

ULTRASES İLE KATI, SIVI VE GAZ ORTAMLARIN  
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Peker

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Fizik Anabilim Dalı  
Genel Fizik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Ertuğ Aral

Şubat 1989

Mehmet Peker'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı  
"ULTRASES İLE KATI, SIVI VE GAZ ORTAMLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliği-  
nin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

22/.2./1989

Üye : Prof. Dr. Muhsin ZOR

Üye : Doç. Ertunç ARAL

Üye : Doç. M. Selami KILIÇKAYA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... 24 SUBAT 1989  
gün ve 204/10.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Rüstem Kava

## ÖZET

Ses maddesel ortamlarda yayılan bir enerji türüdür. İnsan kulağının duyarlı olmadığı, frekansı 20000 Hz'den büyük olan seslere ultrases denir. Günümüzde pek çok alanda kullanım yeri bulan ultrasesin oluşturulmasında ve algılanmasında kullanılan aletler transduser olarak adlandırılır.

Ultrasonik çalışmalarda ölçümler ortamdaki ses hızı ve soğurulmasına yöneliktir. Bunun için çeşitli metodlar geliştirilmiştir. Katı, sıvı ve gazlarda ultrasesin yayılışı o ortamların fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Ultrases hız ve sönüm ölçümleri ile farklılıklara sebep olan bu fiziksel özellikler hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Bu çalışmada ultrases hakkında genel bilgiler verilmiş ve katı, sıvı ve gaz ortamlardaki yayılışları incelenmiştir.

## SUMMARY

Sound is a kind of energy which propagates through material media. The sound whose frequency is higher than 20,000 Hz, which can't be heard by the man's ear, is called as ultrasound. The apparatus which is used in production and perception of ultrasound, nowadays finds many applications in many fields, is called as transducer.

The measurements in studies of ultrasonics are on the determination of sound velocity and absorption. For this reason, several methods were developed. Because of their physical properties, the propagations of ultrasound through solids, liquids and gases differ from each other. We can obtain some information about these physical properties which cause these differences, by the measurements for the velocity of ultrasound and absorption.

In this study; general information has been presented about the ultrasound, and propagation of the ultrasound through the solid, liquid and gas media has been investigated.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı, yüksek lisans tezi olarak bana veren ve çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren Sayın Hocam Doç. Ertunç ARAL' a, çalışmalarım sırasında benimle ilgilenerek yardımcı olan Ege Ün. Fen Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Osman BAYER' e, tezin yazımı sırasında yardımlarını benden esirgemeyen Araş. Gör. Tevfik ÜNALDI, Araş.Gör. A.Şenol AYBEK, Araş. Gör. Metin KUL, Araş. Gör. Murat TANIŞLI ve Tek. Zülkarni DELİL' e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. ULTRASES .....	2
2.1. Tanımı .....	2
2.2. Kullanıldığı Yerler .....	2
2.3. Ultrases Temel Nitelikleri .....	5
2.3.1. Enerjetik yönü .....	5
2.3.2. Akustik empedans .....	6
2.3.3. Ses basıncı .....	7
2.4. Ultrases Dalga Çeşitleri .....	7
2.4.1. Boyuna dalga .....	7
2.4.2. Enine dalga .....	9
2.4.3. Yüzey (Rayleigh) dalgaları .....	10
3. ULTRASES OLUŞTURULMASI VE ALINMASI .....	13
3.1. Transduserler .....	13
3.1.1. Piezoelektrik transduserler .....	14
3.1.2. Manyetostriksiyon .....	21
3.1.3. Elektrostriksiyon .....	25
3.2. Bağlantı .....	27

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. ULTRASES HIZ VE SÖNÜM ÖLÇÜM METODLARI .....	28
4.1. Yansımali Puls Yöntemi .....	28
4.2. Puls Yöntemi .....	31
4.3. Optik Metod .....	32
4.4. Korelasyon Yöntemi .....	34
4.5. İnterferometrik Metod .....	36
5. KATI, SIVI VE GAZ ORTAMLARDA ULTRASES .....	38
5.1. Katılarda Ses Hızı .....	38
5.1.1. Elastik bir ortamda yayılma .....	38
5.1.2. Hooke yasası .....	41
5.1.3. Kübik yapı için ve izotrop yapı için elastisite sabitelerine bağlı ses hızları .....	44
5.1.4. Katılarda ses soğurumu .....	46
5.2. Sıvılarda Ses Hızı Ve Soğurulması .....	48
5.2.1. Ses hızı için temel bağıntılar .....	48
5.2.2. Sıvılarda ses soğurumu .....	54
5.3. Gazlarda Ses Soğurumu Ve Hızı .....	55
6. SONUÇ .....	58
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	60

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ortamda boyuna dalga yayılması .....	8
2.2. Ortamda enine dalga yayılması .....	9
2.3. Yüzeysel dalgaların ortamda yayılması .....	11
3.1. Kuvars kristal ekseninde, x-kesimli dikdörtgensel ve dairesel transduserin gösterilişi .....	15
3.2. Sıkıştırma-çekme dalga transduseri için piezo- elektrik etki, a) Sıkışma ile elektrotlarda oluşan yükler, b) Çekme ile elektrotlarda oluşan yükler, c) Gösterilen yönde voltaj uygulamayla oluşan geniş- leme, d) Voltaj yönü ters çevrildiğinde meydana gelen sıkışma .....	16
3.3. Makaslama dalga transduserleri için piezoelektrik etki, a) Gösterilen yönde makaslama zorlaması ile elektrotlarda oluşan yükler, b) Öncekinin tersi yönde makaslama zorlaması ile elektrotlarda oluşan yükler, c) Gösterilen yönde voltaj uygulanması ile meydana gelen makaslama zorlanması, d) Ters yönde voltaj uygulanmasıyla meydana gelen öncekinin tersi yönde makaslama zorlanması .....	17
3.4. Bazı ferromanyetik materyallerin manyetik alanda gösterdikleri boyuna manyetostriksiyon .....	21
3.5. Ferromanyetik materyallerin sıcaklığa bağlılığı .....	22
3.6. Demir ve nikelde ait kolay mıknatıslanma yönleri .....	23
3.7. Bir manyetostriktif çubukla yapılan ultrases vericisi .....	24
3.8. Çeşitli tip ultrasonik transduserlerin verimi .....	25
3.9. Sıcaklığın fonksiyonu olarak ultrasonik transdu- serlerin verimliliği .....	26
4.1. Yansımali puls yöntemi .....	29
4.2. Ses pulslarının soğurulması, a) İdeal deney koşullarında, b) Deney hataları dikkate alındığında, c) İlk esas ve yansıyan pulslar .....	30



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Puls geçme yöntemi .....	31
4.4. a) Optik yöntemin esası, b) Ekran üzerinde beklenen kırınım deseni .....	33
4.5. k'ıncı mertebe kırınım ışınının gidişi .....	34
4.6. Korelasyon yöntemine ait deney düzeneğinin şeması .....	35
4.7. Ölçü ortamında verici kuvars kristalin hareketi süresince alıcı kristale ulaşan ses dalgalarının genlik değişimi .....	36
4.8. Yandaki şeklin genlik değişiminin x-uzaklığına göre değişimi .....	36
5.1. Katıdaki parçacıkların birbirlerine göre durumlarının basit tasavvuru .....	38
5.2. Hacim elemanı üzerinde gerilim bileşenleri .....	39
5.3. Bir yüzey elemanının deformasyonu .....	40
5.4. Sesin sıvılarda yayılmasının izahı için basit bir örnek .....	48
5.5. Adyabatik ve izotermik durumlara göre ses hızı .....	50

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı malzemelerin akustik empedansları ve yoğunlukları .....	6
3.1. Piezoelektrik olayların özellikleri .....	19
5.1. Kübik kristal yapıya sahip maddelerde ses hızları .....	47
5.2. Bazı sıvılara ait ses hızı değerleri .....	54
5.3. Bazı gazlar için viskozite ve ısı iletkenliğinden ileri gelen soğurma katsayıları .....	56
5.4. Bazı gazlar için ses hızları .....	57

## SİMGELELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I	Ultrases enerji şiddeti
W	Ortama ait akustik empedans
$\omega$	Açısal frekans
A	Dalga titreşim genliği
$\rho$	Yoğunluk
V	Ses hızı
$V_e$	Enine dalga ses hızı
$V_D$	Boyuna dalga ses hızı
$V_y$	Yüzeysel dalga ses hızı
P	Ses basıncı
f	Frekans
$\lambda$	Dalgaboyu
q	Elektriksel toplam yük
F	Gerilme kuvveti
d	Piezoelektrik etki katsayısı
E	Young (elastisite) modülü
V	Elektriksel gerilim
l	Uzunluk
$f_r$	Rezonans frekansı
n	Harmonik uyarılma katsayısı
m	Manyetostriktif sabit
B	Manyetik akı yoğunluğu
e	Elektrostriktif sabit
D	Elektriksel yerdeğişimi
t	Zaman
$\alpha$	Soğurma katsayısı
K	Şiddetlendirme katsayısı
N	Işık dalga frekansı
$\Lambda$	Işık dalgaboyu
$\sigma$	Mekanik gerilme
$e_{xx}, \dots$	Deformasyon bileşenleri
$\lambda, \mu$	Lame sabitleri

## SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C	Elastisite sabiteleri
$\nu$	Poisson oranı
U	Hacim elastisite modülü
G	Kayma modülü
M	Mol kütlesi
V	Hacim
$\beta_{ad}$	Adyabatik sıkışabilirlik katsayısı
$\beta_{is}$	İzotropik sıkışabilirlik katsayısı
$\delta$	Laplace katsayısı
$\eta_s$	Makaslanma viskozitesi katsayısı
$\eta_v$	Hacim viskozitesi katsayısı
L	Isı iletkenlik katsayısı

## 1. GİRİŞ

İnsanların araştırmacılık ruhu doğadaki olayların sebeplerini araştırma ve araştırıp bulduğu olayları kullanarak hayatı kolaylaştırıcı aletler geliştirmesi, bulduklarıyla yetinmeyip daima daha ileri gitmek için maddi manevi çaba sarfetmesi hiç kuşkusuz bugün ulaşılan teknolojinin ve hayat standartının tek sebebidir. Bu ilerleyiş hiç bir zaman durmayıp geçen zamanla birlikte daha da ileriye gidecektir. Ultrases ile ilgili çalışmalarda haliyle bu gelişmenin ürünüdür.

Ultrases ile ilgili ilk gelişmeler piezoelektrik olayın keşfedilmesiyle başlamıştır. Piezoelektrik olay 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiş, bir yıl sonra Lippman'ın zıt piezoelektrik olayla ilgili teorisini ortaya atması ile çok sayıda fizikçi çalışmalarını bu konu üzerinde yoğunlaştırmıştır. Lord Kelvin, Voight, Duhem gibi araştırmacıların çeşitli katkıları ile gittikçe önem kazanan konu, 1914-1918 Dünya savaşı sıralarında Fransız fizikçisi Langevin'in dūřman denizaltısı gemilerinin hareketlerini kontrol amacı ile, kendi adını taşıyan ses-ötesi verici-alıcı sistemini gerçekteştirmesi sonucunda teknik alana uygulanmıştır.

Ultrases dalgalarının katı, sıvı, gaz ortamlardaki yayılma hızı, soğurulması ve iki ortamın sınır yüzeyindeki yansıması mad-denin bir çok özelliklerine ve molekül yapısına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla ortamlara ultrases dalgası gönderip, ortamdaki davranışları izlemek için yeni yeni aletler geliştirilmiştir. Günümüzde ultrases başta tıp ve bilimsel araştırmalar olmak üzere teknikte ve günlük hayatta pek çok amaçlar için kullanılmaktadır.

## 2. ULTRASES

### 2.1. Tanım

Ses, maddesel ortamlarda boyuna dalgalar halinde yayılan bir enerji türüdür. Titreşen her cisim de, enerjisini bulunduğu ortama dalgalar halinde yayan bir ses kaynağı gibi davranır.

Normalde insan kulağı, 16 Hz ile 20 000 Hz frekans bölgesi içinde kalan sesleri duyma yeteneğindedir. Bu sınırın üzerinde kalan seslere sesötesi veya "ultrases", bu sınırın altında kalan seslere de sesberisi veya "infrases" denir. İnsan kulağının duyarlı olmadığı bölgede bazı hayvanların duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Bunun en ilginç örneği yarasalara aittir. Yarasalar, kör denecek kadar görme yeteneğinden yoksun olmalarına rağmen gündüz yerine gece hareket etmeyi tercih ederler. Bu hayvanlar yönlerini, frekansı 40 kHz olan çok kısa süreli dalga pulsları yayınlayarak tayin ederler. Bir engele çarparak dönen yankının gidiş-dönüş süresi, şiddeti ve geliş doğrultusundan engelin uzaklığını cinsini ve ne tarafta bulunduğunu tahmin ederek yönlerini tayin ederler (Ertaş, 1968). Köpeklerin 25 kHz'e kadar duyabildiği, bazı kuşların, böceklerin ve balıkların da yüksek frekanslı sesle anlaştıkları tespit edilmiştir.

### 2.2. Kullanıldığı Yerler

Sesötesi dalgaların bir ortamdaki yayılma hızı, soğurulması ve iki ortamın sınır yüzeyindeki yansımaları maddenin bir çok fiziksel özelliklerine ve molekül yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu yüksek frekanslı dalgaların meydana getirdikleri bazı önemli olaylar da vardır. Bu bakımdan sesötesi dalgalar maddenin molekül yapısını aydınlatmada başarılı bir araştırma aracı olduğu gibi tıpta, teknikte ve günlük hayatımızda pek çok kullanım alanı bulabilmiştir.

i) Bilimsel araştırmalarda:

Elastisite sabitelerinin tayininde,

Sonar cihazı ile deniz dibi haritaları çıkarmakta,

Kristal büyümesini kontrol etmekte,

İç gerilmelerin tayininde,

Metalurjik yapıdaki değişimlerin algılanmasında,

- a) Tane büyüklüğü mertebesi
- b) Yönlenme derecesi
- c) Mikroskopik hataların yoğunluğu
- d) Ayrışmış fazlar
- e) Kalıntılar
- f) Soğuk işlem derecesi
- g) Isıl işlem derecesi

tayinleri sesötesi enerjinin saçılmasındaki ve soğurulmasındaki farklılıkların algılanması ve ses hızı ölçümüne dayanır.

ii) Biyoloji ve tıpta:

Yapılan araştırmalar sonucu canlı bir dokunun makroskopik yapısının ve fonksiyonunun, bu dokuya zarar vermeksizin ultrasesle belirlenebileceği bulunmuştur.

Hastalık veya kazadan doğan tahribat, tümörler, kireçlenmeler, yabancı maddeler, böbrek taşları, beyin tümörlerinin teşhisinde,

Gebelik muayenesinde de sadece 9 haftalık cenin ultrasonik holografi ile algılanabilmektedir. Radyografinin zararlı yönleri olduğu için hamilelik döneminde ultrasonik muayene tercih edilmektedir,

Körler için klavuz alet yapımında,

Frekans ve şiddeti uygun olmak şartıyla, böbrek taşları ve tümörlerin tahribinde,

Başta romatizma olmak üzere daha bir kaç hastalığın tedavisinde,

Şiddetli sesötesi dalgaların önemli fizyolojik etkileri de vardır. 16-30 kHz'lik şiddetli ses dalgalarının beyaz fareleri,

sivrisinekleri bazı böcekleri, sıvılar içindeki bakteri ve diğer canlıları 1 dakika veya daha kısa bir sürede öldürdüğü görülmüştür.

Yine şiddetli sesötesi dalgaların etkisi altında kalan tohumların çimlenme hızının arttığı, yumurtalardan çıkan civcivlerin bazı organlarının noksan olduğu, hücre ve dokularda değişiklikler meydana geldiği tespit edilmiştir.

iii) Teknikte:

Boyut ve kalınlık ölçme, diğer yüzeyine erişilemeyen bir levhanın veya bir duvarın kalınlığı veya metrelerce uzunluğa varan boyutlar hassas olarak ölçülebildiği gibi 0.1 mm kadar ince boyutlarda mikrometre hassasiyetinde ölçülebilir.

Ultrasonik termometre, metal bir çubuğun sıcaklıkla boyut değiştirmesi rezonans metoduyla hassas olarak ölçülür. Sıcaklıklara göre kalibre edilmiş bir cihazla boyuttaki bu değişim, doğrudan sıcaklık olarak okunur.

Yüzey sertliği ölçülmesinde,

Tabakalar arası yapışma ve kaynama kontrolü, kaplama tabakalarının ana metale kaynaması, sandoviç yapılarda tabakalar arası yapışma, otomobil tekerlek lastiğinde takviye dokularının kauçuğa yapışmasının kontrolü,

Makina parçalarının iç kısımlarında mevcut veya daha sonradan oluşmuş çatlakların, hava kabarcıklarının ve yabancı maddelerin tespitinde,

Denizaltılarda çevre kontrolünde,

Metalleri diğer herhangi bir metodla erişilemeyen çok ince toz haline getirmekte,

Çok ince taneli fotoğraf emülsiyonları hazırlamakta,

Civa, altın, v.s.'yi gaz ve sıvılarda süspansiyon haline getirmekte,

Özel metal alaşımları yapmakta,

Uzun polimer zincirlerini daha küçük polimerlere parçalamak-



ta,

Suni sis meydana getirmekte,

Fabrika bacalarından çıkan gazları temizleyerek çevrenin hava kirliliğinin önlenmesinde,

Gaz karışımlardan gazları ayırmakta,

Meşrubat sanayiinde şarabı eskitmek birayı yabani mayalardan ayırmakta, şuruplarda enzimleri glikoz gibi diğer ürünlere dönüştürmekte, sütü sterilize etmekte,

Dökümcülükte erimiş metalleri gazlardan arıtmakta,

Sert maddeleri delmek ve işlemek üzere ultrases matkapları yapmakta,

Özellikle elektrik ve elektronik sanayinde kullanılan ultrasesli kaynak makinaları yapmakta kullanılır.

iv) Günlük hayatta:

Döner kısımları bulunmayan ultrasesli çamaşır ve bulaşık makinaları yapmakta, yıkama tankı içindeki sıvıya 20-40 kHz frekanslı sesötesi enerji verilir. Oluşan şiddetli alternatif basınç kuvvetli bir ovma etkisi yapar.

Modern balıkçılıkta,

Kapıları veya televizyonu açan kapatan uzaktan kumanda cihazları yapımında kullanılır (Özden, 1981).

## 2.3. Ultrases Temel Nitelikleri

### 2.3.1. Enerji yönü

Ultrases, bildiğimiz titreşim hareketinden ibaret olan ses-ten başka bir şey değildir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi olarak yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Sesötesi dalgalar, atomların veya moleküllerin denge konumları etrafında titreşimi olmasından dolayı mekanik bir enerjidir.

Ultrases enerjisinin şiddetiyle titreşen atom veya molekül-

lerin genliği arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir,

$$I = \frac{1}{2} W w A^2 \quad (2.1)$$

Burada  $I$  ( $W/m^2$ ) ultrases enerji şiddeti,  $A$  (m) titreşim genliği,  $W$  ( $kg/m^2 s$ ) ortamın akustik empedansı,  $w = 2\pi f$  ( $s^{-1}$ ) açısal frekansını göstermektedir.

### 2.3.2. Akustik empedans

Akustik empedans, ortamın sesin yayınına karşı gösterdiği dirençtir. Buna kısaca ses direnci de diyebiliriz. Her ortamın sesin yayınına karşı gösterdiği direnç farklıdır. Ortamın yoğunluğu ile sesin o ortamdaki yayılma hızının çarpımı yine o ortam için akustik empedansı vermektedir.

$$W = \rho v \quad (2.2)$$

Burada  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) ortamın yoğunluğu ve  $v$  (m/s) 'de sesin o ortamdaki yayılma hızıdır.

Çizelge 2.1. Bazı malzemelerin akustik empedansları ve yoğunlukları (Özden, 1981).

	$W$ $10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$\rho$ $10^3 \text{ kg/m}^3$
Dökme demir	25-40	7.20
Demir (çelik)	46.5	7.85
Bakır	42.0	8.90
Prinç	33.0	8.50
Alüminyum	17.0	2.70
Porselen	2.40	13-14
Lastik (vulkanize)	2.5-3.7	1.1-1.6
Lastik (yumuşak)	1.9-3.1	1.3-2.1
Su (20 °C)	1.50	~ 1.00
Motor yağı	1.1-1.7	0.88-1.02

Çizelge 2.1'de bazı malzemelerin akustik empedansları verilmiştir.

### 2.3.3. Ses basıncı

Ses, bir titreşim hareketi olduğundan ortam içinde yayılırken geçtiği noktalarda bir basınç oluşturur. Buna ses basıncı diyoruz ve hesaplarırken aşağıdaki formülü kullanıyoruz.

$$P = WvA \quad (2.3)$$

$P$  ( $N/m^2$ ), ses basıncı veya daha doğru bir deyimle alternatif değişen ses basıncının genliğini göstermektedir.

(2.1) ifadesi dikkate alınarak akustik ses şiddeti ile akustik basınç arasında aşağıdaki gibi bir bağlantı olabileceği görülür.

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{W} \quad (2.4)$$

Ses basıncını duyularımızla anlayabiliriz. Şiddetli bir gürültünün kulak zarını zorlayarak bizi rahatsız etmesini buna örnek olarak verebiliriz.

## 2.4. Ultrases Dalga Çeşitleri

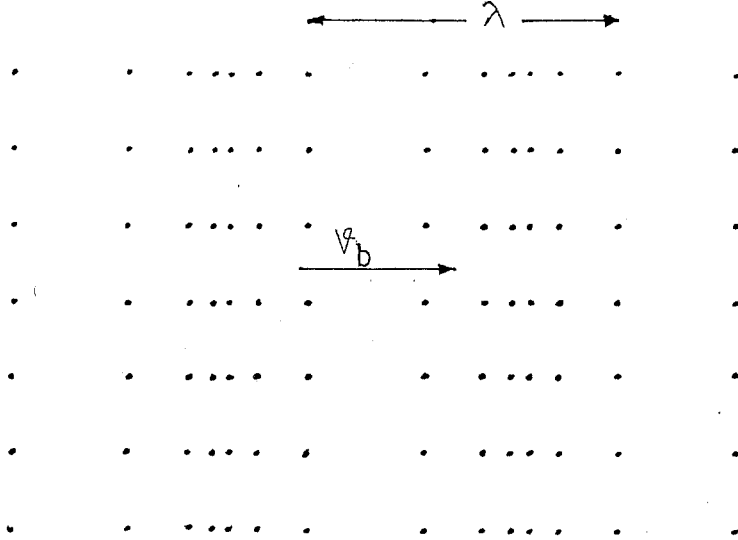
Günlük hayattan sesin dalgasal özelliğini bildiğimiz halde bunun ne tür dalga olduğunu düşünmeye olaylar bizi zorlamamıştır. Sesötesi çalışmalarında ise bunu başlangıçta bilmek zorundayız. Zira çeşitli dalga türleri arasında uygulamayı ilgilendiren önemli ayrıcalıklar vardır.

Ultrases dalga türleri arasında özellikle üçüne uygulamalarda en çok rastlanır. Aralarındaki farklılık ultrasesin ortamdaki yayının doğrultusu ile onu bizzat ileten atomların bu vesileyle yaptıkları titreşimin doğrultusu arasındaki farktır.

### 2.4.1. Boyuna dalga

Boyuna dalga test numunesindeki yüzeye yakın parçacıklar, yüzeye dik olarak titreştiklerinde elde edilir. İlk parçacık yü-

zeyi titre ve kinetik enerjiyi yanındaki parçacık yüzeyine iletir. Parçacıklar arasındaki bağ elastik olduğundan parçacık yüzeyleri arasındaki hareket birbirinin peşi sıradır



Şekil 2.1. Ortamda boyuna dalga yayılışı

ve herhangi bir anda bu hareket durdurulursa Şekil 2.1'deki durum görülür.

Eşit mesafelerde, parçacık yüzeylerinin arasında eşit basınç dalgaları meydana gelir. Bu dalgaların iki sıkışma noktası ile iki gevşeme noktası arasındaki mesafe eşit olup, bu uzunluk ( $\lambda$ ) dalgaboyu olarak ifade edilir. Bu basınç dalgalarının statik halini değil de yayılma halini incelersek sıkışma ve gevşeme noktalarının aralarındaki mesafe bozulmadan deneye tâbi tutulan malzeme içinde yayıldıklarını görürüz. Bu, boyuna dalgaların hızı olup,  $v_b$  ile ifade edilir ve değeri her malzemeye göre ayrı ve sabittir.

Böylece tamamen homojen bir bünyeye sahip olan malzemelerde sesin yayılma hızının sabit olduğu söylenebilir. Çelik, su, hava ve alüminyum için boyuna dalgaların ses hızı şöyledir;

Çelik	:	$v_b = 5900$ m/s
Su	:	$v_b = 1480$ m/s
Hava	:	$v_b = 330$ m/s
Alüminyum	:	$v_b = 6300$ m/s

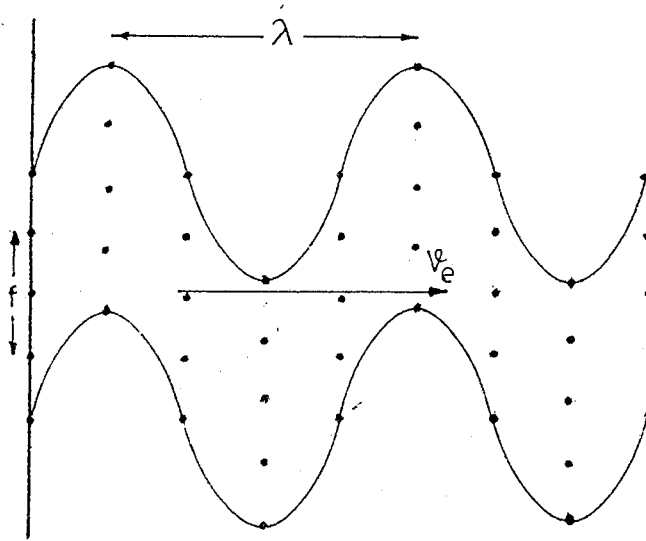
Dalga hareketlerinde, dalgaboyu ve ses hızından başka bir enteresan büyüklük olarak frekans göze çarpar. Frekans, her kütle parçacığı tarafından saniyede yapılan titreşim sayısını gösterir. Dalgaboyu, frekans ve ses hızı arasındaki matematiksel bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$v = \lambda f$$

Malzemeye göre sabit olan ses hızı bilindiğinde belirli bir frekansın seçimi dalgaboyunu da tarif eder.

#### 2.4.2. Enine dalga

Enine dalga ise parçacıklar yüzeye paralel olarak titreştirildiği zaman meydana gelir. Dalga treninin herhangi bir anda kistatik durumunu ele alacak olursak bu defa parçacık yüzeyleri-



Şekil 2.2. Ortamda enine dalga yayılımı.

nin birbirlerinden eşit uzaklıklarda bulunduğunu ve ayrıca yüzeylerin deney parçasının yüzüne paralel olarak hareket ettiklerini görürüz. Yüzeyle eş uzaklıkta olan noktaları birleştirerek parça içinde tabakalar meydana getirelim. Bu tabakaların yüzeyden muh-

telif uzaklıkta olanlarını ele alırsak bazılarının tepecikler bazılarının çukurlar halinde ortaya çıktıkları görülür. Dalga treninin dinamik hareketini dikkate alırsak, dalga tepecik ve çukurlarının test parçası boyunca hareketleri esnasında sabit bir mesafeyi muhafaza ettiklerini görürüz.

Boyuna dalgayı meydana getiren şartlara kıyasla, iki peşisıra dalga çukuru veya iki peşisıra dalga tepeciği arasındaki mesafe enine dalganın ( $\lambda$ ) dalgaboyudur.

Dalga tepecik ve çukurlarının bir malzeme içinde yayılma hızını enine dalga yayılma hızı olarak  $V_e$  ile gösteriyoruz. Bu hızda, yine malzemelere göre ayrı ayrı olup aynı zamanda sabittir.

Çelik, su, hava ve alüminyum için enine dalga hızları da aşağıdaki gibidir;

Çelik	:	$V_e = 3230$ m/s
Su	:	$V_e = 0$ m/s
Hava	:	$V_e = 0$ m/s
Alüminyum	:	$V_e = 3130$ m/s

Enine dalga sadece katılarda yayılır, gazlarda ve sıvılarda yayılmaz. Bu yüzden, enine dalgaların suda ve havada yayılma hızı sıfırdır.

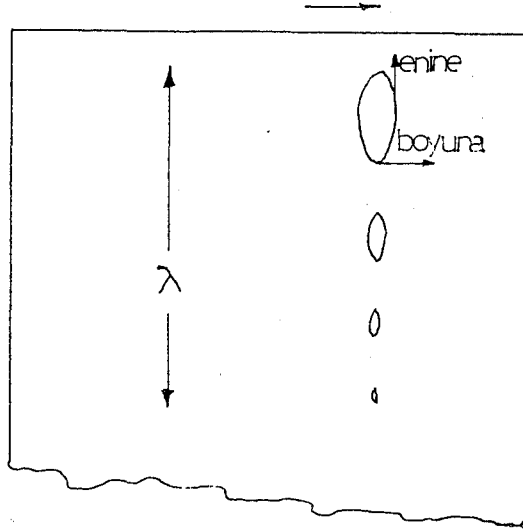
#### 2.4.3. Yüzey (Rayleigh) dalgaları

Yaklaşık bir asır kadar önce Lord Rayleigh yüzeysel dalgaların varlığını ortaya koymuş ve teorisini de oluşturmuştur. Bu nedenle yüzeysel dalgalara Rayleigh dalgaları da denir. Bu dalgaların yayılma hızları elektromagnetik dalgaların yayılma hızından yaklaşık  $10^5$  kez küçüktür. Bundan dolayı bir çok elektronik devrelerde değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Bu dalgaların enerjisi yüzeyde yoğunlaştığı için, yayılma doğrultusuna dik yüzeydeki herhangi bir çatlak veya engelden enerjinin büyük bir kısmı geri yansır. Bu şekilde numune yüzeylerindeki mikro-çatlakların tespiti sağlanır (İşçi, 1986).

Normal olarak katılarda bir boyuna dalga ve iki enine dalga

yayılır. Bazı doğrultularda iki enine dalga hızı birbirine eşittir.

Yüzeysel dalgalar bir boyuna ve bir enine dalganın birleşimidir. Boyuna dalga yüzeye paralel ve yayılma doğrultusunda, enine



Şekil 2.3. Yüzeysel dalgaların ortamda yayılması (İşçi, 1986).

dalga ise yüzeye ve yayılma doğrultusuna diktir.

Şekil 2.3'de yüzeysel dalgaların ortamdaki yayılmaları gösterilmektedir. Dalga hareketinin genliği yüzeyden itibaren aşağı doğru exponansiyel olarak azalır ve yaklaşık bir dalgaboyu mesafede kaybolur. Yüzeysel dalgalarda hareket, yayılma vektörünü içeren ve cisim yüzeyine dik bir düzlemde olur.

İzotropik katılarda yüzeysel dalgaların yayılma hızı  $V_y$  aşağıdaki denklemle verilir,

$$V_y = V_b (0,87 + 1,12 \nu) / (1 + \nu) \quad (2.5)$$

$$\nu = (V_b^2 - 2V_e^2) / 2(V_b^2 - V_e^2) \quad (2.6)$$

Burada  $\nu$  poisson oranı,  $V_b$  boyuna dalga ve  $V_e$  enine dalga hızıdır.

Anizotropik ortamlarda hız, doğrultu ve yayılma düzlemine göre değişir.

Çelik, demir ve alüminyum için yüzeysel dalgaların yayılma hızı aşağıda verilmiştir (Richard, 1962),

Demir	:	$v_y = 3000$ m/s
Alüminyum	:	$v_y = 2800$ m/s
Çelik	:	$v_y = 2971.6$ m/s

Anlatılan bu üç dalgaya ilaveten levha dalgası veya "Lamb dalgası" ismi ile anılan bir dördüncüsü vardır. Bu tür dalgalar daha ziyade levhaların muayenesinde kullanılır.



### 3. ULTRASES OLUŞTURULMASI VE ALINMASI

#### 3.1. Transduserler

Ses dalgaları bir transduser tarafından oluşturulur ve alınırlar. Transduser enerjiyi bir formdan başka bir forma dönüştürür. Bizim ilgilendiğimiz, mekaniksel enerjinin elektriksel enerjiye, elektriksel enerjinin mekaniksel enerjiye çevrilmesini kapsamaktadır. Her iki yönde eşit yetenekte değiştirme yapabilecek transduserler vardır.

Bu bölümde, transduserlerin farklı tiplerini aşağıdaki gibi sınıflara ayırarak inceleyebiliriz.

##### i) Piezoelektrik titreşiciler:

Piezoelektrik etkinin kullanımıyla yapılırlar, her iki enerji türünde birbirine çevirebilir. Uygun frekans bölgesi 20 kHz'den 10 GHz'e kadar uzanır.

##### ii) Magnetostriktif titreşiciler:

Magnetostriksiyon olayına göre çalışırlar, bunlar da her iki enerji türünü birbirine çevirebilirler. Genellikle 40 kHz'den daha büyük frekanslarda kullanılamazlar. Fakat, frekans bölgesi kolaylıkla 100 kHz'e kadar uzandırılabilir.

##### iii) Mekanik transduserler:

Saf mekanik titreşimleri ve radyometreleri kapsar (örneğin, sirenler ve tınılar), iki yönlü dönüştürücü değildirler. Yüksek güç uygulamaları için oldukça kullanışlıdır. Frekans bölgesi nadediren 50 kHz'in üzerine çıkabilir.

##### iv) Elektromagnetik transduserler:

Bazen alçak frekanslarda, yüksek şiddet uygulamaları için kullanılırlar, genellikle işitilir bölgededir. 50 kHz bölgesinde düşük şiddetli çalışma durumunda kullanılmaktadır. Çok çok nadiren mega-Hertz frekanslardadır. Bunlarda iki yönlü dönüştürme yeteneğine sahiptir.

v) Elektrostatik transduserler:

Birkaç yüz kilohertz frekansın üst limitleri ile alçak şiddetlerde üretici gibi kullanılabilirler. Her iki yönde dönüştürme özelliği vardır. 100 MHz kadar yüksek frekanslarda alıcı olarak kullanılabilirler.

vi) Miscellaneous transduserler:

Isıl, kimyasal ve optiksel transduserleri kapsar.

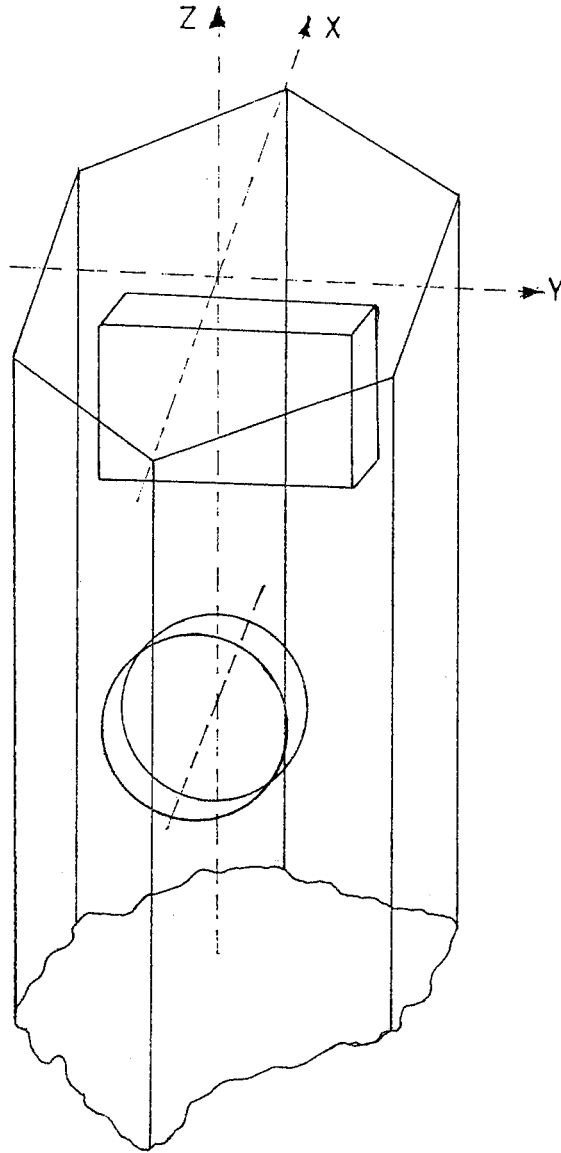
Transduserleri bu şekilde sınıflara ayırdıktan sonra, ençok kullanılan piezoelektrik, magnetostriktif ve elektrostriktif transduserler olduğu için bunlar hakkında daha geniş bilgiler aşağıda verilmiştir.

### 3.1.1. Piezoelektrik transduserler

Piezoelektrik transduserler, piezoelektrik etki gösteren materyallardan yapılırlar. Piezoelektrik etki 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie tarafından bulunmuştur. Bir yıl sonra Lippman'ın zıt piezoelektrik olayla ilgili teorisini ortaya atması ile çok sayıda fizikçi çalışmalarını bu konu üzerinde yoğunlaştırmıştır. Lord Kelvin, Voight, Duhem gibi araştırmacıların çeşitli katkıları ile gittikçe önem kazanan konu; 1914-1918 Dünya savaşı sıralarında Fransız fizikçisi Langevin'in düşman denizaltısı gemilerinin hareketlerini kontrol amacı ile, kendi adını taşıyan sesötesi verici-alıcı sistemini gerçekleştirmesi sonucunda teknik alana uygulanmıştır.

Kuartz, turmalin, lityum sülfat, kadmiyum sulphit ve çinko oksit gibi doğada bulunan tek kristal polar eksenine sahip maddelerde bu etki oluşur.

Farzedelimki bu doğal materyallerden biri disk veya yassı dilim şeklinde kesilmiş olsun ve karşılıklı iki düzlem yüzey şeklinde düzenlenmiş olsun. Ayrıca yüzeyler elektrot formunda ince bir metalik film (Örneğin, altın, gümüş veya alüminyum) ile kaplanmış olsun. Eğer, kaplanmış yüzeylere mekanik gerilmeler uygulanırsa yüzeylerde eşit ve karşılıklı elektrik yükleri oluşacak ve bir voltaj gözlenecektir. Bu direkt piezoelektrik olaydır. Bu



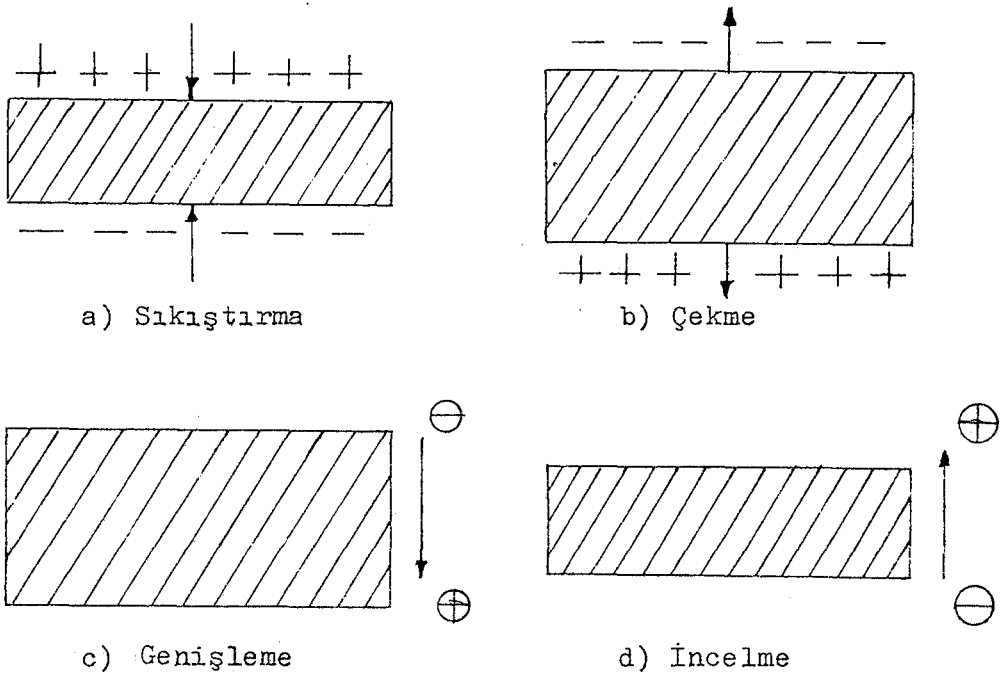
Şekil 3.1. Kuvars kristal ekseninde, x-kesimli dikdörtgensel ve dairesel transduserin gösterilişi (Blitz, 1967).

olay kristalin kaplanmış yüzeylerine dikey olan polar eksen ile ilgilidir. Kristalin karşılıklı elektrotlarına elektrik alan uygulandığı zaman olayın tersi görülür, yani kristal boyutunda değişmeler gözlenir. Bu olaya ters piezoelektrik olay denir.

Bu etkiler, makaslama ve sıkıştırmanın her ikisiyle ilgili, elektrotların polar eksenlerinin hangisi olduğuna bağlıdır. Örneğin, kuartz da, başlıca polar eksenler x ve y eksenleri olarak isimlendirilir. x-ekseni  $120^{\circ}$ 'lik açıda yönlenmiştir ve her x-ekseni için ona dik bir y-ekseni karşılık gelir. x-kesimli kuvars

kristaller (x-eksenine dik düzlemlerle kesilmiş) sıkıştırma, y kesimli kuvars kristaller makaslama etkisine maruz bırakılır. Optik eksen olarak bilinen ve x ve y eksenlerini içine alan düzlem doğrultusunda uzanan z eksenini, piezoelektrik olayın gözlenmediği, polar olmayan bir eksendir.

Şekil 3.1'de tipik kuvars kristal numune görülmektedir. Uygun x, y, z eksenleri gösterilmiştir, dikdörtgensel ve dairesel

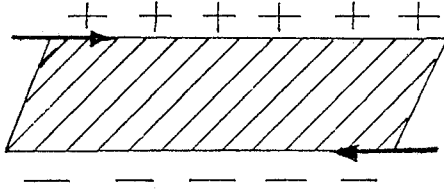


Şekil 3.2. Sıkıştırma-çekme dalga transduseri için piezoelektrik etki, a) Sıkıştırma ile elektrotlarda oluşan yükler, b) Çekme ile elektrotlarda oluşan yükler, c) Gösterilen yönde voltaj uygulamayla oluşan genişleme, d) Voltaj yönü ters çevrildiğinde meydana gelen sıkıştırma (Blitz, 1967).

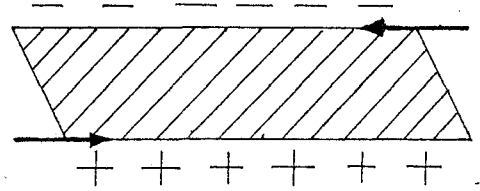
tipli transduserin sınır çizgileri verilmiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 transduser tiplerinin makaslama ve gerilmeye maruz kaldığında piezoelektrik ve ters piezoelektrik olayın etkisini göstermektedir.

Karşılıklı elektrotlara alternatif bir voltaj uygulandığında, piezoelektrik bir transduser uygulanan frekansta kalınlığın  $10^{-6}$  kez mertebesinde genlikle salınım yapar. Bununla birlikte,

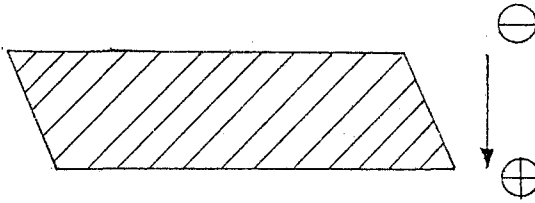
transduser resonans frekanslarından birinde uyarılırsa genlik e-peyce büyür, temel frekansta yaklaşık olarak genlik kalınlığının  $10^{-4}$  mertebesinde. Titreşimler ya sıkışma-gevşeme şeklinde-



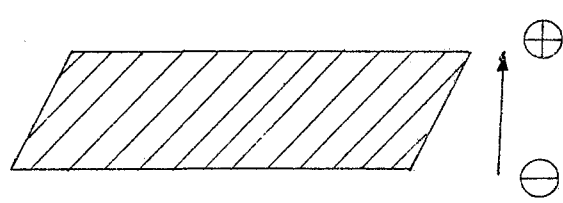
a) Makaslama zorlaması  
(saat dönüş yönü)



b) Makaslama zorlaması  
(saat dönüş yönü tersi)



c) Makaslama zorlanması  
(ters saat yönü)



d) Makaslama zorlanması  
(saat yönü)

Şekil 3.3. Makaslama dalga transduserleri için piezoelektrik etki, a) Gösterilen yönde makaslama zorlaması ile elektrotlarda oluşan yükler, b) Öncekinin tersi yönde makaslama zorlaması ile elektrotlarda oluşan yükler, c) Gösterilen yönde voltaj uygulanması ile meydana gelen makaslama zorlanması, d) Ters yönde voltaj uygulanmasıyla meydana gelen öncekinin tersi yönde makaslama zorlanması (Blitz, 1967).

dir, yada makaslama şeklindedir. Salınımlar kristalin kesim metoduna ve kristalin doğasına bağlıdır. Boyuna dalgalar x-kesimli kuvars kristal tarafından oluşturulur, enine dalgalar ise y-kesimli kuvarz kristal tarafından oluşturulurlar.

Bir piezoelektrik transduser dedektör olarakta kullanılabilir. Ses dalgaları tarafından oluşturulan titreşimler elektrotlarda titreşim frekansında alternatif yüklerin oluşmasına sebep

olur. Rezonans frekansında maksimum hassasiyet elde edilir. Bazı uygulamalarda bir tek transduser hem alıcı ve hem de yayınlayıcı olarak kullanılabilir. Manyetostriksiyona benzer elektrostriksiyon olarak bilinen etkiler gösteren bazı materyallerde de suni olarak piezoelektrik etki oluşturulabilir. Bu etki dielektrik materyallerde gözlenebilir. Baryum titanat, kurşun meta-niobat ve sodyum niobat maddeleri ferromanyetikler sınıfına girer. Eğer, bu materyallerden birinden bir yassı levha (dilim) nin karşılıklı yüzeyleri elektrotla kaplanırsa ve bir voltaj uygulanırsa, uygulanan elektriksel gerilimle orantılı olarak kalınlıkta değişmeler gözlenir. Kalınlıktaki bu artış ve azalma uygulanan voltajın kutuplarınının yer değiştirmesiyle birlikte durur (Blitz, 1967).

Suni olarak imal edilen piezoelektrik transduserler tek kristalli değildir, fakat polikristal yapısındadır. Bu materyaller birbirlerine bağlı bir çok küçük kristalcikten oluşur. İstenilen ölçülerde ve şekilde kalıplara dökülür ve sonra fırında sertleştirilir. En son üretilen bu transduserler seramik formundadır. Bu transduserleri uygun formda şekillendirmek mümkün olduğundan örneğin, ultrasesi odaklama yeteneğine sahip konkav transduserler bile kolaylıkla üretilebilmektedir. Bu transduserlerin piezoelektrik özellikleri diğer materyallerden az miktarda ilave etmeyle veya başka yollarla düzenlenebilir.

Piezoelektrik etki genellikle  $d$  katsayısı diye adlandırılan nicelikle ölçülür. Bu nicelik iki şekilde ifade edilebilir. İlk olarak, farzedelim ki kristal mekaniksel gerilmelere maruz kalmış olsun, gerilmelerle elektrotlarda oluşturulan yükler potansiyel fark sıfır oluncaya kadar telin bir ucundan diğer ucuna akacaktır. Eğer toplam yük değeri  $q$  ise, uygulanan gerilme kuvveti  $F$  ise,  $d$  katsayısını veren ifade aşağıdaki gibidir.

$$d = \frac{q}{F} \quad (3.1)$$

İkinci tanım için, kristalin karşılıklı yüzeylerine uygulanan  $V$  voltajı ise ve uygulanan  $V$  voltajı sonucu meydana gelen kalınlık değişimi  $\Delta l$  ise,

Çizelge 3.1. Piezoelektrik materyallerin özellikleri (Bentley, 1983).

Materyal	d katsayısı C/N	Dielektrik sabit, $\epsilon$	Young Modülü, E $\times 10^9 \text{ N/m}^2$	
Doğal	Kuvarz	2.3	4.5	80
	Turmalin	1.9, 2.4*	6.6	160
Piezoelektrik Seramik	Kurşun zirkonat			
	titanat	265	1500	79
	Kurşun Meta- niobat	80	250	47

\*Uygulanan kuvvet yönüne bağlı

$$d = \frac{\Delta l}{V} \quad (3.2)$$

Eş.(3.1)'deki d'nin boyutları Coulomb/Newton, Eş.(3.2)'deki d'nin metre/volt boyutları ile özdeştir.

En son üretilen suni piezoelektrik transduserlerin seramik formunda olduğundan bahsetmiştik. Seramik transduserler kısa puls üretmek için oldukça uygundur, bununla beraber kuvarz kristaller sürekli dalga yayılması için veya uzun puls üretmek için idealdir. Seramik transduserler yüksek absorblama katsayılı olmalarına karşılık aşırı ısınmadan dolayı piezoelektrik karakteristikleri kaybolur.

Seramik transduserler genellikle çok yüksek d katsayısına sahiptir. Kuvarzlar, seramikler ile kıyaslandığında oldukça pahalı materyallerdir, fakat kimyasal ve fiziksel özellikleri oldukça üstündür.

Çoğu durumlarda piezoelektrik transduserlerin, l kalınlığı ile  $f_r$  rezonans frekansı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir,

$$l = \frac{v}{2nf_r} \quad (3.4)$$

Burada  $n$  harmonik uyarılmanın tam katsayısıdır ve  $v$  transduserde sesin hızıdır. Çoğu piezoelektrik materyaller için boyuna dalgaların hızı  $5000 \text{ ms}^{-1}$  mertebesinde dir. 10 mm kalınlığında bir transduserin kompressional titreşimleri için temel rezonans frekansı yaklaşık 250 kHz değerinde olacaktır. Eş.(3.4)'de de görülebileceği üzere, frekansı artırmak veya azaltmak için ya kalınlığın değiştirilmesi yada uygun harmonikte çalışması veya her iki durumunda uygun seçilmesi gerekmektedir.

Yüksek frekans sınırı ise, materyalin elektrotlarının yanmasına sebep olmayan ve zararsız kesilebilen kalınlıkta limittir. Kuvarz için mümkün temel frekans üst limiti, kalınlık yaklaşık 0.14 mm olduğunda 20 MHz'dir. Seramikler tanecikli yapıya sahip olmalarından dolayı çok ince dilimler halinde kesilebilirler.

Piezoelektrik materyallerden bazıları hakkında aşağıdaki bilgiler verilmiştir.

Rochelle tuzu:

Sodyumpotasyumtartaratın dört mol su ile kristalleşmiş şeklidir ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Kuvarsa nazaran daha piezoetkindir (Pascoe, 1972). Buna karşılık piezoelektrikliğinin sıcaklığa oldukça bağlı bir değişim göstermesi ve dayanıksız oluşu, asit hatta su içinde çözünmesi başlıca kusurlarıdır.  $54^\circ\text{C}$  gibi normal sayılabilecek bir sıcaklıkta piezoelektrikliğini kaybeder. Yine de uygun tutucu modeli seçerek özellikle sualtı çalışmalarında bileşik osilatör olarak kullanılırlar (Sesötesi çıkış yönü kristalin etkin yüzü büyüdükçe artar. Bunun için benzer kristaller eksen doğrultuları muhafaza edilmek suretiyle mozaik biçiminde dizilerek bileşik ossilatör olarak kullanılırlar).

Baryum titanat:

Bu kristal normal konumda piezoetkin değildir.  $120^\circ\text{C}$  olan Curie noktasının üzerinde uygun bir elektrik alan içinde tutulup sıcaklığı azaltılmak suretiyle piezoelektrik hale getirilir. Ku-

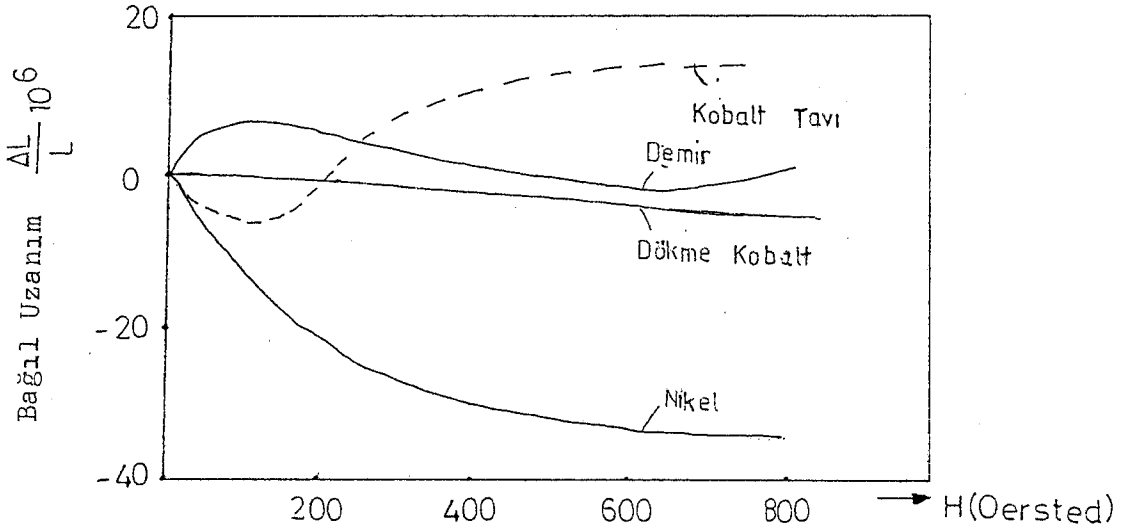


varstan 20-30 kat daha etkin olmasına karşılık istenen boyutlarda üretilmemesi uygulama alanını sınırlar.

Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), potasyum dihidrojen fosfat (KDP), lityum fosfat (LP), etilen diamin tartarat (EDT), dipotasyum tartarat (DPT),... gibi suni kristaller ve turmalin ultrases kaynağı yapımında, diğerlerine oranla az olmakla beraber, gerektiğinde tercih edilir.

### 3.1.2. Manyetostriksiyon

Çok sayıda metal ve alaşım bir manyetik alan içine getirildiğinde, boyutlarında değişme görülür. Özellikle demir, nikel, kobalt gibi ferromanyetik metaller ve permandur, heusler, gadolinium, kromium,... gibi alaşımlarda daha belirli olarak görülen bu olaya manyetostriksiyon denir. Piezoelektrik olay gibi manyeto-

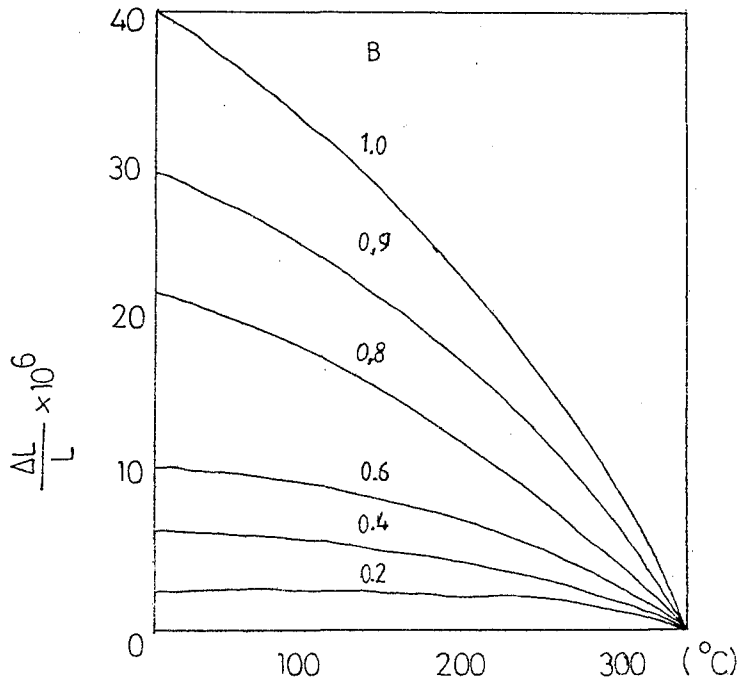


Şekil 3.4. Bazı ferromanyetik materyallerin manyetik alanda gösterdikleri boyuna manyetostriksiyon (Gündüz, 1968).

striksiyon da tersinirlik özelliği gösterir. Yani; sözü edilen maddelere uygulanılacak bir sıkıştırma ve genleştirme sonucu maddenin manyetik özelliklerinde değişmeler olur ve buna bağlı bir manyetik alan ortaya çıkar, aynı maddeler bir manyetik alana girildiğinde boyutlarında değişmeler gözlenir.

Görülen boyut değişimlerinin en önemlisi boyuna manyetostriksiyon veya Joule olayı denilen uzunlukça şekil değişimleridir. Bazı ferromanyetik materyallerin manyetik alanda gösterdikleri boyuna manyetostriksiyon Şekil 3.4'de görülmektedir. Demirin zayıf manyetik alanda uzama, kuvvetli manyetik alanda kısıalma göstermesine karşılık, nikelde alan şiddetiyle artan bir kısıalma gözlenir. Dökme kobalt ve tavllanmış kobalt alan değişmelerinde farklı davranırlar.

Ferromanyetik metaller sıcaklığa bağlı olarak manyetik özelliklerini değiştirirler. Şekil 3.5'de nikelin sıcaklığa bağlı



Şekil 3.5. Ferromanyetik nikelin sıcaklığa bağlılığı (Gündüz, 1968).

manyetostriksiyonu görülmektedir.

Manyetik akı yoğunluğunun  $B_0$  gibi bir değerden bir  $B$  değerine değişmesi halinde  $\sigma$  gerilimi  $B_0 B$  ile orantılıdır. Akı yoğunluğu weber/m<sup>2</sup> cinsinden alınır, nikel için,

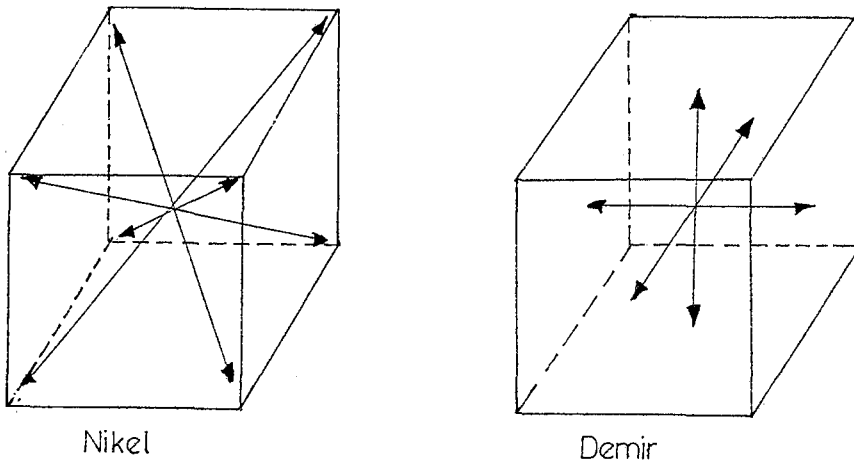
$$\sigma = 0,002 B_0 B \quad (3.5)$$

eşitliği yazılabilir. 0,002 katsayısı piezoelektrik modülü gibi hakiki bir sabit olmayıp  $B_0$ 'a bağlıdır. Yukarıdaki eşitlikte  $B_0 = 0.5$  weber/m<sup>2</sup>'dir. En genel halde gerilme,

$$\sigma = mB \quad (3.6)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada m, manyetostriktif sabittir (Richardson, 1962).

Manyetostriksiyon, Weiss bölgeleri teorisi ile açıklanabilir: Bir atomun manyetik özellikleri onun dış elektron düzenine bağlıdır. Bir çok atom da elektronların manyetik etkileri birbirini hemen hemen nötralleştirir. Atomları bir manyetik momente

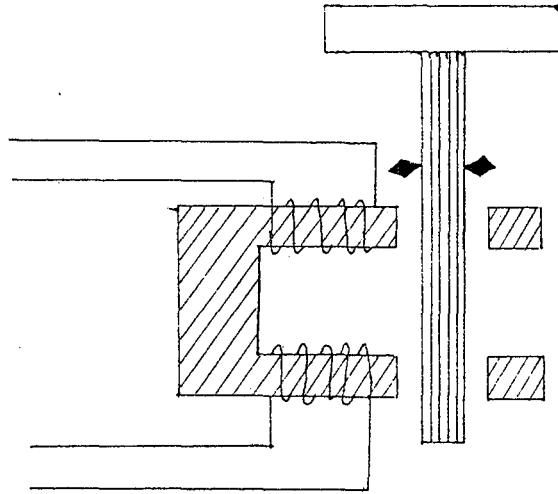


Şekil 3.6. Demir ve nikel için kolay mıknatıslanma yönleri.

sahip bazı metallerde ise, bu manyetik momentlerin uzayda gelişigüzel yönelmesi, atom gruplarının toplam manyetik momentlerini sıfır kılar. Ferromanyetik materyaller bu bakımdan bir ayrıcalık gösterirler. Bu sistemlerde  $10^{-8} - 10^{-9}$  cm<sup>3</sup>'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. Örneğin, demir ve nikel kübik kristalleri kolay mıknatıslama yön-

leri Şekil 3.6'da görülmektedir. Dış manyetik alanın artması ile kristal, alanın en büyük olduğu belirli doğrultuya yönelir. Bu durum, bütün Weiss bölgeleri manyetik alan doğrultusunu alıncaya kadar devam eder.

En basit manyetostriktif verici, manyetostriksiyon özelliği gösteren bir metal çubuğu bir selenoid içine yerleştirmek suretiyle yapılabilir. Sarımlara uygulanan sinüzoidal alternatif geri-



Şekil 3.7. Bir manyetostriktif çubukla yapılan ultrases vericisi (Gündüz, 1968).

lim çubuğu boyuna titreşime zorlar. Çubuğun boyuna titreşim frekansı uyarıcı frekansın iki katıdır. Böylece, çubuğun ucu bir ultrases kaynağı haline geçer. Şekil 3.7'de transformatör içine yerleştirilmiş bir manyetostriktif çubukla yapılmış bir verici görülmektedir. En büyük gücü elde edebilmek için çubuk bir uçundan sabit kılınmıştır.

Şekildeki gibi bir çubuk vericinin öz titreşim frekansı ve harmonikleri,

$$f = \frac{2n+1}{2l\psi} \quad (3.7)$$

eşitliği ile bulunur.

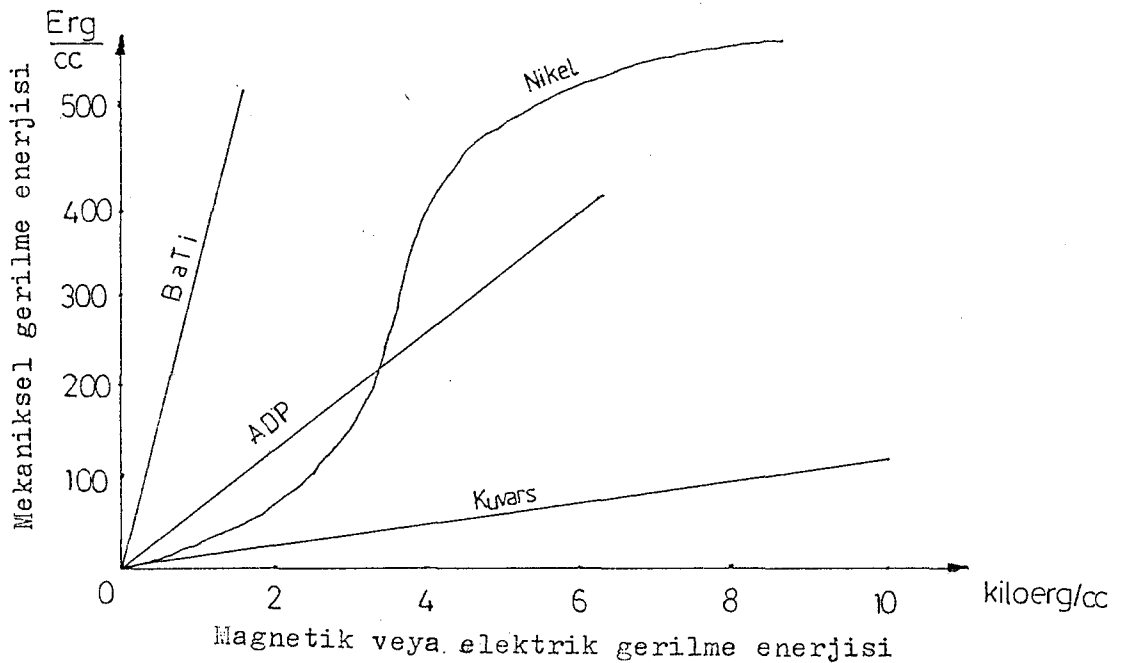
$n = 0, 1, 2, 3, \dots, L$ , çubuğun uzunluğu,  $\psi$  çubuk içindeki ses hızıdır. Örneğin nikelli bir verici için öz titreşim frekansı,

$$f = \frac{237}{l} \text{ kHz} \quad (3.8)$$

dır.

### 3.1.3. Elektrostriksiyon

Dielektrik cisimler elektrik alana getirildiklerinde boyları uzar ve kısalır, bu olayı gösteren cisimler aynı zamanda ferroelektriktir. Cisimin doğasındaki elektrik dipoller uygulanan alanlar tarafından yöneltilir. Müsaade edilen en yüksek elektrik-



Şekil 3.8. Çeşitli tip ultrasonik transduserlerin verimi (Richardson, 1962).

sel yerdeğişimi  $D$ , sırasıyla gövdenin şekline veya boyutlarının

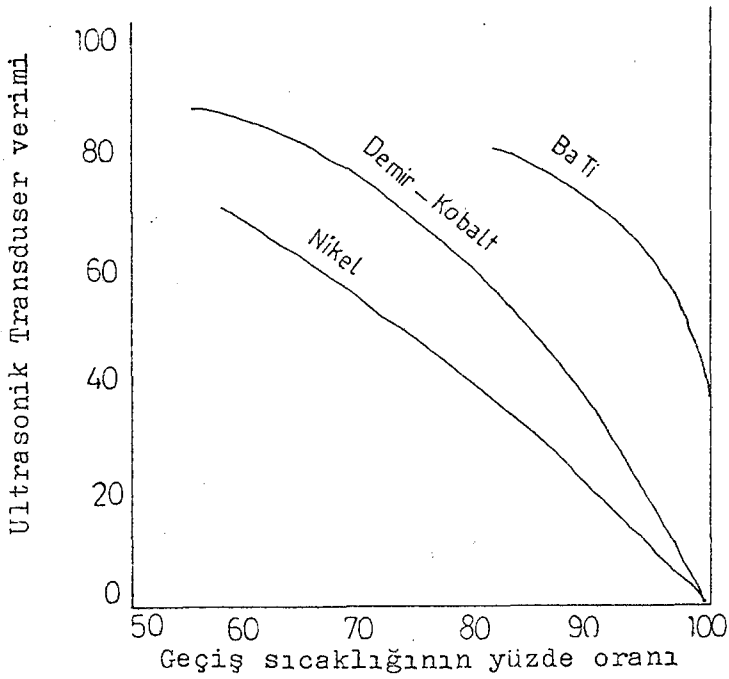
değişimine ve mekaniksel baskılara bağlıdır. Çok büyük mekaniksel orana sahip elektrik gerilmeler amaçlarımız için çok daha uygun olacaktır. Bu durumda  $\sigma$  gerilme olmak üzere,

$$\sigma = eD \quad (3.9)$$

burada  $e$ , elektrostriktif sabittir,  $D$ 'de yukarıda da bahsedildiği gibi elektriksel yerdeğişimdir. Bazen uzama kısalma elektrik alanının şiddetinin karesiyle orantılıdır.

Dört ayrı materyal için bu gerilmeler arasındaki bağıntı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bağıntı üç elektrostriktif yapı için lineerdir ve manyetostriktif nikel için S biçimindedir. Baryumtitanatın üstünlüğü çok belirgin olarak görülmektedir.

Bütün bu materyaller kendilerine özgü bu davranışları geçiş sıcaklığı denilen Curie sıcaklığında kaybederler. Bunun sebebi de polaritenin azalması sonucu kristal örgünün tekrar düzenlenmesidir. Şekil 3.9'da bu sıcaklıklara yaklaşıldıkça, üç yapı için



Şekil 3.9. Sıcaklığın fonksiyonu olarak ultrasonik transduserlerin verimliliği (Richardson, 1962).

elektro veya magnetostriktif verimliliğin azalışı gösterilmiştir.

Normal sıcaklıklardan geçiş noktasının ( $120^{\circ}\text{C}$ ) % 95'ine ulaşıldığı sıcaklıklara kadar yüksek değerlerde baryumtitanatın piezoelektrikliğini koruması sebebiyle sahip olduğu üstünlük görülmektedir.

### 3.2. Bağlantı

Transduser kuru olarak numuneye takıldığı zaman ses dalgası ara yüzeyi (hava tabakası) geçemez. Bu nedenle hava, yoğunluğu daha yüksek olan uygun bir madde tarafından ara yüzeyinden uzaklaştırılmalıdır (Sıfır geçişe veya yüksek azalmaya sebep olabilecek hava boşluğu). Normal sıcaklıklarda boyuna dalgaların oluşumu için, bir yağ tabakası veya diğer bir uygun sıvı tabakası yeterlidir. Fakat, o sıvının katılaşmaya başladığı düşük sıcaklıklarda, sürekli impedans karakteristiği kaybını önlemek için yüksek vakum gresi kullanmak zorunludur. Çok yüksek sıcaklıklarda çalışma için buharlaşmayan bağlantı elemanı seçilmek zorundadır.

Enine dalga yayını için bağlantı, makaslama uygulamalarına karşı koyabilecek yeterlikte sert olmalıdır. Bazen ağır yağ ince gress filmler bu amaç için kullanılır, fakat suni reçine gibi bir yapışkan kullanmak çok daha uygundur (Anık ve Anık, 1977).

#### 4. ULTRASES HIZ VE SÖNÜM ÖLÇÜM METODLARI

Bir maddenin molekül yapısını inceleyebilmek için çeşitli metodlar geliştirilmiştir. Bu metodlardan biri de ortama ultrases dalgaları gönderip geri almak ve sonuçları yorumlamaktır. Çalışmalar, ultrases dalgalarının o ortam içindeki yayılma hızı ve enerjilerinin soğurumu ölçümlerine yöneliktir. Bu iki akustik büyüklüğün çok duyarlıklı ölçülebilmesi, hem molekül özelliklerinin tam öğrenilebilmesi hem de teorik bağıntıların iyi denetlenebilmesi ve geliştirilebilmesi yönünden önemlidir. Bu sebeple gaz, sıvı ve katı ortamlarda ölçümler yapılırken en ideal duyarlığın sağlanması amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunları,

a) Ölçü ortamlarına sürekli ultrases dalgalarının,

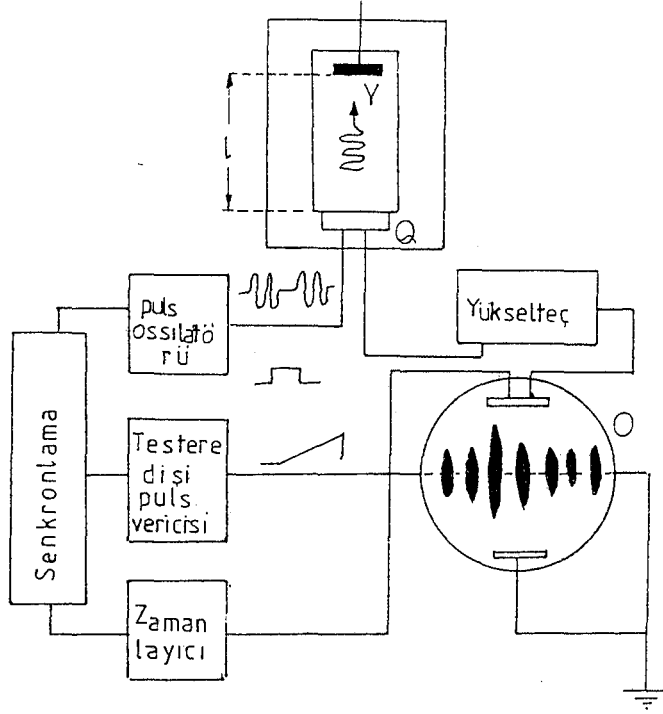
b) Ölçü ortamlarına aralıklı ultrases dalgalarının (ses pulslarının) uygulandığı ve ölçümlerin değerlendirildiği yöntemler olmak üzere başlıca iki ana grupta toplayabiliriz (Bayer, 1983). Bu yöntemler yardımıyla hız ölçümü ve ses soğurulması ölçümünün her ikisi de ölçülebildiği gibi bazen sadece biri ölçülebilmektedir.

Bu yöntemlerden bazıları hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

##### 4.1. Yansımali Puls Yöntemi

Yöntemin basit şeması Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu sistemde hem ultrases üreten hem de bunu tekrar algılayan tek bir verici-alıcı Q kristali vardır. Y yansıtıcısı ile Q kristalinin yüzeyleri birbirine sonderece paralel olmalıdır. Yansıtıcının olmadığı durumda ise numunenin karşılıklı yüzeyleri aynı şekilde paralel olmak zorundadır.  $l$ , Q kristali ile Y yansıtıcı yüzeyi arasındaki uzaklıktır. Senkronlama aleti, saniyede en az 50 defa tekrarlanan Q kristalinin verdiği ses pulslarının zaman işaretleriyle, testere dişi veya kare dalga pulslarının aynı zamanlılığını sağlar.





Şekil 4.1. Yansımali puls yöntemi (Bayer, 1969).

Pulsların  $l$  ses yolunu gidiş-dönüş süresi  $\Delta t$  ise, bunların ölçü ortamındaki grup hızı,

$$v = \frac{2l}{\Delta t} \quad (4.1)$$

dir.

Bir ortam için önemli olan  $\alpha$  soğurma katsayısının ölçülmesi, hız ölçümünden daha zordur. İdeal deney koşulları altında soğurma halinde puls boyu üstel azalan bir fonksiyon değişimi gösterir (Şekil 4.2.a). Buna göre ortamın soğurma katsayısı,

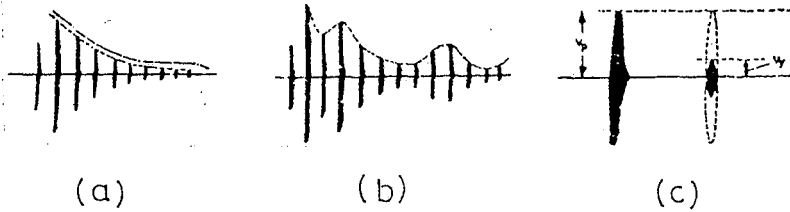
$$\alpha = \frac{1}{2l} \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \frac{I_2}{I_1} \quad (4.2)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $I_1$  ve  $I_2$  kristalden  $x_1$  ve  $x_2$  uzaklıklarındaki ses şiddetleridir.  $I$  ses şiddeti, ses ötesi pulslarının alıcı kristalde meydana getirdikleri gerilimin karesi ( $V^2$ ) ile orantılı olduğundan, büyük duyarlığın gerekli olmadığı durumlarda, ardarda iki  $V_1$  ve  $V_2$  gerilim pulsları için, ortamın soğurma katsa-

yısı;

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (4.3)$$

olur. Fakat verici ve yansıtıcı yüzeylerin tam paralel yapılmaması ve ses enerjisinin yansıtıcıda da soğurulması sebebiyle, puls boyu değişiminin Şekil 4.2.(a)'daki gibi değil Şekil 4.2.(b)'deki



Şekil 4.2. Ses pulslarının soğurulması,  
a) İdeal deney koşullarında,  
b) Deney hataları dikkate  
alındığında, c) İlk esas ve  
yansıyan pulslar

gibi olması, bu yöntemdeki hatalardan kaynaklanır. Bu durumda ilk esas ve yansıyan pulslar Şekil 4.2.(c)'deki gibi osiloskop ekranına alınır ve yansıyan puls için, yükseltgecin K şiddetlendirme katsayısı puls boyları eşit olacak şekilde seçilirse soğurma katsayısı daha doğru olarak,

$$\alpha = \frac{\ln K}{2l} \quad (4.4)$$

bağıntısı ile bulunabilir.

Yansımalı puls yönteminde yeni bir ses pulsu çıkmadan önce bütün yansımaların bitmesini sağlayan ve bir pulsun sonu vericiden çıkmadan, başlangıcının geri gelmesine imkan vermeyen 1 ses yolunun seçilmesi gerekmektedir. 1 ses yolunun değiştirilemediği durumlarda, puls süresi değiştirilerek bu koşullar sağlanabilir.

#### 4.2. Puls Yöntemi

Yansımali puls yöntemindeki bozucu etkileri gidermek üzere geliştirilmiş bu yöntemde verici-alıcı olmak üzere iki kristal ile sönümleyici kullanılmaktadır.  $Q_v$  ve  $Q_a$  kristallerinin gönderdiği pulslar osiloskop ekranında aynı anda görülebilir. Pulsların  $l$  ses yolunu geçmesi için gereken süre  $t$  ise, ses hızı,

$$v = \frac{l}{t} \quad (4.5)$$

dır.  $t$  süresi osiloskop ekranındaki zaman işaretlerinden ölçülür.  $Q_a$  alıcı kristali hareketli yapıldığında ölçü şöyle yapılır; alınan puls bir zaman işareti ile çakışması için  $\Delta l$  kadar sürülürse ses hızı,

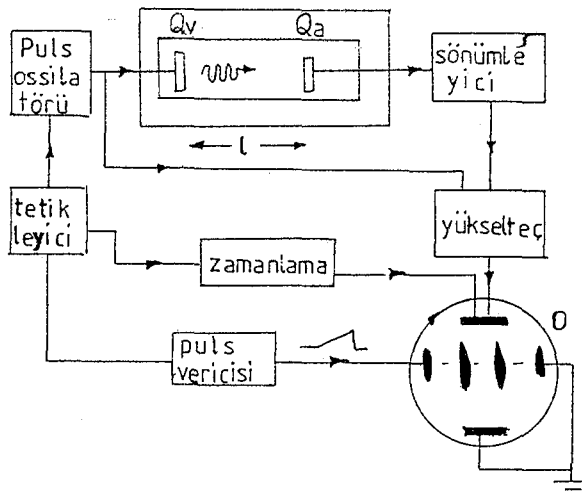
$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (4.6)$$

olur.

Soğurma katsayısı  $Q_a$ 'da oluşan puls genliğinin ilk esas puls genliğine göre ne kadar küçüldüğü sönümleyiciden okunur ve yansımali puls yönteminde olduğu gibi,

$$\alpha = \frac{\ln K}{l} \quad (4.7)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $K$ , sönümleyiciden okunan ve alı-



Şekil 4.3. Puls geçme Yöntemi (Bayer, 1969).

nan puls boyunun ne kadar küçüldüğünü gösteren katsayıdır.

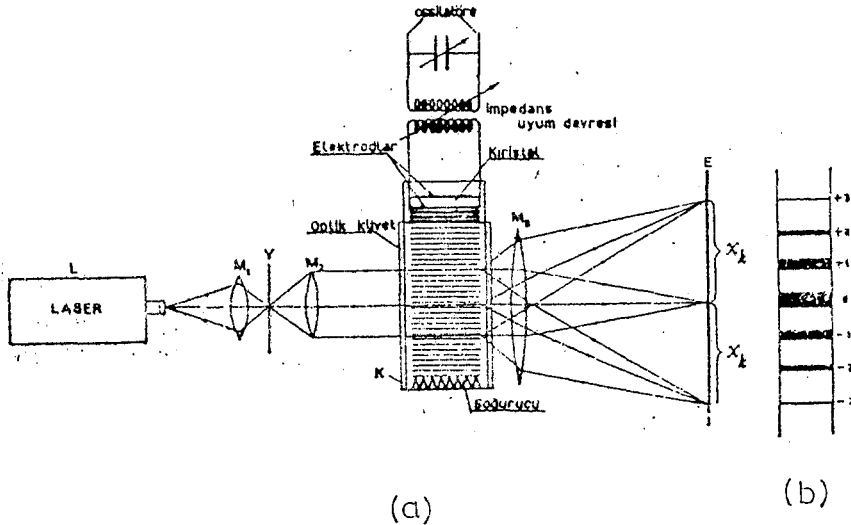
Esas puls genliğinin kullanılmadığı durumlarda, alıcı kristalde oluşan V pulsunun osiloskop ekranında ölçülen genliği, alıcı kristal  $\Delta l$  kadar hareket ettirildiğinde  $\Delta V$  kadar değişirse, söğürma katsayısı,

$$\alpha = \frac{1}{\Delta l} \ln \left( 1 + \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (4.8)$$

bağıntısından bulunabilir.

#### 4.3. Optik Metod

Bu metod, sıvılarda ultrases hızı ölçümüne yönelik bir metoddur. Ultrases dalgalarının yayıldığı saydam ortamdan geçen ışığın kırınıma uğrayacağından ilk olarak Briloin bahsetmiştir. Bu olay 1932 yılında P. Debye- F. Sears ve R. Lucar- P. Biquard



Şekil 4.4. a) Optik yöntemin esası, b) Ekran üzerinde beklenen kırınım deseni (Bayer, 1980).

tarafından deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Ses dalgalarının

ışık dalgalarına karşı gösterdiği etkiye "ses ağı efekti" denir.

Deney düzeneği, Şekil 4.4'de gösterilmektedir. L ışık kaynağından çıkan tek dalgaboylu laser ışığı,  $M_1$  merceği tarafından Y yarığında toplanır. Y yarığından çıkan ışık ışınları  $M_2$  merceği ile paralel kılındıktan sonra karşılıklı yüzeyleri paralel K optik küvetine geçer.  $M_3$  merceği E ekranında kırınım saçakları oluşturur.

Kırınım saçaklarının oluşumu şöyle açıklanabilir; sesötesi dalgaların geçtiği ortam birbirine bağlı silindirik mercekler dizisi gibidir. Bu merceklerden herbiri,  $M_2$  merceğinden gelen ışınları saçılmaya uğratar. N frekanslı,  $\Lambda$  dalgaboylu düzlem ışık dalgaları, f frekanslı ve  $\lambda$  dalgaboylu ses dalgalarının yayılma doğrultusuna dik olarak ses alanını kat etsin. Eğer, dalgaboyu büyük, ses yolunun genişliği dar olursa ışık dalgalarının paralel ve doğru gittiği kabul edilebilir. Işık ışınlarının doğru ve paralel gitmelerine karşın faz cepheleri düzlem olarak kalmaz. Işık dalgaları minimum kırılma indisli bölgelere kıyasla maksimum kırılma indisli bölgede daha yavaş giderler. Buna göre düzlem ışık dalgaları yayılma doğrultusuna dik olarak ses dalgalarını geçerse, ses dalgaları ışık ışınlarına faz ağı gibi davranır. Işık dalgaları ses alanından çıkarken genliği sabit olduğu halde, fazı ses dalgaboyu ile periyodik olarak değişmektedir. Böylece daha yüksek mertebeden kırınım saçaklarının oluşumu kolayca anlaşılır.

Ses hızı hesaplamada kullanılan bağlantı,

$$\sin\theta = \frac{k \cdot \Lambda}{\lambda} \quad (4.9)$$

Fraunhofer şebeke formülünden çıkarılabilir.  $\Lambda$  ,  $\lambda$  yanında çok küçük olduğundan,

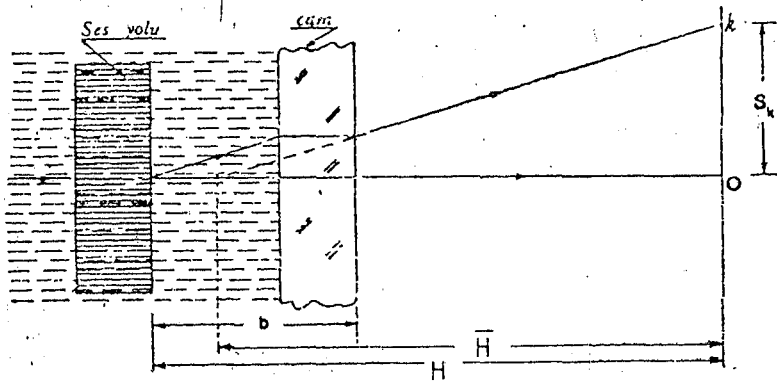
$$\sin\theta = \frac{s_k}{H} = \tan\theta = \frac{k\Lambda}{\lambda} = \frac{k\Lambda f}{v}$$

ve

$$v = \frac{k\Lambda f H}{s_k} \quad (4.10)$$

bulunur. Burada  $H$  ses yolunun ekrana,  $S_k$   $k$ 'nci mertebe kırınım saçağının sıfırinci mertebeye olan uzaklığıdır.

Optik şebekede kırınan ışık yalnız camdan havaya geçtiği halde, burada sıvı-cam ve cam-hava sınırlarında iki defa kırıldıktan sonra ekrana düşer. Düzeltilmiş  $\bar{H}$  uzaklığı ile  $H$  arasındaki



Şekil 4.5.  $k$ 'nci mertebe kırınım ışınının gidişi (Bayer, 1980).

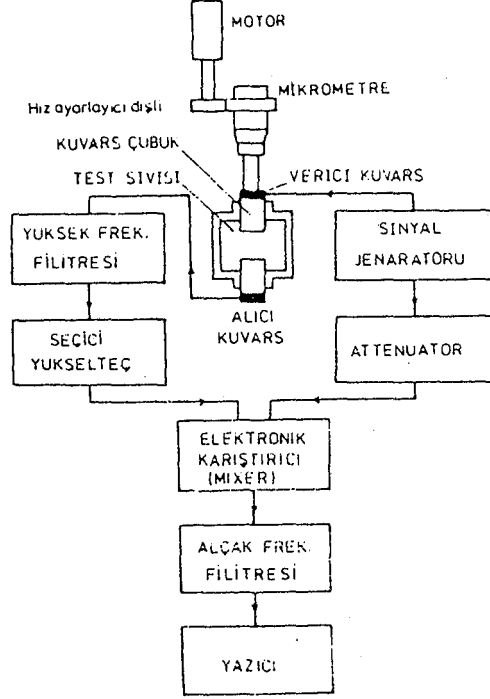
bağıntı kırılma kanunlarında dikkate alınması ile bulunabilir.

$$H = \bar{H} + b \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (4.11)$$

Burada  $b$ , ses yolu ile cam yüzey arasındaki uzaklık,  $n$  ise optik kırılma indisidir.

#### 4.4. Korelasyon Yöntemi

Teorisi M. Sadlacek tarafından geliştirilen bu yöntemde, ses soğurulması ve hızının ölçüldüğü bütün yöntemlere ilişkin kusurların düzeltilmesi amaçlanmıştır. 5-45 MHz frekans bölgesinde sıvılarda ilerleyen sürekli ses dalgalarının soğurulması ve hızını

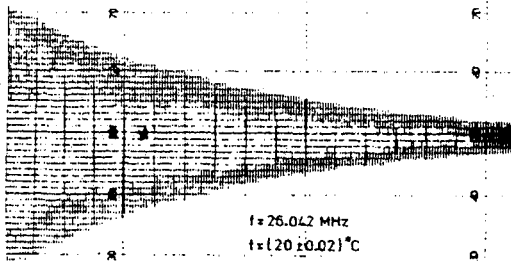


Şekil 4.6. Korelasyon yöntemine ait deney düzeneğinin şeması (Bayer, 1983).

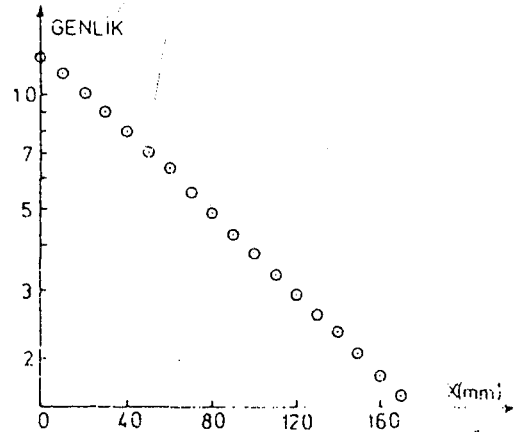
ölçmeyi mümkün kılan deney düzeneğinin tamamı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Buna göre düzeneği; i) 30 cm<sup>3</sup>'lük cam ölçü kabını, temel titreşim frekansı 5 MHz olan x-kesit alıcı verici kuvarş kristalleri ve dalga klavuzu iki kuvarş çubuğu kapsayan interferometre, ii) Sinyal jeneratörünü, seçici yükseltici, işlem yükselticini, süzme devrelerini ve yazıcıyı içeren elektronik kısım, iii) Ölçü ortamının sıcaklığını sabit tutmaya yarayan termostat olmak üzere üç kısma ayırabiliriz.

Verici kristale uygulanan  $f_0$  frekanslı alternatif gerilim yardımıyla elde edilen düzlem ses dalgaları, ölçüm sıvısını geçerken soğurulurlar ve alıcı kristalde tekrar alternatif gerilime dönüşürler. Verici kristal bir motorla küçük bir hızla sürülürse,



Şekil 4.7. Ölçü ortamında verici kuvars kristalin hareketi süresince, alıcı kristale ulaşan ses dalgalarının genlik değişimi (Bayer, 1983).



Şekil 4.8. Yandaki şeklin genlik değişiminin x-uzaklığına göre değişimi (Bayer, 1983).

$f_0$  frekanslı sinyalle alıcıdan alınan arasında,

$$\Delta f = f_0 \frac{v'}{v} \quad (4.12)$$

ifadesiyle verilen bir "Doppler kayması" oluşur. Burada  $v'$ , verici kristalin hareket,  $v$  'de ses dalgalarının yayılma hızları olup  $v' \ll v$  'dir. Doppler kayması etkisini de içine alan alternatif gerilim, bir elektronik devreden geçtikten sonra bir x-t yazıcısında kaydedilir. Şekil 4.7,  $\Delta f$  kaymasından ultrases hızı, alınan sinyal zarfından da  $\alpha$  soğurulma katsayısı bulunabilir (Şekil 4.8).

#### 4.5. İnterferometrik Metod

Burada da kaynak olarak kuvars kristali kullanılır. İlk defa Pierce bu yöntemden yararlanmış ve aynı zamanda magnetostatik özellik gösteren çubukla da ölçüler yapılmıştır. Sistem ya iki kristalli veya tek yansıtıcılıdır. Kuvarsın yüzeyi düzlem olsun ve boyutlar, dalgaboyuna göre büyük seçilsin böyleki düzlem ultrases dalgaları üretsün (Örneğin, havada ses hızı ölçülüyorsa



200 kHz için dalgaboyu 1.6 mm'dir. 2 MHz için ise 0.16 mm, kuvars kristalin çapını 100 dalgaboyu almak istersek 200 kHz için 16 cm ve 2 MHz için 1.6 cm almalıyız. O halde hassas bir ölçüm yapmak için 200 kHz alçak frekans sınırındadır), bu düzlem dalga yansıtıcıdan yansır ve geri döner. Yansıtıcı ile kuvars arası uzaklık yarım dalgaboyunun katları ise bu arada duran dalgalar oluşur ve kuvars yüzeyinden çıkan dalga ile dönen arasında  $180^\circ$ 'lik bir faz farkı bulunur. Bu ise kristalin bağlı bulunduğu osilatörün anod akımında bariz bir artmaya sebep olur. Yansıtıcı hareket ettirildikçe her  $\lambda/2$  kadar gittikçe böyle bir maksimum oluşacaktır. Yansıtıcının hareketi esnasında gittiği yol bir frekansmetre yardımıyla ölçülürse buradan  $\lambda \sim \pi / n$  'den hız hesaplanabilir. Bu düzende esas, dalgaboyunu ölçmek olduğu için interferometre metodu denir.

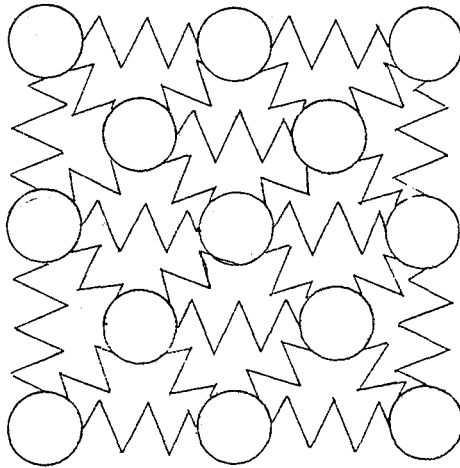
## 5. KATI, SIVI VE GAZ ORTAMLARDA ULTRASES

### 5.1. Katılarda Ses hızı

#### 5.1.1. Elastik bir ortamda yayılma

Katı cisimlerin elastik kuvvetlerle birbirine bağlı olan ve birbirlerinin pozisyonuna göre hareket eden küçük parçacıklardan meydana geldiğini tasavvur edelim (Şekil 5.1).

Bu parçacıklar herhangi bir etkiye maruz kaldıklarında titreşmeye başlar ve kendi enerjilerini yanlarındaki parçacıklara geçirirler. Böylece enerji cismi teşkil eden bütün parçacıklara



Şekil 5.1. Katıdaki parçacıkların bir-birlerine göre durumlarının basit tasavvuru.

yayılır. Sesi yaratabilmek için de bir maddesel ortam titreşime zorlanmalıdır. Sesin yayılmasında ancak maddesel ortamda mümkündür. Bir parçacığın titreşimi onun denge konumu etrafında gidip gelme hareketidir. Bu hareket zaman eksenine üzerine açılarak bir dalga halinde resmedilir (Anık ve Anık, 1977). Dalga,

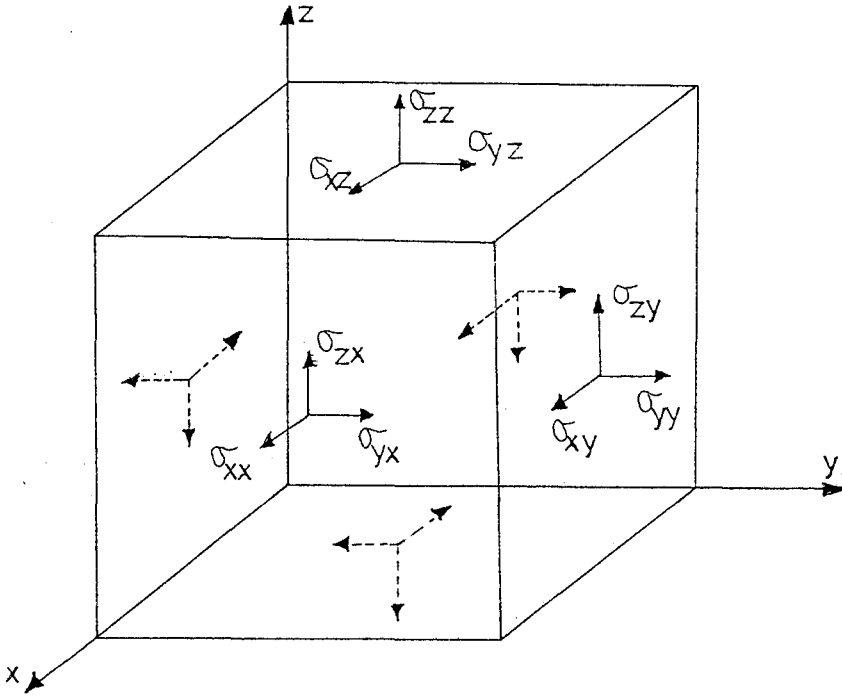
titreşen parçacığın akıp giden zaman içinde titreşim genliğinin bir maksimum ile bir minimum arasında salınımı gösterir.

Bir hacim elemanı üzerinde gerilim ve deformasyon bileşenlerini inceleyelim:

Bir yüzey elemanına tesir eden gerilim genellikle yüzeye dik değildir. Yüzeye dik ve paralel bileşenleri vardır. Eğer cismi birbirine dik üç  $ox$ ,  $oy$ ,  $oz$  eksenleri ile gösterirsek ve bu eksenlere dik bir  $P$  noktasından geçen düzlemlere etki eden gerilimleri

dikkate alırsak, gerilimin  $\sigma_{xx}$  ,  $\sigma_{yy}$  ,  $\sigma_{zz}$  ,  $\sigma_{xy}$  ,  $\sigma_{xz}$  ,  $\sigma_{yz}$  ,  $\sigma_{yx}$  ,  $\sigma_{zx}$  ,  $\sigma_{zy}$  gibi dokuz bileşeni olacaktır. Birinci indis gerilimin doğrultusunu, ikinci indis gerilimin hangi düzleme etki ettiğini gösterir.

P noktası etrafında yüzeyleri eksenlere dik bir hacim elemanı alalım (Şekil 5.2). Denge halinde momentler alınır, görülür ki  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$  ,  $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$  ,  $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$  'dir. Bu yüzden



Şekil 5.2. Hacim elemanı üzerinde gerilim bileşenleri.

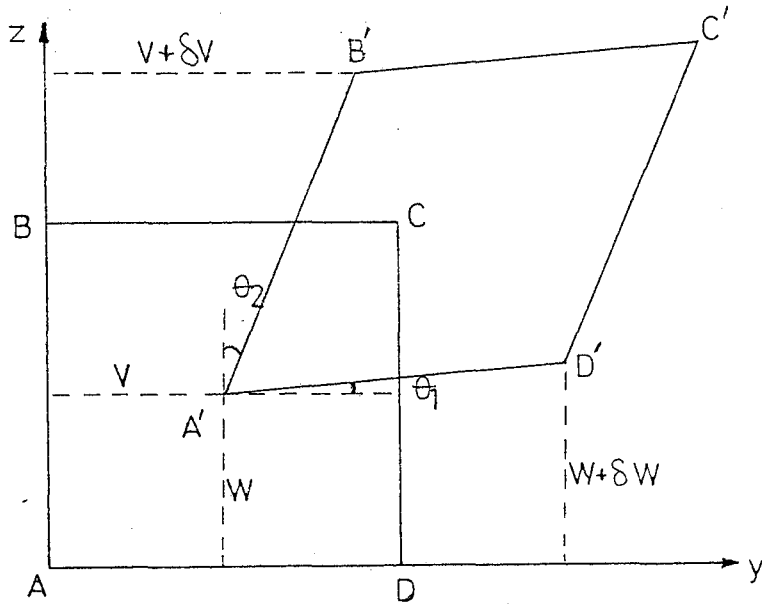
birbirinden bağımsız altı bileşen kalır. Bu altı bileşen bilinirse P'den geçen herhangi bir yüzey elemanına tesir eden gerilim bulunabilir. Yani bu altı bileşen P noktasındaki gerilimi mutlak olarak tarif etmiş olur.

Herhangi bir P noktasının, kuvvet etkisi sonucu yerdeğiştir-

me miktarının bileşenleri  $U, V, W$  olsun. Yani bu noktanın koordinatları önce  $X, Y, Z$  ise yerdeğiştirmeden sonra  $X+U, Y+V, Z+W$  olur. Bu noktaya yakın başka bir noktanın koordinatları  $(X+\delta x, Y+\delta y, Z+\delta z)$  ve bu noktanın yerdeğiştirme miktarının bileşenleri  $(U+\delta u, V+\delta v, W+\delta w)$  olsun. Eğer  $\delta x, \delta y, \delta z$  kafi derece küçükse,

$$\begin{aligned}\delta u &= \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \delta z \\ \delta v &= \frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y + \frac{\partial v}{\partial z} \delta z \\ \delta w &= \frac{\partial w}{\partial x} \delta x + \frac{\partial w}{\partial y} \delta y + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z\end{aligned}\quad (5.1)$$

$\partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial u/\partial z, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y, \partial v/\partial z, \partial w/\partial x, \partial w/\partial y, \partial w/\partial z$  bilinirse, P noktası civarındaki bütün noktadaki izafi yerdeğiştirme bulunabilir. Bu ise P noktasındaki deformasyonun mutlak olarak değerini verir.



Şekil 5.3. Bir yüzey elemanının deformasyonu

Bu dokuz değer, kolaylık bakımından aşağıdaki tarzda gruplanabilir.

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$e_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad e_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad e_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$2w_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad 2w_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad 2w_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

İlk sıradaki ifadeler sırasıyla x, y, z eksenleri boyunca izafi uzama ve daralmaya karşılık gelir. Diğer iki sıradakilerin neye karşılık geldiklerini anlamak için iki boyutlu bir deformasyon alalım. Şekil 5.3, bir ABCD yüzey elemanı, yerdeğiştirme ve deformasyondan sonra A'B'C'D' durumuna gelsin. Şekilden görüldüğü üzere,

$$\tan\theta_1 = \frac{\delta w}{\delta y} \quad , \quad \tan\theta_2 = \frac{\delta v}{\delta z}$$

dır. Küçük açılar için  $\theta_1 + \theta_2 = e_{yz}$  olur.

Bu ise kayma (makaslama) deformasyonudur. Gene şekilden  $2w_x = \theta_1 - \theta_2$  'nin AC'nin dönme açısının iki katına karşılık geldiği görülebilir. O halde bu üç değer rotasyonu, diğer ilk altısı yalnız deformasyonu tarif eder.

### 5.1.2. Hooke kanunu

Elastik bir cisimde, kuvvet elastiklik sınırını aşmaz ise, deformasyon kuvvetle orantılıdır. O halde gerilimin altı bileşenin her biri deformasyonun altı bileşeninin lineer fonksiyonudur.

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= C_{11} \epsilon_{xx} + C_{12} \epsilon_{yy} + C_{13} \epsilon_{zz} + C_{14} \epsilon_{yz} + C_{15} \epsilon_{zx} + C_{16} \epsilon_{xy} \\
\sigma_{yy} &= C_{21} \epsilon_{xx} + C_{22} \epsilon_{yy} + C_{23} \epsilon_{zz} + C_{24} \epsilon_{yz} + C_{25} \epsilon_{zx} + C_{26} \epsilon_{xy} \\
\sigma_{zz} &= C_{31} \epsilon_{xx} + C_{32} \epsilon_{yy} + C_{33} \epsilon_{zz} + C_{34} \epsilon_{yz} + C_{35} \epsilon_{zx} + C_{36} \epsilon_{xy} \\
\sigma_{yz} &= C_{41} \epsilon_{xx} + C_{42} \epsilon_{yy} + C_{43} \epsilon_{zz} + C_{44} \epsilon_{yz} + C_{45} \epsilon_{zx} + C_{46} \epsilon_{xy} \\
\sigma_{zx} &= C_{51} \epsilon_{xx} + C_{52} \epsilon_{yy} + C_{53} \epsilon_{zz} + C_{54} \epsilon_{yz} + C_{55} \epsilon_{zx} + C_{56} \epsilon_{xy} \\
\sigma_{xy} &= C_{61} \epsilon_{xx} + C_{62} \epsilon_{yy} + C_{63} \epsilon_{zz} + C_{64} \epsilon_{yz} + C_{65} \epsilon_{zx} + C_{66} \epsilon_{xy}
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Buradaki 36 sabit maddenin elastik sabitleridir. Elastik enerji deformasyonun tek değerli bir fonksiyonu olması şartı ile  $C_{ij} = C_{ji}$  olduğu gösterilebilir. Böylece elastik sabitlerin sayısı 36'dan 21'e iner. O halde hiç bir simetriye sahip olmayan anizotropik bir maddenin elastik özellikleri, ancak 21 bağımsız sabitin bilinmesiyle mümkün olur. Fakat maddenin simetri eksenleri veya düzlemleri varsa sabitlerin sayısı azalır. Mesela kübik bir kristalde yalnız üç bağımsız sabit vardır. Ultrases elde etmekte kullanılan kuvars kristalinde ise sabitlerin sayısı altıdır. İzotrop bir katı cisimde bu sabitlerin değeri dik eksenlerin seçimine bağlı değildir. Bu özellik (5.2) numaralı eşitliklere tatbik edilirse, sabitlerin sayısı ikiye iner. Bunları  $\lambda$  ve  $\mu$  ile gösterirsek

$$C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = \lambda$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu$$

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu$$

diğer 24 tanesi sıfır olur. Hooke kanununun bu özel haldeki şekli:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) e_{xx} + \lambda e_{yy} + \lambda e_{zz} \\
\sigma_{yy} &= \lambda e_{xx} + (\lambda + 2\mu) e_{yy} + \lambda e_{zz} \\
\sigma_{zz} &= \lambda e_{xx} + \lambda e_{yy} + (\lambda + 2\mu) e_{zz} \\
\sigma_{yz} &= \mu e_{yz} \\
\sigma_{zx} &= \mu e_{zx} \\
\sigma_{xy} &= \mu e_{xy}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

$\mu$  ve  $\lambda$  'ya Lamé sabitleri denir.

Silindir veya dikdörtgenler prizması şeklinde bir çubuğa eksenini boyunca alt ve üst yüzeylerinden üniform bir kuvvet uygulan-sın. X eksenini cismin eksenini boyunca seçecek olursak,  $\sigma_{xx}$  bileşeninden başka gerilim bileşenleri sıfır olur.



$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) e_{xx} + \lambda e_{yy} + \lambda e_{zz} \\
0 &= \lambda e_{xx} + (\lambda + 2\mu) e_{yy} + \lambda e_{zz} \\
0 &= \lambda e_{xx} + \lambda e_{yy} + (\lambda + 2\mu) e_{zz}
\end{aligned}$$

(5.3) ifadelerinden  $e_{xx}$ ,  $e_{yy}$ ,  $e_{zz}$  uzama ve kısılma değerleri,

$$e_{xx} = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)} \sigma_{xx} \quad e_{yy} = e_{zz} = - \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \sigma_{xx} \tag{5.4}$$

olarak bulunur.

Pratik kolaylık için başka elastik sabitler de tarif edilmiştir. Bunların sırasıyla tariflerini yapıp bu özel hal için değerini  $\lambda$  ve  $\mu$  cinsinden hesap edelim,

$$\text{Young modülü} \quad E = \frac{\sigma_{xx}}{e_{xx}} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (5.5)$$

$$\text{Poisson sabiti} \quad \nu = -\frac{\sigma_{yy}}{e_{xx}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (5.6)$$

katı cismin her tarafından üniform bir P basıncı tesirinde kalırsa,

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -P$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{yx} = \sigma_{xy} = 0$$

olur. İzafi hacim değişmesi,  $-dV/V = -(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz})$ ;

$$\text{Hacim elastisite modülü} \quad U = \frac{-P}{-dV/V} = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad (5.7)$$

ve son olarak kayma (makaslama veya burulma) modülü G ise kayma geriliminin kayma deformasyonuna oranıdır (Aral,1979),

$$\text{Kayma modülü} \quad G = \frac{\sigma_{xy}}{e_{xy}} = \mu \quad (5.8)$$

### 5.1.3. Kübik yapı için ve izotrop yapı için elastisite sabitelerine bağlı ses hızları

Ultrases dalgalarının katı içerisinde yayılmaları kullanılarak o katının sahip olduğu elastisite sabiteleri tespit edilebilir. Bunun için, enine ve boyuna dalgaların katıya gönderildikleri doğrultulara göre yayılma hızları ölçülmektedir (Aral, 1987).

Örneğin, kübik yapıda boyuna dalgaların yayılma hızı,

$$v_b = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (5.9)$$

olarak bulunmuştur. Enine dalgaların yayılma hızı ise,



$$v_e = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (5.10)$$

olarak bulunmuştur.

Elde edilen bu hız ifadeleri saf titreşim durumlarına karşılık gelir. Yani dalga yayılım yönü ve titreşim eksenini x, y, z eksenlerinden sadece birinde oluşmaktadır. Kristal yapılarda yön gösteriminde kullanılan Miller indisleri ile bu yön  $[1\ 0\ 0]$  ( =  $[0\ 1\ 0]$  =  $[0\ 0\ 1]$  ) doğrultusuna karşılık gelir.

$[1\ 1\ 0]$  ( =  $[1\ 0\ 1]$  =  $[0\ 1\ 1]$  ) doğrultusunda boyuna dalga için hız ifadesi,

$$v_b = \sqrt{\frac{C_{11} + C_{12} + 2C_{44}}{2\rho}} \quad (5.11)$$

dir. Enine dalga için ise,

$$v_{e1} = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{2\rho}} \quad , \quad v_{e2} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (5.12)$$

olmak üzere dalga titreşim yönüne bağlı olarak iki tane hız ifadesi elde edilmektedir.

$[1\ 1\ 1]$  doğrultusunda boyuna dalga için hız ifadesi,

$$v_b = \sqrt{\frac{C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44}}{3\rho}} \quad (5.13)$$

dir. Enine dalga için ise,

$$v_e = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12} + C_{44}}{3\rho}} \quad (5.14)$$

ifadesi elde edilmektedir.

Homojen izotropik yapıda ise elastisite sabiteleri ikiye indiği için, enine dalga için hız ifadesi,

$$v_e = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5.15)$$

dir. Boyuna dalga için ise,

$$v_b = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (5.16)$$

olarak elde edilmiştir.

Kübik yapıya sahip bazı elementlerin elastisite sabiteleri değerleri, yoğunlukları ve doğrultulara göre hız değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir (Aral, 1976).

#### 5.1.4. Katılarda ses soğurumu

İdealde, ilerleyen ses dalgalarının paralel ışınlarının şiddeti kaynaktan bütün uzaklıklarda sabit kalacaktır. Pratikte ise durum böyle değildir. Çünkü, ortam içinde bir uçtan diğer uca yayılan ultrases dalgalarının şiddeti azalır. Katıda ultrases dalgalarının kayıpları birkaç farklı durumdan kaynaklanabilir. Kırınım, çarpışma ve soğurulma, kırınım ve çarpışma materyalin makroskopik yapısının ve şeklinin özelliklerindedir. Soğurulma ise materyalin mikroskopik yapısı ve fiziksel özelliklerinin karakteristiğidir.

Farzedelim ki ele alınan alan içerisinde tahmin edilen kırınım etkisi sabit olsun, kaynaktan herhangi bir doğrultuda x mesafe kadar uzaklaşılınca, A genlik değerinde eksponansiyel bir azalma bulunur. Yani,

$$A = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (5.17)$$

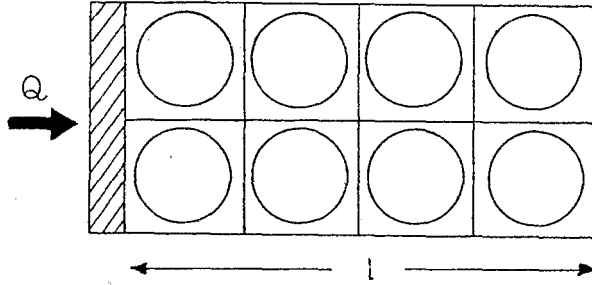
burada  $A_0$ ,  $x=0$  noktasındaki genliktir,  $\alpha$  ise ortama ait soğurma katsayısıdır.

Çizelge 5.1. Kübik kristal yapıya sahip maddelerde ses hızları (Truel, 1969).

Katı	gr/cm <sup>3</sup>	C (dyn/cm <sup>2</sup> )x10 <sup>11</sup>			Hız, V (cm/sn)x10 <sup>5</sup>					
	S	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>44</sub>	Boyuna [100]	Enine [100]	Boyuna [110]	Enine [110]	Boyuna [111]	Enine [111]
Alüminyum	2.70	10.69	6.26	2.85	6.29	3.26	6.47	2.86	6.53	3.00
Bakır	8.94	16.84	12.14	7.54	4.34	2.90	4.96	1.62	5.16	2.14
Elmas	3.51	107.6	12.50	57.58	17.5	12.8	18.3	11.6	18.6	12.0
Germanyum	5.32	12.89	4.83	6.71	4.92	3.55	5.41	2.75	5.56	3.04
Altın	19.32	18.6	15.7	4.20	3.10	1.47	3.33	0.866	3.39	1.10
Kurşun	11.34	4.66	3.92	1.44	2.03	1.13	2.25	0.57	2.32	0.80
Lityum	0.55	1.48	1.25	1.08	5.19	4.43	6.67	1.45	7.09	2.82
Molibten	10.19	46.0	17.6	11.0	6.72	3.29	6.48	3.73	8.19	2.39
Nikel	8.90	24.65	4.73	12.47	5.26	3.74	6.01	2.36	6.24	2.90
Potasyum	0.91	0.457	0.374	0.263	2.24	1.70	2.73	0.68	2.88	1.13
Silikon	2.33	16.57	6.39	7.96	8.43	5.85	9.13	4.67	9.35	5.09
Gümüş	10.49	12.20	9.15	4.48	3.41	2.07	3.79	1.20	3.92	1.55
Sodyum	1.01	0.615	0.469	0.592	2.44	2.41	3.31	0.84	3.58	1.55
Toryum	11.66	7.53	4.89	4.78	2.54	2.02	3.07	1.06	3.22	1.45
GaAs	5.31	1.92	0.599	0.538	1.90	1.01	1.84	1.11	1.82	1.08

## 5.2. Sıvılarda Ses Hızı Ve Soğurulması

Moleküllerin biçimi düşünülmeksizin Şekil 5.4'deki ultrase-  
sin yayılmasını açıklayalım; bir mol sıvıyı içine alan  $V$  hacminde



Şekil 5.4. Sesin sıvılarda yayılmasının izahı için basit bir örnek

olarak inceleyelim. Şekilde gösterildiği gibi her  $V/N_0$  hücre-  
sinde ortalama bir tek molekül bulunsun. Burada  $N_0$ , Avagadro sayıdır.  $Q$  ultra-  
ses yayan kuvars kristali olmak üzere, sağa yayılan ses pul-  
sunu kristale en ya-  
kın moleküller alır ve komşusuna iletir, onlarda komşularına

iletir. Bu pulsun  $l$  uzaklığındaki moleküllere erişebilmesi için geçen zaman her molekülün kendi elemanter hacmini katetmesi için gerekli zaman aralıklarının toplamına eşit olacaktır. Görüldüğü gibi ses pulsları molekülden moleküle çarpışmalar ile iletilmektedir (Bayer, 1988).

### 5.2.1. Ses hızı için temel bağıntılar

(5.15) ve (5.16) ifadelerindeki iki esneklik katsayısını geçerliliği, sadece cisimlerin izotropluğuna değil, daha çok mad-  
denin katı haline bağlıdır. Molekülleri kolayca hareket edebilen akışkan ortamlarda  $\mu$  makaslama modülüne karşılık gelen enine dal-  
galar meydana gelmez, sonuç olarak (5.16) formülündeki  $\mu$  ihmal edilirse sıvı ve gazlardaki faz hızı için,

$$v = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \quad (5.18)$$

bağıntısı bulunur.

sıkışma veya hacim esnekliği modülü,  $P$  şekil değiştir-

me basıncı altında bulunan akışkan ortam için Hooke yasasının ilk üç denkleminde elde edilen,

$$P = \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \lambda(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz})$$

ifadesinden bulunur. Burada  $(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz})$  hacim veya izafi yoğunluk değişimi olup,

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz} \quad (5.19)$$

dır. Böylece Lamé sabiti,

$$\lambda = \frac{P \rho}{\Delta \rho} \quad (5.20)$$

dur. Bu bağıntı Hooke yasasının geçerli olduğu bölgede bulunup, teori ve deneyde dp diferansiyel basıncı kullanıldığında, bunun sebep olacağı  $d\rho$  yoğunluk değişimi bulunur. Buna göre,

$$\lambda = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (5.21)$$

ve bu ifade (5.18)'de yerine yazılırsa,

$$v^2 = \frac{dP}{d\rho} \quad (5.22)$$

bulunur.

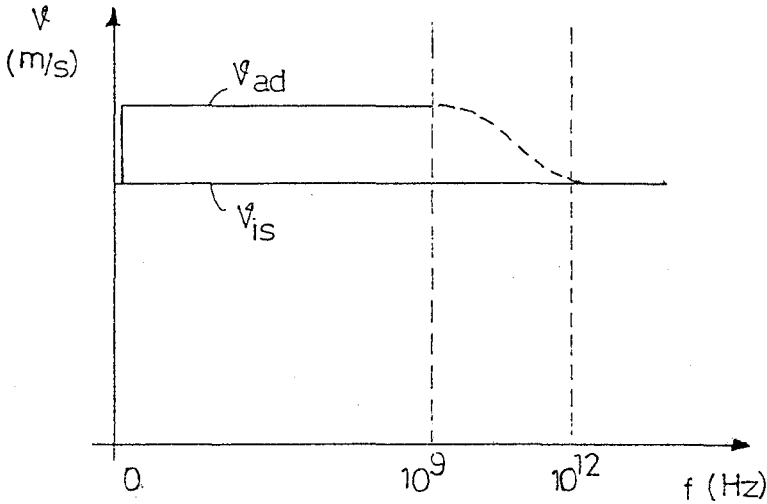
(5.22) ifadesi genel bir ifade olup, basınç ve sıcaklığın sabit olduğu her akışkan ortam için kullanılır. Ses hızı ile basınç ve sıcaklık arasında bir bağıntı aranırsa termik hal denkleminde diferansiyel kısım hesaplanır. Akustik olayların fiziki karakteri üzerine ilk gerçek araştırmayı yapan Newton, havada oda sıcaklığında ses hızının hesabında "PV=Sbt." Boyle-Mariotte hal denklemini kullandı ve 280 m/s değerini buldu. Laplace (1816) yılında akustik olayların çok hızlı bir değişim olduğunu; böyle olayların izotermik değişim olmayıp adyabatik değişim olacağını ileri sürdü ve "PV<sup>γ</sup>=Sbt." hal denklemini kullanarak ses hızı için deneysel değerlere uygun düşen 330 m/s değerini buldu. Bundan dolayı,

$$v_{is}^2 = \left( \frac{dP}{d\rho} \right)_T \quad (5.23)$$

Newton bağıntısı yerine,

$$v_{ad}^2 = \left( \frac{dP}{d\rho} \right)_S \quad (5.24)$$

bağıntısı kullanılır. S işareti, adyabatik olayın sabit entropide meydana geldiğini gösterir.



Şekil 5.5. Adyabatik ve izotermik durumlara göre ses hızı.

Ses ve sesötesi dalgalar izotermik olay olarak açıklanabilirse  $v_{is}$ ,  $f=0$ 'dan yüksek frekanslara kadar sabit kalabilir (Şekil 5.5) Fakat ses dalgaları adyabatik bir olay olarak  $v_{ad}$  hızı ile yayılırsa,  $f=0$ 'da hemen izotermik olaya dönüşür.

$v_{is} = v_{ad}$  olduğu frekans,  $10^{12}$  Hz'den başlar.

Maddenin  $\rho$  yoğunluğu, M mol kütlelerinin V mol hacmine bölümü olarak Eş.(5.24)'de yerine yazılırsa,

$$v_{ad}^2 = - \frac{V^2}{M} \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_S \quad (5.25)$$

elde edilir. Adyabatik sıkışabilirlik katsayısı,

$$\beta_{ad} = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_S \quad (5.26)$$

olduğuna göre,

$$\kappa_{ad}^2 = \frac{1}{\rho \beta_{ad}} \quad (5.27)$$

aynı şekilde izotermik sıkışabilirlik katsayısı,

$$\beta_{is} = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad (5.28)$$

ise,

$$\kappa_{is}^2 = \frac{1}{\rho \beta_{is}} \quad (5.29)$$

elde edilir.

Sabit P basıncı ve sabit V hacmi altında; izotermik olaylar adyabatik olaylardan,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (5.30)$$

oranı olarak verilen mol ısılarının oranı ile ayrılır. Bundan dolayı bu oranın, her iki hızın farkını da vermesi beklenmelidir.

Bir akışkanın birim hacminin incelenmesinde,

$$f(P, \rho, T) = 0$$

termik hal denklemi kullanılır. Akışkanın iç enerjisi  $P, \rho$  ve  $T$  hal değişkenlerinin fonksiyonudur. (5.23) ve (5.24) formülleri ( $P, \rho$ ) değişkenlerinin kullanılmasına gerektirir.  $E$  iç enerjinin  $dE$  değişimi,

$$dE = \left( \frac{\partial E}{\partial P} \right)_\rho dP + \left( \frac{\partial E}{\partial \rho} \right)_P d\rho \quad (5.31)$$

olabilir. Bu denklemde görülen diferansiyel bölümler termodinamik bağıntılardan bulunup yerine konulursa,

$$\left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S = \frac{C_p}{C_v} \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \quad (5.32)$$

ifadesi bulunur. Buradan,

$$\kappa_{ad}^2 = \gamma \kappa_{is}^2 \quad (5.33)$$

elde edilir.

Adyabatik ve izotermik ses hızları arasındaki bağıntı çok basit olup, Şekil 5.5'deki üst yatay eğri ile alt yatay eğri arasındaki fark  $\sqrt{\gamma}$  kadardır.  $\gamma$  üç büyüklüğün oranı olarak,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \left( \frac{V_{ad}}{V_{is}} \right)^2 = \frac{P_{is}}{P_{ad}} \quad (5.34)$$

şeklinde yazılır.

$v^2 = (\partial P / \partial \rho)$  formülünün geliştirilebilmesi için Van der Waals denklemi esas alınır. Van der Waals denklemi,

$$\left( P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (5.35)$$

şeklindedir. Burada P sıvıya tesir eden dış basınç,  $a/V^2$  sıvı molekülleri arasında meydana gelen iç basınç, V bir mol sıvının hacmi, b moleküllerin çarpışmasında bir molekülün sahip olduğu hacimdir. Molekülleri tamamen esnek çarpışma yapan ideal akışkanlarda, b bir molekül hacminin 4 katına eşittir. R ( $= 8.314 \times 10^7$  erg/mol  $^{\circ}K$ ), genel gaz sabiti, T mutlak sıcaklıktır. Van der Waals sabitlerinin oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yoğunluğa bağlı olduğu düşünülerek,

$$\left[ P + \frac{a(\rho, T)}{V^2} \right] \left[ V - b(\rho, T) \right] = RT \quad (5.36)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemden bulunan,

$$P = \frac{RT}{M(\rho - b(\rho, T))} - \frac{\rho^2}{M^2} a(\rho, T)$$

ifadesinin  $\rho$ 'ya göre türevi alınır ve adyabatik ses hızı formülünün,

$$v^2 = \gamma \frac{dP}{d\rho}, \quad \left( \frac{P}{\rho} = \frac{dP}{d\rho} \right) \quad (5.37)$$

olduğu düşünülürse,



$$v^2 = \gamma \left\{ \frac{RT}{\left(\frac{M}{g} - b\right)^2} \left[ \frac{M}{g^2} + \left(\frac{db}{dg}\right)_T \right] - \frac{1}{M^2} \left[ 2 a g + g^2 \left(\frac{da}{dg}\right)_T \right] \right\} \quad (5.38)$$

ifadesi elde edilir. (5.36) ifadesi yardımıyla a yok edilirse,

$$v^2 = \gamma \left\{ \frac{RT}{\left(\frac{M}{g} - b\right)^2} \left[ \frac{M}{g^2} + \left(\frac{db}{dg}\right)_T \right] - \left[ \frac{2RT}{M - b g} - \frac{2P}{g} \right] - \frac{g^2}{M^2} \left(\frac{da}{dg}\right)_T \right\} \quad (5.39)$$

olur. Olaylar atmosfer basıncında incelendiğinde  $\left(\frac{da}{dg}\right)_T$  ve P alınmayabilir.  $\left(\frac{db}{dg}\right)_T$ 'da yaklaşık olarak  $-2M/3g^2$  'dir.

Sonuç olarak,

$$v^2 = \gamma RT \left[ \frac{1/3 M}{(M - b g)^2} - \frac{2}{M - b g} \right] \quad (5.40)$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M - b g} \left[ \frac{1/3 M}{(M - b g)} - 2 \right]}$$

bulunur. Bu denklemden görülebileceği gibi deneyler oda sıcaklığında yapıldığında sıvıların molekül yapısını tayin eden,  $\gamma$ , M, b, g büyüklüklerinin fonksiyonu olarak ses hızı,

$$v = f(\gamma, M, b, g) \quad (5.41)$$

şeklinde gösterilir.

Bu denklemlerin de irdelenmesiyle, ses hızı ölçülen akışkanların molekül yapısının ses hızına bağlılığı için aşağıdaki sonuçlar çıkar.

- Isınma ısıları oranının büyümesi ses hızını arttırır,
- Mol kütlelerinin büyümesi ses hızını azaltır,
- b ile orantılı olan molekül hacmin artması, ses hızını arttırır,
- Yoğunluğun büyümesi ses hızını arttırır.

Çizelge 5.2. Bazı sıvılara ait ses hızı değerleri (Bayer, 1969).

Sıvılar	Formül	t (°C)	ρ (gr/cm <sup>3</sup> )	v (m/s)
Aseton	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	20	0,792	1192
Etilalkol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	20	0,789	1180
Etilasetat	CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	20	0,900	1176
Metilasetat	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>	25	0,928	1154
Nikotin	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	20	1,009	1491
Yağasidi	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	45	0,873	1333
Su	H <sub>2</sub> O	25	0,997	1487
Ağır su	D <sub>2</sub> O	25	1,104	1399
Civa	Hg	20	13,595	1451

## 5.2.2. Sıvılarda ses soğurumu

Bir ses kaynağından çıkan küçük genlikli düzlem ses dalgalarının izotrop ve homojen bir ortamda yayıldığını farzedelim; ses dalgalarına eşlik eden adyabatik ve periyodik sıkışıp-gevşemeler sıvı içindeki tanecikleri birer osilatör gibi titreştirir. x eksenini doğrultusunda v hızı ile yayılan ses dalgalarının taneciklere kazandırdığı uzanım,

$$A = A_0 e^{i\omega(t - \frac{x}{v})} \quad (5.42)$$

şeklinde verilir. Burada A<sub>0</sub> genlik, ω 'da açısal frekanstır. Ses soğurulmasının olduğu bir ortamda, ses kaynağında x kadar uzaklıktaki A ile, x=0 civarındaki A<sub>0</sub> arasındaki bağıntı,

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (5.43)$$

ifadesiyle verilir. Burada α , ortamın ses soğurulma katsayısıdır. Bir akışkan ortam için genel olarak α ,

$$\alpha = \alpha_{vis} + \alpha_{ter} + \alpha_{dif} + \alpha_{ışı} \quad (5.44)$$

ifadesiyle verilir. Bu ifadedeki son iki terim diğer ilk ikisi yanında çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Böylece elde edilen ve klasik soğurulma katsayısı ( $\alpha_k$ ) olarak tanımlanan ilk iki terim hesaplanmış ve,

$$\alpha_k = \frac{8\pi^2}{3\varrho v^3} \left[ \eta_s + \frac{3}{4} \eta_v + \frac{3}{4} \frac{(\gamma-1)L}{c_p} \right] f^2 \quad (5.45)$$

olarak bulunmuştur. Burada  $\varrho$  ortamın yoğunluğu,  $v$  ses hızı,  $\eta_s$  ortamın makaslanma viskozitesi,  $\eta_v$  hacim viskozitesi  $\gamma = c_p/c_v$  Laplace katsayısı,  $L$  ısı iletkenlik katsayısı,  $f$ 'de ses frekansıdır. Genellikle bir madde için  $\alpha_k$  yerine  $\alpha/f^2$  akustik parametresi verilir.

Sıvı ortamda ilerleyen ultrases dalgalarının soğurulması:

4. bölümde anlatılan metodlardan uygun biri ile ölçülerek yukarıdaki fiziksel büyüklüklerin irdelenmesine imkan tanır.

### 5.3. Gazlarda Ses Soğurumu Ve Hızı

Bir ses kaynağından çıkarak herhangi bir ortam içinde yayılmakta olan ses dalgalarının şiddeti, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Düzlem dalgalarında, kaynaktan itibaren belirli bir mesafedeki şiddet  $I$  ise bu noktadan  $x$  kadar uzaklıkta şiddet,

$$I = I_0 \exp(-2\alpha x) \quad (5.46)$$

bağıntısı ile belirlenir.  $\alpha$  'ya ortamın soğurma katsayısı denir.

$$\alpha = \frac{\ln(I/I_0)}{2x} \quad (5.47)$$

Klasik teoriye göre, ses şiddetindeki azalma, ortamın viskozite, ısı iletkenliği, difüzyon ısı ışıması gibi fiziksel niteliklerine bağlıdır. Stokes (1845) ve Kirchoff (1868), düzlem bir

ses dalgası için viskozite ve ısı iletkenliğinden ileri gelen soğurma katsayılarının,

$$\alpha_V = \frac{8\pi^2 \eta_s f^2}{3 \rho v^3} \quad (5.48)$$

$$\alpha_L = \frac{2\pi^2 L (\gamma - 1) f^2}{\rho \gamma C_v v^3} \quad (5.49)$$

bağıntıları ile hesaplanabileceğini ortaya koymuşlardır. Burada  $\eta_s$ ,  $L$ ,  $\gamma = C_p/C_v$ , öngörülen ortam için sırasıyla makaslama viskozitesi, ısı iletkenliği, Laplace katsayıları,  $\rho$  yoğunluk,  $v$  'de  $f$  frekanslı ses dalgalarının yayılma hızıdır.  $C_p$  ve  $C_v$ , sabit ba-

Çizelge 5.3. Bazı gazlar için viskozite ve ısı iletkenliğinden ileri gelen soğurma katsayıları (Gündüz, 1969).

Gaz	$\alpha/f^2 \cdot 10^{13} (\text{s}^2 \text{cm}^{-1})$	
	$\alpha_V$	$\alpha_L$
Hava	0,99	0,38
Oksijen	1,14	0,47
Hidrojen	0,12	0,05
CO <sub>2</sub>	1,09	0,31
SO <sub>2</sub>	1,10	0,27

sınç ve sabit hacim altındaki ısınma ısılarını göstermektedir. Soğurmada, viskozite ve ısı iletkenliği dışındaki etkenler ihmal edilir. büyüklükte olduğundan toplam soğurma katsayısı,

$$\alpha = \alpha_V + \alpha_L = \frac{2\pi^2 f^2}{3 \rho v^3} \frac{4}{3} \eta_s + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{L}{C_v} \quad (5.50)$$

şeklinde verilebilir. Gazlarda viskoziteden ileri gelen soğurma katsayısı  $\alpha_V$ , ısı iletkenliğinden ileri gelen  $\alpha_L$  soğurma katsayısından büyüktür (Çizelge 5.3). (5.50) eşitliğinden de görülebileceği gibi, toplam soğurma katsayısı frekansın karesiyle oran-

tili olarak artmaktadır. Buradan, frekansı 20 kHz'in üstünde olan ses ötesi dalgaların gazlar içinde çok uzaklara gidemeyeceği açıktır. Örneğin, hava içinde 20 °C'de  $\rho = 1,29 \times 10^{-3}$  gr/cm<sup>3</sup>,  $v = 343$  m/s,  $\gamma_s = 1,71 \times 10^{-4}$  gr/cm s olduğuna göre, frekansı 10<sup>5</sup> Hz olan

Çizelge 5.4. Bazı gazlar için ses hızları (Gündüz, 1969).

Madde	T(°K)	$\rho$	$v$ (m/s)	$v_{ad}$ (m/s)	$v_{is}$ (m/s)
Argon	303	1,667	324	324,2	251,2
Azot	273	1,400	337,3	336,7	284,5
Benzal	293	1,450	1324	1329	1095
Tolual	293	1,350	1328	1317	1138
Karbon tetraklorit	293	1,450	935	931	774

bir ses dalgasının  $x = 403$  cm'lik bir yolun sonunda ilk şiddetinin % 40'ını kaybedeceği (5.46) ve (5.50) bağıntılarından hesaplanabilir. Yapılan deneyler bu kaybın aslında daha fazla olduğunu göstermektedir.

Ses dalgalarının gaz ve sıvılar içinde yayılması halinde olaya adyabatik-tersinir gözüyle bakmak hatalı değildir, Çizelge 5.4'de görülen  $v$  ses hızını,  $v_{iz}$  izotermik,  $v_{ad}$  adyabatik koşullarda hesaplanan ses hızlarını temsil etmektedir.

İdeal bir gaz içinde sesin yayılma hızı,

$$v^2 = \gamma \frac{P}{\rho} \quad (5.51)$$

veya bir mol gram gaz için gazların genel denkleminde  $PV = RT$  yazılabileceğinden,

$$v^2 = \gamma \frac{RT}{M} \quad (5.52)$$

bağıntıları ile ifade edilebilir. Burada, P gaz basıncı, V mol hacmi, T mutlak sıcaklık, M mol kütlesi ve R genel gaz sabitidir.

## 6. SONUÇ

Kulağımızın işitme frekansı sınırının üzerindeki frekanslara sahip ses, ultrases olarak adlandırılır. Ultrases de bir titreşim hareketi olduğundan oluşması ve yayılması ancak maddesel ortamlarda olmaktadır.

Ultrases, ortamlardaki yayılışı, davranışı takip edilmek suretiyle tıpta ve teknolojiye özellikle muayene amacına yönelik pek çok kullanım alanı bulmuştur. Bilimsel araştırmalarda ve günlük hayatta da kullanılan ultrasesin oluşturulmasında genellikle piezoelektrik, manyetostriktif ve elektrostriktif etki gösteren materyaller kullanılır. Piezoelektrik etkisi en fazla olan materyal kuvarstır. Suni piezoelektrik etki gösteren seramiklerin üretilmesiyle de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Manyetostriktif etki ferromanyetik cisimlerde, elektrostriktif etki de ferroelektrik cisimlerde çoğunlukla görülür.

Ultrasonik çalışmalarda ölçümler ses hızı ve soğurulmasına yöneliktir. Çalışmalarda iyi sonuç elde etmek için ölçümlerin son derece duyarlıklı olması gerekmektedir. Bunun için katı, sıvı ve gaz ortamlarda ölçüm yapmak üzere çeşitli metodlar geliştirilmiştir. Bu metodlar, ortamlara sürekli ultrases dalgalarının ve aralıklı ses dalgalarının (ses pulslarının) uygulandığı metodlar olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Geliştirilen metodlarla, ses hızı ve soğurumu ölçümlerinin ikisinde yapılabildiği gibi bazı metodlarda niceliklerden sadece biri ölçülebilmektedir.

Katıları oluşturan molekül veya atomlar birbirlerine elastik kuvvetlerle bağlıdır ve bir denge konumu etrafında titreşim hareketi yapabildikleri için katı ortamlarda hem enine dalga, hem boyuna dalga yayılabilmektedir. Boyuna dalgaların yayılma hızı enine dalgaların yayılma hızından yaklaşık 2 kat daha büyüktür. Atom veya molekülleri kolaylıkla hareket edebilen sıvı ve gaz ortamlarında ise enine dalga oluşmaz. Dolayısıyla sıvı ve gazlarda enine dalga yayılım hızı sıfırdır. Katılardaki ses hızı elastisite sabitelerine bağlı olarak, sıvı ve gazlardaki ses hızı ile soğurulmasında sıcaklığa ve viskozluğa bağlı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, yukarıda anlatılanların ışığı altında, aslında her bir özellik ve konu hakkında kalın kalın kitapların yazıldığı ultrases ile ilgili genel bilgilerin verilmesi amaçlanmıştır. Konunun yorumlanmasını kuvvetlendirmek amacıyla gerekli yerlerde kıyaslamalar yapılmış ve bazı deney sonuçları izelge halinde verilmiştir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anık, S. ve Anık, E. S., 1977, Malzeme bilgisi ve muayenesi (Weissbach, W.' den çeviri), Kurtulmuş Matbaası, 180 s.
- Aral, E., 1976, Elastik sabitlerin ultrases metoduyla tayini, Yeterlik çalışması, Eskişehir D.M.M.A.
- Aral, E., 1979, Ultrases yöntemiyle elastik sabitlerinin ölçümü ve perovskite seramiklere uygulanması, Doçentlik tezi, Eskişehir D.M.M.A.
- Aral, E., 1987, Ultrases ders notları, Ana. Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayar, O., 1969, Pulsu sesötesi kaynakları ve ölçü yöntemleri, E.Ü. Fen Dergisi, 5, 7, 204-207 s.
- Bayar, O., 1980,  $HgCl_2$  - KCl Çözelti karışımlarında ultrases hızı ölçümleri ve kompleks oluşumu, E.Ü. Fen Dergisi, A, 4, 1-2-3-4, 93-97 s.
- Bayar, O., 1983, Korelasyon ve puls yöntemlerine ilişkin ölçü duyarlılıklarının karşılaştırılması, Doğa Bilim Dergisi, 7, 7 s.
- Bayar, O., 1988, Ultrases ders notları, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bentley, J. P., 1983, Principles of measurement systems, Longman Group Limited, 210 p.
- Blitz, J., 1967, Ultrasonic methods and applications, Plenum Press, 428 p.
- Ertuş, İ., 1968, Sesötesi (ultrases), E.Ü. Fen Dergisi, 4, 4, 108-110 s.
- Gündüz, E., Sesötesi kaynakları, E.Ü. Fen Dergisi, 4, 6, 184-185 s.
- Gündüz, E., 1969, Sesötesi dalgaların gazlar içinde soğurulması ve relaksasyon olayı, E.Ü. Fen Dergisi, 5, 8, 230-232 s.
- İşçi, C., 1986, Akustik yüzeysel dalgalar ve bazı uygulamaları, Doğa Bilim Dergisi, B, 10, 1, 1-2 s.
- Özden, N., 1981, Sesötesi (ultrasonik) ile muayene, Segem Yayınları, 48, 141 s.
- Pascoe, K. J., 1972, Properties of materials for electrical engineers, Cambridge University Press, 509 p.
- Richard, G., 1962, Ultrasonic technology, Reinhold Publishing Comparison, 304 p.
- Richardson, E. G., 1962, Ultrasonic physics, Elsevier Publishing Company, 474 p.



- Truel, R., Elbaum, C. and Chick, B. B., 1969, Ultrasonic methods in solid state physics, Academic Press, 390 p.
- Tucker, J. W. and Rampton, V. W., 1972, Microwave ultrasonics physics, North Holland Publishing Company, 285 p.