak dağıtmaktadır. Kirleticilerinde aşınarak çözelti içine karışmasını da sağlamaktadır.

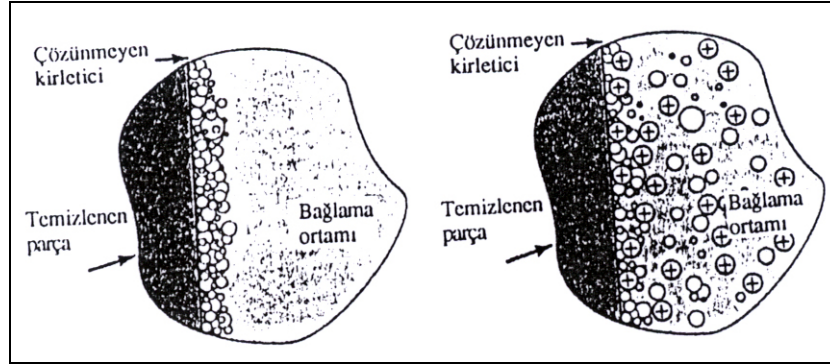
Şekil 2.33 te çözünabilir kirleticilerin ultrasonik sistem yardımı ile yüzeyden uzaklaştırma mekanizması görülmektedir [1].



Şekil 2.33: Çözünabilir kirleticilerin ultrasonik sistem yardımı ile yüzeyden uzaklaştırma mekanizması [1].

İkinci durumda ise çözünmeyen kirleticilerin yüzeylerde bulunması durumudur. Burada da ultrasesin kavitasyon etkisi ile yüzeyindeki kirleticiler sıvı ortama alınarak

uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemin etkin olarak gerçekleşebilmesi için temas eden sıvının uzaklaştırılacak kirleticileri ıslatabilme yeteneğine sahip olması gerekir.



Şekil 2.34: Çözünmeyen kirleticilerin yüzeyden uzaklaştırılması [1].

Ultrasonik temizleme; sprej yıkama, fırçalama, karıştırma ve elektro temizleme gibi bir çok sisteme göre çok daha avantajlı ve etkin bir sistemdir. Malzeme yüzeylerinin girintili olduğu bir çok durum için belki de vazgeçilmez bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır [1, 11].

2. 12. ULTRASONİK İŞLEMLERİN KULLANILDIĞI CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME UYGULAMALARI

Ultrases dalgalarının teknik alanlara uygulamaları hakkında birçok literatür bulmak mümkündür. Cevher hazırlama işlemlerindeki uygulamaları, genellikle ultrases dalgalarının kavitasyon etkisinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Burada günümüze kadar yapılmış araştırmaların bazıları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

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 birçok endüstri ülkesinde ultrasonik temizleme ekipmanları üretiminde hızlı artışlara yol açmıştır. Bununla birlikte ekipmanların dizaynı bir ülkeden diğerine farklılıklar gösterebilmektedir [11, 12].

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 bozunarak ortamdan uzaklaşmaktadır. Kavitasyona ve oluşan hava kabarcıklarının oluşumuna sebebiyet veren etmenler literatürde detaylı bir şekilde incelenmektedir.

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.

Cevher hazırlamanın bir konusu olan minerallerin birbirlerinden ayrılması işlemlerinde vibroakustik veya ultrasonik tekniklerin kullanımı son yıllarda yaygın hale gelmiştir. Bu konuda yapılan birkaç 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 [12].

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 [11].

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 ayrımında 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 [11].

Vibroakustik tekniklerden yararlanan floatasyon makinelerin 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 üzerine denenmiş ve sonuç olarak flotasyon süresinin azaldığı, konsantre miktarı ve veriminin arttığı gözlenmiştir. Böylelikle, konvansiyonel flotasyon makinelerinde 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 ölçekte 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 makinelerinin kullanımının umut verici olduğunu ortaya koymuştur [11, 15].

Halihazırda kullanılan flotasyon makinelerinde 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 konsantre tenörleri bu yolla artırılabilir.

Vibroakustik işlemler aracılığıyla köpükte yüzebilen 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 susuzlandırılmasında ultrasonik tekniklerin etkili olduğunu göstermiştir.

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

Minerallerin flotasyon ile kazanılmasında ultrasonik işlemin etkisi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar sonucunda ultrasonik titreşimlerin flotasyon pülpü üzerindeki etkisinin mineral türüne göre ve prosesi yürütme şekline bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Çalışmalarda flotasyonu kontrol eden birçok faktör gözönüne alınmıştır. Bundan başka ultrasonik işlemin flotasyondaki etkilerini araştırmayı amaçlayan deneylerin bir çoğu gerçekte sadece flotasyondan önceki koşullandırma üzerindeki etkisini incelemektedir.

Taggart (1927); dönen pervane kanatlarının arkasında oluşan gaz kabarcıklarının flotasyondaki etkisini incelemiş ve bu kabarcıkların mineral tanesi üzerine çökebileceğini belirtmiştir. Ancak, bu durumda çökelen kabarcıkların az miktarlarda olması nedeniyle flotasyon üzerine etkisinin ikincil olması gerektiğini düşünmüştür. Aynı kabarcıklar ultras es ortamlarının varlığında da kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

Asai ve Sasaki (1958) flotasyon pülpünün ultrasonik işlemde geçirilmesiyle ince kömürün kazanma veriminin iyileştirildiğini rapor etmişlerdir. Fakat bu araştırmacılar normal kullanımdan çok daha fazla hidrokarbon toplayıcı kullanmışlardır. Zubkov ve Below (1982) ultrasonik ön koşullandırmanın nadir metal cevherlerinin flotasyonundaki etkisi üzerine çalışmışlardır. Bu yazarlar artan flotasyon verimini reaktiflerin daha iyi dağıtılmasına bağlamışlardır. Raghavon ve Hsu (1982) ultrasonik ön işlemin molibden cevherinin flotasyonundaki etkisini incelemiş ve verimde küçük bir artış (%1-2) bulmuşlardır. Ne var ki yazarlar sonuçlarının herhangi bir mekanik yorumunu yapamamışlardır. Stoev ve Kuzev (1966)'in çalışması daha önceki bir çok çalışmadan daha değişiktir. Bu araştırmacılar hava kabarcıklarının ultrasonik dağılmanın etkisini direkt olarak bir flotasyon hücresinde araştırmayı denemişlerdir. Bu ultrasonik kornalar ile sağlanmıştır. İnce kömürde daha iyi verim sonuçları elde edilmiştir [11, 16].

Stoev 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 değinilmektedir. 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 [11].

Stoev ve Martin (1992) tarafından da belirtildiği gibi 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-kalkopirt, galen-kuvars, manganez oksitler, jarosit-ilmenit-ferromolibdenit ve bakır-molibden konsantrelerinin flotasyonunda da ultrasonik ön işlem yardımıyla çok yüksek verimlere ulaşılabildiği belirtilmektedir [11].

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 inceltmesi ve yok edilmesi enerji bariyerini azaltır ve bunun bir sonucu olarak yapışma olayı olur 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 [11].

W.Kowalski ve E.Kowalska (1978), hidrofobik minerallerin flotasyonunda polar olmayan toplayıcıların ultrasonik aktivasyonunu araştırmıştır. Araştırma sonucunda polar olmayan reaktiflerin ultrasonik etki ile çok daha iyi emülsifiye edildikleri ve %89,3'ünün 0,001 mm boyutundan daha küçük olarak oluştukları bulunmuşlardır. Bu çalışmalarını bir fosfat cevheri üzerinde uygulayarak yüksek verimler elde etmişlerdir. Bu iyileşmenin nedenleri olarakta toplayıcının iyi dağıtılmasını, mikro kabarcık oluşturarak katı-sıvı-hava arayüzey çarpışma olasılığının daha fazla arttırılmasını göstermişlerdir. Ayrıca araştırmalarda frekansın dahada büyümesi durumunda bu faydalı etkilerin azaldığını bulunmuşlardır. Bunu da elektriksel çift tabakadaki karışıklığa bağlamışlardır. Sonuç olarak ultrasoniğin kullanılması ile (25 kHz, 500 W), flotasyon

zamanının azaltılması, kullanılan toplayıcıyı ve köpürtücülerin miktarının azaltılması, köpüklerin daha sonraki aşamalarda söndürülmesi, reaktifin daha optimum çalışması gibi faydalarının olduğunu bildirmişlerdir [17].

Nicol, Engel ve Teh (1986) bir araştırmalarında akustik alan içinde ince tane flotasyonunu incelemiştir. Kendilerinden önce yapılan çalışmaların hatalı veya eksik yönlerini safdışı bırakmak için doğal hidrofobik olan metilleştirilmiş silis yüzeyiyle çalışmışlardır. Örnek en büyük boyutu 20 mikron olarak %50'si 8 mikron altındadır. Ultrasonik alan $0,40 \text{ W/mm}^2$ ve $1,18 \text{ W/mm}^2$ olarak uygulanmıştır. Flotasyon işlemindeki bulunan artışın nedenleri araştırılarak, meydana gelen $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ısınmanın etkili olmadığını, tane ufalanmasının meydana gelmediğini, hava kabarcıklarının değişmediğini ve temas açılarının değişmediği bulunmuştur. Bunun sonucu olarak ultrasesin sadece kendi etkisi ile sıvı içinde düşük ve yüksek basınçlı lokal rejim meydana getirerek lokal kaynama/kavitasyon (alçak basınçlı buhar boşluklarının meydana gelip çökmesi) olduğu noktasından hareket ederek sıvı içinde çözülmüş olarak bulunan 20 ml/lt havanın çözelti dışına çöktürülerek tane üzerine çekirdeklenmesinin gerçekleştiği sonucunu çıkarmışlardır [18].

Araştırmacılar sözkonusu teorilerinin ispatlanması için sıvı içinde çözünürlüğü düşük olan (0,36 ml/lt) helyum gazı kullanarak deneylerini tekrarlamışlar ve daha önce başarılı olan flotasyon verim yükselmesinin yok olduğunu görmüşlerdir. Bu da onları doğrular niteliktedir. Eğer bu hipotez kanıtlanabilirse, ince tanelerin flotasyonunun gelişmesinde, bu alanda günümüzde düşünüldüğü gibi yüzey gerilimini azaltan moleküller ile stabilize edilen ilave mikro emülsiyonlar kullanılmasından daha fazla etkili olduğu söylenebilir. Çünkü bu durumda mikro kabarcık ve tane yüzeyi arasında önemli olan elektriksel çift tabaka itişisi ortadan kalkar.

Bir Barit-Fluorit-Kuvars cevherinden baritin flotasyonunun seçimliliğine ultrasonik alanının etkisi Slaczka (1987) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda 22 kHz'lik bir frekans $0,5 \text{ W/cm}^2$ 'lik bir yoğunlukla kullanılmıştır. Deneylerde yüksek frekansın saf minerallerin flotasyonuna etkisi, şlam atmaya olan etkisi ve mineral üzerine toplayıcı adsorbsiyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak ultrasonik ön işlemin baritin seçimliliğini oldukça büyük oranda arttırdığı bulunmuştur. Bu baritin yüzeyinin daha

kırılgan olduğundan çukurlaştırılarak adsorblanma kabiliyetinin artırılması ve ters şekilde daha sert olan fluorit yüzeyinin düzlenerek adsorbsiyonu düşünerek seçimliliği arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ön işlemin 3. dakikasından sonra önemli bir değişiklik olmaması, kısa süre içinde gerekli işlemlerin gerçekleştirilebilmesi bir avantajdır. Ayrıca şlam kaplamanın önlenmesinde oldukça önemlidir [19].

Djendova tarafından (1987) hidrodinamik olarak ultrases üreten bir cihaz tasarlanarak bakır cevheri flotasyonunda kullanılmıştır. Bu deneylerde metal veriminde %6 oranında bir düzelme gerçekleşmiştir. İşlem sulu ksantat solüsyonlarının sonikleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Diğer bir çalışmada ultrasonik ön işlemin kömür ve galenin yüzdürülebilirlikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Oksitleyici ve indirgeyici maddeleri ile işlenmiş kömür yüzdürmeden önce sonik işlemde geçirilmesinin, kömürün su iterliğini tümüyle eski durumuna döndürdüğü bulunmuştur. Toplayıcı yokluğunda sonik işlemde geçirme sonrası şlam giderme ve toplayıcı ile koşullandırma, sonik işlem olmaksızın yapılan oranla, birkaç kez daha yüksek verim ile sonuçlanmıştır. Verimdeki iyileşmeyi açıklamak için temiz yüzeylerin oluşmasının ardından su iten katı üzerinde mikrokabarcıkların oluşması ve bundan kaynaklanan kabarcık-tane bağlanmasının çoğalmasından oluşan bir mekanizma önerilmiştir. Bu sonuçlar ayrıca, uygun koşullar altında yapılan ultrasonik işlemin galen / ksantat sistemindeki toplayıcı tüketimini en az %50 oranında azaltabileceğini göstermiştir. Çalışmalar 22 kHz'de ve 0,5 W/cm² gücünde yapılmıştır.

Mekanik flotasyon hücrelerinde gangin köpük içinde tutulma oranlarının azaltılmasında 55 kHz de çalışan ve 0,4 W/cm² yoğunluklu dalga üreten bir kristal kullanılmıştır. Çalışmada gang tutulma oranının %30 azaltıldığı bulunmuştur. Ultrasonik dalga uygulaması köpük-pulp ara zonunun hemen üzerinde yapılmıştır. Ses dalgalarının iletiminde çok önemli olan iletim alanı olarak köpük zonu yani hava kullanılarak verimli bir sonuç alınmamış olabilir. Belki de pulp zonuna uygulanması ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Yerkovic ve arkadaşları (1993) bakır cevherlerinin ultrasonik öğütmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ultrasonik ilaveli merdaneli değirmende Şili porfirik bakır cevheri üzerinde kullanılmıştır. Öğütme sonuçları ayrı boyut ve kapasitedeki bilyalı değirmen ile karşılaştırarak yorumlanmıştır. Ultrasonik öğütücü 15-16 kHz ultrasonik titreşimle hareketli bir tabla ile merdane arası mesafe 50 mikron olduğunda bilyalı değirmen sonuçları ile aynı olmakta, aradaki açıklık 130 mikron olduğunda ise bilyalı değirmene ve 50 mikron boyutuna göre daha düşük olmaktadır. Bu çalışma daha önce test edilen kömür ve kireçtaşı gibi yumuşak malzemelere ek olarak bakır cevherleri gibi sert malzemelerin de öğütülmesi için ultrasonik merdaneli öğütücünün ümit vadettiğini göstermektedir. Halihazırdaki ultrasonik aletlerin önemli tasarım sınırlamasının olması ve elektrik enerjisinin ultrasonik enerjiye çevirme etkinliği en büyük sorunlardır [20].

Ultrasonikleştirme ile flokların ve agregaların boyutlarının duraylı parçalara bölünerek azaltılabileceği bulunmuştur (Strengge, Pilgrimm, 1983). Ultrasonik dalgalar disperse sistem hazırlamak için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Ultrases dalgalarının dispersiyonu sağlayan etkisinin tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen, meydana getirilen kavitasyon olayından kaynaklandığı bilinmektedir.

Price ve Smith (1992) tarafından polimer solüsyonlarının dağıtılmasında ultrasoniğin kullanılmasında solüsyon konsantrasyonu ve çözücü değişikliğinin etkileri çalışılmıştır. Çalışmalarında 22 kHz, 17 W/cm²'lik bir ultrasonik prob kullanılmıştır. Çalışmalarda polisitrinin toluen ve metil butrat içinde çeşitli konsantrasyonlarda dağıtılabilişirliğinin zamanla değişimi incelenmiştir. Sonikleştirme zamanının artışıyla molekül ağırlığının hızla azaldığı ve konsantrasyon azalırken molekül ağırlığındaki azalma hızında arttığı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar kavitasyon kabarcıklarının çökmesi çevresinde hasıl olan kayma gerilmeleri tarafından zincirler üzerindeki oluşturulan stresler tarafından doğan bir mekanizma ile uyumlu olduğu öne sürülmüştür. Dağılma hızı temel olarak çözücü buharlaşmasına bağlıyken, ulaşılmış limit molekül ağırlığı temel olarak şekil üzerine bağımlıdır. Konsantrasyon artışı solüsyon viskozitesi ve zincir karmaşıklığını arttırdığından dolayı prosesin etkinliğini düşürmektedir.

Ultrases etkileri elektrokimyasal prosese yardımcı olarak kullanılırsa üç avantaj sağlar:

- a) Elektroliz süresince akımın geçişi ile elektrot yüzeyinde gaz birikimi olur. Eğer bu tip bir elektroliz sonikleştirilirse, elektrot yüzeyinde oluşan her kabarcık kavitasyon için bir çekirdek olur. Böylece kabarcıklar yüzeyden uzaklaştırılır. Ultrasesin gazıslştırma etkisinin bir sonucu olarak atmosfere salıverilir. Böylece elektrolizde elektrotta gaz kabarcıklarının birikimini önlenir.
- b) Elektrot yüzeyinde kavitasyonel çökeltme elektrot çift tabakasının bozulmasına ve ayrılmaya sebep olur. Bu tüketimi düşürür ve elektro kimyasal prosesin devamı için iyon transferine yardım eder.
- c) Ultrases bir elektrot yüzeyini aktive eder ve temizler. Bu elektrodun pislensmesini önler ve özellikle elektro kaplamada faydalıdır.

Ultrasesin en büyük kullanım alanı elektro kaplamadır. Elektro kaplama sistemini sonikleştirmenin iki basit metodu vardır. İlki bütün kaplama banyosunun sonikleştirilmesi diğeri ise sadece elektrotların birisinin sonikleştirilmesidir. Nikel kaplama işlemi kaplama banyosunun sonikasyonu ile iyileştirerek birikme hızının arttırır ve kaplama akımını arttırır. Kaplama akımı polarizasyon sebebiyle proses esnasında normal olarak düştüğünden bu son etki önemlidir. Krom kaplamada ise ultrases direkt olarak katoda uygulandığı zaman proses iyileştirilebilir. Sonuçta kaplamanın mikrosertliğini düşürür (%100), mikro kırık üretimini düşürür ve geleneksel metodlarla üretilene göre daha iyi parlaklık gösterir.

Nikel kaplama çalışmalarında ultrasonik banyonun kullanımıyla kaplamanın aşınma karakteristiklerinin daha da azaltıldığı görülmüştür. Ultrasonik dalgaların etkisi ile daha iyi yerleşen moleküllerin mikro sertliğinin arttığı ve aşınmaya karşı daha fazla dayanıklılık gösterdiği düşünülmektedir. Burada 22 kHz 500 W'lık bir ultrasonik banyo kullanılmış ve saçaklı büyümeyi azaltarak düzenli bir yüzey oluşturduğu optik olarak tespit edilmiştir.

Suslick ve arkadaşları (1987) inorganik katılar üzerine yüksek yoğunluklu ultrasesin etkisini (20 kHz, 20 W/cm²) incelemişlerdir. 60-90 mikron çaplı örnekler birkaç dakika içinde 5-10 mikrona düşmüştür. 60-90 mikron boyutlu TaS₂ yüzey alanı 15 dk sonra 1'den 11 m²/g'ye gelmiştir. 3-5 mikron başlangıç boyutlu Ni tozlarının yüzey alanı 15 dk.'da 0,48'den 0,69 m²/g'ye çıkmış ve de 2 saat sonunda 1,00 m²/g'ye büyümüştür. Yüzey morfolojisinde de önemli değişiklikler görülmüştür. Elektron mikroskobunda gözlemlendiğinde TaS₂ ve NaO₃'ün yüzeylerinin çok kötü aşınmış ve kabarcıklanmış oldukları, Ni tozlarının yüzeylerinin ise metalikleştiği görülmüştür. Bu iki katı tipinin sünebilirliklerindeki farklılıktan meydana gelmiştir. Yani tabakalı inorganik oksit ve sülfidler göreceli olarak kırılğan malzemelerdir. Buna karşın geçiş metalleri oldukça dövülebilirdirler [21, 22].

Swamy ve arkadaşları (1983) kurutma öncesi taneli örneklerin susuzlandırılması üzerine ses dalgalarının etkisini araştırmışlardır. Kullanılan örnekler manyezit, kalsiyum karbonat, kum ve talaştır. Susuzlandırma prosesi boyunca ultrases kullanıldığında nem içeriğinde bir düşme gerçekleştiği bulunmuştur. çalışmalarda 9,8 kHz'de 138 dB'lik yüksek yoğunluklu ses dalgalarını üretmek için akslı bir korna kullanılmıştır.

Atık şehir sularının temizleme tesisinin organik atıklı çamurlarının ve metal endüstrisinin atık mineral çamurlarının susuzlandırılmasında ultrasesin etkisi Kowalska ve arkadaşları (1978) tarafından incelenmiştir. Çamurlar organik kolloidlerle muamele edilmeden önce 20 kHz'lik frekansta 900 W'lık bir ultrases alanından geçirilmişlerdir. Uygulanan flokülantların türü ne olursa olsun örneklerin sesle muamelesi susuzlandırma etkinliğini arttırmıştır. Mineral çamurlarının filtreleme özelliklerini iyileştiren etki; ultrasesle oluşturulan kaviteasyon şartlarında oluşan dağıtıcı ve yıkıcı etkisinden kaynaklandığı sonucu çıkarılmıştır. Ultrasonik dalgaların diğer etkilerde suyun yüzey gerilimini, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini ve elektrokinetik potansiyeli düşürerek moleküller arasındaki kuvvetlerin oryantasyonunda değişimler oluşturmasıdır. Ayrıca ultrases dalgaları filtre yatağının dokusunu ve porozitesini değiştirerek filtreleme özelliklerini iyileştirmektedir [23].

1970'ler içinde akustik filtrasyonun avantajlarının raporlarından bir kaçı yayımlanmıştır ve filtrasyonda 10-300 kat oranında iyileştirme sağladığı bulunmuştur. Güç ultrasesi

filtre üzerindeki karışım veya filtrenin kendisine uygulanabilir. Temel olarak ultrasesin filtrasyonu iyileştiren iki etkisi vardır;

- a) Kek içinde çok ince tanelerin aglomerasyonu
- b) Kısmen asılı taneleri tutan kek için yeterli titreşim enerjisinin temini

Böylece yıkama solventi için daha fazla kanallar üretilir. Özellikle etkileyici bir durum kömür pülplerindedir. Geleneksel filtrasyon teknikleri ile çoğu pülplerden suyu uzaklaştırmak zordur. Gerçekten vakum filtrasyonu %60 sulu solüsyonu sadece %40'a azaltacaktır. Maalesef, kömür solüsyonları %30'dan fazla nem içeriğinde yakılamaz. Fakat ultrases yardımcı vakum filtrasyonu %20 nem içerikli yanabilir bir ürünü direkt olarak üretebilir.

Filtrelerde çok ince parçalar, daha yavaş filtrasyon hızı ve tıkanmaya neden olur. Eğer membran kendi kendini temizleyebilirse bu ayırma teknolojisinde büyük bir ilerleme olacaktır. Bu ultrases duran dalgaları yardımcı ile başarılabilir. İki transduser sıvı ortam içinde yerleştirildiği zaman, duran dalgalar, transduser frekansları aynı olduğu zaman üretilecektir. Bu durumda sıvı içinde bulunan her minik tanecik ultrases ışınımının aksı üzerinde yarım dalga boyu uzaklıktaki bölgede toplandığı bulunur. Eğer transduserlere hafifçe farklı frekanslarda güç verilirse, duran dalgalar yavaşça transduserin birine doğru göç eder ve parçacıkları taşır. Böylece, tanecikler bu transduserde toplanma eğilimindedir. Eğer transduserler arasındaki sıvı akıyorsa akışın bir yarısı parçalı maddelerce zenginleşecektir.

Slaczka (1986) tarafından karbonatlı çinko cevherinin amonyak liçi üzerine ultrasesin etkisini araştırmıştır. Ultrasonik bir alanın kullanılması liç edilen karbonatlı cevherin yüzeyi üzerindeki difüzyon tabaka kalınlığını düşürerek daha kısa sürede liç yapılabilmesine izin vermiştir. Ultrasesle birlikte gelen kavitasyon, yayılma basıncı ve kuvvetli türbülanslı akış gibi olaylar sıvı içine batırılmış katı yüzeyinde oluşmuş difüzyon tabakasının karakterini değiştirir. Süspansiyon içine katı-sıvı ara yüzeyi üzerinde ultrasonik yayılımdan dolayı mikroakımların ortaya çıkışı, süspansiyon kuvvetlice hareket ettirildiği zaman oluşan ile karşılaştırılabilecek kadar difüzyon tabaka kalınlığında kabul edilebilir bir düşmeye sebep olur. Kavitasyon etkileri ultrases

uygulanan katı yüzeyi üstünde birçok mikro çatlakların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Difüzyon hızı artarak solüsyon kapiler boşlukların içlerine kadar gider ve liç hızlanır. Çalışmalarda 22 kHz ve 100 W gücünde piezoelektrik transduserli bir üreteç tank içinde daldırılarak kullanılmıştır [24].

Mikro çatlaklı proseslerdeki ultrasenin etkisi üzerine yapılan araştırmalar göstermiştir ki, 23,5 kHz ultrasen frekansı ve 1-2 W/cm² şiddet; kapilerler içine yağ penetrasyon hızını kabul edilebilir bir şekilde arttırmaktadır. Sülfirik asit içinde bakır cevherinin liçi için ultrasen kullanılmıştır. Sonuçta liç üzerine ultrasenin pozitif bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Knavskii (1979) ve Terenin (1982) şelitin liç prosesinde ultraseni kullanmışlardır. Ultrasonik titreşimlerin tanelerin yüzeyi üzerinde oluşmuş katı reaksiyon ürünlerinin filmlerini yıkadığını, böylece reaktifin yeni bir alan ile kontakt kurmasına izin vermişlerdir.

Revnitzev ve Dmitriev (1965), minerallerin saflaştırılması için ultrasoniğin direkt uygulamalarını araştırmıştır. Ultrasonik kimyasal temizleme ve ultrasonik temizleme adı altında kromit konsantreleri, kayaç kristalleri, cam kumları ve sentetik aşındırıcı gibi yapay mineraller için uygulanmıştır [25].

Ultrasonik temizlemenin tekniği, bilinen frekansta yoğun ultrasonik titreşimleri veren bir hücre içinden %50-60 katlı pulpun geçirilmesinden oluşmaktadır. Normalde frekans 15-20 kHz aralığında ve 0,31 W/cm²'den daha yoğundur. Yüzey filmleri ve ayrı kısımlardan ibaret mineral inklüzyonları, pul pul olup dökülür ve yıkanarak uzaklaştırılabilen ince bir şlam oluşturur. Küçük miktarlardaki bastırıcılar etkinliği daha da arttırmıştır. Ultrasonik temizleme, mineral empüritelerini de çözebilen reaktiflerle yıkamadan farklıdır. Cam kumlarının muamelesinde demir hidroksit filmlerinin normal olarak gerekli zamanında onda biri kadarlık bir zamandan daha kısa bir sürede ultrasonik temizleme ile uzaklaştırılmıştır. Feldspat saflaştırılması, demir oksit filmlerinin ve kaolin şlamlarının uzaklaştırılmasını gerektirir. Yazarlar ultrasonik temizlemeyi veya en iyi sonuçlar için ultrasonik kimyasal temizlemeyi önermişlerdir. Mekanik temizleme testinde demir oksit içeriği yalnızca %0,27'ye düşürülebilmştir. Fakat ultrasonik temizleme ile %0,20 Fe₂O₃ elde edilmiş ve %10 HCl eklenmesi ile empürite %0,17 Fe₂O₃'den daha aza düşürülmüştür. Kromit konsantrelerinden fosforun

uzaklaştırılması için ultrasonik prosesin mükemmel sonuçlar verdiği bulunmuştur. Sentetik aşındırıcılardan demir oksitlerin uzaklaştırılmasında ultrasonik işlem mevcut metodlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Ultrasonik güç kil, şeyl ve kumtaşı gibi ince taneli sedimanter kayaçların dağıtılması için oldukça kullanışlıdır. Konik şekilli mekanik dönüştürücünün ucundan güç üreten bir ultrasonik alet tank tipi aletlerden çok daha etkilidir. Ultrasonik metod çok hızlı ve çoğu ince taneli sedimanter kayaçlar için tatmin edicidir. Buna rağmen koyu siyah şeyller çok inatçıdırlar ve dağılmanın tamamlanması için hatırı sayılır derecede uzun zaman gerektirir. Krumbein ve Pettijohn (1938), iyi sonuç veren ve materyalin doğasına bağlı ince taneli sedimanter kayaçların ayrışmasında başarılı olmuş çeşitli metodları listelemişlerdir. Kuvvetli alkalilerle küçük ölçekli liç, uzun süreli sarsıntı ve katı fırça kullanımı analizlerde genellikle hoş olmayan etkilere sebep olabilmektedir. Olmtead (1931), toprak süspansiyonlarını bastırmada ultrasonik güç kullanmıştır [1].

Mark, Gibson (1963), şeyllerin ultrasonik dağıtılmasını incelemek amacıyla yaptığı çalışmalarda piezoelektrik bir elementten oluşan soğutmalı bir transduser, elde tutulabilen bir uçtan oluşan mekanik dönüştürücüden oluşmuş ultrasonik jeneratör kullanılmıştır (Sonifier). Ultrasonik güç çapı 7-20 cm olan çelik bir çubuk sivrilterek konik şekle getirilmiş mekanik dönüştürücüden yayılmaktadır. Frekans 20 kHz civarındadır. Çalışmalarda 12 farklı şeylin karakteristik örnekleri bu sonifier ile muamele edilerek iki aletin performansları karşılaştırılmıştır. 10 dk. ile 5 saat arasındaki bir zaman sonunda sonifier ile muamele edilen örnekler tamamen dağıtılmıştır. Tank tipi aletle ise 2'den 20 saate kadar muamele süreleri içinde örneklerin hiçbirisinden memnuniyet verici bir sonuç elde edilmemiştir. Diğer 34 şeyl sonifier ile dağıtılmış ve sadece koyu-siyah karbonlu şeyllerin dağıtılmasında sonuçlar iyi çıkmamıştır [26].

Sonifier ile dağıtılmış şeyllerin uygulama metodu şöyledir; 25-50 gramlık orijinal kuru örnek yaklaşık 4-8 meş'e kırılarak 4-60 güne kadar periyotlarda N/100 sodyum oksalat içinde ıslatılmıştır. Sonra örnek üçte ikisi su ile doldurulmuş 150 cc cam bir kaba yerleştirilmiş ve sonifier'in ucu su yüzeyinin altına 3,81 cm derinliğe kadar batırılmıştır. Jeneratör maksimum güce ayarlanmış ve örnek bulanık bir süspansiyon üretilene kadar kırılmıştır (yaklaşık 8-12 dk). Bulanık süspansiyon 1 litrelik bir behere dekante edilmiştir ve distile edilmiş taze besleme suyu dağıtılmamış materyaller için

eklenmiştir. Bu işlem örnek tamamen dağıtıncaya kadar devam edecektir. Oluşan ısı dekante edilen sıcak ikili süspansiyon yerine taze soğuk su ilavesiyle dağıtılmaktadır. Sonifier ile karıştırmanın tane boyutundaki kabul edilebilir ufalama sonuçlarının olup olmadığını belirlemek için şeyllerde yaygın olarak bulunan birkaç kil dışı mineral incelenmiştir. Bu testler mika, kalsit, feldspat ve kuvars taneleri üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki sonifier ile karıştırma, çok az kuvars aşınması, biraz daha fazla feldspat aşınması, kalsit ve mika gibi kolay kırılabilen minerallerin oldukça büyük şekilde aşınması meydana getirmiştir. Mika çok gevrek olduğundan hızlıca parçalanmaktadır. Aşınmanın çoğu 0,175 mm'den daha büyük sınıflarda gerçekleşmiştir. Bu kumtaşı, kil ve şeyl gibi ince taneli sedimanter kayaçların boyut dağılımını ciddi olarak etkilememiştir.

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 değişimlere yol açabilmektedir [27].

Çelik (1989) ise ultrasonik ön işlemlerin oksitlenmiş galen ve kömürün yüzebilirliğine etkisi üzerinde araştırmalarda bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda kollektör konsantrasyonu, şlam atımı ve ultrasonik dalganın uygulama süresinin kömür ve galenin flotasyon davranışına olan etkisi üzerinde durulmuştur. Sonuçta ultrasonik dalgaların kimyasal etkisinin kaviteyona bağlanabileceği, 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 [28].

Özkan (2002) tarafından yapılan -38 mikronun altındaki manyezitlerin etkin olarak değerlendirilmesi çalışmaları kapsamında konvansiyonel, ultrasonik ve ön ultrasonik

flotasyon yöntemleri kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler ön ultrasonik işleme tabi tutularak 10 mikron altı tanelerin uzaklaştırıldığı flotasyonun, konsantredeki manyezit tenörü ve verimi açısından en iyi sonuçları verdiği saptanmıştır. Yine Özkan (1996) tarafından yapılan araştırmalarda 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 kademedede incelenmiş ve ultrasonik ses dalgalarının flotasyon üzerindeki etkileri saptanmaya çalışılmıştır. – 0,020 mm tane boyutundaki şamları 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 şamları yeniden atılan kolemanit numunelerinin çok yüksek tenör ve verimle yüzen 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 [29, 30, 31].

Kalsitin oleik asit ile ultrasonik flotasyonunda ise, konvansiyonel flotasyona nazaran tenörde % 13'lük artış sağlanmış, son olarak kuvarsın katyonik kollektörler kullanılarak yapılan flotasyonunda ise ultrasonik işlem uygulanan numunelerde yüzen malzeme miktarında azalma olmuştur. Bu sonuç araştırmacılar tarafından, mineral yüzeyi ve kollektörler arasında oluşan bağların ultrasonik dalgaların etkisiyle hidrodinamik sistemde oluşan türbülans yüzünden kopmasıyla açıklanmıştır [32].

Özer (2002) değişik çökme koşullarında kil numunelerinin çökme karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla, doğal ortamda ve ultrasonik titreşim etkisinde çöktürme deneyleri yapmış, pülpte katı oranı, flokülant ilavesi ve ultrasonik titreşim uygulaması gibi parametreleri incelemiş, optimum çöktürme koşullarını tespit etmeye çalışmıştır. Sonuçta, ultrasonik titreşim uygulaması ile yapılan çöktürme işlemi, tüm pülpte katı oranlarında doğal ortamdaki çöktürmeye göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ultrasonik ortamda ve doğal ortamda flokülant ilavesinin çöktürme hızında belirgin bir artış sağladığı görülmüştür. Çöktürme işlemini hızlandıran flokülant miktarları, doğal

ortamdaki çöktürmede çok büyük değerler olmakla birlikte, ultrasonik titreşim etkisinde az miktarda flokülant ilavesinin en iyi sonucu vermiştir. Özer tarafından ultrasonik titreşim uygulaması ile çöktürme süresinin yarı yarıya azaltılabildiği ve çöktürme sonucu pülp te katı oranının belirgin şekilde arttığı saptanmıştır [33].

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) [12].

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 konsantrasyon 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-kuvars, manganez oksitler, jarosit-ilmenit-ferromolibdenit ve bakır-molibden konsantrasyonlarının 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 inceltmesi 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 [12].

Çelik (1989) ise ultrasonik ön işlemlerin oksitlenmiş galen ve kömürün yüzebilirliğine etkisi üzerinde araştırmalarda bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda kollektör konsantrasyonu, şlam atımı ve ultrasonik dalganın 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 [12].

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 kademedeki 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), Glembotskii (1963), Leja (1982) [12].

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.

3. MALZEME VE YÖNETEM

3.1. UÇUCU KÜL NUMUNELERİ

Deneyleerde kullanılan uçucu kül (fly ash) numuneleri, Almanya, Ruhr Bölgesi'ndeki bir termik santral tarafından sağlanmıştır. Uçucu küller, termik santralin bacasındaki elektrostatik filtreler yardımıyla yakalanıp, partiküllerin atmosfere karışması engellenmektedir.

Tablo 3.1 de, uçucu kül numunelerinin bazı önemli kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

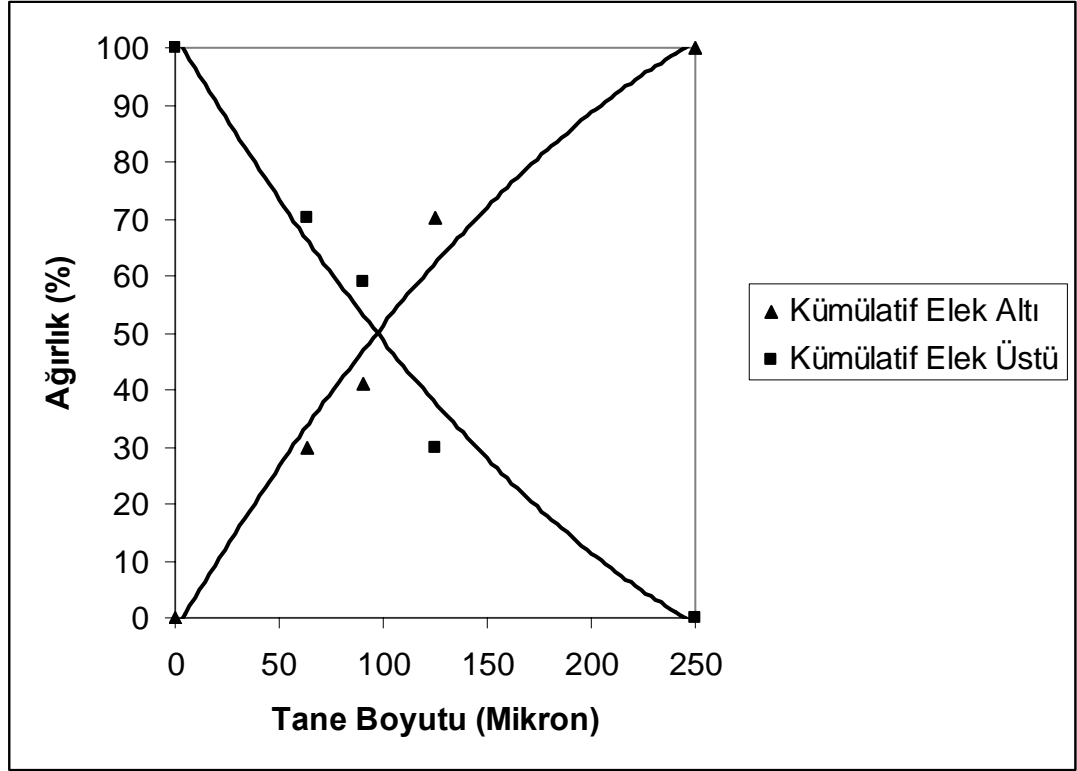
Tablo 3.1 : Uçucu kül numunelerinin bazı önemli kimyasal ve fiziksel özellikleri

PARAMETRELER	% BİLEŞEN	DIN No
Isıl Değer (kcal/kg)	3294,88	51900-1,2,3
Kül	57,81	51719
Kükürt	0,32	51724-1
Nem	0,30	51718
Toplam Karbon	41,32	51721
Uçucu Bileşenler	1,30	51720
Hidrojen	0,14	51721

Tablo 3.2 de ise uçucu kül numunelerinin tane boyut dağılımı verilmiştir.

Tablo 3.2 : Uçucu kül numunelerinin tane boyut dağılımı

TANE BOYUTU	% AĞIRLIK (DIN 22019-1)	% KÜL İÇERİĞİ (DIN 51719)
+ 0,125 mm	29,8	44,08
+ 0,090 mm	29,1	52,43
+ 0,063 mm	11,3	59,85
- 0,063 mm	29,8	76,88



Şekil 3.1: Elek altı – elek üstü eğrisi

Şekil 3.1 deki “elek altı – elek üstü eğrisine” göre malzemenin ortalama tane boyutu (d_{50}) 100 mikron, (d_{80}) ise 180 mikron civarındadır. Bu da numunenin çok ince tane boyutunda dağıldığını ve kül içerisinde bulunması muhtemel kömürlerin kazanımı için flotasyon yönteminin kullanılabileceğini gözler önüne sermiştir.

3. 2. FLOTASYON YÖNTEMİ

Flotasyon çok ince tane boyutlu minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ayırma bazı minerallerin hava kabarcıklarına ilişerek yüzmesi ile sağlanır. Bu mineraller yüzey özelliklerine veya çeşitli reaktiflerle yüzey özelliklerinin değiştirilmesine bağlı olarak hava kabarcığına ilişirler, yani yüzeyleri hidrofobik (suyu iten yüzey) hale gelir. Bu özellikleri göstermeyen diğer mineraller ise, su içinde ıslanarak batarlar. Flotasyon genelde farklı yüzey özelliğine sahip minerallerin zenginleştirilmesine uygulanan bir yöntemdir. Flotasyon 0,5 mm'den kolloid büyüklüğüne (1-2 mikron) kadar değişen tane boyutlardaki cevhelere uygulanabilir. 0,2 mm'den daha iri parçalarda, özgül ağırlık fazla ise, köpükle taşınma zorlaşabilir. Kolloid boyutlu malzemenin yüksek oranda bulunması ise flotasyonu güçleştirebilir ve

bazen imkansız hale getirebilir. Küçük boyutlu tanelerin yüzey alanındaki büyümeye paralel olarak, çözünme artmakta ve çözeltiye geçen çeşitli iyonlar sebebiyle, toplayıcı-mineral adsorbsiyonu etkilenmektedir.

Flotasyon yöntemi sırası ile şu işlemleri içerir :

1. Cevherin maksimum 0,5-0,2 mm gibi bir boyutun altına öğütülmesi.
2. % 15-35 arasında katı içerecek şekilde sulandırılması.
3. Pülpe, bir veya birkaç çeşit inorganik kontrol reaktifinin çok az miktarda ilavesi (bastırıcı-canlandırıcılar).
4. Mineral yüzeyini kaplayarak köpüğe yapışmasını sağlayacak toplayıcı reaktifin ilavesi (kollektör).
5. Dayanıklı hava kabarcığı oluşturan köpürtücü reaktifin ilavesi.
6. Karıştırma yolu veya basınçlı hava sevki ile köpüğün oluşturulması.
7. Mineral taşıyan köpük zonu ile, köpüğe yapışmayan mineralleri bulandıran pülpen birbirinden ayrılması [34, 35, 36].

Flotasyon işleminde farklı karakterlerde reaktifler kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Kollektörler: Kollektörlerin görevi, minerali hidrofob yapmak, yani yüzeyini değiştirerek aktif hale getirmektir. Kollektörlerin etkili olabilmesi için suda erimeleri gerekir. Bir kollektör reaktifin kuvveti ile, mineralin flotasyonu için ihtiyaç duyulan zaman ve olayın verimi ifade edilir. Kollektörler, mümkün olduğu kadar çabuk zenginleştirme özelliğine sahip olacak şekilde ve korozyona mani olacak tarzda imal edilmek istenir [35, 36].

Kollektörler başlıca iki grup altında toplanır:

a- Anyon aktif grubu

b- Katyon aktif grubu

Esas olarak anyon aktif grubu sülfür flotasyonunda, katyon aktif grubu ise oksit flotasyonunda kullanılır. Kollektörlerin yapısında bir polar bir de apolar kısım vardır ki, hidrofobi teşekkülüne etkili olan kısım, polar yapıdır. Polar ve apolar yapının tesiri, aynı şekilde olmaktadır.

Mineral taneciklerinin kollektör tarafından kuşatılması;

- Minerallerin kollektörü absorbe etmesi,
- Islanmayan hidrokarbon grubunun bir yağ filmi oluşturması neticesinde meydana gelmektedir.

Mineral yüzünü kaplayan bu yağ filmi ile hava kabarcığı arasında büyük bir adhezyon kuvveti vardır. Kollektörlerin sayılan bu özelliklere sahip olmaları nedeniyle ksantat tipindeki kollektörler, flotasyon problemlerinde tercih edilirler.

2. Düzenleyiciler:

a- pH Düzenleyicileri: Selektif flotasyonda ortamın pH'ı değiştirilerek cevheri teşkil eden mineraller sırasıyla kazanılmaktadır. Karışık bir olay gibi görünen bu olay, aslında ortamdaki serbest H⁺ iyonu sayısının değiştirilmesinden ibarettir. Yani, ortamın karakterini asidik veya bazik yapmaktır. Minerallerin yüzdürülme özelliklerine göre asit veya bazik ortamda çalışmak gerekir ki, bu taktirde pH azalır veya artar. pH'ı düşürmede sülfürik asit, yükseltmede ise genellikle sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit kullanılır. pH faktörü ile kullanılan kollektörler arasında yakın bir ilgi vardır. Bu ilgi pH kademeleriyle kollektör konsantrasyonunu sınırlamaktadır. Yani belirli bir pH kademesi için belirli bir kollektör konsantrasyonuna ihtiyaç vardır. Demek oluyor ki, istenilen bir pH kademesi için belirli konsantrasyonda kollektör, (veya tersi pH için) kullanıldığı takdirde, pH değeri değişir. Flotasyon problemlerinin çoğunda sülfürleştirici madde olarak genellikle sodyum sülfür kullanılmaktadır [35, 36].

b- Aktifleştiriciler: Flotasyon problemlerinin bir çoğunda kullanılan kollektörler bazı minerallerin yüzeyini değiştiremezler. Bunun aksine mineral kazanılmak isteniyorsa, bir yardımcı kullanılarak kollektörle mineralin bir yüzey teşkil etmesi sağlanır. Bu maksatla

“aktifleştiriciler” kullanılır. Aktifleştirme olayının prensibi, sfaleritin bakır sülfat ile aktifleştirilmesi olayı ile izah edilir. Genellikle çok taze bir sfalerit organik kollektörler ile yüzdürülebilirse de sfalerit bakır sülfat ile birkaç dakika muamele edildikten sonra organik kollektörlerle gayet kolay yüzdürülmektedir. Bu işlemde bakır sülfatla sfalerit kimyasal bir reaksiyon yapmakta ve sfaleritin yüzünde Kovellin mineraline özdeş bir zar oluşmaktadır. Bunun gibi bakır sülfat birçok minerali da aktifleştirmektedir.

c- Pasifleştiriciler: Bu reaktifler, bazı mineral veya mineral grubunun yüzey gerilimini belirli bir zaman veya flotasyon olayının devamı süresince değiştirmek için kullanılır. Pasifleştiricilerin çoğu anorganiktir, fakat organik olanlar da vardır. Örnek olarak pirit için CaO, galen için ise bi kromat iyi birer pasifleştiricidir. En önemli pasifleştiricilerden biri de siyanürdür. Gang çamurunu pasifleştirmede Na_2SiO_3 de iyi netice vermektedir [35, 36].

d- Kuvvetlendiriciler: Esas olarak aktifleştirme olayından pek farklı değildir. Bu olayda mekanizma biraz daha değişiktir. Belirli bir süre için pasifleştirilmiş bir kısım mineral yeniden kazanılmak istendiği takdirde ortama kuvvetlendirici reaktifler ilave edilir. Bu şekilde bunların aktifleştiricilere göre daha zayıf olan toplama özelliklerinden yararlanılmış olur. En önemlilerinin başında sodyum sülfür gelir. Ayrıca bakır sülfat ve çeşitli asitler de bu maksatla kullanılmaktadır [35, 36].

e- Koruyucular: Bunların görevi flotasyon olayına engel olan unsurları zararsız hale getirmektir. Flotasyona engel olan unsurlar “flotasyon zehirleri”, ya cevherle birlikte devreye girmekte ya da kullanılan suda doğal olarak bulunmaktadır. Flotasyon sularında genellikle humin asidi vardır ki bu asit, bitki köklerinin ürettiği bir madde olup flotasyon olayına engel olmaktadır. Çamur zerrelere mineral taneciklerinin yüzünü kapladığından kollektörler görevini yapamamaktadır. Ferrik ve alüminyum tuzları ise flotasyona durdurucu etki gösterirler. Koruyuculardan istenen, bu hallerden her birine yerine göre mani olmaktır. Alkaliler bu problemlere karşı kullanılır. Su camı, çamur bastırıcı ve iyi bir koruyucudur. Çamur bastırmada kullanılan koruyucuların iyonları, çamur zerrelere elektrik yüküyle zıt işarette olduklarından, bu eriyikler devreye girince, çamur zerrelere yapışmakta ve ufak yumaklar halinde çökmektedirler. Bu şekilde faydalı mineral tanecikleri de serbest kalır [35, 36].

3- Köpürtücüler: Flotasyon olayında gerekli köpük, sadece temiz su ile yapılamamaktadır. Köpük yapmak için muhakkak surette bir köpürtücü unsur kullanmak gerekir. Köpürtücülerin asıl görevi, flotasyon suyunun yüzey gerilimini azaltmaktır. Bundan amaç, mineral yüklü hava kabarcıklarının su yüzeyine çıktıkları zaman dağılmadan bir köpük yığını oluşmasının sağlanmasıdır. Yüzey gerilimi azalmadığı zaman yüzeye çıkan bir kabarcık sert bir zemine çarpmış gibi olmakta ve patlayarak taşıdığı tanecikleri bırakmaktadır. Köpürtücüler, kompleks moleküllü organik veya anorganik maddelerdir. Molekül yapıları polar ve apolar kısımlardan oluşmaktadır. Köpürtücü molekül ise heteropolardır. Bu kutuplardan birinin suya diğerinin havaya karşı afinitesi büyüktür. Bu şekilde ıslanmayan parça en üst tarafında toplanır hidrokarbon grubundan oluşmaktadır. Bu yüzeyin hidrokarbon grubuyla kaplanması, bu kısımda hava kabarcıklarının suyun en üst tabakasından kolaylıkla geçip su-hava arakesitine istenen özellikte varmasına yardım edecek elastikiyeti sağlar. Köpürtücü suda fazla eriyorsa köpüğü zayıftır. Çünkü bu halde ıslanmayan hidrokarbon grubu, suyun içinde kalmakta, su yüzüne toplanmamaktadır. Buna karşın köpürtücü suda çok az eriyorsa, suyun yüzüne toplanacak ve istenilen elastikiyeti verecek kâfi hidrokarbon grubu mevcut olmayacaktır. Köpürme olayında köpürmenin azami olduğu bir an vardır ve ortam köpürtücüye doyduğu an köpürme durmaktadır. Ortamdaki köpürtücü konsantrasyonu ile yüzey gerilimi arasındaki bağıntı: Konsantrasyon arttıkça yüzey gerilimi düşmektedir. Ortam köpürtücüye doyduğu an köpürme durmakta ve yüzey gerilimi, sıfır olmaktadır. Yüzey geriliminin düşük olması istenilen durum sağlanmakla beraber, flotasyona en uygun durum azami köpürme anıdır. Köpürtücü dozunu, bu noktada sabit tutmak gerekmektedir. Bu zorunluluk ise kullanılan köpürtücü miktarını kısıtlar. Genellikle kollektörlerle köpürtücülerin birbirini takiben ayarlı olması istenir. Yani, hangi kollektörde ne miktar ve cinsten köpürtücü kullanılacağına bilinmesi gereklidir. Fakat bütün kollektörler meyanında hangi yapıda ve kullanma tarzında olursa olsun, köpürtücüler aynı karakterdedirler. Sadece köpürtücü miktarı az veya çok olabilir. Köpürtücülerin genel formülleri, R-G şeklindedir [35, 36].

- R: 6 dan yukarı sayılı karbonhidrat.
- G: Polar grup. -OH, -COOH, NH₂ vs.

En önemli köpürtücülerden biri de çamyadır. Cevher flotasyonunda oldukça fazla kullanılır. Açık sarı renkte, terebentin kokuludur. Oldukça dayanıklıdır. Uzun bir zaman sonra bozularak kahverengine yakın bir renk almakta ve etkisini kaybetmektedir. 1 g/lit. konsantrasyonlu sulu bir eriyik halinde kullanılır. Tüketim, genellikle 10-50 g/tondur. Diğer bazı köpürtücüler: Terpen, Terpin, Pinen, Terpinöl, Kinöl, Şampon. Bunların dışında sun'i köpürtücüler de vardır: Flotol, Flotigol gibi ticari isimler altında satılırlar. Doğal bir köpürtücü olan okalıptüs yağı, molibden gibi kolay yüzen olan cevherlerin hazırlanmasında fazlaca kullanılır [35, 36].

Flotasyon işleminde kullanılan makinelerse hava basınçlı veya pnömatik ve mekanik olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

Hava basınçlı veya pnömatik tiplerde, pülp geniş bir oluk şeklindeki bir selül içerisinden yavaş yavaş akarken, içerisine alttan delikli bir borudan (veya bir filtre bezi ile sarılmış bir delikli borudan) hava püskürtülür. Bu hava hem pülpün karışmasını ve hem de köpük oluşmasını sağlar.

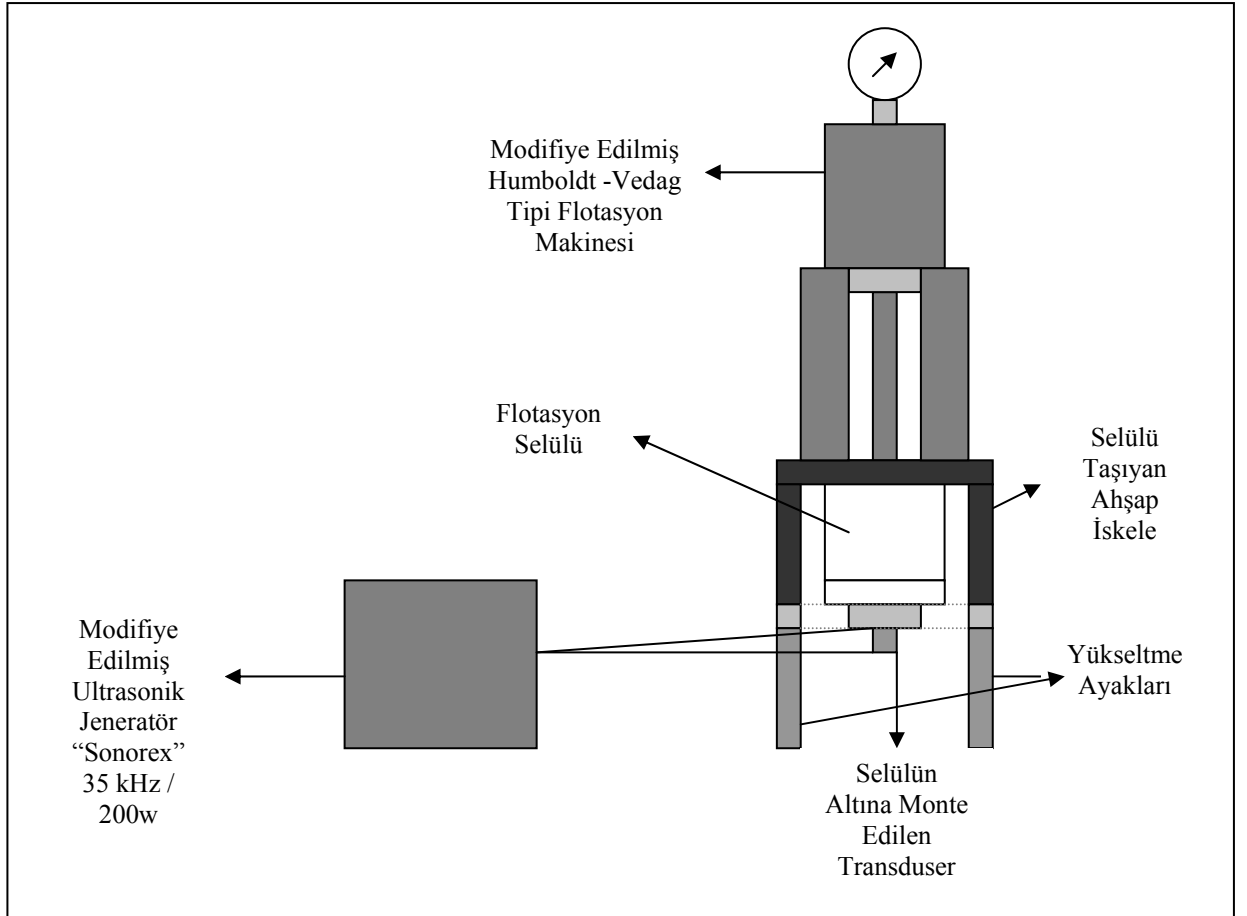
Mekanik tiplerde ise, selülün alt ortasında dönen bir pervanenin etkisiyle hem pülpün iyi karışması ve hem de santrifüj olayı ile pervanenin orta kısmından alt kenarlara doğru hava püskürtülmesi temin edilir. Bu tiplerden en fazla kullanılmakta olanlarından Denver Sub-A tipidir. Mekanik flotasyon selülleri çeşitli standart ebatlarda imal edilmektedirler [35, 36].

2. 3. ULTRASONİK DALGA ÜRETEÇLİ BİR FLOTASYON DÜZENEĞİ

Ultrasonik işlem uygulandığında, malzeme yüzeyindeki film tabakası kavitasyonla oluşan hava kabarcıkları sonucu bozularak ortamdan uzaklaşmaktadır. Kavitasyonlar düşük frekanslardaki ultrases dalgalarıyla oluşturuldukları için deneylerde 35 kHz sabit frekansta çalışan "Sonorex" marka ultrasonik jeneratör kullanılmıştır (Şekil 3.5).

Şekil 3.2 ve 3.3 te görülen deney düzeneği, modifiye edilmiş bir ultrasonik elek temizleyici ve Humboldt-Vedag tipi sub-air flotasyon makinesinden oluşturulmuştur. Şekil 3.2, 3.3.a, 3.3.b, 3.4 ve 3.5 te deney düzeneğini oluşturan ultrasonik jeneratör ve buna bağlı piezoelektrik prensiple çalışan selüle monte edilmiş transduser

görülmektedir. Flotasyon makinesine, selülün oturduğu alt tabla kesilip, yerine makineye 6 cm. yerden yükseklik kazandıracak şekilde ayakların monte edildiği ikişer demir çubuk kaynaklanmıştır. Bu şekilde, 2 demir çubuğun üstüne ahşaptan bir iskele yapılarak altına transduser vidalanmış flotasyon selülü, deneyler esnasında yerinden oynamayacak şekilde iskeleye oturtulabilmiştir. Ultrasonik titreşimler selülün altına monte edilen ve çapı 30 mm. olan bir transduser tarafından elde edilmiştir (Şekil 3.4.a, 3.4.b). Transduser selüle vidalanmadan önce üzerine, titreşim kayıplarını en aza indirmek amacıyla vazelin sürülüp daha sonra vidalanmıştır. Ultrasonik dalgaları elde etmek için kullanılan jeneratörün gücü 200 W.'tır.



Şekil 3.2: Deney düzeneğinin şematik görünümü



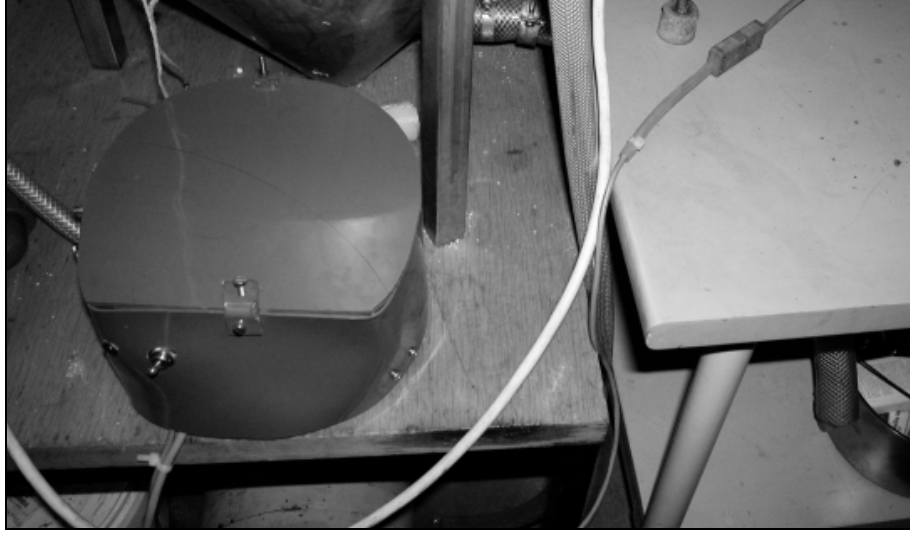
Şekil 3.3: Deney düzeneği



Şekil 3.4.a: Kullanılan transduserin selüle monte edilmiş hali



Şekil 3.4.b: Kullanılan transduserin selüle monte edilmiş hali



Şekil 3.5: Modifiye edilmiş “Sonorex” marka ultrasonik jeneratör

3. 4. FLOTASYON DENEYLERİNDE KULLANILAN PARAMETRELER

Wedag tipi 1 litrelik flotasyon hücresinde, doğal pH koşullarında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde 4 ayrı tasarım denenmiştir. Tüm deneylerde flotasyon makinesinin devri 2500 dev/dk, hava akışı 3 lt / saat olarak tutulmuştur. Deneylerde kullanılan reaktif, %30-%40 fuel-oil’le karıştırılmış, arıtılmış oksoalkol artığı ve C-8 ve C-9 hidrokarbonların oluşturduğu “Ekofol 440”dır.

1. sette kullanılan reaktif miktarı “g/ton” başına sabit olup, farklı pülpte katı oranları uygulanmıştır. Bu deneylerde konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon yapılmıştır.
2. sette de kullanılan reaktif miktarı “g/ton” başına sabit olup, yine farklı pülpte katı oranları uygulanmıştır. Ancak bu deneylerde konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon işlemleri yerine ultrases dalgaları eşliğinde koşullandırma ve flotasyon gerçekleştirilmiştir.

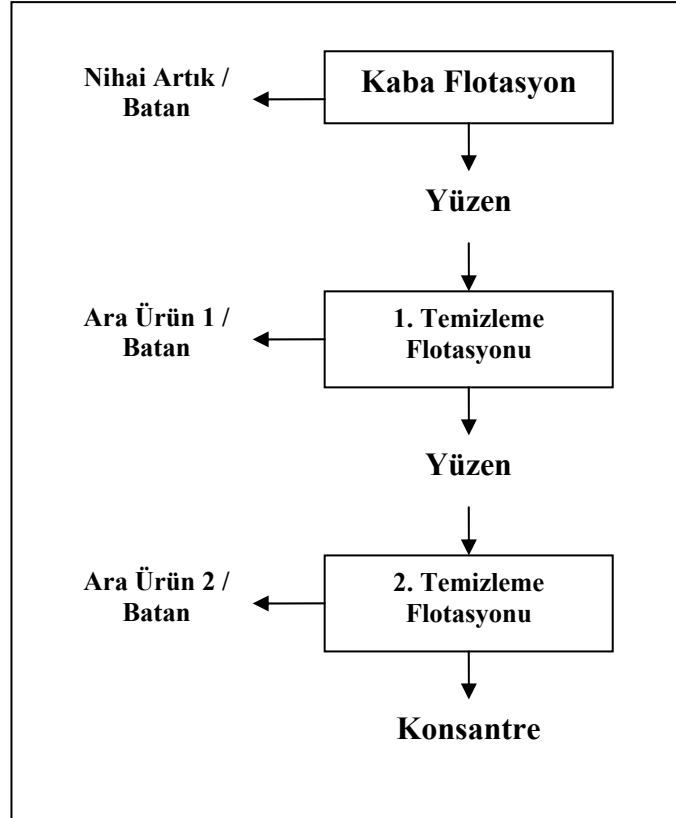
3. deney setinde, 2. sette optimize edilen bir pülpte katı oranı uygulanıp, aşağıdaki farklı parametreler incelenmiştir;

- Konvansiyonel flotasyon
- Ultrasonikli koşullandırma, konvansiyonel flotasyon
- Konvansiyonel koşullandırma, ultrasonikli flotasyon
- Ultrasonikli koşullandırma ve ultrasonikli flotasyon

4. ve son deney setinde ise, uygulanan pülpte katı oranı yine sabit tutulup, şekil 3.6 da gösterilen akım şeması dahilinde yürütülen flotasyon deneylerinde;

- Kademeli konvansiyonel koşullandırma ve temizleme flotasyonu
- Kademeli ultrasonikli koşullandırma ve ultrasonikli temizleme flotasyonu

durumları incelenmiştir.



Şekil 3.6: Kademeli flotasyon akım şeması

Tablo 3.3 te ise farklı deney tasarımlarına göre değişken koşullar verilmiştir.

Tablo 3.3 : Farklı deney tasarımlarına göre değişken koşullar

Deney Seti 1	Pülpte Katı Oranı %	Reaktif Miktarı (ml.)	Ultrasonik Koşullandırma / Flotasyon
<i>Deney 1</i>	4,76 (50 g/l)	0,1712	Yok / Yok
<i>Deney 2</i>	6,97 (75 g/l)	0,2568	Yok / Yok
<i>Deney 3</i>	9,09 (100 g/l)	0,3425	Yok / Yok
<i>Deney 4</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Yok / Yok
Deney Seti 2	Pülpte Katı Oranı %	Reaktif Miktarı (ml.)	Ultrasonik Koşullandırma / Flotasyon
<i>Deney 1</i>	4,76 (50 g/l)	0,1712	Var / Var
<i>Deney 2</i>	6,97 (75 g/l)	0,2568	Var / Var
<i>Deney 3</i>	9,09 (100 g/l)	0,3425	Var / Var
<i>Deney 4</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Var / Var
Deney Seti 3	Pülpte Katı Oranı %	Reaktif Miktarı (ml.)	Ultrasonik Koşullandırma / Flotasyon
<i>Deney 1</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Yok / Yok
<i>Deney 2</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Var / Yok
<i>Deney 3</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Yok / Var
<i>Deney 4</i>	16,67 (200 g/l)	0,6850	Var / Var
Deney Seti 4	Pülpte Katı Oranı %	Reaktif Miktarı (ml.)	Ultrasonik Koşullandırma / Flotasyon
<i>Kaba Flotasyon</i>	9,09 (100 g/l)	0,3425	Yok / Yok
<i>1. Temizleme Flotasyonu</i>		0,4395	Yok / Yok
<i>2. Temizleme Flotasyonu</i>		0,5365	Yok / Yok
<i>Kaba Flotasyon</i>	9,09 (100 g/l)	0,3425	Var / Var
<i>1. Temizleme Flotasyonu</i>		0,4395	Var / Var
<i>2. Temizleme Flotasyonu</i>		0,5365	Var / Var

4. BULGULAR

Flotasyon deneylerinde pülpte katı oranı değiştirilerek ve ortama ultrases uygulanarak bu parametrelerin deneylerin sonuçlarına nasıl etki ettikleri araştırılmıştır.

Flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantreler ve artıklar tartılıp kül analizleri yapılmıştır. Kül analizi sonuçlarına göre kül içeriği ve verim tabloları oluşturulup, “Yanabilir Verim” hesaplanarak “% Kül İçeriği” ve “% Yanabilir Verim” grafikleri çizilmiştir.

Yanabilir verim şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\text{Yanabilir Verim} = \frac{(100 - c)(t - f)}{(100 - f)(t - c)} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada;

t: Artık Külü, %

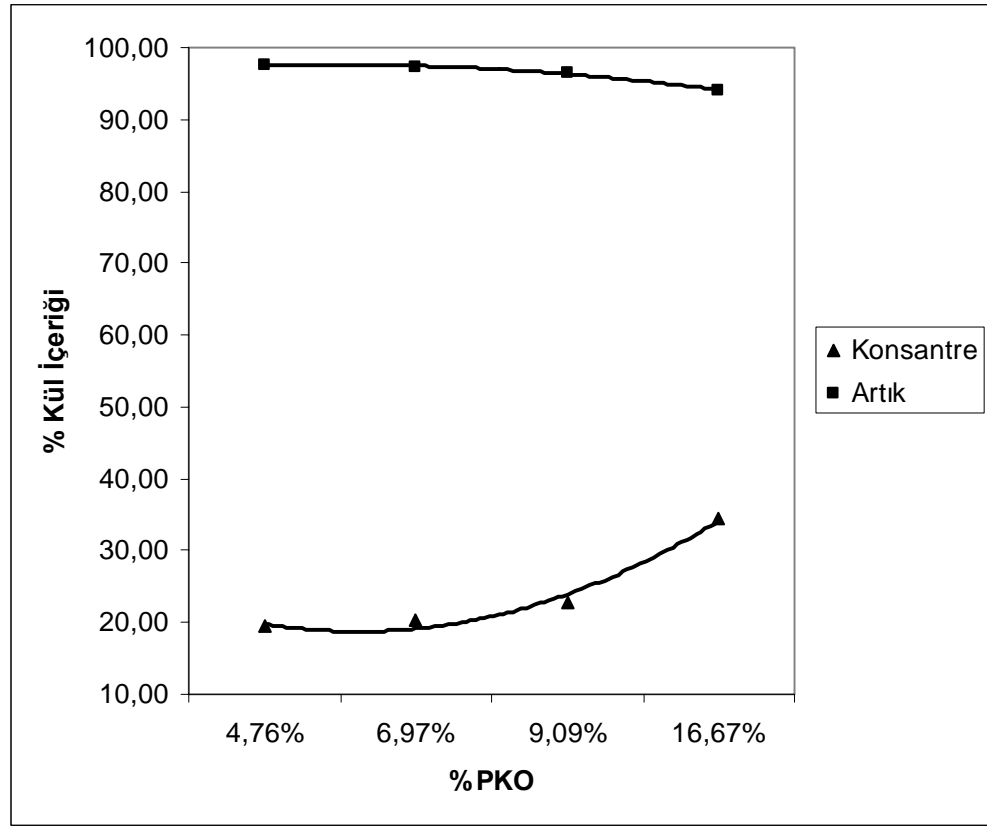
f: Tuvenan Kömür Külü, %

c: Temiz Kömür Külü, %' dür.

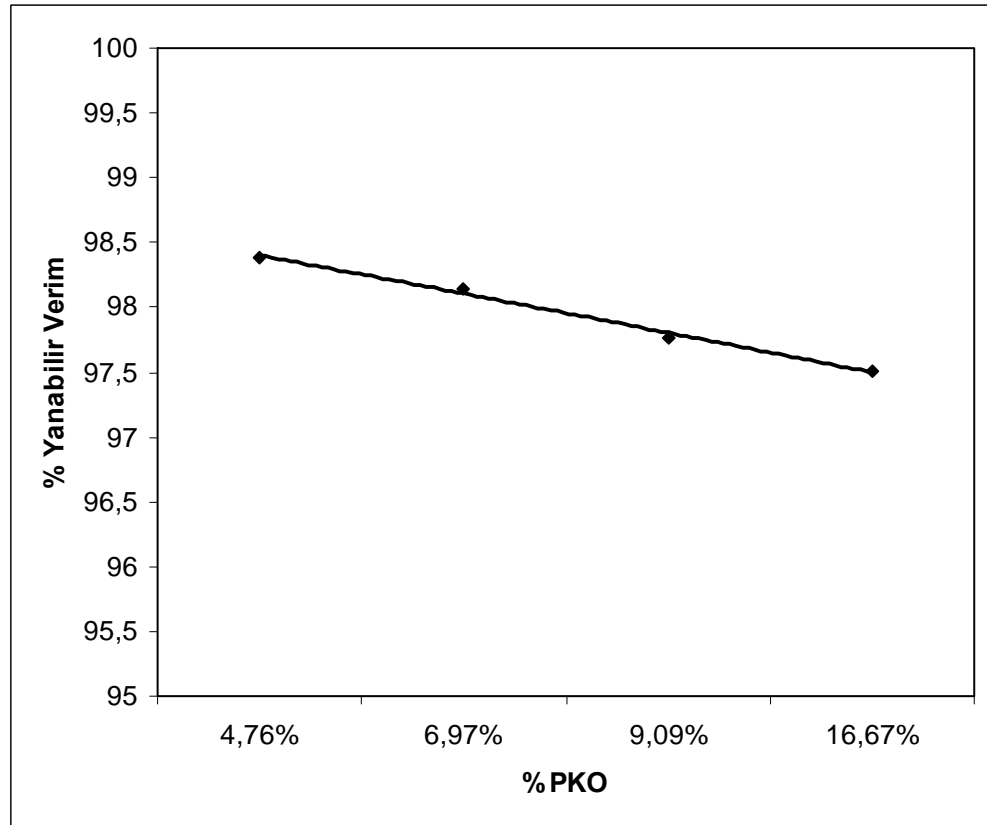
4. 1. FARKLI PÜLPTE KATI ORANLARININ DENENDİĞİ KONVANSİYONEL FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

Tablo 4.1 : Farklı pülpte katı oranlarının denendiği konvansiyonel flotasyon deney sonuçları

PKO = % 16,67 (200 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	78,12	34,53		97,51
Artık	21,88	94,03		
Beslenen	100,00	47,55		
PKO = % 9,09 (100 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	66,10	22,74		97,77
Artık	33,90	96,56		
Beslenen	100,00	47,76		
PKO = % 6,97 (75 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	64,58	20,32		98,14
Artık	35,42	97,24		
Beslenen	100,00	47,57		
PKO = % 4,76 (50 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	63,90	19,42		98,39
Artık	36,10	97,66		
Beslenen	100,00	47,66		



Şekil 4.1: Deney seti – 1, % Kül içeriği



Şekil 4.2: Deney seti – 1, % Yanabilir verim

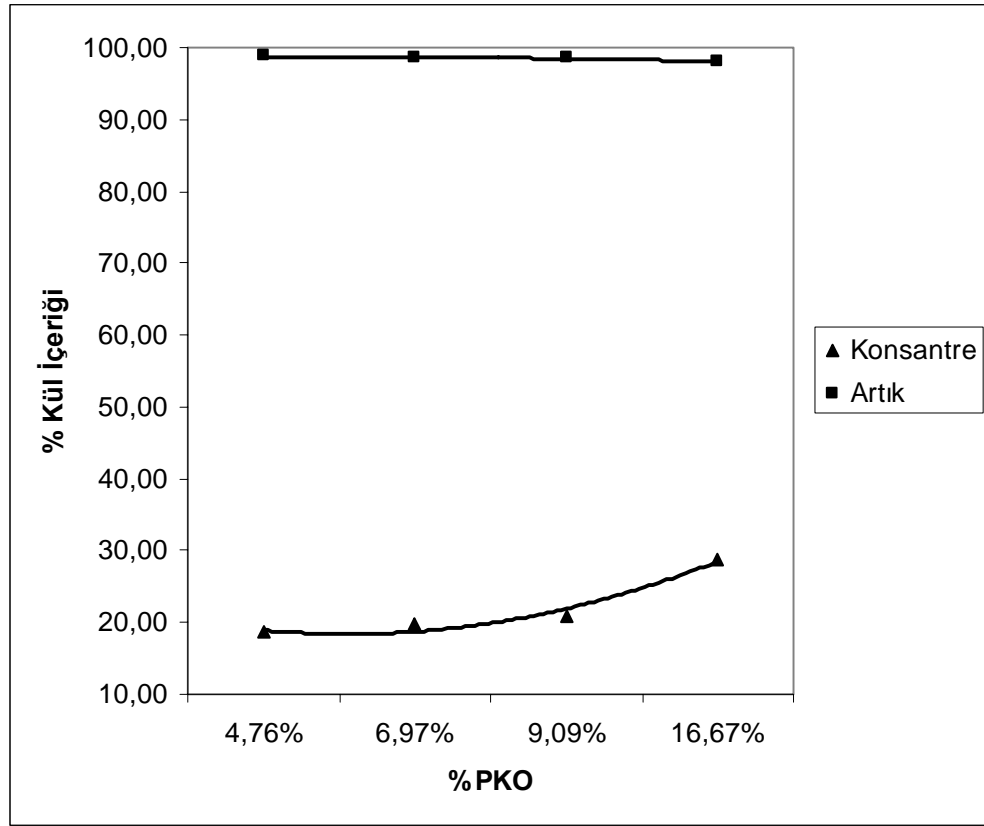
PKO konusu bir optimizasyon olayı olduğu için, bu deney setinde %4,76, %6,97, %9,09 ve %16,67 PKO'da konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon deneyleri yapıp PKO'nun flotasyona etkisi incelenmiştir. Deneyler yapılırken “g/ton” başına reaktif miktarı sabit tutulmuştur.

Deneyler sonucunda şekil 4.1 de konsantredeki “% kül miktarı”nın PKO ile doğru orantılı olarak azaldığı ve şekil 4.2 deki “% yanabilir verim” değişiminin PKO ile ters orantılı olarak arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki PKO azaldıkça flotasyon verimi artmaktadır.

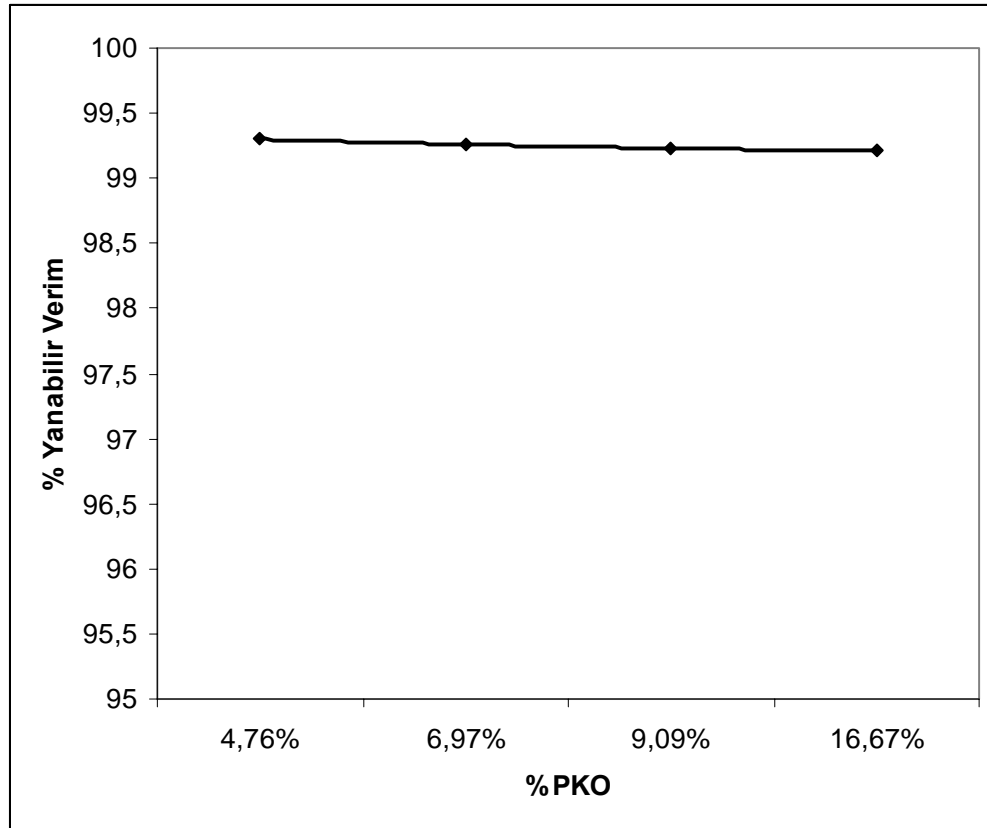
4. 2. FARKLI PÜLPTE KATI ORANLARININ DENENDİĞİ ULTRASONİK FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

Tablo 4.2 : Farklı pülpte katı oranlarının denendiği ultrasonik flotasyon deney sonuçları

PKO = % 16,67 (200 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	72,76	28,88		99,21
Artık	27,24	98,48		
Beslenen	100,00	47,84		
PKO = % 9,09 (100 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	70,01	20,91		99,23
Artık	29,99	98,56		
Beslenen	100,00	44,20		
PKO = % 6,97 (75 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	70,86	19,73		99,26
Artık	29,14	98,54		
Beslenen	100,00	42,69		
PKO = % 4,76 (50 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	67,99	18,61		99,30
Artık	32,01	98,79		
Beslenen	100,00	44,28		



Şekil 4.3: Deney seti – 2, % Kül içeriği



Şekil 4.4: Deney seti – 2, % Yanabilir verim

Bu deney setinde, “deney seti – 1”deki konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon yerine, ultrases dalgaları eşliğinde koşullandırma ve flotasyon uygulanıp diğer tüm koşullar aynı bırakılmıştır.

Şekil 4.3 te konsantredeki “% kül içeriği” değişimi ve şekil 4.4 deki “% yanabilir verim” değişimi incelendiğinde yine en düşük kül içeriği en yüksek yanabilir verim değişiminin en düşük PKO’da (% 4,67) elde edildiği görülmüştür.

Ancak bu sonuçları bir önceki deney setinin sonuçlarıyla karşılaştırdığımız zaman aynı PKO’larda, konsantrelerdeki “% kül içeriklerinin” %1 - %6 oranında düştüğü ve “% yanabilir verim” değerlerinin de %1 - %2 arasında yükseldiği görülmektedir.

4. 3. SABİT PÜLPTE KATI ORANINDA KONVANSİYONEL VE ULTRASONİK FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

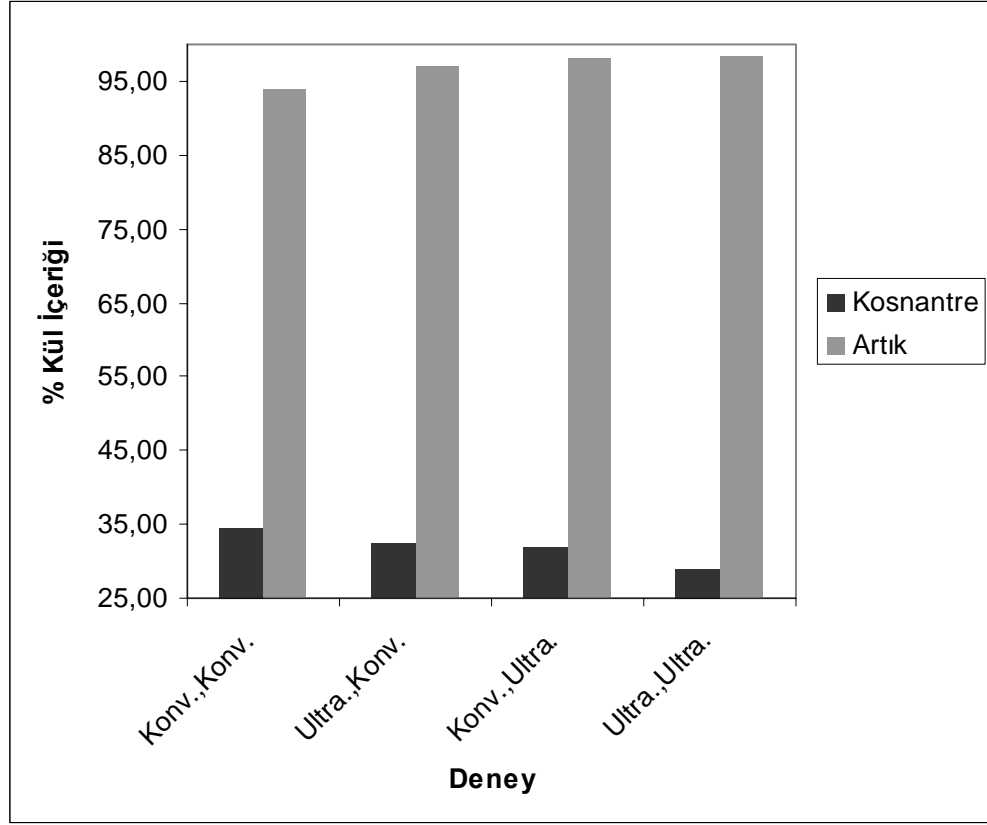
Önceki 2 deney setinde, PKO düşürüldükçe, konsantredeki “% kül içeriğinin” orantılı olarak azalıp “% yanabilir verimin” orantılı olarak yükseldiği görülmüştür. Bu 2 deney seti karşılaştırıldığında ise ultrases dalgalarıyla yapılan koşullandırma ve flotasyon deneylerinin, konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon deneylerine göre daha optimum sonuçlar verdiği görülmüştür.

Deney seti – 3’te ise PKO ve reaktif miktarı sabit tutulup, “konvansiyonel koşullandırma – konvansiyonel flotasyon”, “ultrasonik koşullandırma – konvansiyonel flotasyon”, “konvansiyonel koşullandırma – ultrasonik flotasyon” ve “ultrasonik koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneyleri yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

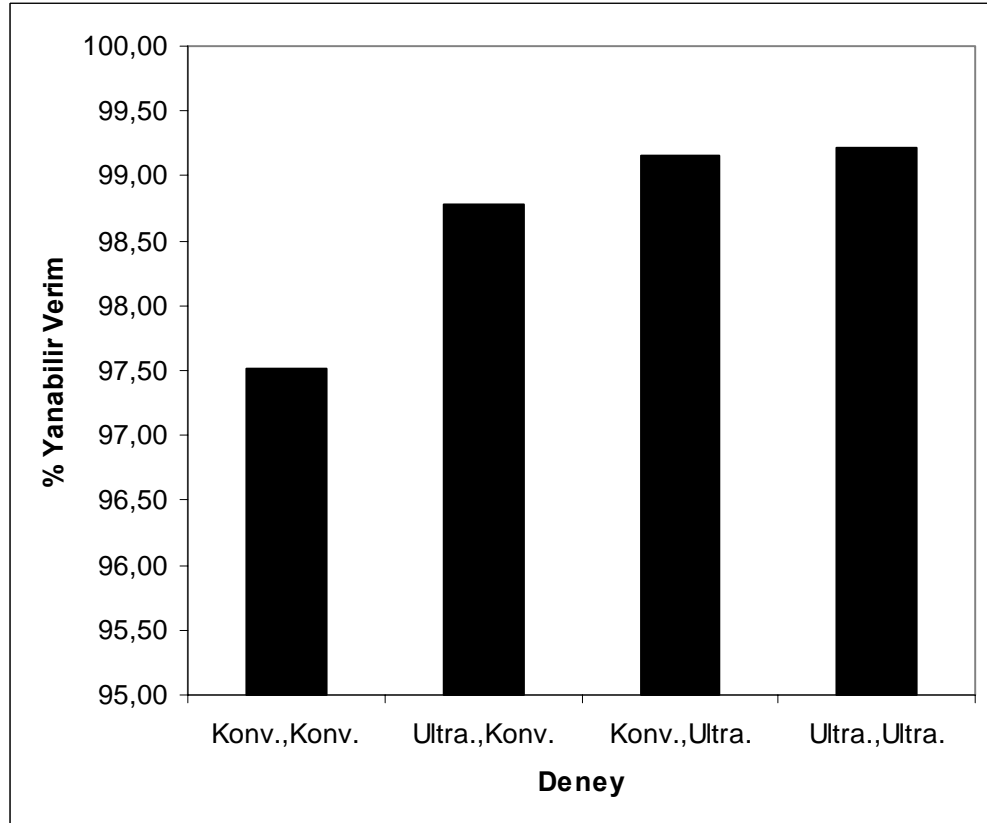
PKO’nun %16,67 olarak seçilmesinin nedeniyse, önceki 2 deney setinde %16,67 PKO’nun en düşük % yanabilir verimi ve konsantredeki en yüksek % kül içeriğini vermesidir. Dolayısıyla %16,67 gibi yüksek bir PKO’da ultrases dalgalarının koşullandırma ve flotasyona etkisinin incelenmesidir.

Tablo 4.3 : Sabit pülpte katı oranında konvansiyonel ve ultrasonik flotasyon deney sonuçları

PKO = % 16,67 (200 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	78,12	34,53		97,51
Artık	21,88	94,03		
Beslenen	100,00	47,55		
PKO = % 16,67 (200 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Konvansiyonel Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	77,00	32,52		98,78
Artık	23,00	97,21		
Beslenen	100,00	47,40		
PKO = % 16,67 (200 g/l) Konvansiyonel Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	77,01	31,78		99,15
Artık	22,99	98,48		
Beslenen	100,00	47,11		
PKO = % 16,67 (200 g/l) Ultrasonik Koşullandırma + Ultrasonik Flotasyon				
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Yanabilir Verim %
Konsantre	72,76	28,88		99,21
Artık	27,24	98,04		
Beslenen	100,00	47,72		



Şekil 4.5: Deney seti – 3, % Kl içeriği



Şekil 4.6: Deney seti – 3, % Yanabilir verim

Konvansiyonel ve ultrasonik kořullarda oluřturulan 4 ayrı kořullandırma ve flotasyon deneyi kombinasyonun da Őekil 4.5 te konsantredeki en dūřuk “% kūl ięerięi” ve Őekil 4.6 da gōrūlen en yūksek “% yanabilir verim” deęeri “ultrasonik kořullandırma – ultrasonik flotasyon” deneyinde elde edilmiřtir. Bu deneyin sonuęları konvansiyonel kořullandırma – konvansiyonel flotasyon deneyinin sonuęlarıyla karřılařtırıldıęında, konsantredeki kūl ięerięinde %6’lık bir azalama ve yanabilir verim deęerinde de %2’lik bir artma saęlanmıřtır.

Ara deneyler sayılabilecek “ultrasonik koşullandırma – konvansiyonel flotasyon” ve “konvansiyonel koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneylerinin sonuçlarında ise optimum sonuçlar “konvansiyonel koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneyinde elde edilmiştir.

4. 4. SABİT PÜLPTE KATI ORANINDA KADEMELİ KONVANSİYONEL VE ULTRASONİK FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

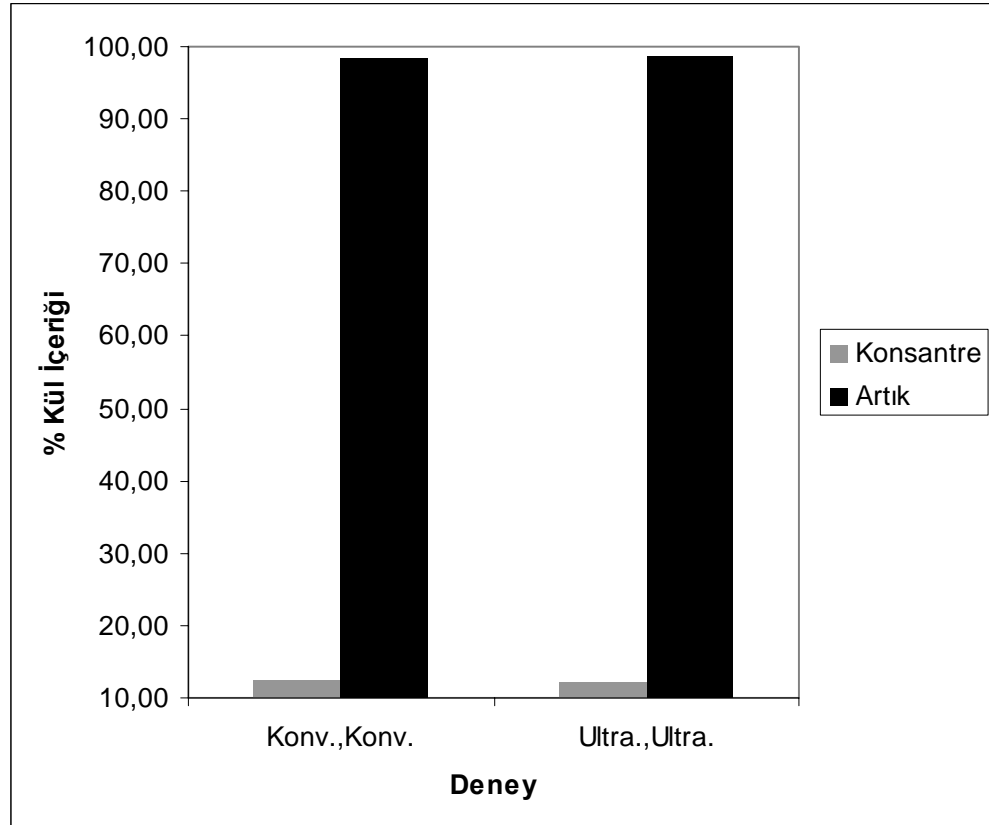
İlk 3 deney setinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde ultrases dalgalarının flotasyon veriminde gözle görülür bir optimizasyon sağladığı görülmektedir. 4. ve son deney setinde ise % 9,09'luk bir PKO'da ve sabit reaktif miktarında, kademeli flotasyon yapılması uygun görülmüştür.

Bunun nedeni bir önceki deney setinde %16,67'lik PKO'nun denenmiş olması ve diğer PKO'larda (%4,76 ve % 6,97) kademeli flotasyonun verimsiz olacağı düşünülmesidir.

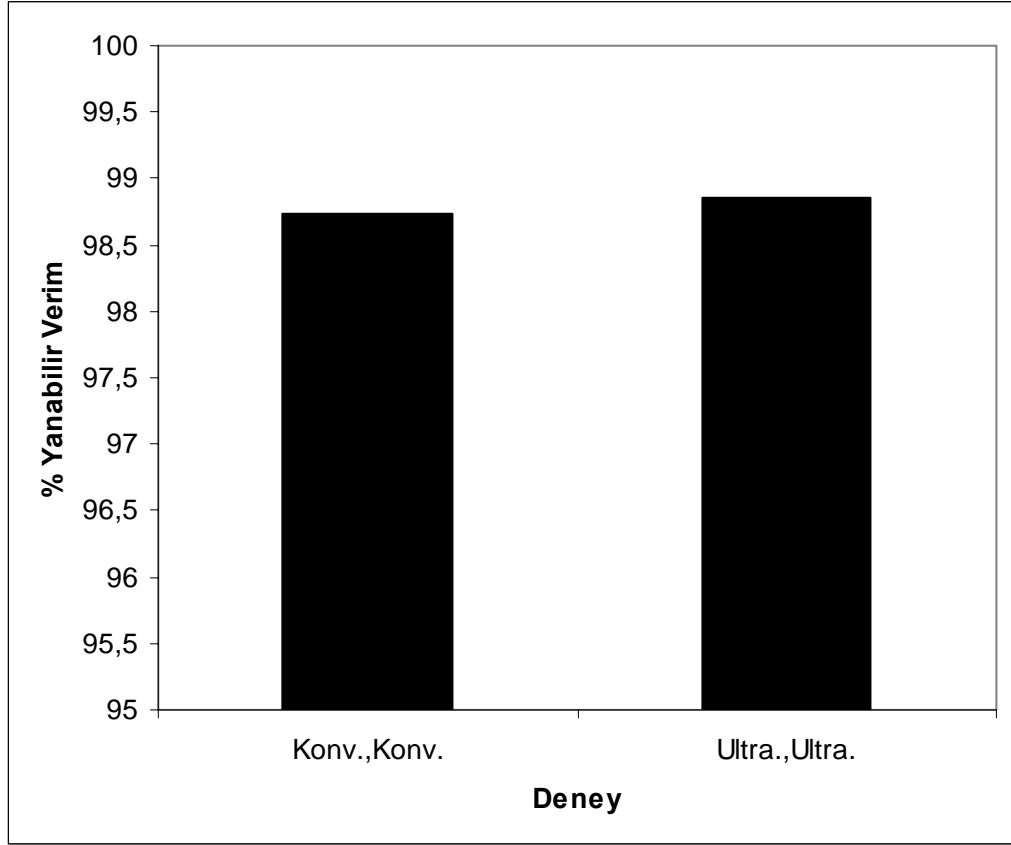
Ayrıca kademeli flotasyonda da “% kül içeriği” ve “% yanabilir verim” değerlerinde, ultrases dalgaları eşliğinde nasıl bir değişim olacağı incelenmek istenmiştir.

Tablo 4.7 : Sabit pülpte katı oranında kademeli konvansiyonel ve ultrasonik flotasyon deney sonuçları

PKO = % 9,09 (100 g/l)		Konvansiyonel Koşullandırma	+	Konvansiyonel Flotasyon
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Verim %
Konsantre	60,35	12,51		98,73
Ara Ürün 1	5,59	97,84		
Ara Ürün 2	2,45	97,21		
Artık	31,60	98,28		
Beslenen	100,00	46,46		
PKO = % 9,09 (100 g/l)		Ultrasonik Koşullandırma	+	Ultrasonik Flotasyon
Ürünler	Ağırlık %	Kül %		Verim %
Konsantre	58,86	12,08		98,86
Ara Ürün 1	6,37	97,94		
Ara Ürün 2	2,19	97,17		
Artık	32,57	98,54		
Beslenen	100,00	47,58		



Şekil 4.7: Deney seti – 4, % Kül içeriği



Şekil 4.8: Deney seti – 4, % Yanabilir verim

4. ve son deney seti olan kademeli flotasyon deneyleri sonucunda, şekil 4.7 de konsantredeki en düşük “% kül içeriği” ve şekil 4.8 de görülen en yüksek “% yanabilir verim” değeri kademeli ultrasonik koşullandırma ve ultrasonik flotasyon deneyinde elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde konsantredeki kül içeriğindeki azalma %0,5 ve yanabilir verimdeki artma %0,13 oranında gerçekleşmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Ultrasonik işlemlerin cevher hazırlama ve zenginleştirme üzerindeki etkilerinin araştırılması kapsamında, dört farklı flotasyon tasarımının, uçucu kül numunesine tatbik edilmesiyle elde edilen sonuçlar ve uygulanması düşünülen öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. deney setinde sadece PKO'lar değiştirilip konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, konsantredeki “% kül miktarı” değişiminin PKO ile doğru orantılı olarak azaldığı, “% yanabilir verim” değişiminin de PKO ile ters orantılı olarak arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki PKO azaldıkça flotasyon verimi artmaktadır.

2. deney setinde, “deney seti – 1”deki konvansiyonel koşullandırma ve flotasyon yerine, ultrases dalgaları eşliğinde koşullandırma ve flotasyon uygulanıp diğer tüm koşullar aynı bırakılmıştır. Konsantrelerdeki “% kül içeriği” değişim ve “% yanabilir verim” değişimi incelendiğinde yine optimum değerlerin en düşük PKO’da (% 4,67) elde edildiği görülmüştür.

Ancak bu sonuçları, “deney seti-1”in sonuçlarıyla karşılaştırdığımız zaman aynı PKO’larda, konsantrelerdeki, “% kül içeriğinin” %1-%6 oranında düştüğü ve “% yanabilir verim” değerlerinin de %1 - %2 arasında yükseldiği görülmektedir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi ultrases dalgaları, bütün PKO’larda, flotasyon veriminin artmasını sağlamıştır.

3. deney setinde, sabit PKO ve sabit reaktif miktarında, konvansiyonel ve ultrasonik koşullarda oluşturulan 4 ayrı koşullandırma ve flotasyon deneyi kombinasyonun da “ultrasonik koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneyinin sonuçları “konvansiyonel koşullandırma – konvansiyonel flotasyon” deneyinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında,

konsantredeki “% kül içeriğinde” %6’lık bir azalma ve “% yanabilir verim” değerinde de %2’lik bir artma sağlanmıştır.

Ara deneyler sayılabilecek “ultrasonik koşullandırma – konvansiyonel flotasyon” ve “konvansiyonel koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneylerinin sonuçlarında ise optimum sonuçlar “konvansiyonel koşullandırma – ultrasonik flotasyon” deneyinde elde edilmiştir. Bu iki deneyin sonuçları karşılaştırıldığında, ultrases dalgalarının, koşullandırma işleminden çok flotasyon işleminde uygulandığı zaman genel flotasyon verimine katkıda bulunduğu görülmüştür.

4. ve son deney seti olan kademeli flotasyon deneyleri sonucunda, ultrases eşliğinde yapılan koşullandırma ve flotasyon deneyinde, konsantredeki “ kül içeriğindeki” azalma %0,5 ve “yanabilir verimdeki” artma %0,13 oranında gerçekleşmiştir. Ultrases dalgalarının, kademeli flotasyona da olumlu etkisinin olduğu saptanmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlara genel olarak bakıldığında, ultrasonik flotasyonun, konvansiyonel flotasyona nazaran daha selektif bir yöntem olduğunu görülmektedir.

Ultrases dalgaları koşullandırma sırasında ajitasyon etkisi yaratarak pülpün daha homojen bir şekilde karışmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca yanmış kömür oksidasyona uğradığından ultrases dalgalarının kavitasyon etkisi sayesinde kömür taneciklerinin yüzeyleri temizlenecek ve reaktifle daha etkin bir şekilde kaplanması sağlanmış olacaktır.

Deneyler sırasında ortam ısısının ultrases dalgaları uygulandığında arttığı gözlemlenmiştir. Bu da reaktiflerin suda daha iyi çözünmesini sağlayarak daha verimli bir koşullandırma yapılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca flotasyon işlemi sırasında oluşan köpüklerin uniform oldukları gözlemlenmiştir.

Uçucu kül numuneleri üzerinde gerçekleştirilen ultrasonik dalga yardımıyla yapılan flotasyon deneylerinin sonuçları, daha önce bu konuda farklı mineraller üzerinde yapılmış flotasyon deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında;

Ön ultrasonik işlemin koşullandırmadan itibaren yüzen ve batan malzemeler üzerinde bir etki yarattığı, köpük boyutlarını standart hale getirerek, kavitasyon sonucu flotasyondaki mekanik karıştırma işlemini daha etkin bir hale getirdiği gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda da şamlı malzemelerle yapılan koşullandırma ve flotasyon proseslerinde benzer etkileşimler gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada flotasyon esnasında yüzen malzemenin kül içeriği açısından daha zengin köpükler alınması da, daha önceki çalışmalarla uyumludur.

Kömür ve pirit ayırımında daha önce denenmesine rağmen, uçucu küllerin flotasyonunda daha önce denenmemiş olan bu tip flotasyon tekniği, ürünler üzerinde fiziksel, fizikokimyasal ve kimyasal etkileşimler yaratarak konsantre ve artığın daha seçici bir şekilde alınmasını sağlamıştır.

Yapılan tüm deneyler sonucuda ultrasonik işlemlerin, flotasyon üzerinde olumlu etkisinin saptanmasına rağmen henüz etki mekanizmasının tam olarak açıklanamaması bu konuda daha kapsamlı deneyler yapılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle, kavitasyonun sistem içerisinde, tanelerin yüzey özelliklerindeki değişiminin incelenmesinde büyük yararlar vardır.

Yapılacak olan kapsamlı deneyler ve mekanizmanın nasıl işlediğinin araştırılması sonucu elde edilecek bulgular sayesinde, deney düzeneği optimum hale getirilip, flotasyon veriminin daha da arttırılabileceği kuşkusuzdur.

Özellikle ultrasonik yöntemle elde edilen sonuçların çok umut verici olması, olası bir endüstriyel uygulamaya zemin sağlaması açısından, hem normal hem de ultrasonik dekantasyonun uygulandığı numunelere konvansiyonel ve ultrasonik flotasyonun uygulanacağı bir çalışmanın yapılması yararını ortaya çıkarmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1]. ALP, İ., Ekim 1998, Yüksek Frekanslı Ses Dalgalarının Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 240s.
- [2]. AKYOLDAŞ, A. Ç., 1973, Ultrasonik Dalgaların Metalurjik Tatbikatı, Diploma Çalışması, İ. T. Ü. Maden Fakültesi, Fiziksel Metalurji Kürsüsü, İstanbul, 38s.
- [3]. ÇETİNTÜRK, S., 1980, Ultrasonik Muayene Yöntemleri, Bitirme Çalışması, İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi, Malzeme Bilimi Kürsüsü, İstanbul, 70s.
- [4]. CARLIN, B., 1960, Ultrasonics, McGraw-Hill Book Company Inc., New York,10-50s.
- [5]. BLITZ, J., 1971, Ultrasonics: Methods and Applications, Butterworth & Co Ltd., 151s.
- [6]. CRACKNELL, A. P., 1980, Ultrasonics, Wykeham Publications, London, 200s.
- [7]. TEZEREN, O., 2003, Ultrasonik İşlemlerin Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 3-43s.
- [8]. RICHARDSON, E. G., 1962, Ultrasonic Physics, Elsevier Publishing Company, New York, 313s.
- [9]. MASON, T. J., 1990, Chemistry With Ultrasound, Society of Chemical Industry, London, 195s.
- [10]. HUETER, T. F., BOLT, R. H., 1955, Sonics; Techniques For The Use Of Sound and Ultrasound in Engineering and Science, John Wiley & Sons Inc., New York, 456s.
- [11]. STOEV, S. M., MARTİN, P. D., 1992, The Application of Vibration and Sound in Minerals and Metals Industries, Bonney, C. E., ed., A Technical Review, Series No:8, MIRO, Lichfield, İngiltere, 659s.
- [12]. ÖZKAN, Ş. G., 1998, Ultrasonik İşlemlerin Flotasyon Üzerindeki Etkileri, İst. Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, Cilt:11, Sayı:1, İstanbul, 131-135s.
- [13]. ÖZDEN, N., 1981, Sesötesi ile Muayene, SEGEM, Yayın No:48, Ankara, 142s.
- [14]. ÖZER, M., 1979, Yapı Akustiği ve Ses Yalıtımı, Birsan Yay., İstanbul, 335s.

- [15]. STOEV, S. M., 1992, Vibroacoustik Improvements of Froth Flotation, Mavros, P. Matis, K. A., eds., Innovations in Flotation Technology, NATO ASI Series, Vol: 208, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollanda, 383-407s.
- [16]. ASAI, K., SASAKI, N., 1958, Ultrasonic Treatment Of Slurry, III. International Coal Preparation Congress, Brussels-Liege, 112-121s.
- [17]. KOWALSKI, W., KOWALSKA, E., Mart 1978, The Ultrasonic Activation of Non-Polar Collectors in The Flotation of Hydrophobic Minerals, Ultrasonics, 84-86s.
- [18]. NICOL, S. K., ENGEL, M. D., TEH, K. C., 1986, Fine Particle Flotation in an Acoustic Field, Int. J. Min. Process., 17, 143-150s.
- [19]. SLACZKA, A., 1987, Effects of an Ultrasonic Field on The Flotation Selectivity of Barite from a Barite-Florite-Quartz Ore, Int. J. Miner. Process., 20, 193-210S.
- [20]. YERKOVIC, C., MENACHO, J., GAETE, L., 1993, Exploring The Ultrasonic Communion of Copper Ores, Minerals Engineering, Vol:6, 607-617s.
- [21]. SUSLICK, K. S., 1988, Ultrasound: Its Chemical, Physical and Biological Effects, VCH Pblishers Inc., 336s.
- [22]. SUSLICK, K. S., CASADANTE, D. J., GREEN, M. L. H., THOMSON, M. E., Ocak 1987, Effects of High Intensity Ultrasound on Inorganic Solids, Ultrasonics, Vol:25, 56-59s.
- [23]. KOWALSKA, E., CHMURA, K., BIEN, J., Temmuz 1978, Ultrasonics in The Dehydration Process Of Sludge, Ultrasonics, 183-185s.
- [24]. SLACZKA, A., Ocak 1986, Effect of Ultrasound on Ammonium Leaching of Zinc from Galmei Ore, Ultrasonics, 53-55s.
- [25]. REVNIŪTZEV, V. I., DIMITRIEV, Y. G., Şubat 1965, Ultrasonic Cleaning of Minerals, Mining and Minerals Engineering, 299s.
- [26]. GIBSON, M., 1963, Ultrasonic Disaggregation of Shale, Journal of Sedimentary Petrology, Vol:33, No:4, 955-958s.
- [27]. DJENDOVA, S. MEHANDJSKI, V., 1986, Study of The Effects Of Acoustic Vibration Conditioning of Collector and Frother on Flotation of Sulphide Ores, Int. Journal of Mineral Procesing, 34 (3), 205-217s.
- [28]. ÇELİK, M. S., 1987, Effect Of Ultrasonic Treatment On The Floatability Of Coal and Galena, Sep. Sci. Technology, vol: 24, no:14, 1159-1166s.
- [29]. ÖZKAN, Ş. G., 2002, Beneficiation of Magnesite Slimes With Ultrasonic Treatment, Minerals Engineering, Vol:15, 99-101s.

- [30]. ÖZKAN, Ş. G., 1994, Flotation Studies of Colemanite Ores From The Emet Deposites of Türkiye, Doktora Tezi , The University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, GB, 208s
- [31]. ÖZKAN, Ş. G., VEASEY, T. J., Eylül 1996, Effect of Simultaneous Ultrasonic Treatment on Colemanite Flotation, 6. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu, Kuşadası, Aydın, 277-281s.
- [32]. GÜRPINAR, G., SÖNMEZ, E., ÖZDAĞ, H., 1999, The Effect of Ultrasonic Treatment of Flotation, VIII Balkan Mineral Processing Conference, Belgrade, Yugoslavia, 175-178s.
- [33]. ÖZER, M., Mayıs 2002, Ultrasonik Titreşimin Kil Çöktürmesinde Etkisinin İncelenmesi ve Klasik Çöktürme Yöntemleri ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ. T. Ü. Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 85s.
- [34]. GAUDİN, A. M., 1957, Flotation, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 573s.
- [35]. ATAK, S., 1990, Flotasyon: İlkeleri ve Uygulaması, İ. T. Ü. Vakfı, İstanbul, 222s.
- [36]. ÖNAL, G., ATEŞOK, G., 1994, Cevher Hazırlama El Kitabı, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, İstanbul, 511s.
- [37]. KUBITZA, K. H., 1980, Der Anreicherungsgrad des Normalgutaustrags zur Kennzeichnung von Trennungen, Glückauf, Deutschland, 508-513s.

7. ÖZGEÇMİŞ

Arda Onur, 26 Şubat 1979 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Özel İnci Abla İlkokulu'nda tamamlayıp, 1998 yılında Özel Saint Benoit Fransız Kolejini bitirdi. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği'nde öğrenimine başladı. İlk zorunlu stajını 2000 yılı yazında Almanya - Essen'de "Deutsche Montan Technologie AG." yeraltı işletmesinde yapıp, 2001 bahar yarıyılında "TFH - Georg Agricola zu Bochum"da eğitim gördü. Aynı yıl ikinci zorunlu stajını ise Almanya – Münih'te "Süd Chemie AG." open pit bentonit işletmesinde tamamladı.

2002 senesinde İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilimdalı'ndan, danışmanı Doç. Dr. Şafak G. Özkan yönetiminde hazırladığı, deneysel çalışmalarını da Almanya "Georg Agricola, Technische Fachhochschule zu Bochum" üniversitesinin laboratuvarlarında, Prof. Dr. Rainer Lotzien'in yönetiminde gerçekleştirdiği "Kalsit Mineralinin Filtrasyon Özelliklerinin Araştırılması" konulu lisans tezini sunup, bölüm üçüncüsü ve anabilimdalı birincisi olarak mezun oldu.

Aynı yıl, İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilimdalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

Arda Onur, Fransızca, İngilizce ve Almanca olmak üzere üç yabancı dil bilmektedir.