

**GENİŞ BANDLI 3 MHz ULTRASONİK DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN  
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Cengiz DENİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK-BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2007  
ANKARA**

Cengiz DENİZ tarafından hazırlanan GENİŞ BANDLI 3 MHz ULTRASONİK DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN TASARIMI ve GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. İnan GÜLER

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Yılmaz SAVAŞ



Üye : Prof. Dr. İnan GÜLER



Üye : Yrd. DOÇ. Dr. Mahir DURSUN



Tarih:13 /09/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

**Cengiz DENİZ**



**GENİŞ BANDLI 3 MHz ULTRASONİK DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN  
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Cengiz DENİZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ  
EYLÜL 2007**

**ÖZET**

Bu çalışmada, 3 MHz'lik piezoelektrik kristaller kullanılarak genişbantlı bir ultrasonik dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Tasarıma geçmeden önce, piezoelektrik malzemelerin mekaniksel ve elektriksel davranışları, bağıntılarında göz önüne alınarak detaylı bir şekilde izah edilmiştir. Daha sonra, ultrasonik dalgaların özellikleri ve piezoelektrik maddelerle üretilmesi incelenmiştir. Bir piezoelektrik materyal kullanılarak yapılan dönüştürücünün, modellemesinde kullanılan eşdeğer devreleri verilerek, genişband ve hassasiyet elde etmek için empedans uygunlaştırmanın gerekliliği anlatılmıştır. Son olarak, tasarım aşamaları anlatılmıştır. Dönüştürücüden elde edilen impuls cevapları verilmiştir.

**Bilim Kodu :704.3.013**  
**Anahtar Kelimeler :Ultrasonik, Piezoelektrik, PZT, Dönüştürücü**  
**Sayfa Adedi : 66**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. İnan GÜLER**

**THE BROADBAND ULTRASONICS TRANSDUCER DESIGN and  
PRODUCING with 3 MHz**

**(M. Sc. Thesis)**

**Cengiz DENİZ**

**GAZİ UNIVERSITY  
INFORMATICS INSTITUTE  
SEPTEMBER 2007**

**ABSTRACT**

**In this study, a broad-band ultrasonic transducer has been designed by using 3 MHz piezoelectric crystals. Before beginning the design, mechanical and electrical behaviors of piezoelectric crystals are explained in details by considering their relations between them. Then, the properties of the ultrasonic waves and their production by using piezoelectric crystals have been investigated. By giving the equivalent circuits, which are used in modeling transducer produced by using a piezoelectric crystal, necessity of impedance matching to have broadband and system sensitivity is explained. Then, stages of design are expressed. As a result, the impulse response of the system obtained from transducer is given.**

**Science Code :704.3.013**

**KeyWords :Ultrasonic, Piezoelectric, PZT, Transducer**

**Page Number :66**

**Adviser :Prof. Dr. İnan GÜLER**

## **TEŞEKKÜR**

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. İnan GÜLER'e, çalışmam için laboratuvarlarını bana açan ve yardım eden M. Rüştü UZEL Kimya Meslek Lisesi öğretmenlerine, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım esnasında kanserden dolayı kaybettiğim biricik Babam Sadettin DENİZ'e bu çalışmayı adıyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. PİEZOELEKTRİK ETKİ.....	4
2.1. Piezoelektriğin Elastik Sabitine Etkisi.....	8
2.2. Piezoelektriğin Dielektrik Sabitine Etkisi.....	8
2.3. Elektrik Akışı ve İçsel Baskı.....	9
2.4. Değişken Elektrik Alanına Maruz Kalan Piezoelektrik Materyal için Temel Elektrik Empedans Modeli.....	10
3. ULTRASONİK DALGALAR ve ÖZELLİKLERİ.....	17
3.1. Ultrasesin Hızı ve Dalgaboyu.....	17
3.2. Dalga Yayılımı ve Parçacık Hareketi.....	18
3.3. Akustik Empedans, Yansıma ve Zayıflama.....	20
3.4. Ultrasesin Etkin Alanı.....	21
3.5. Ultrasonik Dalgaların Üretilmesi.....	23
3.5.1. Piezoelektrik etki ile ultrasonik dalgaların üretilmesi.....	23
3.5.2. Piezoelektrik kuplaj faktörü.....	26
4. DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMINDA KULLANILAN MODELLER.....	29
4.1. KLM Modeli.....	30
4.2. Mason Eşdeğer Devresi.....	32
4.3. Basitleştirilmiş Eşdeğer Devre.....	36
5. DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DİNAMİK ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİ.....	38
5.1. Akustik Kapılarda Empedans Uyumlaştırma.....	39

5.1.1. Empedans uygunlaştırmayla optimum band genişliğine ulaşma.....	42
5.1.2. Arka akustik kapının sonlandırılması.....	45
5.2. Elektriksel Kapıda Empedans Uygunlaştırma.....	48
5.2.1. Elektriksel kapıda bobin kullanarak giriş empedansının imajiner kısmının yok edilmesi.....	49
6. GENİŞ BANDLI ULTRASONİK DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN PRATİK TASARIMI ve ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	54
6.1. Test Yöntemi.....	58
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	66



**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Sesin çeşitli maddeler içindeki yayılma hızı.....	18
Çizelge 4.1. Piezoelektrik materyallerin genel karşılaştırılması.....	29

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Ses spektrumu ve ultrasonik dalgaların frekans aralığı .....	1
Şekil 2.1. Piezoelektrik materyalin basit moleküler yapısı, a) bozulmamış yapı b) baskı altındaki molekül yapısı c) etki ile yüzeyde oluşan kutuplaşma ...	5
Şekil 2.2. Baskı altındaki piezoelektrik materyalin oluşturduğu akım .....	6
Şekil 2.3. Baskı kaldırıldığında materyalin tekrar nötralize olması ve akımın kesilmesi.....	6
Şekil 2.4. Piezoelektrik ve dielektrik materyallerin elektriksel akışları .....	9
Şekil 2.5. Gerilmenin oluşturulması a) doğru yönde gerilim verildiğinde b) ters gerilim uygulandığında.....	12
Şekil 2.6. Elektrik alanı altında piezoelektrik materyalin sonunda oluşan baskı ve gerilmeler.....	13
Şekil 2.7. Piezoelektrik materyalin rezonans yada rezonans frekansına yakın titreşim yaptığı durumundaki eşdeğer elektriksel devresi.....	16
Şekil 3.1. Bir ses dalgasının frekansı, periyodu ve dalga boyu.....	17
Şekil 3.2. Enlemsel ve boylamsal dalga ile parçacıkların hareket yönü.....	19
Şekil 3.3. Dönüştürücünün oluşturduğu yakın alan ve uzak alan içerisindeki maksimum ve minimum dalgalar.....	22
Şekil 3.4. Sesin başlangıç ve son odak uzaklıkları ile ölçüm yapılan alanların yoğunluk çizgileri.....	23
Şekil 4.1. KLM eşdeğer devresi.....	30
Şekil 4.2. Mason eşdeğer devresi.....	33
Şekil 4.3. Mason eşdeğer devresinden türetilen devreler.....	34
Şekil 4.4. Mason eşdeğer devresinden türetilen eşdeğer devreler .....	35
Şekil 4.5. Rhyne eşdeğer devresi.....	35

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.6. Basitleştirilmiş eşdeğer devre.....	36
Şekil 5.1. Elektrik alanı oluşturulduğunda piezoelektrik materyalde meydana gelen kuvvetler.....	38
Şekil 5.2. Piezo diskin elektriksel eşdeğer devreleri a) transmisyon hattı gösterimi ile eşdeğeri b) mason devresi ile gösterilmiş eşdeğer devresi.....	39
Şekil 5.3 Dönüştürücüde impuls cevabı oluşturulma aşamaları a) yoğun kütlelin tespiti b) uygulanan elektrik alanı ve piezoelektrik sabit c) oluşturulan baskı d) oluşturulan kuvvet e) sonuç impuls cevabı f) impuls cevabının fourier dönüşümü.....	40
Şekil 5.4. Empedans ve frekans değişim grafiği.....	43
Şekil 5.5. Kalınlığı 1 mm, çapı 10 mm olan PZT dönüştürücünün giriş empedansının frekansa göre değişimi.....	44
Şekil 5.6. Değişik tip empedans uygunlaştırma katmanlarının bağıl frekans spektrumuna etkisi .....	46
Şekil 5.7. Arka akustik kapının hava ile $5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik, $8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik ve $Z_0$ 'a eşit empedanslarla sonlandırıldığı durumlar için toplam akustik giriş empedanslarının reel kısmı.....	47
Şekil 5.8. Arka akustik kapının hava ile $5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik, $8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik ve $Z_0$ 'a eşit empedanslarla sonlandırıldığı durumlar için toplam akustik giriş empedanslarının imajiner kısımları.....	47
Şekil 5.9. Paralel uygunlaştırma elektrik devresi.....	51
Şekil 5.10. Seri uygunlaştırma elektrik devresi.....	51
Şekil 5.11. Seri uygunlaştırma devresi eğrileri .....	52
Şekil 5.12. Paralel uygunlaştırma devresi eğrileri.....	53
Şekil 6.1. Kristalin yerleştirileceği iki ucu açık fiber boru.....	54
Şekil 6.2. Fiber boru içerisinde kristalin seviyede kalmasını sağlayacak aparat.....	55
Şekil 6.3. Elektrotların kristal üzerine yapıştırılması.....	55

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.4. Elektrotları yapıştırılan kristalin fiber boru içerisine yerleştirilmesi.....	56
Şekil 6.5. Sönümlendirme malzemesinin dökülme safhası.....	57
Şekil 6.6. Dönüştürücü test devresi.....	59
Şekil 6.7. Dönüştürücü ile osilaskop bağlantısı.....	59
Şekil 6.8. Dönüştürücünün ön kısmına ait kalınlığın $\lambda/4$ seviyesine kadar tıraşlanması.....	61

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 6.1. Epoxy gümüş iletken yapıştırıcı ( Epoxy Conductive Silver paint).....	56
Resim 6.2. Uygulanan test sinyali (volt/div=2 V, Time/Div 0,1 ms).....	60
Resim 6.3. Dönüştürücü impuls cevabı (time/div: 0,2 $\mu$ s volt/div: 50 mV).....	60
Resim 6.4. Dönüştürücünün sönümlendirme ve uyumlaştırma maddeleri yok iken alınan impuls cevabı (10 mV/Div, 0,2 Time/Div).....	62

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Kesit alanı
$\bar{B}$	Tam geçiş fonksiyonu
<b>B</b>	Bulk Modülü
$\bar{c}$	Piezoelektrik katılık sabiti
<b>c</b>	Elastik sabiti
<i>c</i>	Madde içindeki ses hızı
<b>C<sub>0</sub></b>	Piezoelektrik plakanın sıkıştırılması
<b>C<sub>s</sub></b>	Basitleştirilmiş eşdeğer devrede C <sub>0</sub> ile paralel koldaki kapasite.
$\bar{D}$	Deplasman vektörü
<b>D</b>	Yük akışı
<b>d,e,h,g</b>	Piezoelektrik sabitler
<b>E</b>	Elektrik alan
<b>e</b>	Piezoelektrik gerilme sabiti
$\varepsilon$	Dielektrik katsayısı
<b>f<sub>s</sub></b>	Seri rezonans frekansı
<b>f<sub>p</sub></b>	Paralel rezonans frekansı
<b>f<sub>0</sub></b>	Temel rezonans frekansı, band merkezi frekansı
$\phi$	İdeal elektroakustik transformatörün dönüştürme oranı
<b>J</b>	Akım yoğunluğu
<b>k<sub>t</sub><sup>2</sup></b>	Piezoelektrik kuplaj sabiti

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$\lambda$	Dalga boyu
$\lambda_0$	Temel rezonans frekansının dalga boyu
$\ell$	Malzeme uzunluğu, dönüştürücü kalınlığı
$L_0$	$C_0$ kapasitesi ile $f_0$ frekansında rezonans sağlayan bobinin öz endüktansı
$L_s$	Basitleştirilmiş eşdeğer devrede $C_0$ ile paralel koldaki bobin
$\eta$	Vizkosite sabiti (akışkanlık)
$P$	Dönüştürücüye aktarılan akustik gücün kaynağın verebileceği optimum güce oranı
$P_p$	Piezoelektrik polarizasyon vektörü
$Q_a$	Akustik kalite faktörü
$Q_e$	Elektriksel kalite faktörü
$R$	Dönüştürücü giriş empedansının reel kısmı
$R_s$	Basitleştirilmiş eşdeğer devrede $C_0$ ile paralel koldaki direnç
$\rho$	Yoğunluk
$\sigma$	Yük yoğunluğu
$S$	Şekil değişikliği oranı
$T$	Gerginlik
$t$	Zaman
$U$	Voltaj farkı
$X$	Dönüştürücü giriş empedansının imajiner kısmı
$v$	Hız
$V$	Voltaj
$\omega_c$	Açısal frekans olarak 3 dB'lik band genişliği
$\omega_0$	Açısal temel rezonans frekansı
$Z$	Dönüştürücü giriş empedansının genliği
$Z_0, Z_1, Z_2$	Dönüştürücünün, yük/dönüştürücü tarafındaki

**Kısaltmalar****Açıklama****EMAT**

Elektromanyetik lazer

**IEEE**

Institute of Electrical and Electronics Engineers

**TE**

Thickness Extensional

**TTM**

Tünel Taramalı Mikroskop

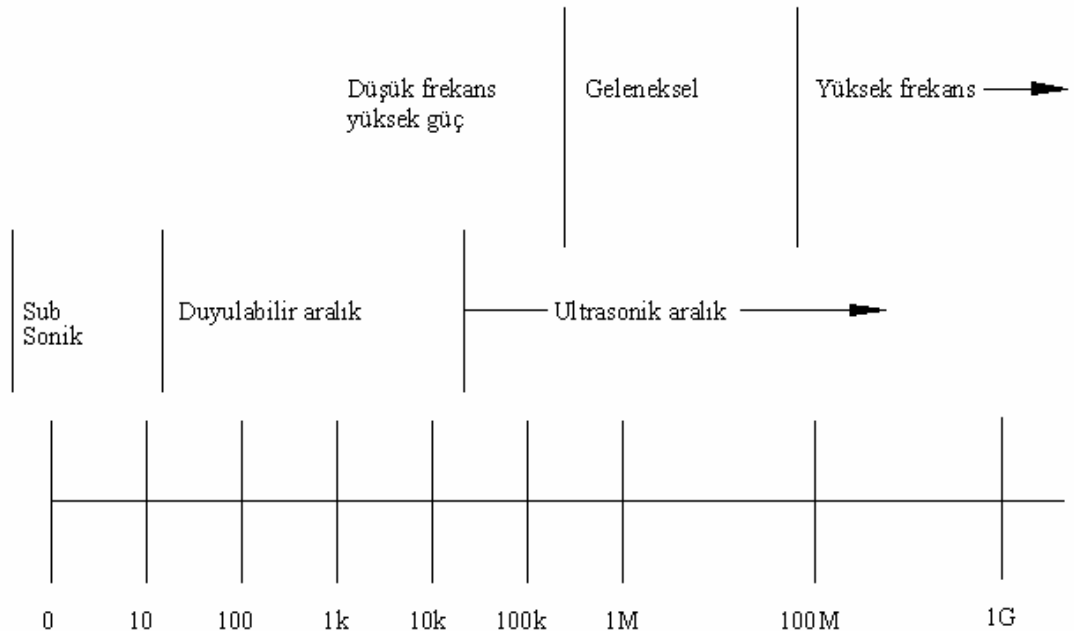


## 1. GİRİŞ

Dönüştürücüler, enerjiyi bir biçimden başka bir biçime dönüştüren aygıtlardır. Bu çalışmada kullanılan dönüştürücü, mekanik sinyal domenindeki bir enerji formunu, elektrik sinyal domenindeki enerji formuna çevirebilirken, elektrik sinyal enerjisini, mekaniksel enerjiye çevirebilecek şekildedir.

Dönüştürücülerde, oluşturulan enerji dönüştürme işlemi sistemin bütünüdür. Aslında enerjinin bir sinyal domeninden ötekine geçmesini sağlayacak en uygun dönüştürücü tasarımı matematiksel boyutlarıyla incelenerek sistem içerisine adapte edilir.

Ultrasonik dalgalar, insan kulağının duyabileceği seslerin üstündeki ses dalgalarını tanımlar ( Şekil 1.1.). Bu çalışmada tasarlanan dönüştürücü bu dalgaları üretebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Her dönüştürücünün kendine özgü rezonans frekansı vardır, bu anlamda etkin frekans aralığı yada bandgenişliğine sahiptir (Şekil 1.2.).



Şekil 1.1. Ses spektrumu ve ultrasonik dalgaların frekans aralığı

Ultrasonik dönüştürücü sistemin dönüştürme işlemini yapabilmesi için en uygun dönüştürücü piezoelektrik malzemelerdir. Bu çalışmada PZT (Lead Zirconate

Titanate) 3 MHz'lik piezoelektrik kristal kullanılmıştır. Piezoelektrik tamamen mekanik gerginlikle bir elektrik polarizasyon üretilmesine dayanır.

Bir dönüştürücü, alternatif gerilim (AC) veya doğru gerilim (DC) güç kaynağı ile beslemek durumunda ise pasif bir dönüştürücüdür aksi halde aktif bir dönüştürücü olarak sınıflandırılır. Başka bir ifadeyle aktif dönüştürücüler besleme kaynağı gerektirmeden dönüştürme işlemini yaparlar ve pasif dönüştürücülerin aksine olarak dönüştürme işlemini ters yönde de yapabilirler. Bu çalışmada tasarlanan ve gerçekleştirilen dönüştürücü aktif dönüştürücüler sınıfına girmektedir [1].

Bu çalışmanın ikinci bölümünde piezoelektrik malzemeler ana hatlarıyla incelenmiştir. Geniş bantlı ultrasonik dönüştürücülerin düzenlenmesi dönüştürücülerin yapımında kullanılan yapay piezoelektrik seramik malzemeler, dönüştürücüden beklenen özellikleri çoğu zaman tek başlarına sağlamamaktadır. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için dönüştürücülerin akustik ve elektriksel kapılarında bir takım düzenlemelere gidilmektedir [2].

Uygulama açısından bir ultrasonik dönüştürücüde iki önemli özellik ortaya çıkmaktadır. Birincisi dönüştürücünün elektriksel giriş empedansının frekansa göre değişimi ve bundan kaynaklanan araya girme kaybıdır. İkincisi ise dönüştürücünün duyarlılığı ve impuls cevabıdır [2].

Bu çalışmanın üçüncü bölümünde, ultrasonik dalgaların özellikleri ve dönüştürücü üzerinde piezoelektrik malzemeyle ultrasonik işaretlerin üretilmesi ve algılanması kısaca izah edilmiştir. Algılamadaki dönüştürücü nitelikleri, ultrasonik dalgaların özellikleriyle birlikte verilmiştir.

Dördüncü bölümde, önce dönüştürücü tasarımında kullanılan modeller tanımlandıktan sonra pratik uygulamalar için kullanılan temel dönüştürücü eşdeğer devresi verilmiştir.

Beşinci bölümde bu dönüştürücülerde, optimum band genişliğine ulaşabilmek için akustik ve elektriksel kapılarla yapılan empedans uygunlaştırma düzenlemelerinin dönüştürücü giriş empedansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ayrıca, empedans uygunlaştırma amacıyla kullanılan çeyrek dalga katlarının uzunluklarında ve karakteristik empedanslarında yapılabilecek hataların dönüştürücünün giriş empedansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Dönüştürücü ile dönüştürücünün sürüleceği kaynağın iç empedansları arasında oluşacak uyumsuzlukları azaltacak ve dönüştürücünün band genişliğini artıracak düzenlemeler, paralel bobin düzenlemeleri kullanılarak sağlanmıştır. Bu düzenlemelerle birlikte dönüştürücünün giriş empedansının frekansa göre değişimi ortaya konmuştur.

Altıncı bölümde tasarımının gerçekleştirilme aşamaları anlatılmıştır. Yapım sırasında en uygun dönüştürücü elde etmek için gereken teoriler açıklanmıştır. Dönüştürücünün test edilme yöntemleri gösterilmiştir. Sonuç detayların resimleri, çıkış sinyalleri olarak verilmiştir.

## 2. PİEZOELEKTRİK ETKİ

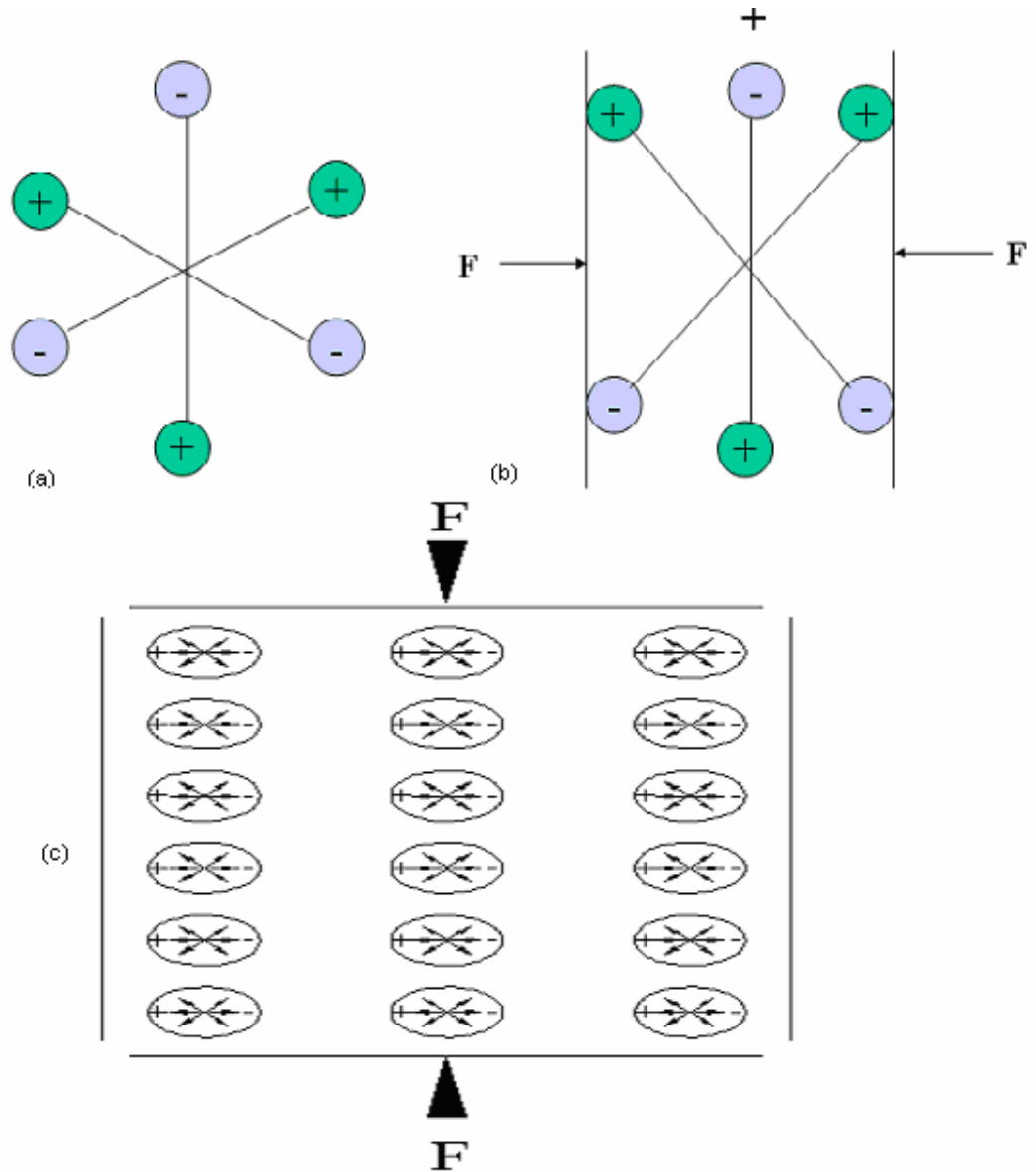
Piezoelektrik, basınçla elektrik oluşturma anlamına gelmektedir. Bu isim, Pierre ve Jacques Curie kardeşlerin olayı keşfettiklerinden bir yıl sonra 1881'de Hankel tarafından verilmiştir. Kardeşler, kristale farklı yönlerden basınç uyguladıklarında, kristal yüzeyinde pozitif ve negatif yüklerin oluştuğunu gözlemlediler [3].

Piezoelektrik materyaller hidrotermal yöntemle yapılır. Hidrotermal metot, materyal birleştirme metodudur. Kristal yüksek basınç ve sıcaklık altında su içinde çökelti oluşturularak yapılır [4].

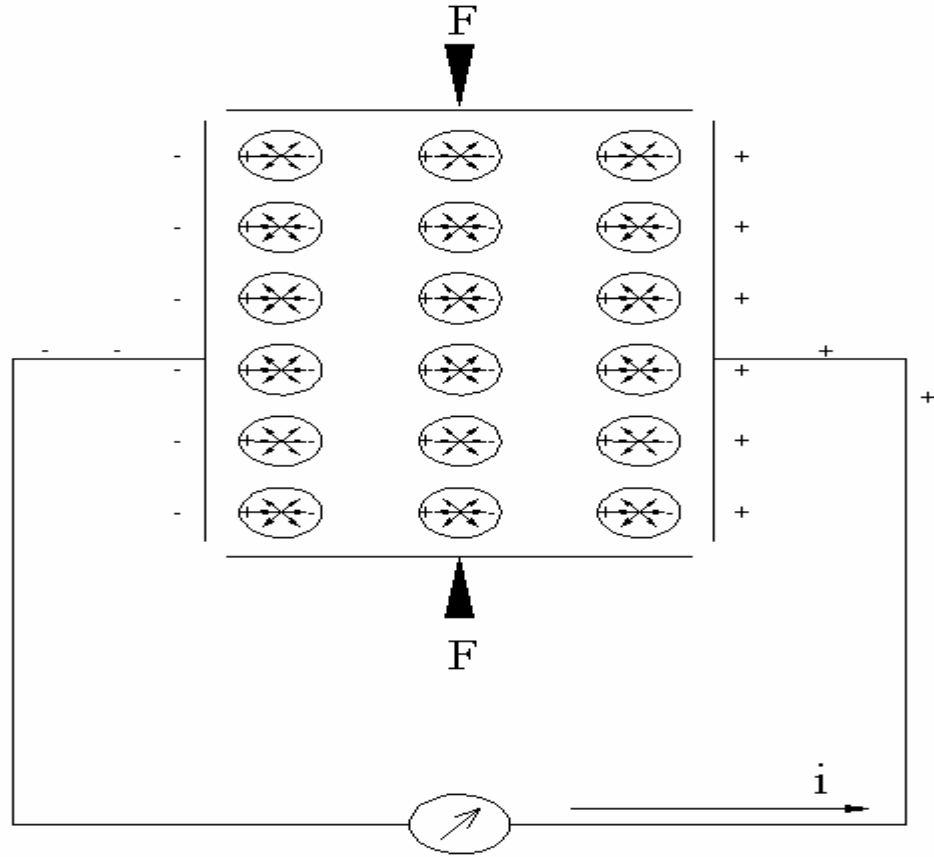
Şekil 2.1.a'da piezoelektrik materyalin basit moleküler yapısı görülmektedir. Kuvvet uygulandığı zaman oluşan elektrik yükleri tanımlanmaktadır. Dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmadan önce her molekülde negatif ve pozitif yükler birbirine eşit şekilde dağılmış olarak bulunurlar. Yüzeydeki negatif ve pozitif yükler birbirlerini karşılıklı olarak etkisizleştirirler. Sonuçta yüksüz (nötr) moleküller ortaya çıkar. Maddeye baskı uygulandığında içsel ağ yapısı deforme olur, buda molekülün çekim merkezindeki pozitif ve negatif yüklerin farklılaşmasına neden olmakta ve kutuplaşma yaratmaktadır ( Şekil 2.1.b). Madde içerisindeki aynı yükler bir bölgeye toplanmakta ve birbirine bağlı farklı yükler madde yüzeyine dağılmış şekilde bulunduğu durumda madde kutuplanmıştır (Şekil 2.1.c). Bu kutuplaşma, elektrik alanı üretir ve maddenin bozulmasına neden olan mekanik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülebilir [3].

Şekil 2.2.'de, baskı altındaki piezoelektrik maddesi gösterilmiştir. Elektrot olarak kullanılan iki metal plaka yüzeye karşılıklı olarak yerleştirilir. Basınç uygulandığında, farklı yükler bu elektrotlar üzerinde toplanırlar. Bu elektrotlara yük bağlandığında bir akım meydana getirebilir, böylece mekanik enerji elektrikselleştirilerek elde edilir. Kristal üzerindeki basınç uygulanmadığında, kutuplaşma ortadan kalkar ve nötr moleküller tekrar oluşur, elektrik alanı kalkar (Şekil 2.3.).

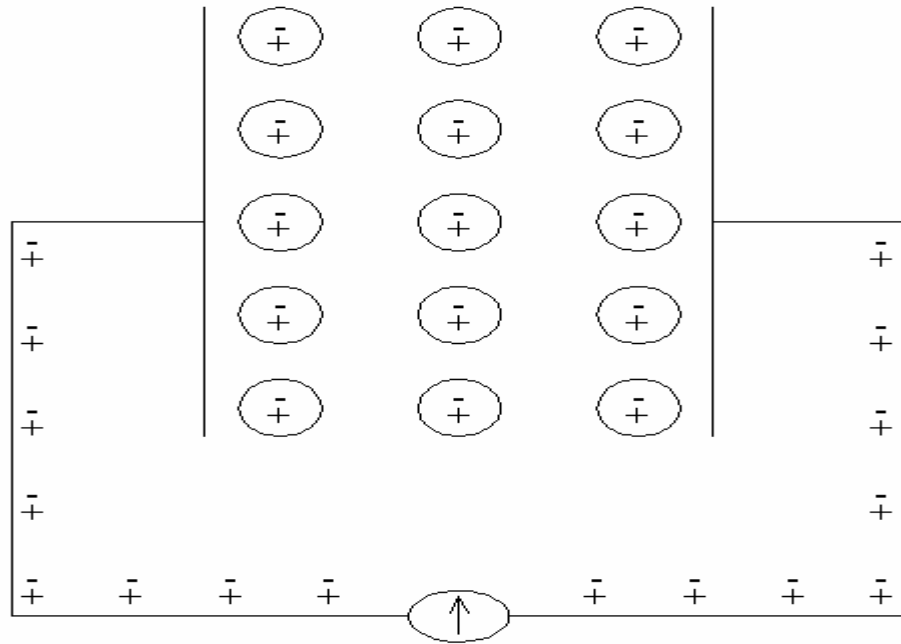
Curie kardeşler, Lippmann tarafından ortaya atılan tersine dönüştürme işlemini, kendi buluşlarından sonraki yıl kanıtladılar [3]. Bu durum elektrik alanı ürettiği için direkt piezoelektrik etki olarak adlandırılırken, elektrik enerjisi uygulandığında meydana gelen deformasyon sonucu oluşan mekanik enerji üretmesi ters piezoelektrik etki olarak adlandırılır. Bu bağlamda, iki yönde enerji dönüştürme yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Piezoelektrik materyalin basit moleküler yapısı, a) bozulmamış yapı b) baskı altındaki molekül yapısı c) etki ile yüzeyde oluşan kutuplaşma



Şekil 2.2. Baskı altındaki piezoelektrik materyalin oluşturduğu akım



Şekil 2.3. Baskı kaldırıldığında materyalin tekrar nötrale olması ve akımın kesilmesi

İlk yaklaşımda, Curie kardeşlerin elde ettiği deneylerde yüzey yoğunluğunun yüklerin üretilmesini sağlayan durum basınçla doğru orantılı olduğu ortaya çıkarılmıştır [3]. Bu bağlantının ifadesi;

$$P_p = d.T \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada  $P_p$ , piezoelektrik polarizasyon vektörüdür ve şiddeti piezoelektrik etkinin bulunduğu yüzey yoğunluğundaki bağlı yüklere eşittir.  $d$  piezoelektrik gerilme katsayısıdır ve  $T$ , gerginliktir ve piezoelektrik maddeye bağlıdır.

Ters piezoelektrik etki, aşağıdaki gibi basit bir şekilde ifade edilebilir;

$$S_p = d.E \quad (2.2)$$

burada  $S_p$ , piezoelektrik ile oluşturulan gerilmedir,  $E$  ise uygulanan elektrik alan şiddettir.

Direkt ve ters piezoelektrik etkiler, maddelerin elastik özellikleri ele alınarak alternatif olarak ifade edildiğinde;

$$P_p = d.T = d.c.S = e.S \quad (2.3)$$

$$T_p = cS_p = c.d.E = e.E \quad (2.4)$$

elde edilir. Burada  $c$ , elastik sabiti, uygulanan baskı ile üretilen gerilmeyle bağlantılıdır ( $T=c.S$ ),  $S$ , basınç değişikliğinin sebep olduğu hacim değişikliği katsayısıdır ( $S=c.T$ -komplians katsayısı) ve  $e$ , piezoelektrik gerilme sabitidir.

## 2.1. Piezoelektriğin Elastik Sabitine Etkisi

Piezoelektrik olayı maddelerin katılığının artmasına neden olur. Bu etkiyi anlamak için piezoelektrik maddenin S gibi bir baskıya maruz kaldığını varsayalım. Bu gerilme iki etkiye sahip olacaktır. Bir taraftan da,  $T_e$  (2.3) denklemine göre  $P_e = e.S$  gibi piezoelektrik polarizasyon üretecektir. Bu polarizasyonla oluşan elektrik alanı;

$$E_p = \frac{P_p}{\epsilon} = \frac{e.S}{\epsilon} \quad (2.5)$$

olduğu görülür. Burada  $\epsilon$ , maddenin dielektrik sabitidir.

Piezoelektrik kaynaklı elektrik alanı, maddenin elektriksel yapısının bozulmasına karşı bir kuvvet oluşturur, bu  $T_p = e.E_p$  ile tanımlanan gerilmedir. Bu gerilme elastik olduğu için, maddenin bozulmasına karşıdır. Kalıcı biçimde baskı ile oluşturulan gerilme S;

$$T = T_e + T_p = cS + \frac{e^2}{\epsilon}.S = \left( c + \frac{e^2}{\epsilon} \right).S = \bar{c}.S \quad (2.6)$$

bağıntısı ile oluşturulabilir. Burada  $\bar{c}$ , piezoelektrik katılık sabitidir. Piezoelektrik nedeniyle elastik sabitindeki artışı kapsamakta olup piezoelektrik içerisinde sonradan oluşacak sabitdir.

## 2.2. Piezoelektriğin Dielektrik Sabitine Etkisi

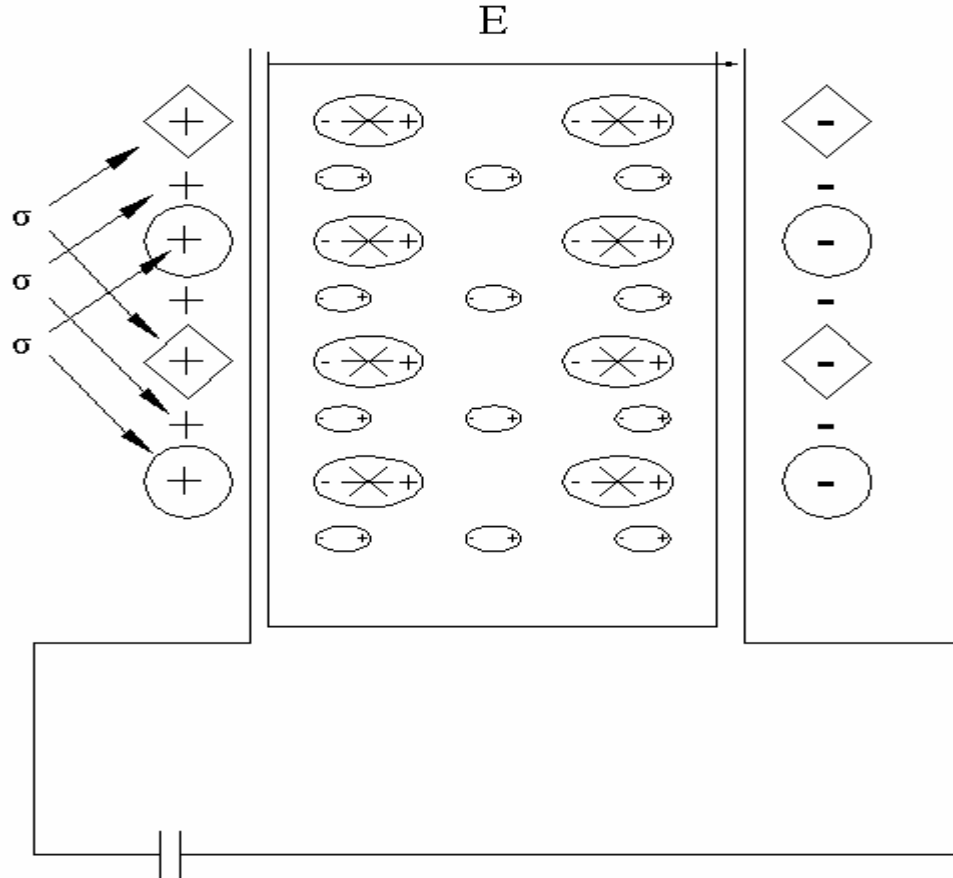
Dielektrik sabiti  $\epsilon$  olan maddenin iki elektrot arasına, E elektrik alanı uygulandığı zaman, elektrik akımı bu elektrotlar arasında akmaya başlar, üretilen yüzey yük yoğunluğu  $\rho = \rho_0 + \rho_p$ 'dir, şiddeti ise  $D = \epsilon.E$ 'dir. Eğer madde piezoelektrik ise, elektrik alanı ile üretilen gerilme bağlantısı,  $S_p = d.E$  olur. Piezoelektrik kaynaklı bu



baskı, yüzey yük yoğunluğunu artırır. Bu durum  $P_p = e.S_p = e.d.E$  ifadesi ile açıklanabilir (Şekil 2.4.). Elektrik alanı korunmuş sabittir, piezoelektrik polarizasyon, elektrotlar arasında akan eşit büyüklükteki ( $\rho_p = p_p$ ) elektrik akışı sayesinde artar. Bunun için, toplam elektrik yük akışı;

$$D = \epsilon.E = \epsilon.E + e.d.E = \bar{\epsilon}.E \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $\bar{\epsilon}$ , etkin dielektrik sabitidir.



Şekil 2.4. Piezoelektrik ve dielektrik materyallerin elektriksel akışları

### 2.3. Elektrik Akışı ve İçsel Baskı

Bir önceki konuda, (2.7) denkleminde açıklandığı üzere, elektrik akışı ve elektrik alanı  $E$  piezoelektrik maddeye uygulandığı zaman oluşur ve dielektrik materyal;

$$D = \varepsilon.E + P_p = \varepsilon.E + e.S_p \quad (2.8)$$

olarak tanımlanır. Aynı şartlar altında, materyalde içsel baskı elde etmek istenir. Fakat piezoelektrik materyale uygulanan elektrik alanı,  $S_p = d.E$  ile verilen materyal yapısında bozulmaya neden olur. Bu gerilme, şiddeti  $T_e = c.S_p$  olan elastik baskı üretir. Diğer taraftan, elektrik alanı E, maddenin içsel yapısında  $T_p = e.E$  ile verilen bir kuvvet kullanır. Bu baskı, tam olarak gerilme ve bükülme ile oluşur. Bunun için, içsel baskı denenerek yapıldığında her iki sonucun farkıyla oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu fark;

$$T = c.S_p - e.E \quad (2.9)$$

olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, her baskı, maddede gerilme ve statik meydana getirecektir. Eğer değişken elektrik alanı uygulansaydı, gerilmede değişken olacaktı, materyalin parçacıklarının dinamik davranışları birlikte oluşur. Bu elektromekaniksel olay piezoelektrik materyallerle temas halindeki ortamda, bir karmaşıklığa neden olur. Bu etki dönüştürücülerde ve sensörlerde kullanılmaktadır.

#### **2.4. Değişken Elektrik Alanına Maruz Kalan Piezoelektrik Materyal için Temel Elektrik Empedans Modeli**

Elektrik alanı, yüzeylere yerleştirilen elektrotlar arasında potansiyel farkı oluşturulduğunda meydana gelir. Eğer uygulanan potansiyel farkı değiştirilse, elektrotlar arasında elektrik akışını sağlayan elektrik akımının arttığı kadar, elektrik alanında artar. Elektrik akışının artışı ile uygulanan voltaj arasındaki oran, piezoelektrik maddenin elektriksel empedansını verir. Örneğin, sadece dielektrik özellikleri varsa, sonuç elektriksel empedansı kapasitans değerleriyle çıkacaktır.

Piezoelektrik sistemler elektrik devreleri ile modellenir. Bu elektrik devresiyle analizini ve çalışmasının anlaşılmasını kolaylaştırır.

Elektrik devre modelini elde etmek için, piezoelektrik etkinin çalışmasında kullanılan basitleştirilmiş formüller kullanılır. Bu basitleştirilmiş formüller, temel olarak sonuçları değiştiremez ve bize kullanılabilir model fikrini verebilirler. Diğer taraftan, modelden elde edilen elektriksel parametrelerin tanımlamaları çok zor matematiksel işlemlerden elde edilir [3].

Şekil 2.5'de, piezoelektrik materyalin kalınlığından geçen enine çizgi gösterilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, Y eksenine doğru, elektrotlar arasında voltaj farklılığı oluşturularak elektrik alanı uygulandığında, Şekil 2.5.b'deki gibi materyal deforme olacaktır. Bu durumda alan ters oluşturulursa gerilme tekrar Şekil 2.5.'deki gibi olacaktır. Gerilme, akış oluşturulduğunda meydana gelmektedir veya diğer bir ifadeyle, yük hareketi bir yönde artırıldığında yada azaltıldığında oluşur. Bu nedenle, (2.10) denklemindeki gerilme  $S$ , bir yönde yük akışı eğilimi olarak tanımlanır. Böylece,  $y$  uzaklığı boyunca yük akışı  $\xi(y)$ 'dir, gerilmede bu bölge boyunca olacaktır.

$$S(y) = \frac{\xi(y)}{y} \quad (2.10)$$

Şekil 2.5.'de,  $y$  ekseninde yük artışının nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir, absis ekseninde boyunca geçersiz bir artış oluşur. Kalıcı bir biçimde, maksimum gerilme  $y = l/2$  ve ters işaret de akış işaretinin değişmesiyle ters yönde üretilir. Bu nedenle, gerilme,  $y = l/2$ 'de;

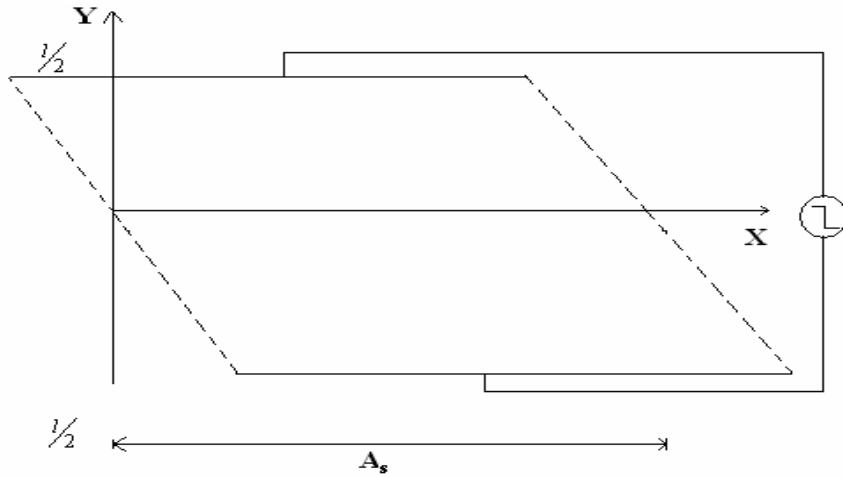
$$S(l/2) = \frac{\varepsilon}{l/2} = \frac{2\xi}{l} \quad (2.11)$$

olacaktır. Şekil 2.6.'da, elektrik alanı uygulandığında, materyal sonlarındaki kuvvet davranışları gösterilmiştir. Bu elektrik alanı X yönünde bir kuvvet oluşturur ki bu (2.4) denkleminde verilen piezoelektrik baskıyı tanımlar. Elastik baskı  $T_e = c.S_p$ , piezoelektrik baskıya karşıdır ve materyalin gerilmesinde savurmaya çalışır. Ayrıca yüklerin akışındaki sürtünmede piezoelektrik gerilmeye karşıdır, çünkü yük akışın zorlaştırır. İç sürtünme nedeniyle baskı, genelde vizkozite ile orantılıdır. Bu durum;

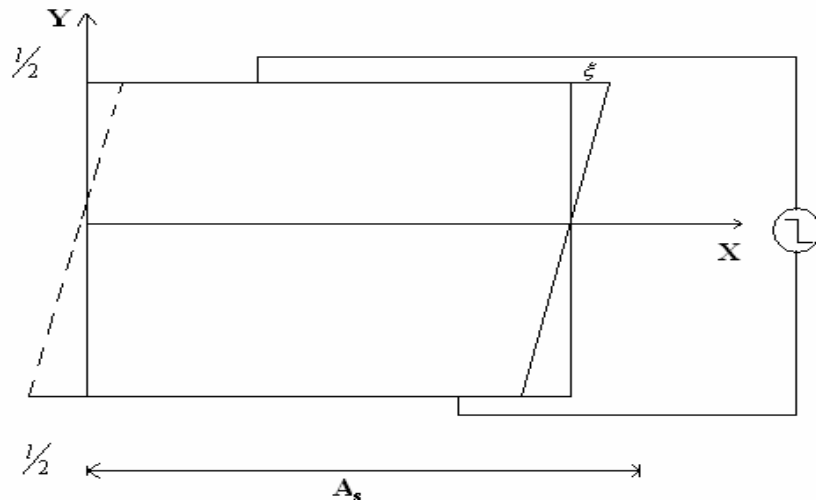
$$T_v = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{d^2\xi}{dy.dt} = \eta \frac{dS}{dt} \quad (2.12)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $\eta$ , vizkozite (akışkanlık) sabitidir.

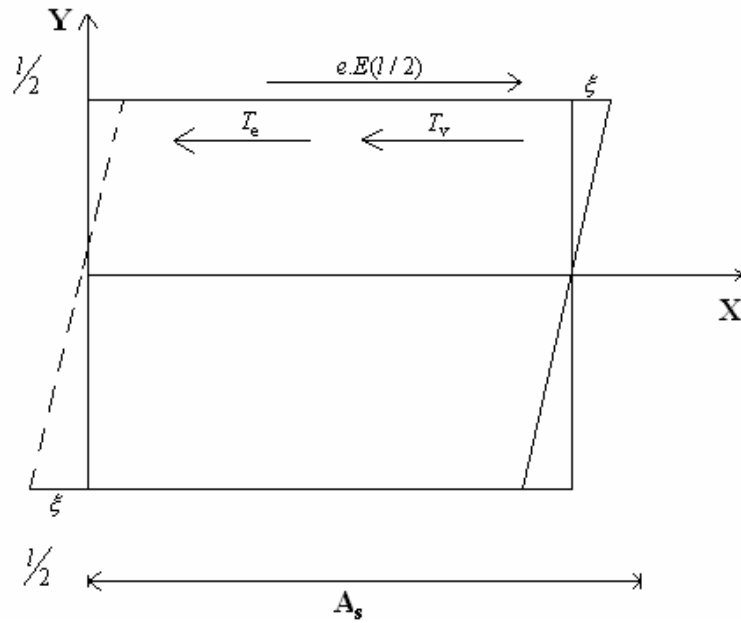
a)



(b)



Şekil 2.5. Gerilmenin oluşturulması a) doğru yönde voltaj verildiğinde b) ters gerilim uygulandığında



Şekil 2.6. Elektrik alanı altında piezoelektrik materyalin sonunda oluşan baskı ve gerilmeler

Kuvvetlerin bileşkesi, yüklerin hızlanmasıyla oluşan kütleye eşittir. Baskılar açısından ele alındığında, yüzey kütle yoğunluğu da göz önüne alınması gerekir. Bu nedenle, Newton'un ilk kanunu materyal yüzeyine uygulandığında,  $y = l/2$  koordinatında, toplam gerilmeler;

$$\sum T = e.E(l/2) - c.S(l/2) - \eta \frac{dS(l/2)}{dt} = \rho_s \frac{d^2 \xi}{dt^2} \quad (2.13)$$

şeklinde çıkacaktır. Bu durumda, (2.11) ve (2.13) denkleminde,  $E(l/2)=V/I$  olarak ele alındığında, voltaj;

$$V = \frac{2\eta}{e} \times \frac{d\xi}{dt} + \frac{\rho_s l}{e} \times \frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{2c}{e} \xi \quad (2.14)$$

olarak tanımlanır. (2.8) denkleminde verilen elektrotlar arasındaki elektrik akışının zamana göre türevi alınırsa, akım yoğunluğu  $J$  bulunur. Bu işlem,

$$J = \frac{dD(l/2)}{dt} = \epsilon \frac{dE(l/2)}{dt} + e \frac{dS(l/2)}{dt} = J_d + J_p \quad (2.15)$$

yapılarak elde edilir. Burada,  $J_d$ , dielektrik etkiyle artan akım yoğunluğu cevabıdır.  $J_p$  ise piezoelektrik etki ile artan akım yoğunluğu cevabıdır. (2.11) denkleminde verilen  $J_p$  analiz edildiğinde;

$$J_p = \frac{2e}{l} \cdot \frac{d\xi}{dt} \quad (2.16)$$

sonucu çıkacaktır. Piezoelektrik etkiyle artan akım  $i_p$  ve elektrot yüzey alanı  $A_s$  ile  $J_p$ 'yi tekrar incelediğimizde, yüzey akım yoğunluğu  $J_p = i_p / A_s$  olarak ele alınabilir. Elektrot yüzey alanı  $A_s$ , (2.16) ile (2.17) denklemindeki bağıntılarından elde edilebilir. Bu denklemler,

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{l}{2eA_s} i_p \quad (2.17)$$

şeklinde eşitlenerek yüzey alanı bulunur. (2.17) denkleminde  $d\xi$  ifadeleri (2.14) denkleminde yerlerine yerleştirilirse,

$$V = \frac{\eta l}{A_s e^2} i_p + \frac{\rho_s l^2}{2A_s e^2} \frac{di_p}{dt} + \frac{cl}{A_s e^2} \int i_p dt \quad (2.18)$$

ifadesi elde edilir.  $L_m$  indüktanslı ve  $C_m$  kapasitanslı seri devre sonlandırılmadaki voltaj yükselmesi şu şekilde tanımlanır;

$$V = R_m i_p + L_m \frac{di_p}{dt} + \frac{1}{C_m} \int i_p dt \quad (2.19)$$

Bu nedenle, piezoelektrik etki ile (elektromekaniksel etki) artan akım, materyalden akarken, oluşturduğu etki seri devreden akıyormuş gibi etki oluşturur. Bu devredeki direnç, bobin ve kondansatör etkileri aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$R_m = \frac{\eta l}{Ae^2} = K_R \eta \quad (2.20)$$

$$L_m = \frac{\rho_s l^2}{2Ae^2} = K_L \rho_s \quad (2.21)$$

$$C_m = \frac{Ae^2}{cl} = K_c \frac{1}{c} = K_{C^s} \quad (2.22)$$

Bu modelde, materyalin mekaniksel ve elektriksel parametreleri arasındaki bağlantıları burada, rezistif elektrik parametresi, akış etkisiyle oluşan enerji kaybı ve akışkanlıkla orantılı olduğunu açıkça göstermektedir. İndüktif parametreler, yüzey kütle yoğunluğu ve atalet etkisiyle oluşan enerji depolama ile orantılıdır. Kapasitif parametreleri elastik etkiyle oluşan elastik komplians modeliyle orantılıdır. Bu bağlantılar, fiziksel özellikler ile elektrik parametreleri arasında açık bir benzerlik oluşturur ve piezoelektrik materyallerde meydana gelen fiziksel olayı yararlı bir şekilde değerlendirebiliriz [3].

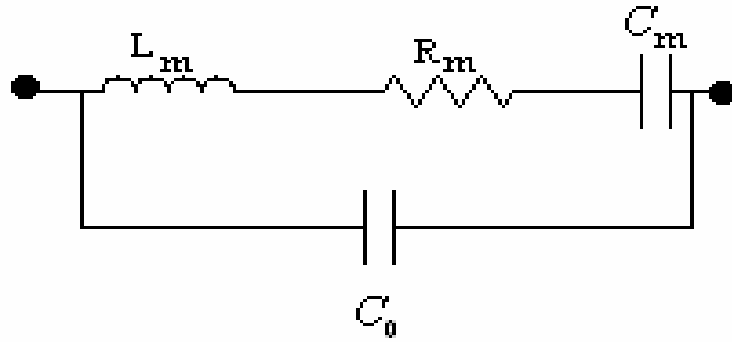
Akım  $i_p$  bileşeninden ayrı olarak, dielektrik etkiyle ilişkili  $i_d$  bileşenini değerlendirmek gerekecektir. Aslında (2.15) denkleminde  $i_d$ 'yi şu şekilde yazabiliriz.

$$i_d = A_s J_d = A_s \varepsilon \frac{dE(l/2)}{dt} = \varepsilon \frac{A_s}{l} \frac{dV}{dt} \quad (2.23)$$

Bu eşitlikte, değişken voltaj farkı  $V$  uygulandığı zaman kondansatör  $C_0 = \varepsilon A_s / l$  üzerinden artan akıma cevabını tanımlamaktadır.

Değişken voltaj farkına maruz kalan dielektrik ve piezoelektrik materyalin elektrik empedans model devresi Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Elektrik devre, iki paralel kolla oluşturulur. Bu kollardan birinde seri  $R_m$ ,  $L_m$  ve  $C_m$  devreleri, dinamik olaylara eş model oluştururken, diğer koldaki (statik kol)  $C_0$  kondansatörü, iki elektrot arasındaki dielektrik materyalin elektriksel kapasitansını belirlemektedir.

Elde edilen elektriksel model, basitleştirilmiş olmasına rağmen, rezonans frekansında titreştiği zaman, gerçek elektriksel empedans göstermektedir.

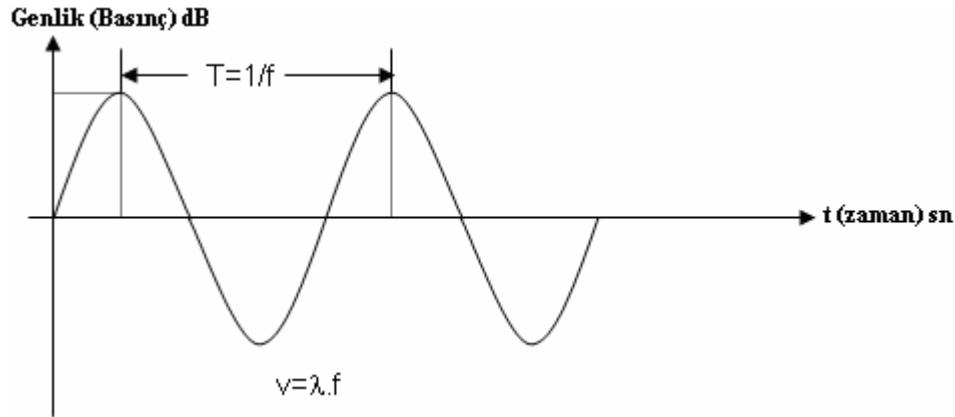


Şekil 2.7. Piezoelektrik materyalin rezonans yada rezonans frekansına yakın titreşim yaptığı durumundaki eşdeğer elektriksel devresi



### 3.ULTRASONİK DALGALAR ve ÖZELLİKLERİ

Ses dalgalarının tekrarlanan seri basınç dalgalarından meydana geldiği ve yayıldığı ortamlardaki molekülleri titreştirerek ilerlediği bilinmektedir. Ses dalgalarını frekanslarına göre infrases, işitilebilir ses ve ultrases (Ultrasound) olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür. 20 Hz'den düşük sesleri infrases, 20 Hz – 20 kHz arasındaki sesleri işitilebilir ses, 20 kHz – 30 MHz arasındaki sesleri ultrases olarak sınıflandırabiliriz. Şekil 3.1.'de bir ses dalgasının genliği, periyodu ve dalga boyu gösterilmiştir



Şekil 3.1. Bir ses dalgasının frekansı, periyodu ve dalga boyu

Bütün ses ve elektromanyetik dalgalar  $v = \lambda f$  eşitliğine uygun olarak yayılırlar. Burada;  $v$ , dalganın ortamdaki yayılım hızı (m/s),  $f$ , frekans (Hz),  $\lambda$ , dalga boyudur (m). Aynı denklem; dalganın periyodu,  $T$  (s) cinsinden  $v = \lambda / T$  olarak da yazılabilir.

#### 3.1. Ultrases'in Hızı ve Dalgaboyu

Düzgün elastik materyal içinde, sabit sıcaklık ve basınç altında, ultrasesin hızı sabittir. Hız ,

$$\lambda = c / f \quad (3.1)$$

ile hesaplanır. Burada,  $\lambda$ , dalga boyunu,  $c$ , materyal içindeki ses hızı,  $f$ , frekans olarak verilmiştir. Aynı tanımı periyot  $T$  ile yapılırsa,

$$\lambda = cT \quad (3.2)$$

şeklinde oluşur. Çizelge 3.1’de bazı piezoelektrik materyaller içerisindeki sesin hızı yoğunluk ile birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Sesin çeşitli maddeler içindeki yayılma hızı

<b>Madde</b>	<b>Yoğunluğu (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Hızı (m/sn)</b>
Hava	0,001	331
Yağ	0,93	1450
Su	1,0	1540
Kemik	1,85	4080
Alüminyum	2,7	6400

Değişik ortamlarda sesin yayılma hızı, ortamın iki önemli parametresine bağlıdır. Bunlardan birincisi ortamı oluşturan malzemenin sertliği [(B), (Bulk modülüs), (Stiffness)], ikincisi ise ortamın kütle yoğunluğudur, (g). Burada B; sıkıştırılabilirliğin (k, compressibility) tersidir, çünkü çok sert maddeler çok az sıkıştırılabilirler.

Bu değişkenler cinsinden sesin hızı:

$V = \sqrt{B/g}$  veya  $V = \sqrt{1/g.k}$  olarak gösterilebilir. Sesin sudaki yayılma hızı ortalama olarak 1540 m / s kabul edilebilir. Dönüştürücünün ses hızı sıcaklıkla değişebilir [5].

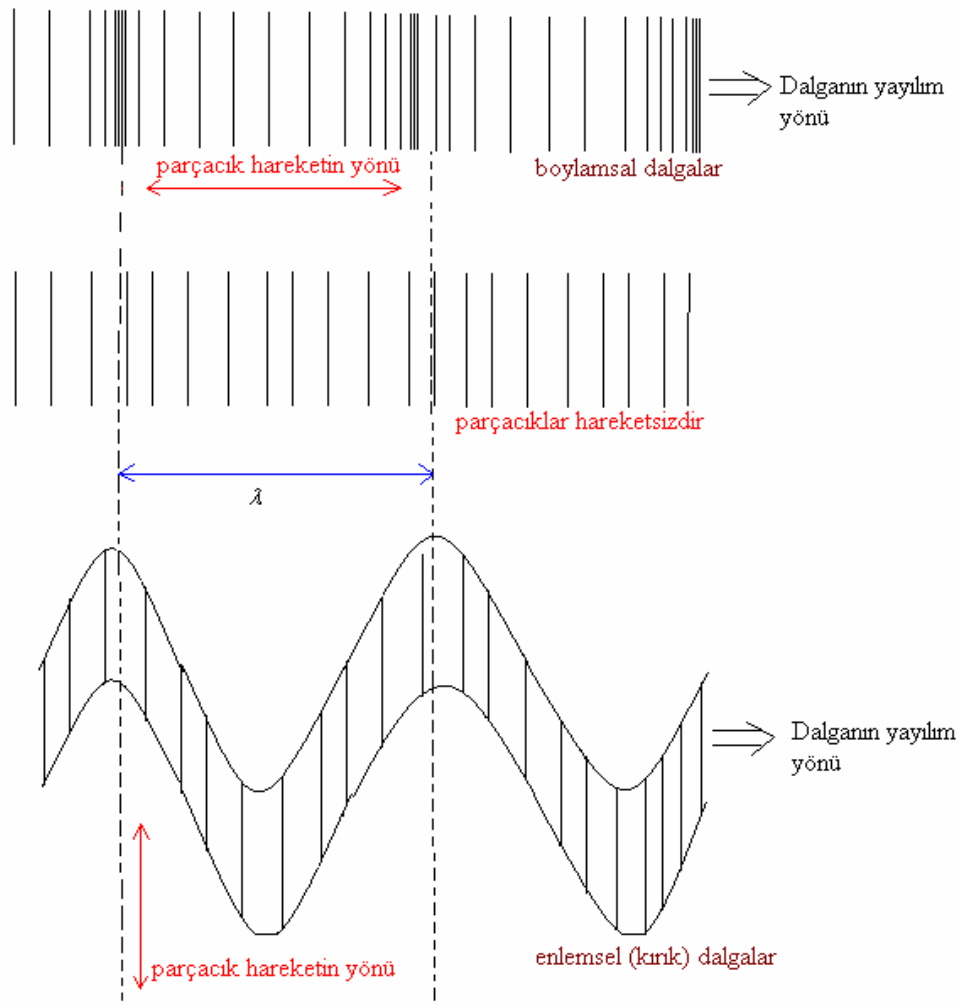
### 3.2. Dalga Yayılımı ve Parçacık Hareketi

Ultrasonik uygulamalarda ve incelemelerde, çoğu zaman ne boylamsal dalgalar ne de enlemsel dalgalardan faydalanılmaktadır. Daha çok yüzey dalgaları (rayleigh) ve Lamb dalgaları kullanılır [6]. Bu dalgaların özellikleri şöyledir:

- Boylamsal dalgalar, parçacıkla aynı yönde yayılan dalgalardır.

- Enlemsel dalgalar, parçacıkla dik yönde yayılan dalgalarıdır.
- Yüzey dalgaları, eliptiksel parça hareketine sahip ve materyalin yüzeyi boyunca yayılırlar. Hızları, yaklaşık enlemsel dalgaların %90'ını kadardır ve sızma (penetrasyonu) derinliği yaklaşık bir dalga boyu kadardır.
- Lamb dalgaları, dalga boyundan daha küçük kalınlığa sahip materyaller içinde kompleks titreşimlere sahiptir.

Şekil 3.2.'de boylamsal ve enlemsel dalgaların yayılımı ve parçacık hareketi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Enlemsel ve boylamsal dalga ile parçacıkların hareket yönü

### 3.3. Akustik Empedans, Yansıma ve Zayıflama

Materyalin akustik empedansı, ses tarafından oluşturulan parçacıkların akışına karşıdır. Akustik empedans;

$$Z = \rho \cdot c \quad (3.3)$$

ile hesaplanır. Bu eşitlikte  $Z$ , akustik empedans,  $c$  materyal içindeki sesin hızı ve  $\rho$  materyal yoğunluğudur. Farklı akustik empedansa sahip iki materyal arasındaki sınır, akustik arayüz olarak adlandırılır. Akustik arayüze ses çarptığında, ses enerjisinin bir kısmı geri yansır ve geri kalanı sınır yüzeyden diğer ortama geçer [7]. Bir ortamdan diğer ortama geçen sesin enerji kaybı dB olarak ;

$$dB_{kayıp} = 10 \log_{10} \left[ 4Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2 \right] \quad (3.4)$$

ile elde edilir. Burada  $Z_1$ , birinci ortam yada materyalin akustik empedansı,  $Z_2$  ise ikinci ortam yada materyalin akustik empedansıdır. Yansıyan sesin kaybı ise,

$$dB_{kayıp} = 10 \log_{10} \left[ (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \right] \quad (3.5)$$

ile edilir.

Sonuç olarak ses, ortam boyunca ve ortam değişikliğinde enerji kaybı sonucu zayıflayarak ilerler. Zayıflamaya, sesin kırılması, saçılması ve yansıması neden olur. Dönüştürücü tasarımda uygulamanın yapılacağı düzeye göre zayıflama önem arz etmektedir [7].

### 3.4. Ultrases'in Etkin Alanı

Dönüştürücüde ses alanı iki bölgeye ayrılır, yakın alan ve uzak alanlardır. Yakın alan dönüştürücünün önündeki bölgedir. Buradan eko genliği, dönüştürücüden  $N$  uzaklığında maksimumda sonlanana kadar, sesin maksimum ve minimumlarda bulunarak ilerler (Şekil 3.3.).

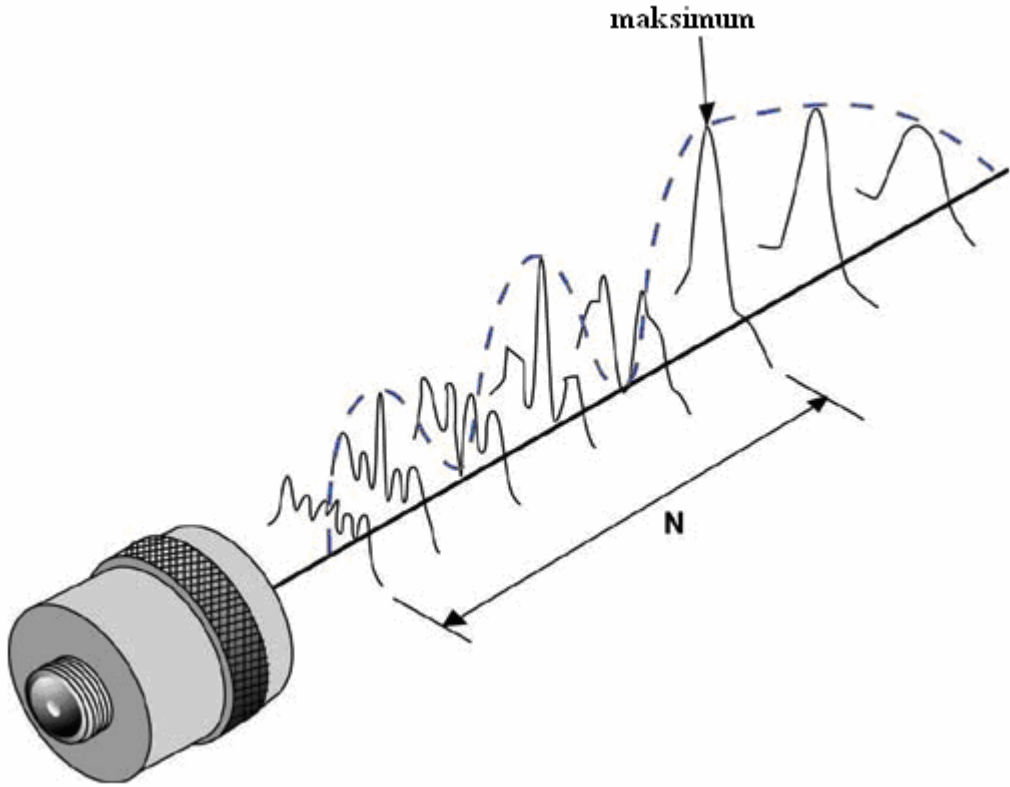
Ses maksimum olduğunda, yakın alana uzaklığı ( $N$ ) bilinmektedir ve dönüştürücünün odağındadır. Uzak alan, ses alan basıncının azalarak sıfıra geldiği yerdir. Yakın alanındaki değişimler, yakın alandan değerlendirme yapmasını zorlaştırır. Yakın alan uzaklığı, dönüştürücü frekansının bir fonksiyonudur, yarıçap ve ses hızı arasındaki bağlantılar,

$$N = D^2 F / 4c \quad (3.6)$$

$$N = D^2 / 4\lambda \quad (3.7)$$

şeklindedir. Burada,  $N$ ,yakın alan uzaklığı,  $D$ , dönüştürücüde kullanılan piezoelektrik materyalin yarıçapıdır.

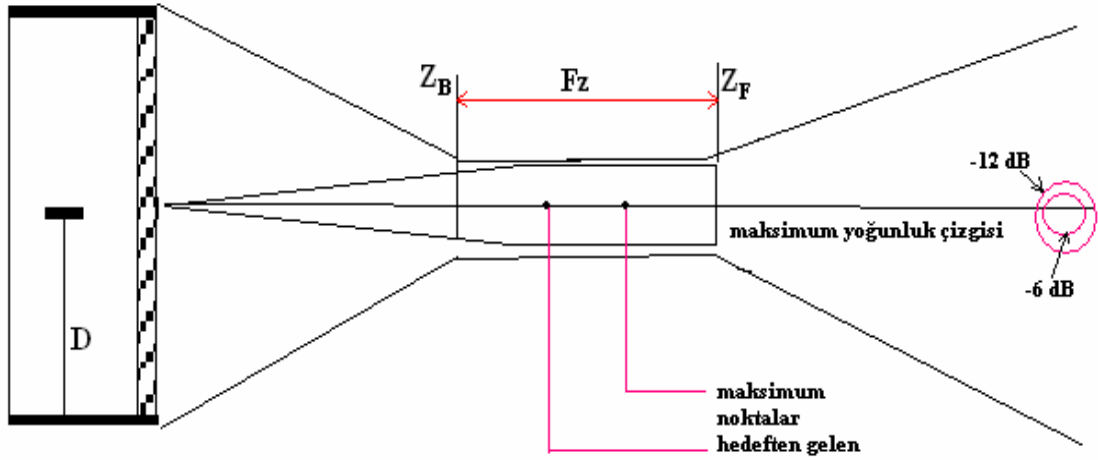
Dönüştürücüyü tanımlamak için birçok ses alanı parametreleri vardır. Ayrıca yakın alanda, hüzmeye genişliği ve odak bölgesi uygulamaya göre belirlenmesi için gereklidir (Şekil 3.4.). Dönüştürücü hassasiyeti, hüzmeye çapından etkilenir. Daha küçük hüzmeye çapı, daha büyük enerjinin yansımaya neden olur.



Şekil 3.3. Dönüştürücünün oluşturduğu yakın alan ve uzak alan içerisindeki maksimum ve minimum dalgalar

Şekil 3.4'de,  $Z_B$ , odak bölgesinin başlangıcı,  $F_2$  odak bölgesi,  $Z_E$  odak bölgesi sonu ve  $D$  dönüştürücünün yarıçapıdır.

Başlangıç ve son odak bölgeleri, -6 dB ve -12dB'e denk düşen darbe eko genlik ekseninde bulunurlar.



Şekil 3.4. Sesin başlangıç ve son odak uzaklıkları ile ölçüm yapılan alanların yoğunluk çizgileri

### 3.5. Ultrasonik Dalgaların Üretilmesi

Ultrasonik dalga üretmek için birkaç metot bulunmaktadır. Bunlar, piezoelektrik, elektrostriksiyon, manyetostriksiyon, elektromanyetik lazer (EMAT) ile ultrasonik dalgalar üretilebilmektedir. Bunlardan en çok piezoelektrik etki yöntemi kullanılmaktadır [8].

Piezoelektrik’de kristale baskı uygulandığı zaman sadece gerilme üretilmez, ayrıca potansiyel farkı oluşur. Bu olaya direkt piezoelektrik etki denir. Ters bir şekilde, potansiyel farkı uygulanırsa piezoelektrik materyal üzerinde baskı kuvvetleri oluşur. Yüksek frekanslar uygulandığı zaman ( $10^{12}$  Hz'lere kadar uygulanabilmektedir), piezoelektrik kristal ters etkide ultrasonik dalgalar üretmek için kullanılırken, direkt etkide ultrasonik dalgaları algılayabilir [8].

#### 3.5.1. Piezoelektrik etki ile ultrasonik dalgaların üretilmesi

İki elektriksel değişken ( $D, E$ ) ve iki tane mekaniksel değişken ( $T, S$ ) olmasından dolayı üretimi ifade etmek için birkaç metot kullanılmaktadır. Gerçekte bir elektriksel bir mekaniksel nitelik değişken olarak alınırsa, dört farklı bağıntıyı

kolayca yazabiliriz. Örneğin, T ve E'yi bağımsız değişken olarak seçersek,  $S = S(T,E)$  ve  $D = D(T,E)$  bağıntılarını elde ederiz [8].

Küçük değişimler için S'nin Taylor açılımını ve D'nin yaklaşık denge değerini ve sadece lineer terimlerle çıkarılmasını yapabiliriz. Sonuç olarak;

$$S = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_T + \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_E \quad (3.8)$$

$$D = \left( \frac{\partial D}{\partial T} \right)_T + \left( \frac{\partial D}{\partial E} \right)_E \quad (3.9)$$

bağıntıları elde edilir. Oransal sabitleri tanımlarsak;

$$s^E = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_E \quad (3.10)$$

$$d = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_T = \left( \frac{\partial D}{\partial T} \right)_E \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_T = \left( \frac{\partial D}{\partial E} \right)_T \quad (3.12)$$

sonuçlarını elde ederiz. Burada, d termodinamik etkenlerden elde edilmiş aynı şartlar da diğer bağıntılar eşitliğidir.

Böylece;

$$S = s^E T + dE \quad (3.13)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (3.14)$$

eşitliklerini elde ederiz. Aynı şekilde diğer temel bağıntılar,

$$S = s^D T + gD \quad (3.15)$$

$$E = -gT + \beta^T D \quad (3.16)$$



$$T = e^E S - eE \quad (3.17)$$

$$D = eS - \varepsilon^S E \quad (3.18)$$

$$T = c^D S - hD \quad (3.19)$$

$$E = -hs + \beta^S D \quad (3.20)$$

elde edilir. Bu sabitlerden ikisi dönüştürücü tasarımda göz önüne alınır.

1. Alıcı sabiti  $g$  ve potansiyel düşümünü belirlemek için (3.15) ve (3.16) denklemleri kullanılır. Yüksek empedans alıcılarda, giriş akımı düşüktür. Piezoelektrik dönüştürücülerdeki elektrotlardan geçen  $i_d$  deplasman akımı sıfıra yaklaşır.  $i_d = \partial D / \partial t$  'de  $D$  sabitine sıfır verilirse,  $E = g.t$  ve  $S = S^D T$  olur. Dönüştürücüde giriş baskısı  $T$ 'li potansiyel farkı  $g$  ile orantılıdır.

$$g = \frac{d}{E^T} \quad (3.21)$$

2. İletim sabiti  $h$ , (3.19) ve (3.20) denklemlerindeki bağıntılardan elde edilir. Bunun için elektrik alanı ile baskı oluşturulmalıdır. Aynı yaklaşımda  $h = e / \varepsilon^S$  olarak çıkarılır. Gerçek uygulamada kristaller üç boyutlu çalışırlar, bu taktirde sabitler  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$  vektörel büyüklükleri,  $T_{ij}$ ,  $S_{KL}$  matrislerine uygulanması gerekir. Bu durumda,  $e \rightarrow e_{ijk}$  piezoelektrik sabiti 3 boyutlu matris tanımlamasıyla çözülür. Kısaltarak yazarsak, elastik sabite gelince  $e_{ij}$ ,  $i = (x, y, z - veya -1, 2, 3)$  ve  $j = 1, 2, \dots, 6$  olur. Böylece, tek temel bağıntı yazılırsa;

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{ii} E_j \quad (3.22)$$

$$D_i = \varepsilon_{ij}^S E_j + e_{ij} S_j \quad (3.23)$$

şekilde tanımlanır.  $\varepsilon_{ij}$ ,  $c_{ij}$  ve  $e_{ii}$  'nin sıfır olmayan değerleri simetri ile belirlenir.  $Z$  eksenine ilgili enine izotropik PZT'nin önemli sonuçları elde edilir.  $Z$  eksenine

boyunca boylamsal yayınımları, PZT kaplama yüzeyinde normal olarak ele aldık. Eğer dalga boyundan daha geniş kaplama olursa, kenarlarda  $S_1 = S_2 = 0$ ,  $T_1 \neq 0$  ve  $T_2 \neq 0$  olarak sabit kalacaktır [8].

Elektrik alanı  $E_z$  uygulandığı zaman  $T_3$ 'ü bulmak isteriz. İki parametre,

$$T_3 = c_{33}^E S_3 - e_{3z} E_z \quad (3.24)$$

$$D_z = \varepsilon_{zz}^S E_z - e_{z3} S_3 \quad (3.25)$$

olarak elde edilir. Önemli sabitler  $c_{33}$  ve  $e_{z3}$ 'dir. Enine izotropik (hexagonal) durum için sıfır olmayan sabitlerdir. Bu sabitler  $c_{11} = c_{22}$ ,  $c_{11} - c_{12} = 2c_{66}$ ,  $c_{44} = c_{55}$ ,  $c_{44} = c_{33}$  ve  $e_z, e_{z1}, e_{z2}, e_{z4} = e_{z5}$ 'e eşittir. Ayrıca dielektrik matrisden  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$ 'dir.

### 3.5.2. Piezoelektrik kuplaj faktörü

Kuplaj faktörü, elektriksel enerjiyi mekaniksel enerjiye dönüştürme verimini belirlemek için kullanılır. Ayrıca, farklı, piezoelektrik materyallerin karşılaştırılmasında kullanılır. IEEE'nin piezoelektrik standartlarında değerlendirilmektedir. Z eksenini boyunca yayılımındaki tek boyutlu durum ele alınarak incelenmiştir.

Sonsuz piezoelektrik dielektrik ortam için, yüksüz ve  $B=0$ 'da,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.26)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = -\vec{B} = 0 \quad (3.27)$$

$$\vec{J} = \vec{D} = 0 \quad (3.28)$$

sonuçları elde edilir. Buradaki  $\vec{B}$ , tam geçiş fonksiyonu,  $\vec{D}$ , deplasman vektörüdür. Bu bağlantılar bizi,

$$E = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial D_z}{\partial z} = 0 \quad (3.30)$$

sonuçlarına götürür. Boylamsal dalgalar için, T ve D için  $S = \frac{\partial U_z}{\partial Z}$ 'de temel bağıntıları kullanarak,

$$T_{zz} = c^E \frac{\partial U_z}{\partial Z} - eE_z \quad (3.31)$$

$$D_z = e \frac{\partial U_z}{\partial Z} + \epsilon^S E_z \quad (3.32)$$

matris fonksiyonları elde edilir. Buradaki u, malzeme yüzeyindeki uzayıp kısılma hızıdır. Bağıntıları (3.33) denkleminde uygulanırsa (3.34) denklemini elde edilir.

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (3.33)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = c^E \left( 1 + \frac{e^2}{c^E \epsilon^S} \right) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \quad (3.34)$$

Bu piezoelektrik ortamın ses hızını, piezoelektrik olmayan ortamdaki durumla karşılaştırmasını kolaylaştırır.

$$V_L = \sqrt{\frac{c^E}{\rho}} \quad (\text{katı olmayan ortam}) \quad (3.35)$$

$$V_L^D = V_L \sqrt{1 + K^2} \quad (\text{katı ortam}) \quad (3.36)$$

cevapları

$$c^D = c^E (1 + K^2) \quad (3.37)$$

ile

$$K^2 = \frac{e^2}{c^E \epsilon^{S'}} \quad (3.38)$$

piezoelektrik kuplaj faktörü ile gerçekleşir. Bu bağıntılar  $D = 0$  için geçerlidir.  $K^2$  değeri  $10^{-2}$  ile 0,5 arasında olabilir.  $K^2$  formülleri enlemsel kırık dalga üreten ve algılayan dönüştürücülerde kullanılır. Pratikte dönüştürücü analizinde, empedans,  $K_T^2$  ile belirlenir. Etkin kuplaj sabiti;

$$K_T^2 = \frac{K^2}{1 + K^2} \quad (3.39)$$

ile hesaplanır ( $K^2 \ll 1$ ,  $K_T^2 \approx K^2$  için geçerlidir, yoksa işaret farklı çıkacaktır.)

Ayrıca kuplaj faktörünü,

$$K^2 = \frac{U_{elec}}{U_{elas}} \quad (3.39)$$

şeklinde tanımlanabilir [8]. Burada  $U_{elec}$ , depo edilen elektriksel enerjiyi,  $U_{elas}$  ise depo edilen elastike enerjiyi tanımlar. Bu bağıntıda, kuplaj faktörü elektriksel enerjinin mekaniksel enerjiye yansıtılması, parametresi olduğu açıkça görülmektedir. Bu bağıntı;

$$\frac{U_{elec}}{U} = \frac{K^2}{2(1 + K^2)} \quad (3.40)$$

şeklinde tanımlanabilir [8]. Burada  $U$  toplam depo edilen enerjiyi temsil eder (toplam kinetik, elastik ve elektriksel enerji ).

#### 4. DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMINDA KULLANILAN MODELLER

Piezoelektrik dönüştürücüler, birçok genişbandlı ultrasonik sistemin ana elemanıdır. Genellikle bu dönüştürücüler görüntüleme ve algılama amaçlı kullanılırlar. Medikal görüntüleme veya zararlı olmayan testlerde kullanılan genişbandlı ultrasonik uygulamalarda, piezoelektrik dönüştürücü, geniş frekans aralığında iyi verimle ultrasonik sinyalleri üretmeli ve almalıdır. Yüksek çözünürlük geniş sinyal genliği sağlarken kısa süreli cevap iyi çözünürlük sağlar [3].

Piezoelektrik dönüştürücü olarak en çok ince kaplamalı piezoelektrik kullanılır. Yanal boyutları kalınlığından daha büyüktür ve kalınlığına titreşim (TE) modunda genellikle 0,5-15 MHz'lik frekans aralığında çalışırlar. Farklı tipteki piezoelektrik materyaller, dönüştürücüde aktif eleman olarak kullanılır. Kurşun zirconate titanate (PZT) gibi ferroelektrik seramikler yüksek kuplaj katsayısına sahiptir. Polyvinylidene difluoride (PVDF) gibi polimer piezoelektrik dönüştürücüler, faydalı düşük akustik empedansa sahiptirler. Piezoelektrik karışımlar, piezoseramik karışımlarla, piezoelektrik olmayan polimerlerden oluşur. Çizelge 4.1'de çeşitli dönüştürücülerin karşılaştırılması verilmiştir [3,9,10].

Çizelge 4.1. Piezoelektrik materyallerin genel karşılaştırılması

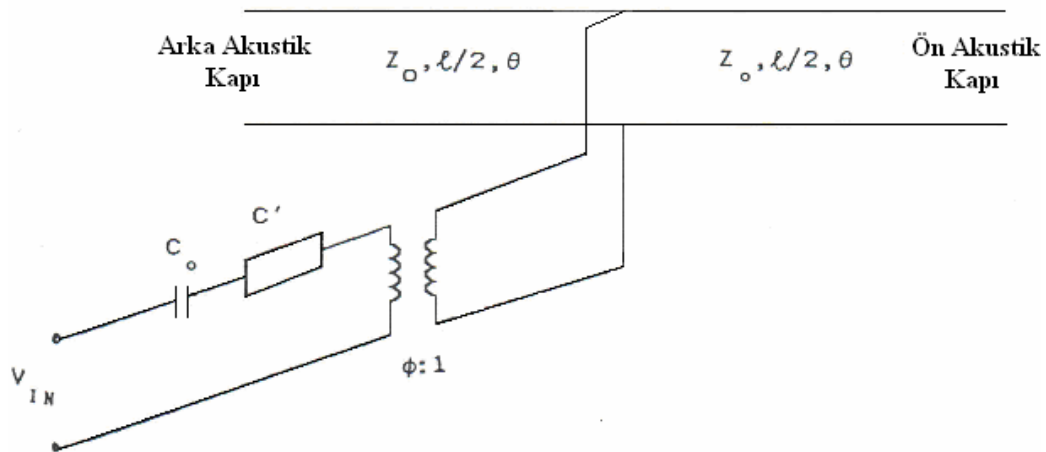
Materyal	PVDF	PZT-5A	Quartz	PbNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Copolymer
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,78	7,78	2,65	6,0	1,9
Hız (m/sn)	2200	4350	5700	3300	2400
Piyasada mevcut olan kalınlıklar (mm)	0,1-0,0006	>0,005	>0,005	>0,01	>60
Kullanabilir Frekans Aralığı (MHz)	10-180	>40	>60	20	10-180
Elektromekanik kuplaj katsayısı(k <sub>t</sub> )	0,12-0,2	0,49	0,1	0,37	0,23-0,3

Genişbandlı ultrasonik dönüştürücü tasarlarken teorik hesaplamalar kullanılır. Bu hesaplamalar genel cevapların tahmin edilmesini sağlar. Bu amaçla, tasarımda yaklaşık modeller kullanılır. Aktif piezoelektrik kaplamalarında genişliğin kalınlığa oranı yeteri kadar büyük olmalıdır. Tek boyut modellerde, dönüştürücü özelliklerinin tahmininde iyi bir yaklaşımdır [3].

Devre analizi iki göz devreli dönüştürücü modelinde kullanılır. Dönüştürücü sistemin değerlendirilmesi akustik uygunlaştırma tabakası ve elektriksel uygunlaştırma bileşenlerini kapsayarak incelenmelidir.

#### 4.1. KLM-Modeli

Bir dönüştürücü üç ana kısma bölünerek incelenebilir. Bu üç kısımdan ikisi akustik kısmını oluştururken diğer kısım ise elektriksel yapıyı oluşturur. KLM eşdeğer devresinin en belirgin özelliklerinden biri şudur: Dönüştürücünün akustik özelliklerini belirleyen eleman, akustik bir transmisyon (iletim) hattı modellenmiştir. Yani akustik etkiler, toplu parametrelili akustik empedanslarla değil de, akustik bir transmisyon hattı yardımıyla dağılmış parametrelili olarak aynen muhafaza edilmiştir.



Şekil 4.1. KLM eşdeğer devresi

Bu hat parçasının uzunluğu dönüştürücünün kalınlığı  $L$ 'ye eşittir. İdeal bir elektroakustik transformatör kullanılarak bu hat parçası orta noktasından KLM eşdeğer devresinin elektriksel kısmına kuple edilmiştir. Bu eşdeğer devrenin ikinci bir özelliği de ideal elektroakustik transformatörün dönüştürme oranına frekansın fonksiyonu olmasıdır [11].

Transformatörün dönüştürme oranı  $\phi$

$$\phi = \left[ k_t \left[ \frac{\pi}{\omega_o C_o Z_o} \right]^{1/2} \cdot \text{sin } c \left[ \frac{\omega}{2\omega_o} \right] \right]^{-1} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir [15]. Bu ifadedeki  $\text{sin } c(x)$

$$\text{sin } c(x) = \frac{\text{sin}(\pi x)}{\pi x} \quad (4.2)$$

şeklindedir.  $L$  uzunluğundaki akustik transmisyon hattının mekanik rezonans açılal frekansı  $\omega_o$ , karakteristik empedans  $Z_o$  ve sıkıştırılmış kapasitesi de  $C_o$  ile ifade edilmektedir.

Toplu elemanlı elektriksel devre bir ideal elektroakustik transformatör ve ona bağlı iki kapasiteden meydana gelmektedir.  $C_o$  dönüştürücünün sıkıştırılmış kapasitesini  $C$  ise elektromekanik kuplaj katsayısı  $k_t^2$  nin ve frekansın fonksiyonudur ve

$$C = \frac{-C_o}{k_t^2 \cdot \text{sin } c \left[ \frac{\omega}{\omega_o} \right]} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir.

MHz'ler mertebesindeki frekanslarda çalıştırılacak geniş bantlı dönüştürücülerin incelenmesinde ve tasarımıda, mekanik ve elektriksel elemanların incelendiği yollar

arasında farklılık olması doğaldır. Çünkü bu frekans değerleri için yapılan akustik empedans uydurma teknikleri dağılmış parametrelili transmisyon hattı yaklaşımı gerektirmektedir. Bu yüzden KLM modeli bu tür dönüştürücülerin tasarımında daha etkili olmaktadır [12].

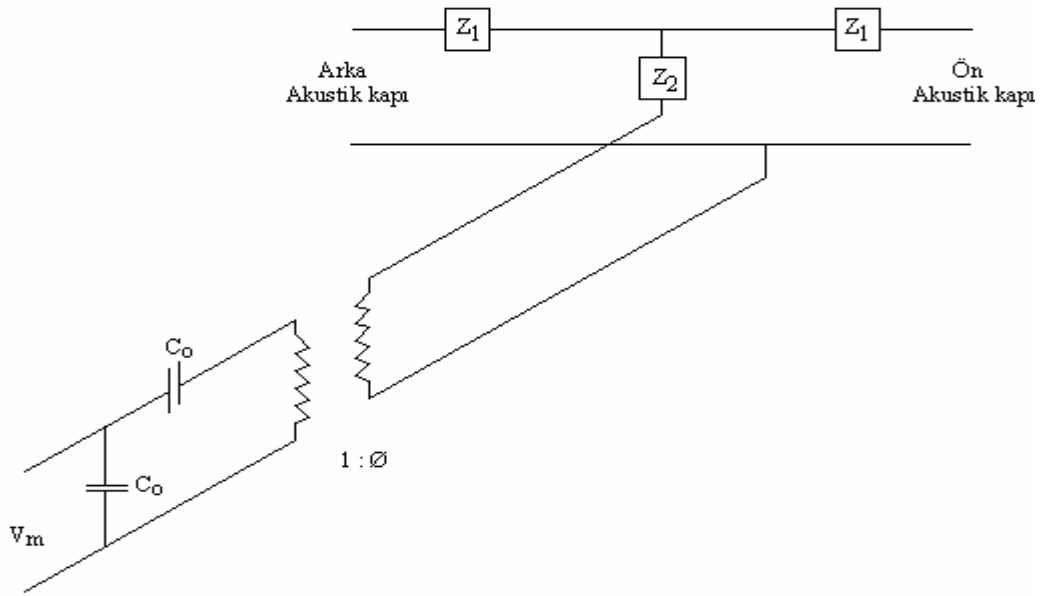
#### 4.2. Mason Eşdeğer Devresi

Piezoelektrik malzemede mekanik ve elektriksel özellikler iç içe bulunurlar. Bundan dolayı, böyle bir malzemenin özelliklerini ortaya koyacak eşdeğer devrelerdeki elemanların, elektriksel ve mekanik parametrelerin karışımını içermesi beklenir. Fakat mason, mekanik ve elektriksel özelliklerin ideal bir elektroakustik transformatör ile birbirlerini kuple edildiği bir eşdeğer devre geliştirmiştir. Bu devrede ideal transformatörün dönüştürme oranı ( $\phi$ ) frekanstan bağımsızdır. Bu durum denklem (4.4)'de;

$$\phi = gC_0c^D \quad (4.4)$$

şeklinde verilmektedir. Bu ifadede  $g$  piezoelektrik sabiti,  $C_0$  sabit şekil değiştirme oranı altında plakanın kapasitesini ve  $c^D$  ise D'nin sabit olduğu durumdaki (elektrotların uçları açık devre iken) elastik katılık sabitini ifade etmektedir. Bu eşdeğer devre Şekil 4.2. 'de verilmiştir. Bu eşdeğer devre piezoelektrik plakanın ön ve arka yüzeylerine karşılık gelen iki akustik kapıya ve metal elektrotlara karşılık gelen bir elektriksel kapıya sahiptir [11].

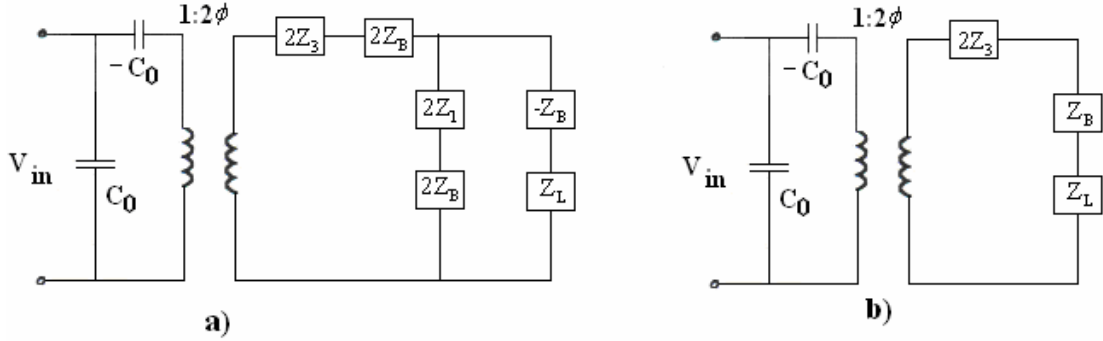




Şekil 4.2. Mason eşdeğer devresi

Şekil 4.2.'deki eşdeğer devresindeki, ön akustik kapı ve arka akustik kapıların empedansları  $Z_1 = Z_0 \tanh(\theta\ell/2)$ ,  $Z_2 = Z_0 \cosh(\theta\ell)$  ve  $C_0 = \epsilon^5 A/\ell$  eşitlikleri kullanılarak bulunabilir.

Piezoelektrik malzemenin hem ön yüzeyi hem de arka yüzeyi mekanik empedansla yüklenmektedir. Mason, Norton tarafından geliştirilen devre özdeşliğini kullanarak, Şekil 4.2.'deki eşdeğer devrenin Şekil 4.3.a'daki gibi daha kullanışlı bir şekle getirebileceğini göstermiştir [2]. Dönüştürücüler genellikle kendi mekanik rezonans frekansları civarında çalıştırılırlar. Bu frekanslarda, Şekil 4.3.a'daki eşdeğer devrenin  $2Z_1$  elemanını ihtiva eden kolun empedansı paralelindeki kolun empedansı ile karşılaştırıldığında çok büyüktür. Bundan dolayı bu kol açık devre gibi düşünülüp, bu eşdeğer devre Şekil 4.3.b'deki gibi basitleştirilebilir.



Şekil 4.3. Mason eşdeğer devresinden a) norton özdeşliği kullanarak b) a'dan elde edilen devrede  $2Z_1$  elemanının bulunduğu kolu ihmal ederek türetilen eşdeğer devreler

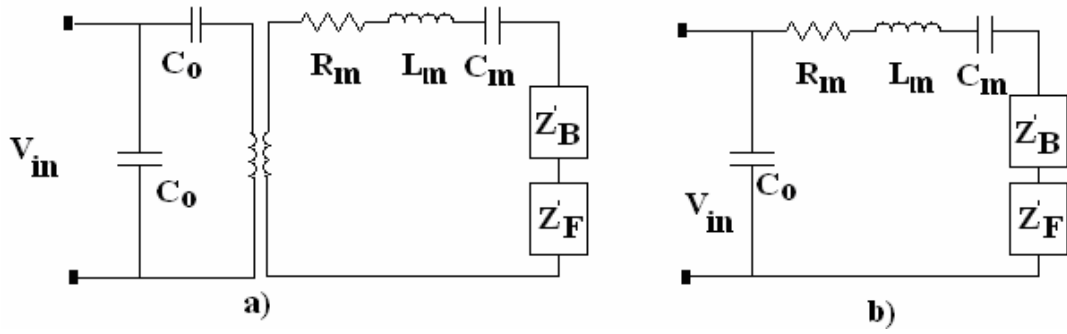
Şekil 4.3.b'deki  $Z_1$  ve  $Z_2$  empedansları önceki gibi bulunurken,  $Z_3$  ise  $Z_3 = Z_0 \coth(\theta \ell / 2)$  eşitliği bulunabilir.

Kayıpsız bir piezoelektrik plakanın ( $\alpha = 0$ ,  $\theta = j\omega \div v^0$ ) akustik kapılarında herhangi bir yükün bulunması ( $Z_f = 0$ ,  $Z_B = 0$ ) halinde bu plakanın elektriksel rezonansı için şu söylenebilir: Dönüştürücünün kalınlığı  $\ell$  dalga boyunun yarısının tek katlarına eşit olduğunda piezoelektrik plaka rezonansa gelir ( $\ell = n \left( \frac{\lambda}{2} \right)$ ,  $n = 1, 3, 5, 7, \dots$  tek sayı). Yani  $n$ 'nin tek olduğu rezonans frekansları civarında elektriksel enerji optimum oranda mekanik enerjiye dönüştürülür. İfadesinden de anlaşılacağı üzere  $n$ 'nin tek değerleri için maksimum elektromekanik dönüşüm sağlandığı halde çift değerleri için mekanik kısımda hiç bir akım akmaz. Bundan dolayı da piezoelektrik plakanın dışarıdan görülen elektriksel yapısı sadece bu plakanın sıkıştırılmış kapasitesi  $C_0$  dan ibaret olmaktadır [13]. Tek değerli  $n$ 'ler için oluşan mekanik rezonans frekansları civarında eşdeğer devre daha da basitleştirilebilir. Dönüştürücüler genelde temel rezonans frekansı ( $n=1$ ,  $f_0 = v^D / 2\ell$ ) civarında çalıştırılırlar. Şekil 4.3b'deki  $2Z_3$  empedansının değeri  $f_0$  frekansı civarında rezonansa sahip seri bir RLC devresiyle yaklaşık olarak ifade edilebilir. Bu düzenleme sonucu oluşturulan Şekil 4.4a'daki eşdeğer devrenin eşdeğer kapasitesi (esnekliği), endüktansı (kütlesi) ve rezistansı şu şekilde ifade edilebilir [14].

$$C_m = (\pi^2 f_0 Z_0)^{-1}, \quad L_m = Z_0 / (4f_0), \quad R_m = \alpha \ell Z_0 \quad (4.5)$$

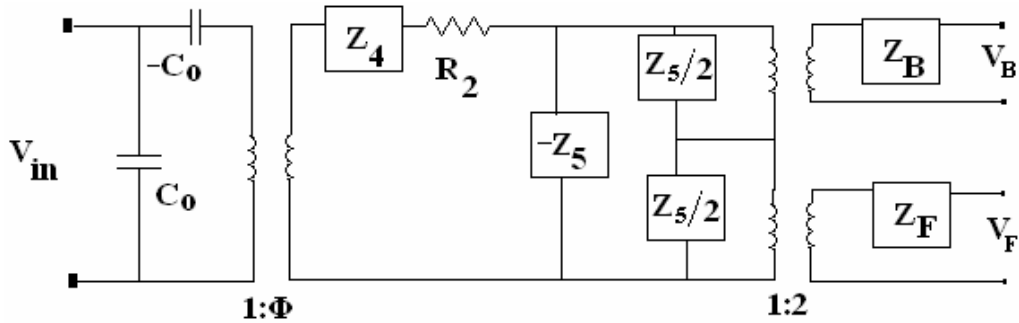
Transformatör etkisinin de devre elemanları tarafından içerildiği durum için Şekil 4.4.a'daki gibi yeniden düzenlenebilir. Bu eşdeğer devrenin rezonans frekansı  $f_0'$  şu şekilde verilir [14].

$$f_0' = f_0 \left[ 1 - 4\phi^2 \left( \frac{C_m}{C_0} \right) \right]^{1/2} \quad (4.6)$$



Şekil 4.4. Mason eşdeğer devresinden türetilen eşdeğer devreleri

Mason eşdeğer devresinin başka bir yorumu da Şekil 4.5.'de gösterilmiştir. Rhyne'nin ortaya koyduğu bu modelde, dönüştürücünün iki mekanik kapısı ile elektriksel kapısı arasında bir bağlantı kullanılarak Masonun eşdeğer devresi genişletilmiştir [11]



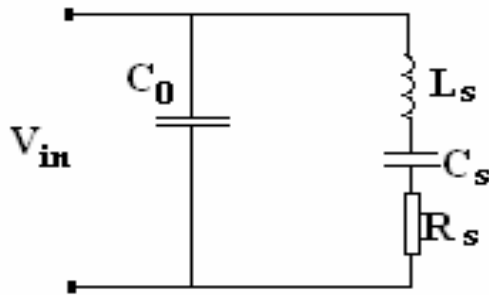
Şekil 4.5. Rhyne eşdeğer devresi

Geniş bantlı uygulamalarda ultrasonik işaretlerin gönderilmesinde ve alınmasında ortaya çıkan kayıpların belirlenmesinde bu eşdeğer devrenin daha faydalı olduğu ve gerçek fiziksel parametrelerin daha iyi anlaşılmasını sağladığı belirtilmektedir [11].

Mason modeli ve bu modelden türetilen eşdeğer devrelerde piezoelektrik akustik malzemenin yapısı toplu parametrelili devre elemanlarıyla tanımlanmaktadır. Bu eşdeğer devreler kullanılarak, dönüştürücülerin giriş empedansları, araya girme kayıpları ve diğer bazı parametreleri belirlenebilir. Ayrıca, arka akustik kapıdaki sonlandırma (backing) empedansları ve ön akustik kapıdaki akustik yükler toplu parametreleri devre elemanlarıyla temsil edilerek, bunlar dönüştürücü cevabının tümü üzerindeki etkileri de belirlenebilir. Bununla beraber, akustik kapılarda yapılan dağılmış parametrelili empedans uygunlaştırma düzenlerinin kolayca ve anlaşılır bir şekilde yapılmasına bu eşdeğer devreler imkân vermemektedir. Bu yüzden impuls cevabı kısa ve band içindeki dalgalanması küçük olan geniş bantlı yüksek duyarlılığa sahip dönüştürücü tasarımlarında bu eşdeğer devreleri kullanmak biraz sakıncalı olmaktadır. Bundan dolayı bu tür dönüştürücü tasarımlarında bu eşdeğer devrelerin yerine KLM modelini kullanmak daha uygun bir yaklaşımdır [11].

### 4.3. Basitleştirilmiş Eşdeğer Devre

Pratikte uygulamaların çoğunda, dönüştürücünün elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 4.6.'da verilen basitleştirilmiş eşdeğer devre kullanılır. Bu eşdeğer devrenin eleman değerleri bir vektör empedansmetre kullanılarak belirlenen parametrelerden bulunur [3]. Bu değerler aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.6. Basitleştirilmiş eşdeğer devre

$$C_0 = C' - C_s \quad (4.6)$$

$$C_s = C_0 \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_s^2} \quad (4.7)$$

$$L_s = \frac{1}{C_s (2\pi f_s)^2} \quad (4.8)$$

Bu ifadelerde;  $f_s$  dönüştürücü empedansının minimuma yani  $R_s$ 'ye indiği seri rezonans frekansını,  $f_p$  dönüştürücü empedansının maksimum olduğu paralel rezonans frekansını ifade etmektedir.

$C'$  ise  $f_s$  frekansından oldukça düşük bir frekansta ölçülen dönüştürücü kapasitesidir. Bu eşdeğer devre pratik uygulamalar için oldukça kullanışlı olmakla beraber geniş bantlı hassas dönüştürücü tasarımlarında yetersiz kalmaktadır.

Teoride, mekaniksel rezonans RLC kolunda akım ve voltaj aynı fazda olduğu zaman oluşur.[15]

Rezonans frekansı;

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi L.C}} \quad (4.9)$$

ile basitçe hesaplanır.

## 5. DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DİNAMİK ÇALIŞMA KARAKTERİSTİKLERİ

Piezoelektrik materyallerin, elastik katılığı yanı sıra atalet durumlarında göz önüne alınmalıdır. Piezoelektriğe gelecek herhangi bir baskı, onun yayılım yapmasına neden olur. Bu amaçla, piezoelektrik materyal, model eşdeğer devrelere bağlı kalınarak, titreşim rezonansını doğru algulamalarda çalışabilmesi için, ön ve arka yüzeylerinden uygunlaştırma yapılmalıdır [16].

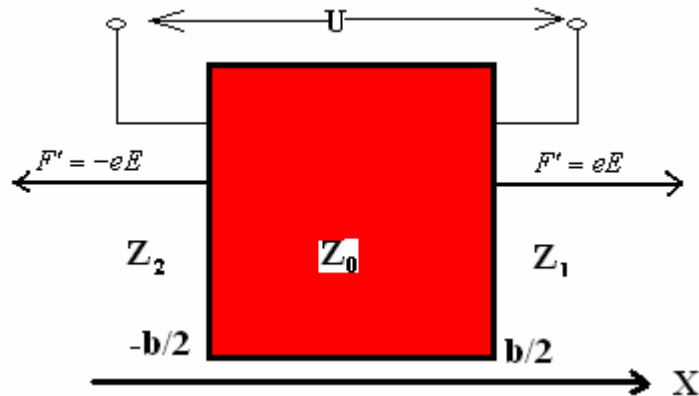
Şekil 5.1'de, ön ve arka yüzeylere yerleştirilen uygunlaştırma maddelerin empedansları  $Z_1$ ,  $Z_2$  ve piezoelektrik materyalin empedansı  $Z_0$  ile uygulanan baskı yada uygulanacak baskı,  $F'$  ve potansiyel farkı  $U$ , iletim hattı uzunluğu  $b$  ile gösterilmiştir.

Bu durum mason eşdeğer devresi ile Şekil 5.2.a'da iletim hattı modeli Şekil 5.2.b'de olduğu gibidir. Her bir kaplamadaki mekaniksel giriş empedansı;

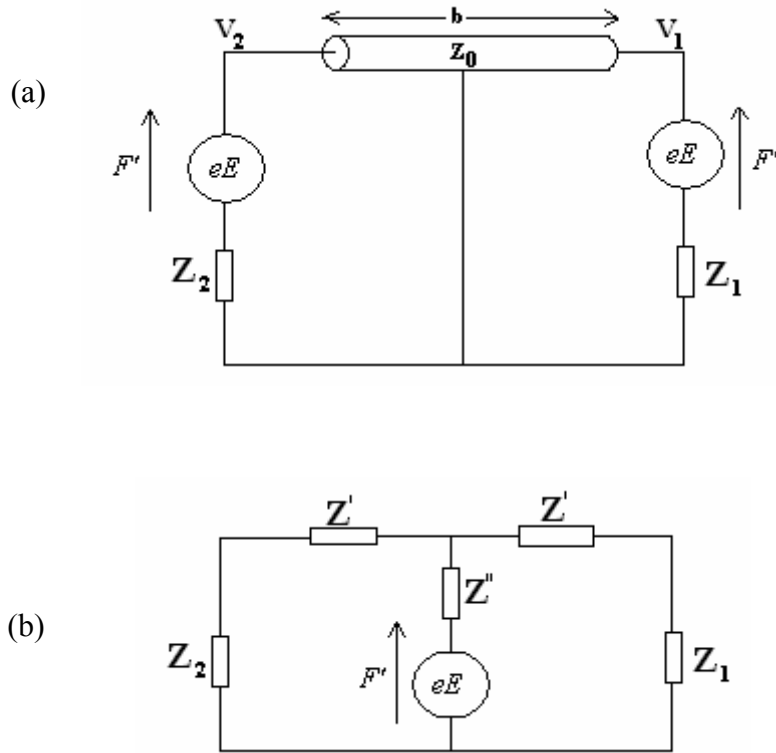
$$Z' = iZ_0 \tan(k.b/2) \quad (5.1)$$

$$Z'' = \frac{Z_0}{i \sin(k.b)} \quad (5.2)$$

bağıntısı kullanılarak da hesaplanır.



Şekil 5.1. Elektrik alanı oluşturulduğunda piezoelektrik materyalde meydana gelen kuvvetler



Şekil 5.2. Piezo diskin elektriksel eşdeğer devreleri a) transmisyon hattı gösterimi ile eşdeğeri b) mason devresi ile gösterilmiş eşdeğer devresi

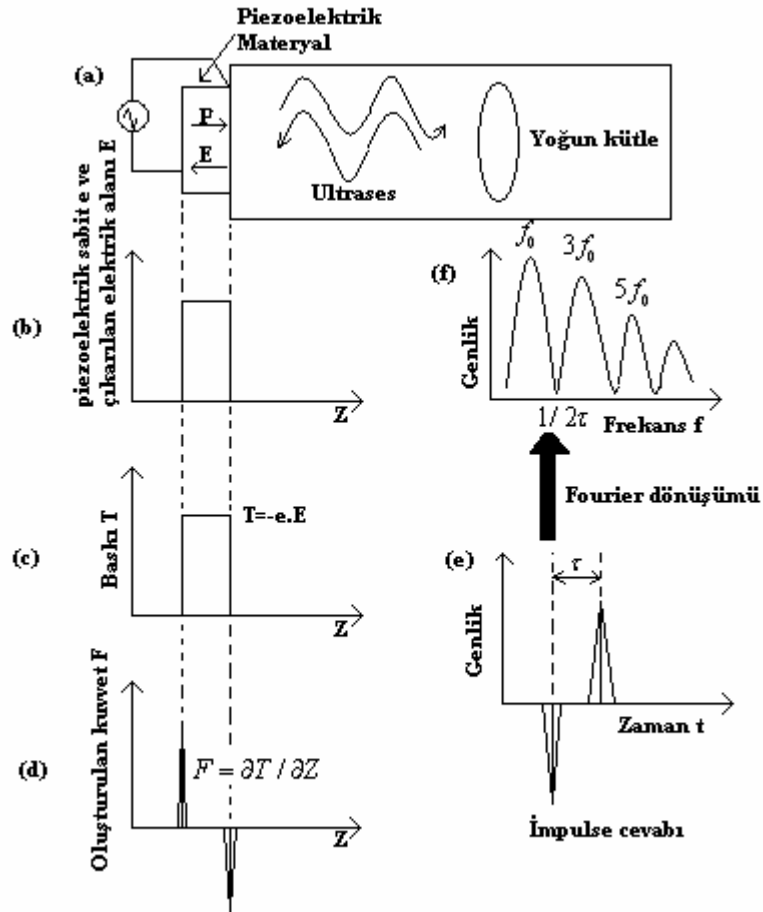
Şekil 5.3.'de, geleneksel dönüştürücüde dalga üretimi gösterilmiştir. Piezoelektrik kaplamalarında, hem piezoelektrik sabiti  $e$  hemde oluşturulan elektrik alanı  $E$  şekil 5.3.b'de standartlaştırılmıştır. Baskı  $T = -e.E$ , elektrik alanıyla artırılır (Şekil 5.3.c). Bu durumda, ultrases üretmek için uygulanan kuvvetler baskıyla orantılıdır ve piezoelektrik kaplamaların her iki yüzeyinde oluşur (Şekil 5.3.d). Bu nedenle iki ultrasonik darbe uygunlaştırılması yapılmış dönüştürücüde impuls ile üretilir (Şekil 5.3.e) Böylece frekans karakteristiği dardır ve piezoelektrik kaplamaların kalınlığı ile belirlenen frekans tepelerine sahiptir (Şekil 5.3.f). İmpuls cevabının kısa olması ölçümlerin hassasiyetini artırır [16,17,18].

### 5.1. Akustik Kapılarla Empedans Uygunlaştırma

Teşhis ve tedaviye yönelik medikal sistemlerin birçoğunda ultrasonik işaretler kullanılmaktadır [1,12]. Ultrasonik işaretlerin üretilmesi ve algılanması genellikle

piezoelektrik ultrasonik dönüştürücülerle gerçekleştirilir. Bu dönüştürücülerin karakteristik empedansı oldukça yüksektir ( $20-40 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) [5].

Medikal amaçlı ultrasonik dönüştürücü genelde, su içerisinde veya akustik empedansı suyun akustik empedansına yakın olan insan vücudu üzerinde ultrasonik işaret üretmek veya bu ortamlardan gelen ultrasonik işaretleri sağlamak için kullanılırlar. Suyun karakteristik empedansı oldukça düşüktür ( $1,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) [12].



Şekil 5.3. Dönüştürücüde impuls cevabı oluşturulma aşamaları a) yoğun kütlenin tespiti b) uygulanan elektrik alanı ve piezoelektrik sabit c) oluşturulan baskı d) oluşturulan kuvvet e) sonuç impuls cevabı f) impuls cevabının fourier dönüşümü

Piezoelektrik malzeme ile ultrasonik işaretin propagasyon yapacağı bu ortamlar arasındaki büyük akustik empedans farklılığı bir süreksizlik oluşturmaktadır. Piezoelektrik malzeme ile üretilen akustik işaret propagasyon ortamına aktarılırken



veya propagasyon ortamından gelen akustik işaret piezoelektrik malzemelerle algılanırken, bu süreksizlikten kaynaklanan önemli oranda yansımalar meydana gelmektedir [11]. Bu yansımalar neticesinde hem dönüştürücünün verimi azalmakta hem de dönüştürücünün kullanılabilceği dinamik aralık daralmaktadır. Bu iki malzeme arasındaki akustik empedans farklılığının etkisini minimuma indirmek amacıyla, dönüştürücünün ön akustik kapısında empedans uygunlaştırma düzenleri kullanılır [11,16,15].

Piezopolimerler (PVDF), daha düşük empedansa sahip sönümlendirme maddesi kullanırlar. Kalınlıklarının ince olması nedeniyle iletimdeki verimleride düşüktür ama algılamaları yüksektir. Uygunlaştırma tabakasıyla empedansları artırılarak yüksek frekanslarda çok verimli bir şekilde kullanırlar [9].

Dönüştürücünün arka akustik kapısında yapılacak düzenlemeler, dönüştürücünün kullanılacağı sistemin gereksinimlerine göre farklılık gösterir. Eğer dönüştürücünün kullanılacağı sistem, çözünürlüğü iyi olan bir dönüştürücü gerektiriyorsa, dönüştürücünün arka akustik empedansı dönüştürücünün akustik empedansına yakın olan bir malzeme ile sonlandırılmalıdır [19].

Arka akustik kapının sonlandırılmasında kullanılan malzemenin akustik empedansı eşit olduğunda bu kapıdan yansıma olmaz. Böylece dönüştürücün impuls cevabı kısa sürede sifira iner. Buna karşılık dönüştürücü verimi azalır. Çünkü elektriksel işaretten üretilen akustik işaretin büyük bir kısmı arka akustik kapıdan yayılacaktır. Bunun sonucu olarak ön akustik kapıdan yayılan yararlı akustik enerji miktarı büyük oranda azalacaktır. Dönüştürücünün band genişliğini elde etmek için de akustik kapılarda empedans uygunlaştırmasına ihtiyaç duyulur [20].

Transmisyon matrisi kullanılarak, uygunlaştırma tabakalarının empedansları ile kalınlıkları belirlenir. Bu tabakaların kalınlıkları, iletim katsayısıyla bağlantılı empedansları ile elde edilmelidir. İletim katsayısı,

$$R = \left[ \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \right] \quad (5.3)$$

ile hesaplanır [21].

### 5.1.1. Empedans uygunlaştırmayla optimum band genişliğine ulaşma

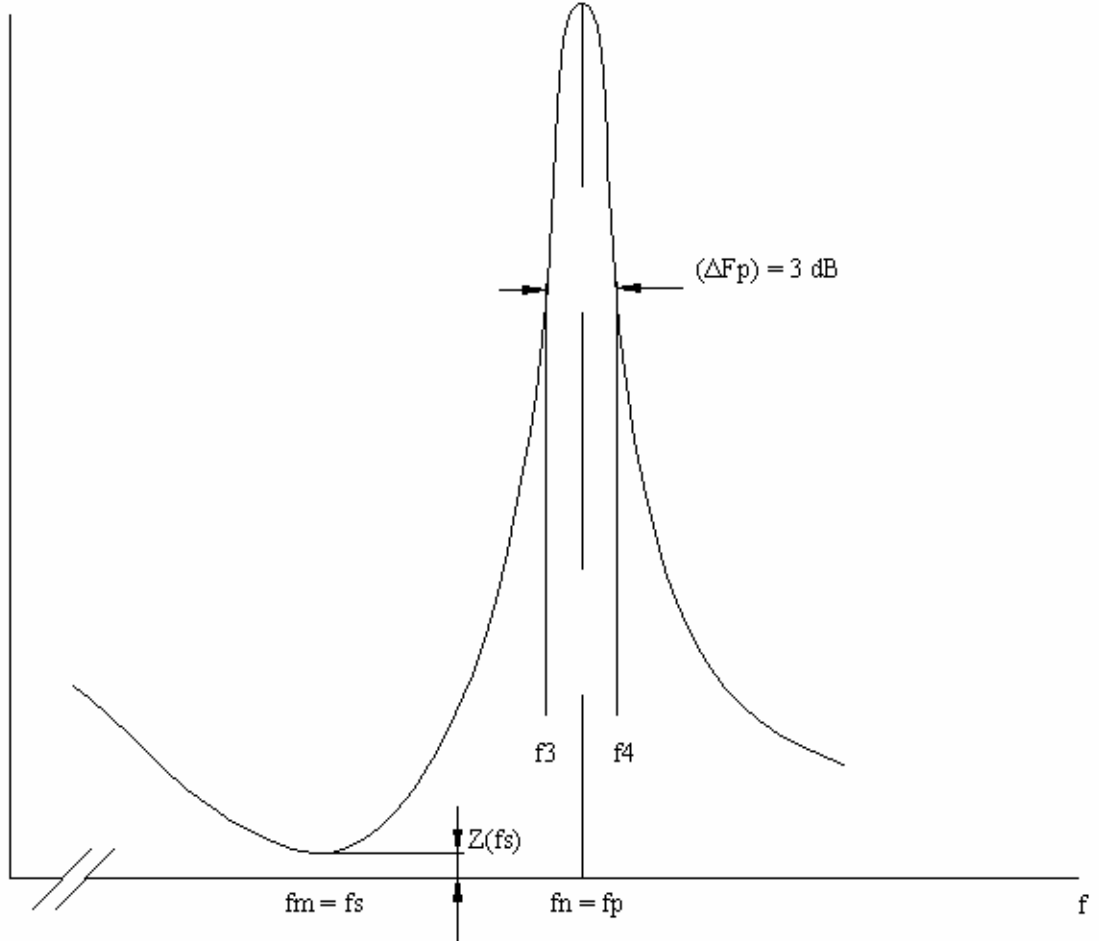
Akustik kapılarda empedans uygunlaştırma düzenlemeleri kullanılmadan sadece piezoelektrik malzeme kullanılarak yapılan dönüştürücülerin band genişlikleri genellikle dardır. Bu şekilde düzenlenen dönüştürücülerin merkez frekansındaki giriş empedansları oldukça büyüktür. Merkez frekansından uzaklaştığında ise giriş empedansı hızlı bir şekilde azalır. Akustik kapılarda yapılan empedans uygunlaştırma düzenlemeleriyle merkez frekansındaki giriş empedansı küçük değerlere çekilir. Bu düzenlemeler sonucu merkez frekansı civarındaki giriş empedansının hızlı değişimi de yavaşlatılır [16].

Böylece dönüştürücünün band genişliği artırılabilir. Şekil 5.4.'de verilen frekans ve empedans değişim grafiklerini ele alalım. Eğer bir dönüştürücünün arka akustik kapısını hava ile sonlandırılırsa ön akustik kapıda bir ve iki adet çeyrek dalga empedans uygunlaştırma katı kullanılması gerekir. Dönüştürücünün girişinden görülen empedansın frekansa göre değişimi şekil 5.5.'de verilmiştir.

Empedans uygunlaştırma katlarının karakteristik empedansları De Silets'in yukarıda verilen ifadelerine göre belirlenmiştir [12]. Şekilden de görüleceği gibi, ön akustik kapıya bir adet çeyrek dalga katmanı eklendiğinde, merkez frekansındaki giriş empedans genliği düşmüştür.

Çeyrek dalga empedans uygunlaştırma katları esnek bir plastik yapıya sahip dolgu vernikler içerisine yükleme maddesi olarak tungsten yâda alüminyum gibi metal tozu veya küçük cam küreleri ilave edilerek oluşturulur. Değişik malzemelerde farklı

yüklem oranları kullanılarak farklı akustik empedanslara sahip yapılar oluşturulabilir.

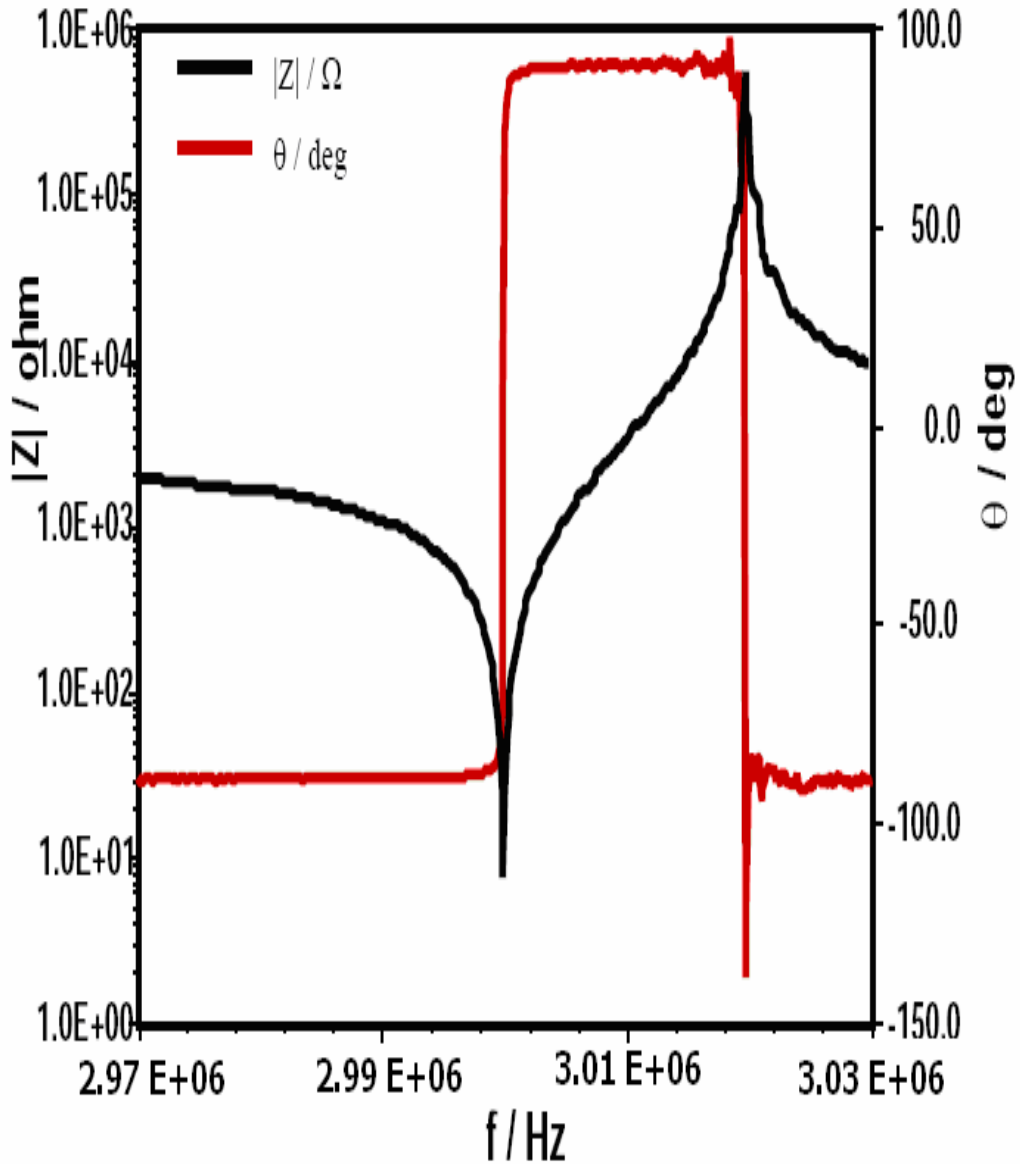


Şekil 5.4. Empedans ve frekans değişim grafiği

Çeyrek dalga uzunluğundaki empedans uygunlaştırma katlarının karakteristik empedansları  $n\lambda/4$  ( $n = 1,3,5,7,\dots$ ) değerlerinin üzerine çıktıkça, elektriksel giriş empedansının  $f_0$  merkez frekansı civarındaki genliği azalmakta ve değişimi yavaşlamaktadır. Bundan dolayı da dönüştürücünün band genişliği artmaktadır. Bu katların karakteristik empedansları belirtilen değerlerin altına indiğinde, giriş empedansının  $f_0$  civarındaki genliği artmakta ve değişim hızlanmaktadır. Bunun sonucu olarak da band genişliği daralmaktadır.

Empedans uygunlaştırma katının uzunluğu  $\lambda_0/4$  değerinin altına indikçe, giriş empedansının  $f_0$  civarındaki değeri azalmakta ve bu frekans civarındaki değişimi yavaşlamaktadır. Bundan dolayı band genişliği artmaktadır.

Katların uzunluğu çeyrek dalga boyunun üzerine çıktığında ise, merkez frekansı civarındaki giriş empedansı genliği artmakta ve empedansın değişimi hızlı olmaktadır. Bundan dolayı da band genişliği daralmaktadır.



Şekil 5.5. Kalınlığı 1 mm, çapı 10 mm olan PZT dönüştürücünün giriş empedansının frekansa göre değişimi.

### 5.1.2. Arka akustik kapının sonlandırılması

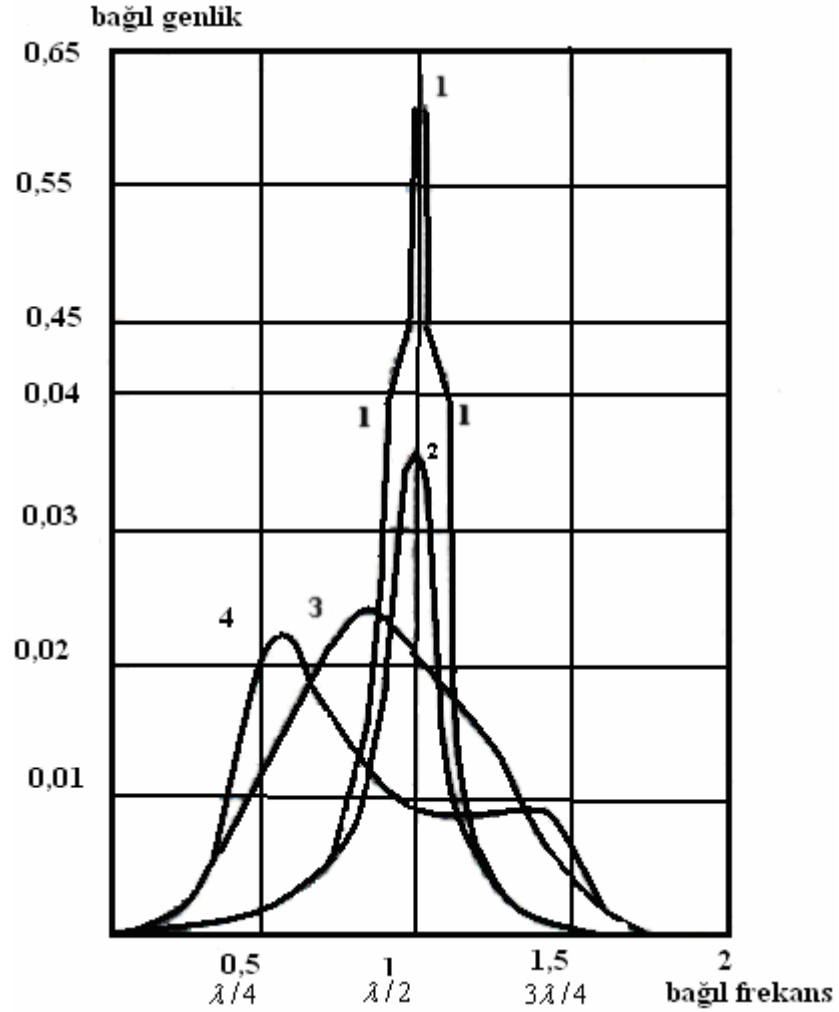
Daha önce de ifade edildiği gibi, KLM modelinin transmisyon hattı kısmının eşdeğer empedansı, ortadaki kuplaj noktasından ön ve arka akustik kapılara doğru bakıldığında görülen empedansların paralel eşdeğeridir. Arka akustik kapıdaki sonlandırmayla hem mümkün olduğu kadar az akustik gücün buradaki malzeme tarafından absorbe edilmesi hem de arzu edilen geçirme band karakteristiğinin sağlanması beklenir. Hava ile sonlandırılan arka akustik kapı büyük oranda kısa devre edilmiş gibi düşünülebilir.

Materyallerin ön ve arka yüzeylerinde kullanılan akustik empedans uygunlaştırma katmanlarının frekans spektrumuna olan etkileri aşağıda Şekil 5.6.'de verilmiştir [22].

Arka akustik kapıda yapılacak sonlandırmanın etkisini görmek için bu akustik kapının değişik rezistif yüklerle sonlandırılabilir. Arka akustik kapının hava ile  $5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik,  $8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 'lik ve  $Z_0$ 'a eşit empedanslarla sonlandırıldığı durumlar için toplam akustik giriş empedanslarının reel ve imajiner kısımları Şekil 5.7. ve 5.8.'de verilmiştir. Bu şekle göre, arka akustik kapıda kullanılan malzemenin empedansı arttıkça, dönüştürücünün giriş empedansının merkez frekansı  $f_0$  civarındaki değerinin azaldığı ve değişiminin yavaşladığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da band genişliği artmaktadır. Sonlandırma malzemesinin empedans dönüştürücü empedansı  $Z_0$ 'a eşit olduğunda, akustik hattın band içindeki giriş empedansı hemen hemen tamamen rezistif olmaktadır.

Arka akustik kapıdaki sonlandırma malzemesinin empedansı arttıkça bu kapıdan yansıyan akustik enerji miktarı azalacaktır. Buna bağlı olarak arka akustik kapıdan yayılan kullanılmayan akustik enerji miktarı artacaktır. Sonlandırma empedansı  $Z_0$ 'a eşit olduğunda, kuplaj noktasından arka akustik kapıya doğru bakıldığında sonsuz uzunluğa sahip bir transmisyon hattına eşdeğer bir yapı görülür. Bu durumda arka akustik kapıda hiçbir yansıma olmayacak ve akustik enerjinin büyük bir kısmı bu

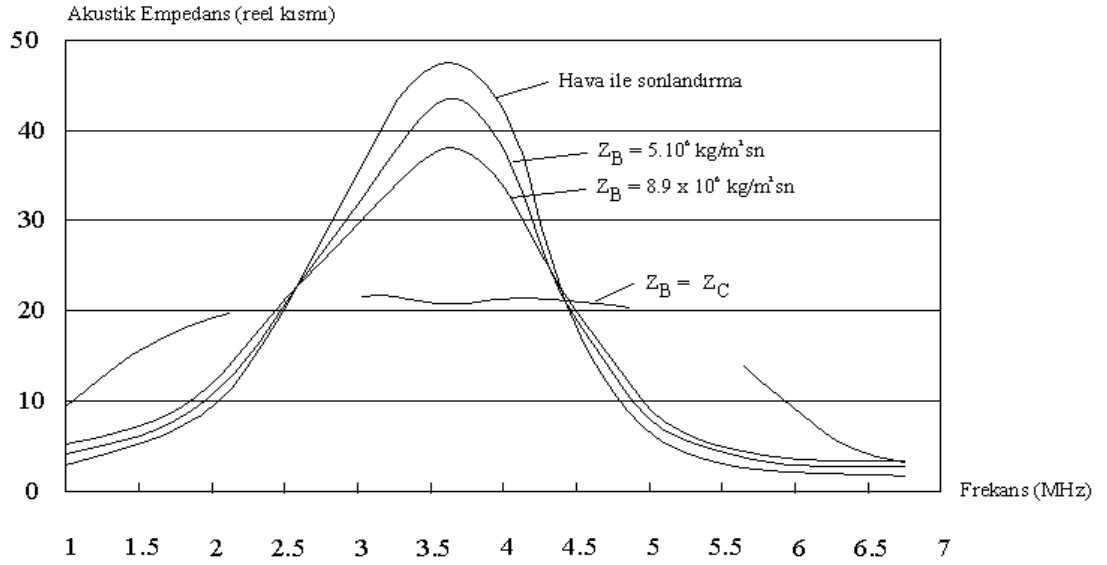
yapıda kaybolacaktır. Bununla beraber ön akustik kapıda yapılan empedans uygunlaştırma katları ile birlikte arka akustik kapıda oldukça düşük empedanslı sonlandırma malzemesi kullanmak oldukça yararlı olacaktır.



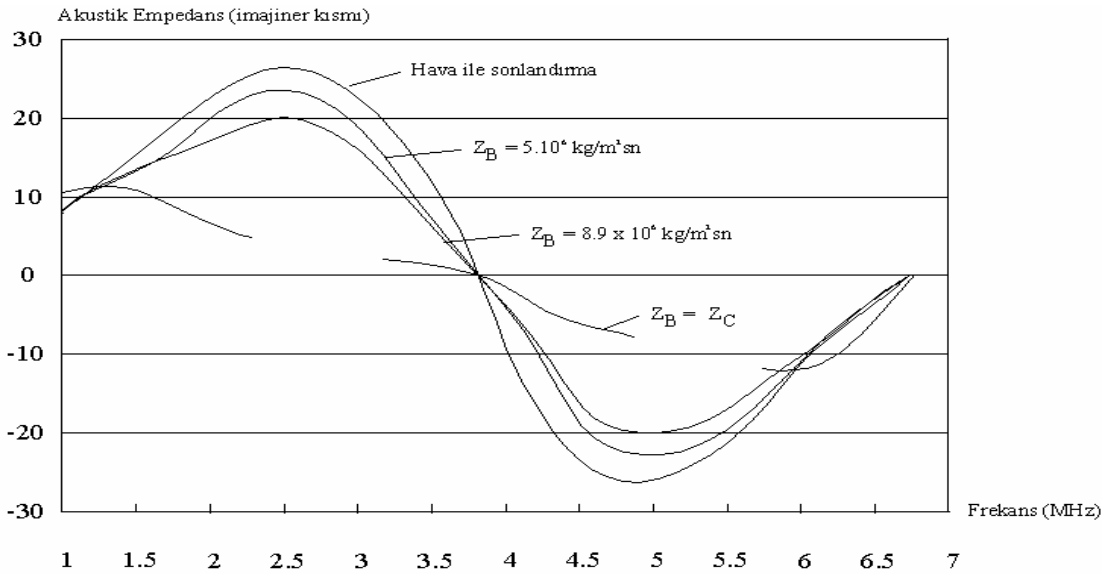
Şekil 5.6. Değişik tip empedans uygunlaştırma katmanlarının bağıl frekans spektrumuna etkisi 1.nolu eğri arka yüz hava, ön yüz su 2. arka yüz plastik, ön yüz su 3. arka yüz plastik, ön yüz alüminyum 4. arka yüz plastik, ön yüz çelik iken elde edilen eğriler

Dönüştürücünün akustik kapılarında yapılan empedans uygunlaştırma düzenlemeleriyle dönüştürücünün merkez frekansı  $f_0$  civarındaki giriş empedansı azaltılarak band genişliği artırılabilir.

Eğer dönüştürücünün merkez frekansındaki giriş empedansı, dönüştürücüyü kullanacak akustik verici veya alıcının empedanslarından oldukça farklı olursa, bu durumda elektriksel kapıda empedans uygunlaştırması gerekecektir. Geniş bantlı dönüştürücüler için elektriksel kapıda yapılacak empedans uygunlaştırması güçleşmektedir.



Şekil 5.7. Arka akustik kapının hava ile  $5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 'lik,  $8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 'lik ve  $Z_0$ 'a eşit empedanslarla sonlandırıldığı durumlar için toplam akustik giriş empedanslarının reel kısmı



Şekil 5.8. Arka akustik kapının hava ile  $5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 'lik,  $8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 'lik ve  $Z_0$ 'a eşit empedanslarla sonlandırıldığı durumlar için toplam akustik giriş empedanslarının imajiner kısımları.

## 5.2. Elektriksel kapıda empedans uygunlaştırma

Akustik verici ve alıcı sistemlerin empedansları genellikle reel ve  $50 \Omega$  civarındadır. İlgili band içerisinde dönüştürücünün sebep olacağı araya girme kaybını minimum yapmak için, akustik vericiden veya alıcıdan bakıldığında görülen empedansın bu değer civarında olması yani reel ve  $50 \Omega$  civarında olması arzu edilir. Ayrıca sistemin ihtiyacına bağlı olarak dönüştürücünün band genişliğinde bir artış istenebilir. Bu sebeplerden dolayı elektriksel kapıda toplu elemanlı empedans uygunlaştırmasına ihtiyaç duyulabilir.

Elektriksel kapıdaki empedans uygunlaştırma düzenlerinin kolayca gerçekleştirilebilmesi için elektriksel kolun kalite faktörü  $Q_e$ 'nin düşük değerlere sahip olması gerektiği daha önce belirtilmişti. Bunu sağlamak amacıyla ön ve arka akustik kapılarda dağılmış parametrelili empedans uygunlaştırması yapılır ve aktif eleman olarak yüksek elektroakustik kuplaj sabitine ( $k_t^2$ 'ye) sahip malzeme kullanılır [16]. Akustik kapılarda yapılan uygunlaştırma neticesinde dönüştürücünün ışıma direnci  $R_a$  (giriş empedansının reel kısmı) belli bir yapıya (örneğin Gauss dağılım formunda) sahip olacaktır.

Elektroakustik transformatörün dönüştürme oranının ( $\phi$ ) frekansa bağımlılığa  $0,5 > \omega/\omega_0 > 1,5$  aralığında hemen hemen lineerdir. Dönüştürücü cevabı üzerinde büyük etkisi olan bu değişimin elektriksel kolda yapılacak empedans uygunlaştırma düzenleri ile dengelenmesi gerekmektedir. Dönüştürücünün akustik hat kısmının elektriksel kola aktarılan imajiner kısmı,  $C_0$  kapasitesinden kaynaklanan reaktans ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ve geniş bantlı dönüştürücü tasarımlarında ihmal edilebilir. Bu durumda  $C_0$  kapasitesi ile  $f_0$  frekansında rezonansa gelen bir bobin kullanılarak  $C_0$ 'ın etkisi dengelenebilir. Band genişliği daha da arttırılmak istenirse, daha özel empedans uygunlaştırma devreleri kullanılır [23].



### 5.2.1. Elektriksel Kapıda Bobin Kullanılarak Giriş Empedansının İmajiner Kısımının Yok Edilmesi

Dönüştürücünün band genişliğini ve duyarlılığını arttırmanın en basit yolu, elektriksel kapıda bir bobin kullanmaktır. Bu bobin sayesinde dönüştürücünün elektriksel giriş empedansının negatif değerli reaktif bileşeni mümkün olduğu kadar sifıra yaklaştırılmaya çalışılır. Dönüştürücünün giriş empedansının imajiner kısmını belirleyen en önemli eleman  $C_0$  olduğundan; bu bobinin değeri  $L_0$ ,  $f_0$  frekansında  $C_0$  ile rezonans sağlayacak şekilde seçilir.

$$L_0 = \frac{1}{C_0(2\pi f_0)^2} \quad (5.4)$$

Elektriksel kapıda bobin kullanılması ile ilgili inceleme Thurston tarafından yapılmıştır [23]. Bu incelemelere göre bobin kullanılmadığından dönüştürücünün 3dB'lik band genişliği

$$BW \cong \left[ \frac{1}{2} \right] \left[ \frac{C_s}{C_0} \right] \quad (5.5)$$

olarak, paralel bobin kullanıldığında

$$BW = \sqrt{\frac{C_s}{C_0}} \quad (5.6)$$

olarak, seri bobin kullanıldığında ise

$$BW = \left[ \frac{1}{\sqrt{\frac{C_s}{C_0}}} \right] \left[ 1 - \frac{C_s}{8C_0} \right] \quad (5.7)$$

ifadeleri ile verilmiştir. Bu ifadelerde  $C_s = C_0 \frac{(f_p^2 - f_s^2)}{f_p^2}$ , dir.  $f_p$ , dönüştürücü giriş empedansının  $f_0$  frekansı civarında maksimuma çıktığı paralel rezonans frekansını,  $f_s$  ise,  $f_0$  civarında empedans minimuma indiği seri rezonans frekansını ifade etmektedir.

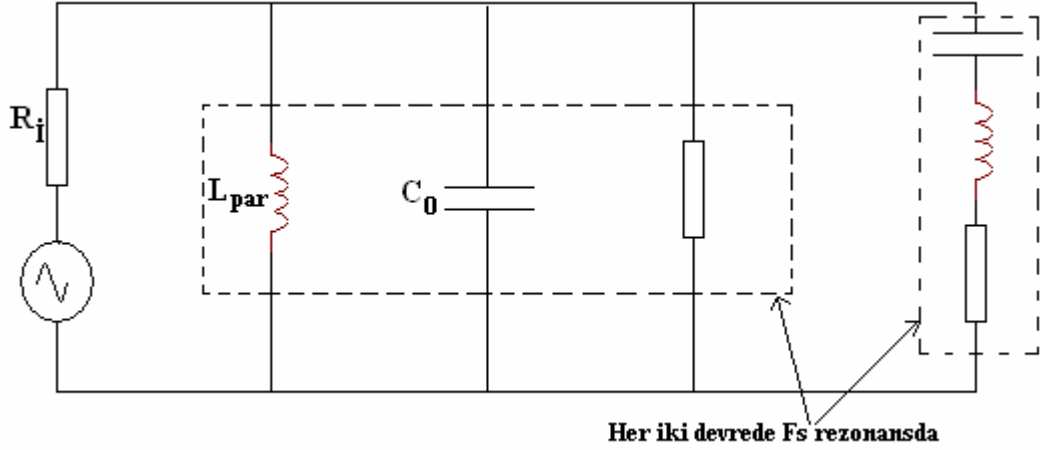
Önceki bölümden de görüldüğü gibi, büyük band genişliğine ulaşmak için akustik kapılarda yapılan işlemler dönüştürücünün giriş empedansının reel kısmını  $f_0$  frekansı civarında  $50 \Omega$ 'un altındaki değerlere indirmektedir. Elektriksel kapıda seri bobin kullanıldığında, bu bobinin reaktansı dönüştürücünün giriş empedansına seri olarak eklenir. Bobin pozitif bir reaktansa sahip olduğu için dönüştürücünün giriş empedansının sadece negatif değerli imajiner kısmı denklem (5.6) ifadesiyle verilen band sınırları içerisinde sifıra yaklaşacaktır. Bobinin iç direnci ihmal edilirse, dönüştürücü empedansının reel kısmında herhangi bir değişiklik olmaz.

Eğer dönüştürücünün ışıma direnciyle dönüştürücüyü kullanan sistemin empedansı arasında büyük farklar varsa, bu durumda ilave bir düzenleme gerekir. Dönüştürücü ile sistem arasında, dönüştürücünün ışıma direncini verici veya alıcı empedansına uygunlaştıracak bir transformatör kullanılarak bu düzenleme gerçekleştirilebilir.

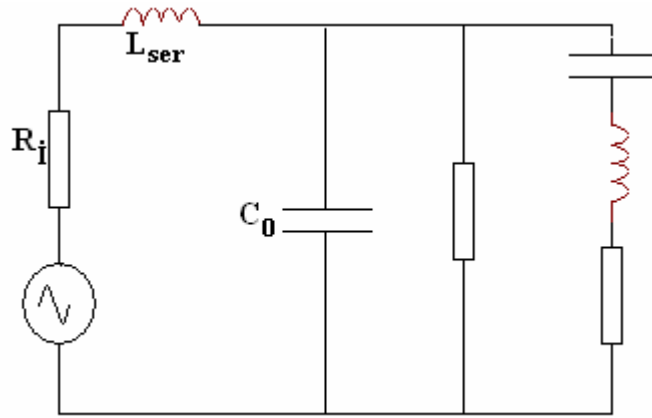
Paralel bobin kullanıldığında, dönüştürücünün empedansı ile bobinin reaktansının paralel eşdeğeri elektriksel empedansı belirler. Bu durumda elektriksel empedansın hem reel hemde imajiner kısmı önemli ölçüde değişir.

Şekil 5.9. ile şekil 5.10.'de paralel ve seri uygunlaştırma devreleri verilmiştir. Verilen bu devrelerin yapmış olduğu uygunlaştırmaları, Şekil 5.11. ile Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Bu iki şekil incelendiğinde: Elektriksel kapıda seri bobin kullanılmasıyla dönüştürücünün ışıma direnci değişmemiş, sadece reaktif bileşen band içerisinde sifıra yaklaşmıştır. Küçük frekans değerleri için reaktif bileşen negatif değerli olmaya devam etmektedir, fakat değeri hızlı bir şekilde azalmaktadır.

Büyük frekans değerleri için ise bobinin etkisiyle empedansın reaktif bileşeni pozitif olmuştur ve frekans artıkça bu reaktansın değeri de büyümüştür [22].



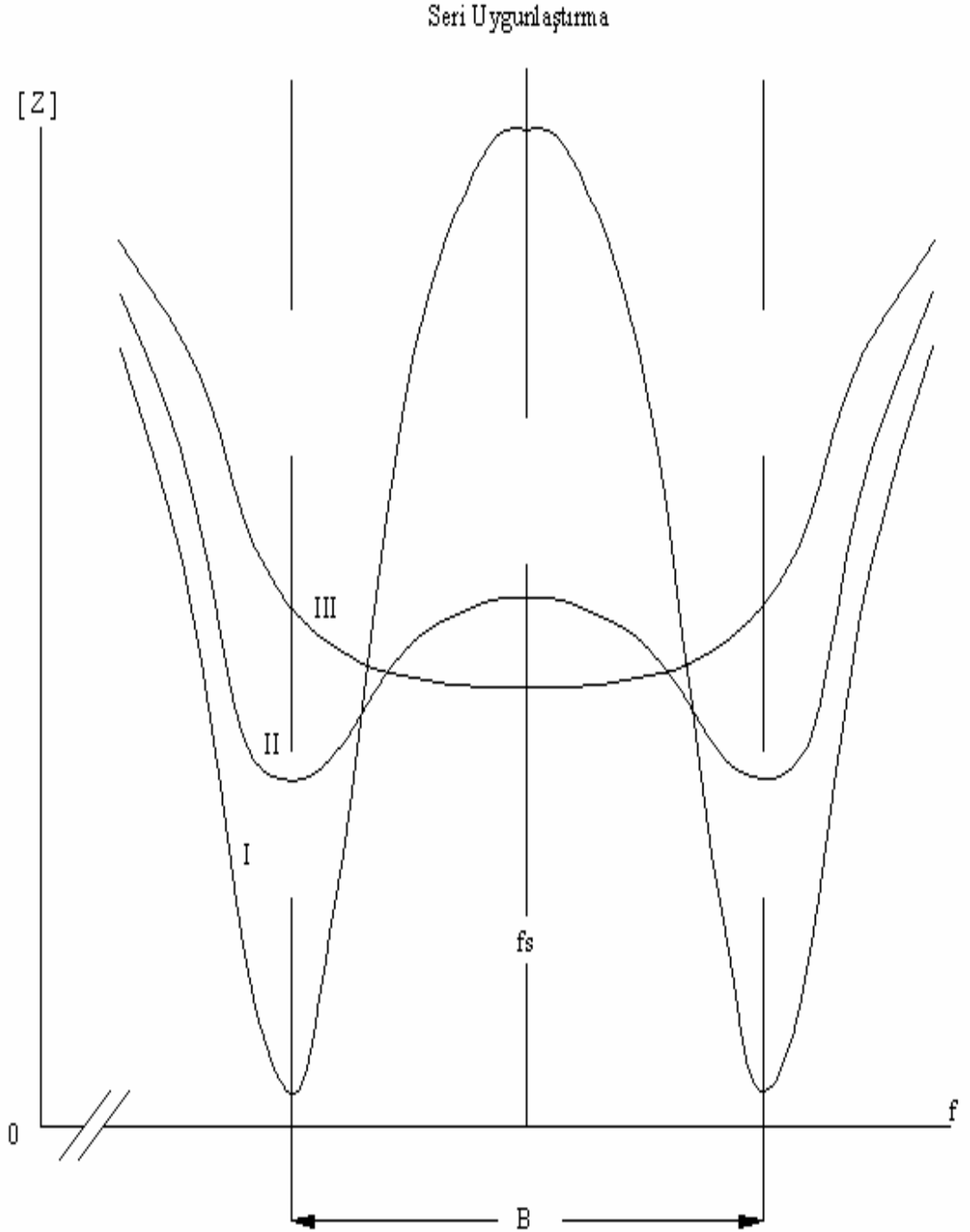
Şekil 5.9. Paralel uygunlaştırma elektrik devresi



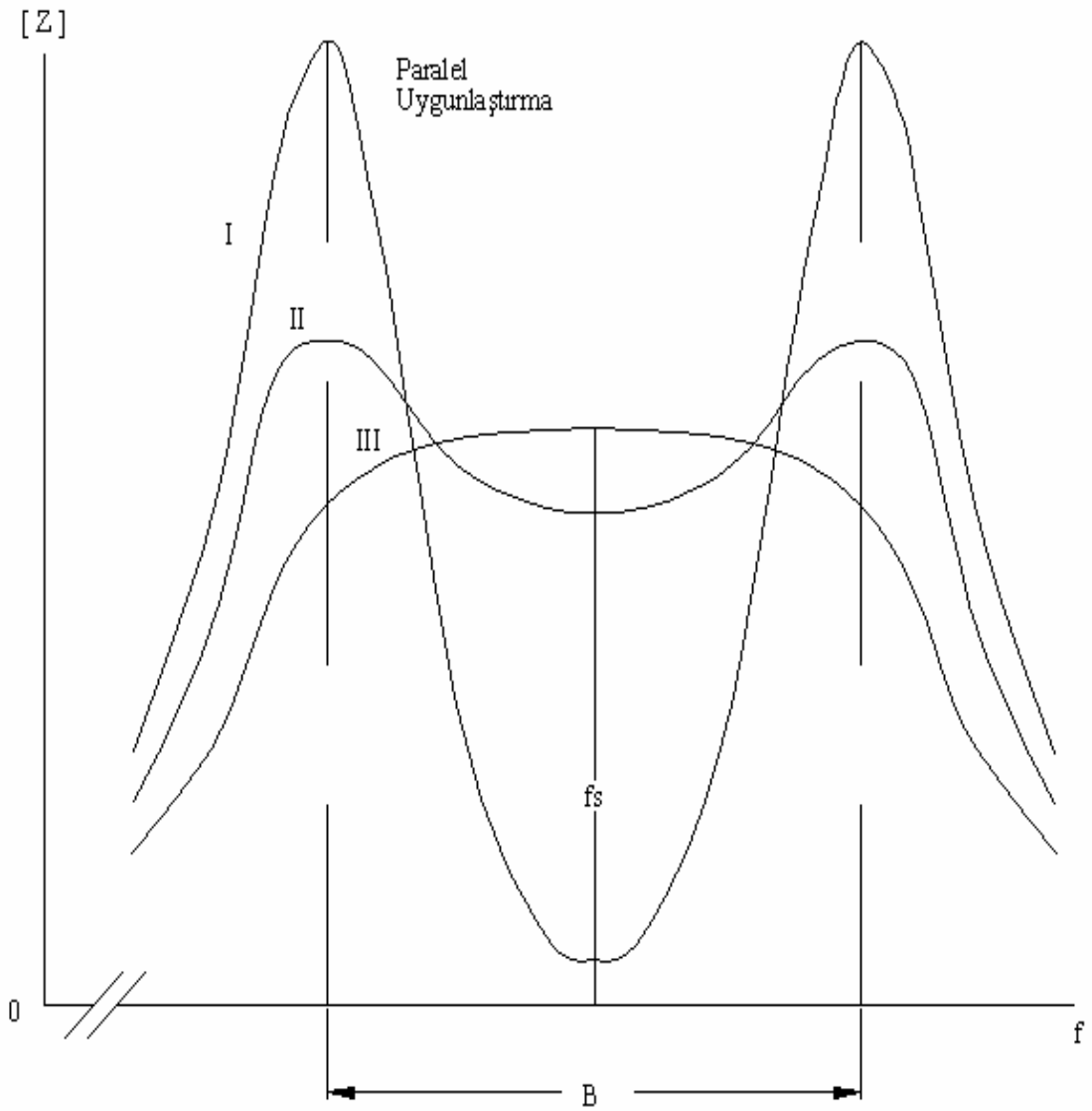
Şekil 5.10. Seri uygunlaştırma elektrik devresi

Empedans serileri tekrar incelendiğinde ise farklı olacak; Elektriksel kapıda paralel bobin kullanıldığında, ışınma direnci geçirme bandı içerisinde daha az değişen bir yapıya sahip olmakta ve band genişliği bir miktar artmakta olduğu görülebilir. Paralel bobinin etkisiyle küçük frekanslarda negatif değerlere sahip olan bileşen pozitif olmuştur. Bobinin değeri,  $f_0$  frekansında  $C_0$  kapasitesi ile rezonans sağlayacak şekilde seçildiğinden, imajiner bileşenin sıfır olduğu rezonans anı, dönüştürücünün üst band sınırına yakın bir yerde oluşmuştur. Bundan dolayı,

geçirme bandının üst sınırına yaklaşırken ışıma direncinin, reaktansın ve bunlara bağlı olarak empedans genliğinin hızlı bir şekilde değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.11. Seri uygunlaştırma devresiyle yapıldığında I nolu eğri uygunlaştırma devresi yok iken II nolu eğri seri uygunlaştırma ortalama olarak sağlandığında III nolu eğri güçlü seri uygunlaştırma sağlandığında elde edilmiştir

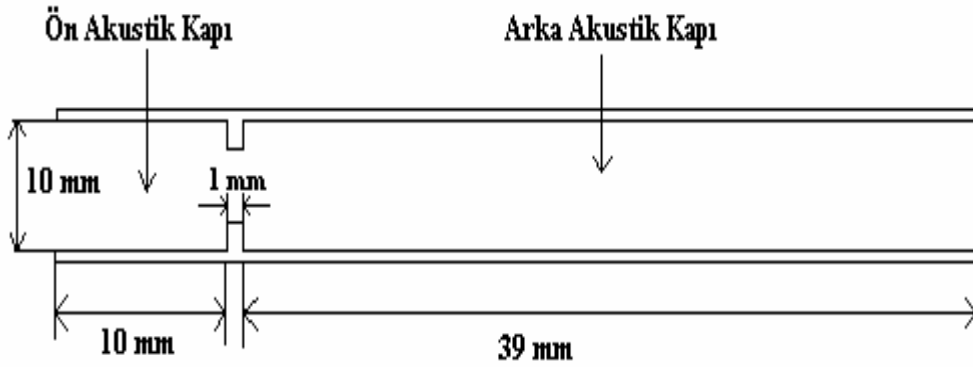


Şekil 5.12. Paralel uygunlaştırma devresiyle yapıldığında I nolu eğri uygunlaştırma devresi yokken II nolu eğri paralel uygunlaştırma ortalama olarak sağlandığında III nolu eğri güçlü paralel uygunlaştırma sağlandığında elde edilmiştir

## 6. GENİŞ BANDLI ULTRASONİK DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN PRATİK TASARIMI VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

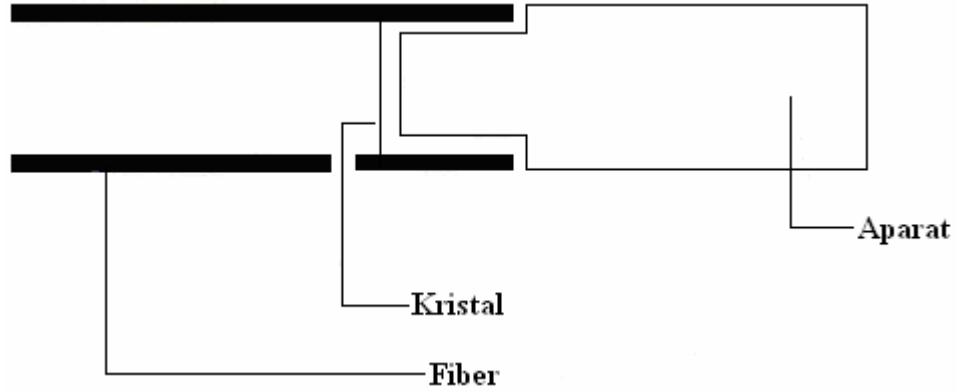
Bu kısımda bilinen metotlarla, geniş bantlı ultrasonik dönüştürücü yapımı anlatılmaktadır. Dönüştürücü yapımında 3 MHz'lik, PZT piezoelektrik seramik kristal kullanılmıştır. Bu kristalin kalınlığı 0,4 mm, çapı 10 mm olup çalışma frekansı 3 MHz'dir. Bu kristalin akustik empedansı  $1.69 \times 10^7 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Mrayl) ve kristaldeki ses hızı  $2960 \text{ ms}^{-1}$  dir. Dönüştürücü yapımına başlamadan önce bu kristal alkol yâda trichlorethylene kullanarak çok iyi bir şekilde temizlenmesi gerekir.

Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi kristalin yerleştirileceği iki ucu açık fiber yapılı boru hazırlanır. Bu fiber borunun özellikleri önceden belirlenen kriterlere göre hazırlanmıştır. Bu özellikler, kristalin yerleştirileceği yer, kristalin ön kısmında olması gereken akustik empedans uyumlaştırma tabakasına ait yer ve kristalin arka kısmına konması gereken sönümlendirme malzemesine ait yerlerin özellikleridir.



Şekil 6.1. Kristalin yerleştirileceği iki ucu açık fiber boru

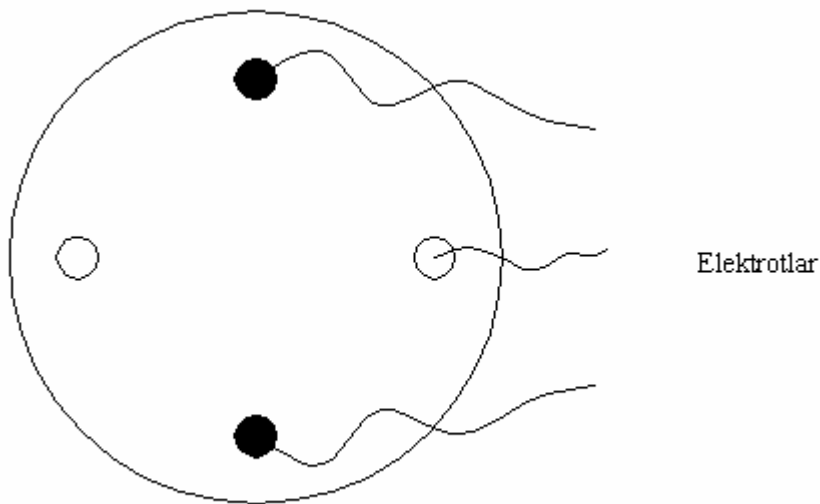
İki ucu açık fiber boruya kristalin rahatlıkla girebilmesi için torna tezgâhında 10,2mm olacak şekilde açıldı. Kristalin kalacağı seviyede hareket etmemesi ve empedans uyumlaştırmak için dökülecek olan kimyasalların, kristalin boşluk kısımlarından akması için şekil 6.2.'deki gibi aparat o seviyeye uygun şekilde yerleştirildi.



Şekil 6.2. Fiber boru içerisinde kristalin seviyede kalmasını sağlayacak aparat

Bunlar hazırlandıktan sonra ilk iş olarak kristalin her iki yüzeyi alkole temizlenir. Daha sonra gümüş kristalle yapıştırılacak uçları sıfır zımpara ile zımparalanarak inceltildi. Burada dikkat edilmesi konu inceltme işleminde gümüş tel üzerinde kopma noktaları meydana getirmemektir. Daha sonra resim 6.1.'de görülen epoxy iletken yapıştırıcı karışımı hazırlandı. Burada bilinen diğer metotlarda farklı olarak yapıştırma teknolojisi kullanılmıştır. Çünkü havaya ile teller kristale lehimlenirken, kristal aşırı ısıda yeniden kutuplanmakta ve özelliğini kaybetmektedir.

Elektrotlar (gümüş teller) her iki yüzeye ikişer adet yapıştırıldı. İkişer adet olmasının nedeni, birer tane yedek kopmalara karşı önlem olarak yapıştırılmıştır.



Şekil 6.3. Elektrotların kristal üzerine yapıştırılması



Resim 6.1. Epoxy gümüş iletken yapıştırıcı ( epoxy conductive silver paint)

Elektrotları yapıştırılan kristal iki tarafı açık fiber boru içerisine yerleştirilir.



Şekil 6.4. Elektrotları yapıştırılan kristalin fiber boru içerisine yerleştirilmesi

Dönüştürücü sönümlendirme malzemesi, Flexane 94 (devcon firması tarafından üretilmiştir) ile yine bu maddenin sertleştiricisi birlikte hacimsel olarak 68:32 oranında karıştırılarak, eşit ağırlıkta tungsten tozunun bu karışıma ilave edilmesiyle hazırlanır. Eşit ağırlığı doğru tespit edebilmek için 0,001 gr'a kadar tartabilen hassas elektronik tartı kullanılmıştır.

Geniş frekans bandı elde etmek için arka yüzeyden yayılan dalgaların kristale geri yansımaları önlemek üzere çok kayıplı bir ortam oluşturmak gerektiğinden dolayı bu karışımın akustik empedansı 10 Mrayl olarak alınmıştır.

Bu karışımın akustik empedansı değiştirilmek suretiyle istenilen band genişliğinde dönüştürücüler yapılabilir. Diğer bir yandan karışım miktarı oranının fazlalığı da yine band genişliğinin artmasına neden olur.



Bu karışım Şekil 6.5. görüldüğü gibi arka akustik kapıya dökülür. Eğer çok az miktarda sönümlendirme malzemesi kullanılırsa, hafif bir sönümlendirme yapılır ve dolayısı ile dar bandlı bir dönüştürücü elde edilir. Eğer geniş bandlı bir dönüştürücü yapılmak istenirse daha fazla sönümlendirme malzemesi kullanılarak geniş band elde edilmeye çalışılır. Bu aşamada genişliğinin ayarlanması daha çok deneyimle yapılabilmektedir. Band genişliği arttıkça dönüştürücü duyarlılığı azalır.

Sönümlendirme malzemesi döküldükten sonra hızı  $3000 \text{ min}^{-1}$  olan bir santrifüj makinesinde 1 dakika döndürülerek hava kabarcıklarının yok edilmesi ve maddenin kristal yüzeyine iyice yapışması sağlanır. Daha sonra sertleşmesi için 2 gün oda sıcaklığına bırakılır.



Şekil 6.5. Sönümlendirme malzemesinin dökülme safhası

Sönümlendirme malzemesi, işlemi bitikten sonra ön akustik kapının hazırlanması işlemine geçilir. Bu malzeme, araldite MY753 ile HY951 sertleştirici maddenin hacimsel olarak 10:1 oranında karıştırılması, daha sonra bu karışım ile eşit ağırlıkta tungsten tozunun bu karışıma ilave edilip hep birlikte iyice karıştırılması sonucu elde edilir. Bu karışımın akustik empedansı  $4,1 \times 10^6 \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  'dir. Bu değer  $Z_m = \sqrt{Z_k \cdot Z_d}$  ( $Z_m$  uyumlaştırma tabakası empedansı,  $Z_k$  kristal empedansı,  $Z_d$  doku empedansı) ifadesine göre optimize edilmiştir.

Ön yüzeye yaklaşık 10mm kalınlığında empedans uyumlaştırma malzemesi döküldükten sonra, hızı  $1000 \text{ min}^{-1}$  olan bir santrifüj makinesinde 2 dakika döndürülerek hava kabarcıklarının yok edilmesi sağlanır. Empedans uyumlaştırma yüzeyi sertleştikten sonra dönüştürücü, darbe paketiyle uyarılarak ekosu incelenir.

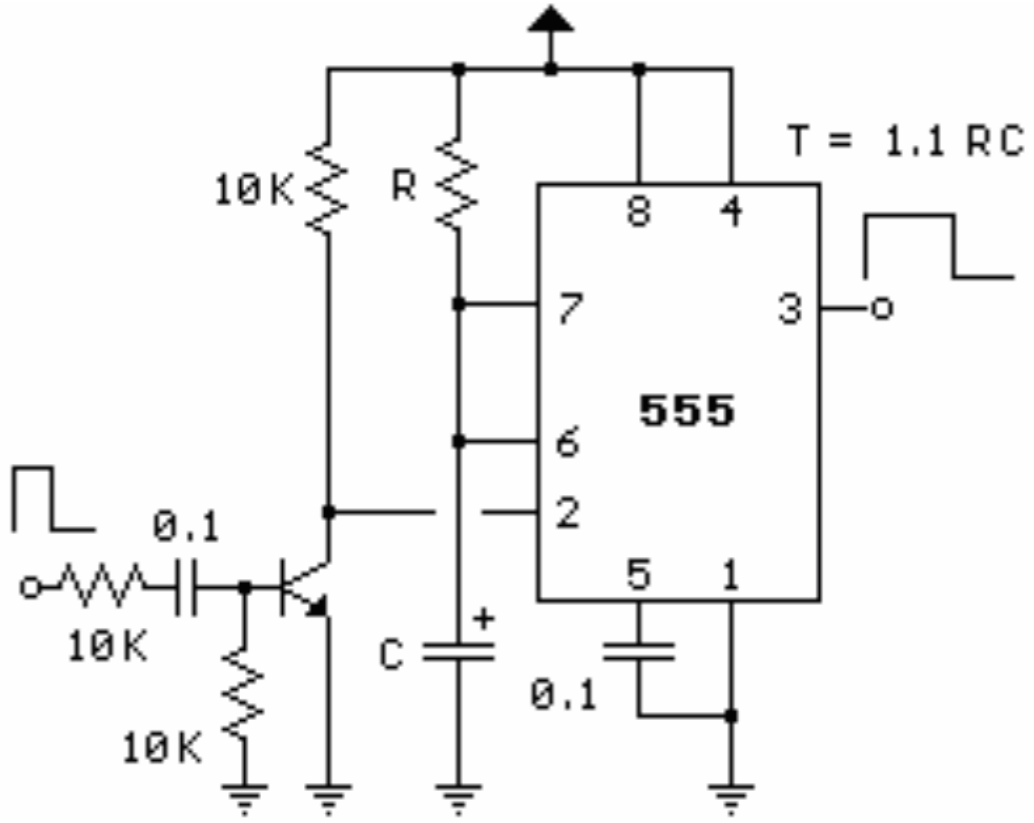
Çeşitli safhalarda yapılan bu şekilde ölçmeler, dönüştürücünün istenilen şartlara uygun yapıp yapılmadığı hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılır.

### **6.1. Test Yöntemi**

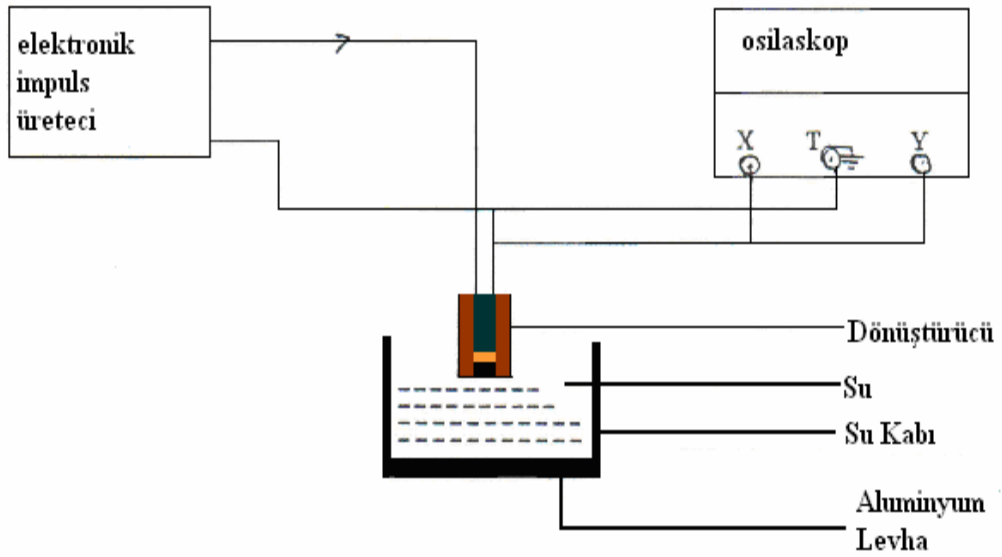
Dönüştürücü test edilirken aşağıdaki Şekil 6.6.'daki devre kullanıldı. Bu devrede görüldüğü gibi 555 entegreli monostabl devresidir. Direnç R ve C kondansatör değerleri ile pils genişliği belirleniyor, yani dönüştürücü için impulslar üretmek için tasarlanmıştır.

Test devresine 1 KHz'lik kare dalga üreticisiyle darbeler uygulanarak, 1-5 KHz'lik impulslar elde edilmiştir. Kare dalga üreticisi olarak, fonksiyon jeneratör test cihazı kullanılmıştır.

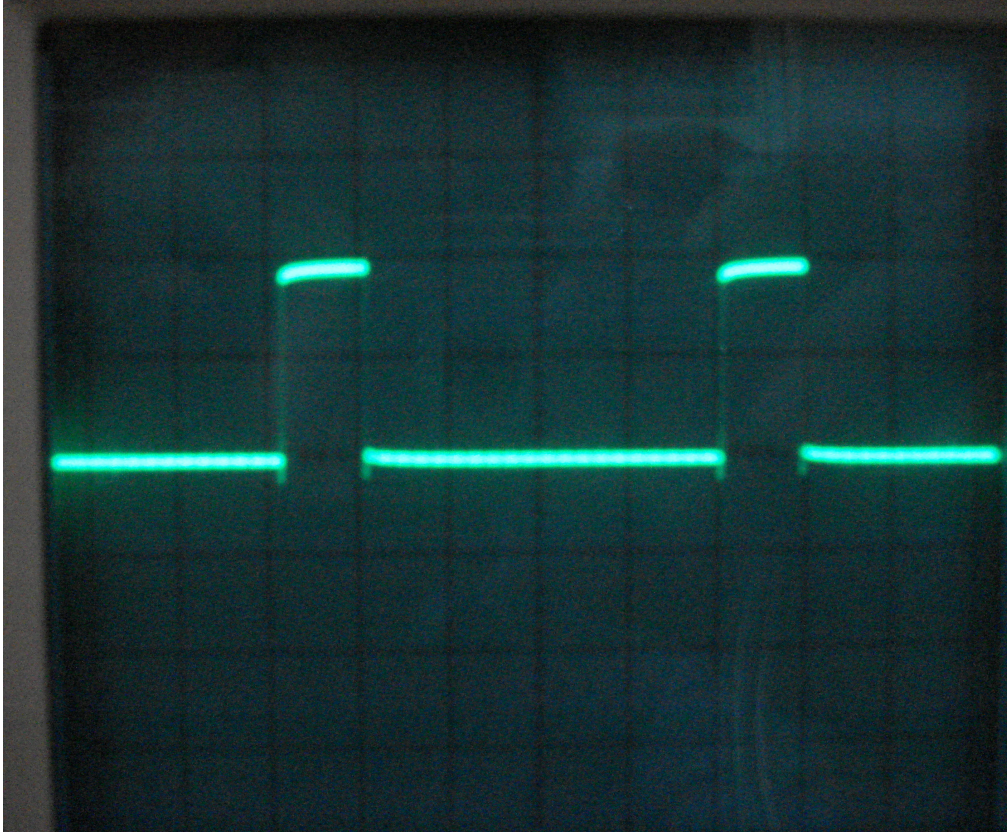
Dönüştürücü uçlarına, test devresi bağlandı, alınan ekoları incelemek için dönüştürücü çıkışında osilaskop kullanıldı. Test düzeneği şekil 6.7'de gösterilmiştir. Uygulanan test sinyali Resim 6.4'de gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi dönüştürücünün impulslara cevap verebileceği salınım süresi boşluklara bağlıdır.



Şekil 6.6. Dönüştürücü test devresi



Şekil 6.7. Dönüştürücü ile osiloskop bağlantısı

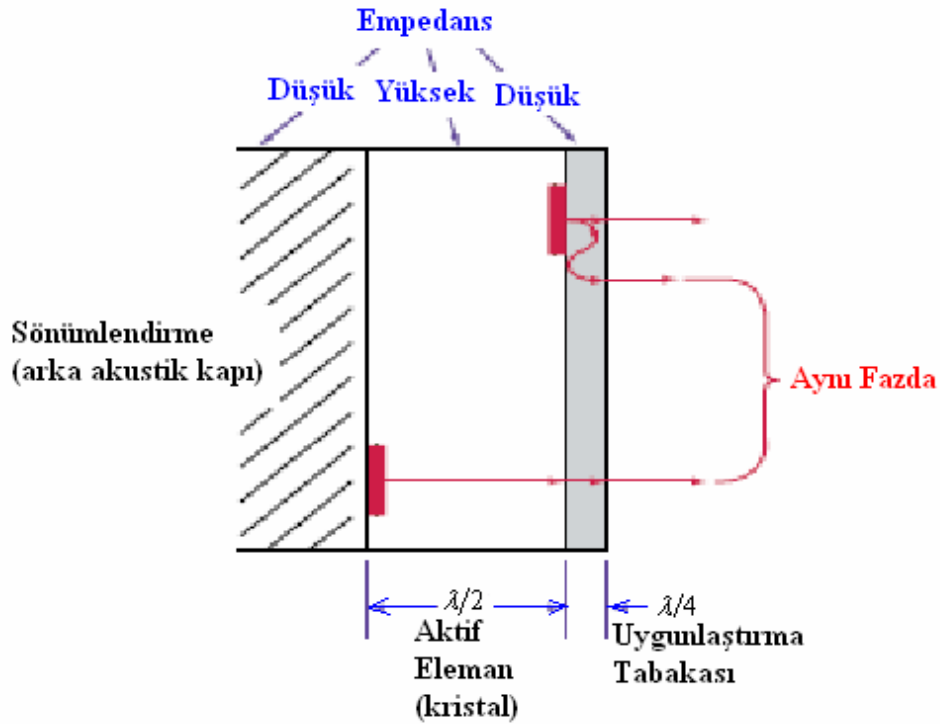


Resim 6.2. Uygulanan test sinyali (volt/div=2 V, Time/Div 0,1 ms)



Resim 6.3. Dönüştürücü impuls cevabı (time/div: 0,2  $\mu s$  volt/div: 50 mV)

Dönüştürücüden dokulara maksimum gücün aktarılması ve dönüştürücü duyarlılığın artırılması için, dönüştürücünün ön kısmına ait kalınlığın  $\lambda/4$  seviyesine kadar traşlanması gerekir. Bu nedenle 10 mm kalınlığında olan kristalin ön kısmı çok dikkatli bir şekilde torna tezgâhında inceltilir. Herhangi bir hataya neden vermemek için, 10 mm'lik kalınlık önce 4 mm'ye düşürülür, daha sonra çok ince zımpara kâğıdı kullanarak bu kalınlık  $\lambda/4$  seviyesine indirilir. Bu durum Şekil 6.8.'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Dönüştürücü İmpuls cevabı resim 6.5.'de gösterilmiştir. Resim 6.6'da ise dönüştürücümüzün uygunlaştırma ve sönümlendirme maddeleri yok iken verdiği impuls cevabı verilmiştir.



Şekil 6.8. Dönüştürücünün ön kısmına ait kalınlığın  $\lambda/4$  seviyesine kadar traşlanması

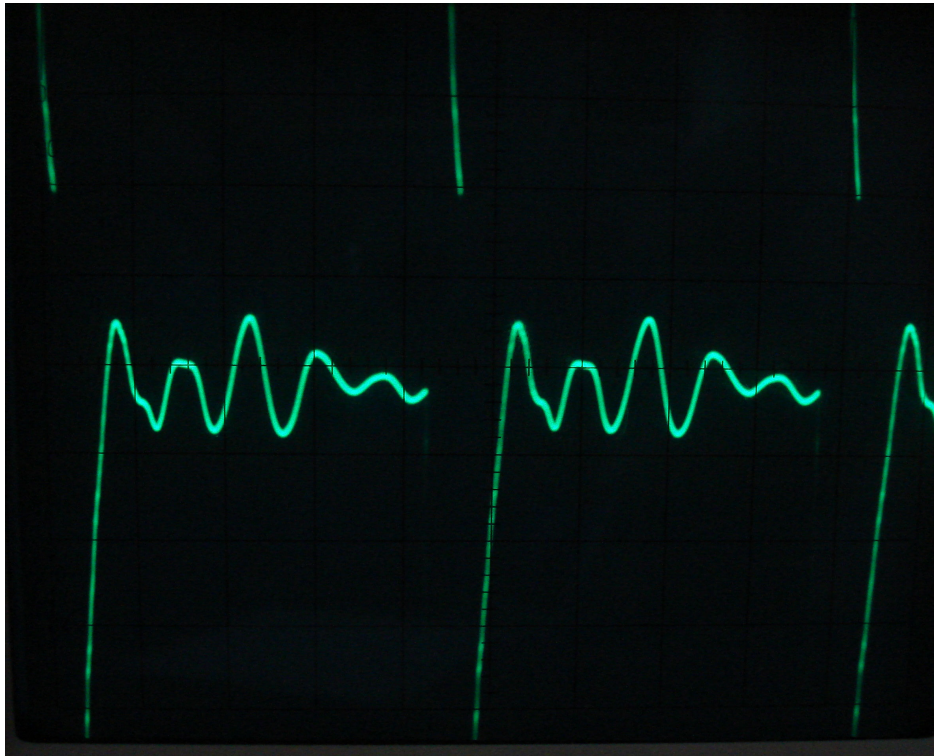
Bu  $\lambda/4$  'lük kalınlığı hesap edecek olursak: Kullanılan kristalin frekansı 3 MHz, hız 2960 m/s olduğuna göre oluşacak dalga boyu  $\lambda$  (6.1) eşitliğine göre :

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ 'den } \lambda = 2960 / 3.10^6 = 9,8 \times 10^{-4} m \quad (6.1)$$



Çeyrek dalga akustik katın kalınlığı  $\lambda/4 = 245\mu m$  olur. Bu kalınlığı normal şartlar altında elde etmek çok güçtür. Biz bunu dönüştürücü ön yüzeyi üzerinden yaparken sıfır zımpara ile zımparaladık ve her zımparalama sonunda impuls cevabının genliğine baktık. Daha sonra zımparalama işlemine devam edildiğinde genlik değerinin azaldığı görülmüştür.

Bir önceki genlik değerini tekrar buluncaya kadar bu işleme devam edilerek yaklaşık aynı genliğe yakın sinyali elde edince zımparalama işlemi durdurulmuştur. Bu işlem ile dönüştürücü genel hatları ile tasarlanmış oldu. Ön ve arka akustik kapının dönüştürücü giriş empedansına olan etkileri genel hatları ile dördüncü bölümde anlatılmıştır.



Resim 6.4. Dönüştürücünün Sönümlendirme ve Uyumlaştırma Maddeleri Yok İken Alınan İmpuls Cevabı (10 mV/Div, 0,2  $\mu s$  Time/Div)

## 7. SONUÇ ve ÖNERİLER

PZT disk kristaller kullanılarak geniş bantlı ultrasonik dönüştürücüler yapılabilmektedir. Genelde bu dönüştürücülerin tasarımında KLM modeli kullanılmaktadır. Pratik olması bakımından basitleştirilmiş eşdeğer devreden da faydalanılmaktadır.

Bu çalışmada en önemli problem olan elektrotların kristal üzerine yerleştirilmesi problemi çözülmüş, bu anlamda bu çalışmalara yeni bir teknik katılmıştır.

Karışım oranlarının hassas ayarlanması, ağırlık oranlarının çok hassas terazide tartılması, dönüştürücü için hazırlanan uygunlaştırma ve sönümlendirme malzemelerin hassas değerlerin elde edilmesini sağlayacak sonuçlar verecektir. Bu karışıma katılacak olan tungsten tozunun, partikül yapıda olamamasına dikkat edilmelidir. Çünkü yoğunluğu katı olmasından dolayı, diğer sıvı malzemelerden daha çok olduğu için karışımda homojenliği sağlamaz, bu nedenle sıfır dereceye kadar parçalandırılmalıdır.

Hazırlanan karışımların dökülmesi sonunda, artık tıraşlama safhası önem arzeder. Ön akustik kapının kalınlığı  $\lambda/4$  ve bunun tek katları olması gerektiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu kalınlık  $\mu m$  'ler seviyesinde olduğu için çok dikkat isteyen bir iştir.

Her tıraşlama sonunda dönüştürücünün alınan sinyalin maksimum oluncaya kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Maksimum genlik elde edildiği kısımdan sonra aynı işlemlere devam edildi tekrar eski maksimum genlik değerine ulaşıldığında tıraşlama işlemi durduruldu. Bu ön akustik kapıdaki çeyrek dalga katmanlarının dönüştürücünün giriş empedansı arttıkça giriş empedansının  $f_0$  merkez frekansı civarındaki genliği azalmakta ve band genişliği daralmaktadır. Çeyrek dalga katının uzunluğu  $\lambda/4$  değerinin altına indikçe,  $f_0$  civarındaki empedans genliğinin azaldığı ve band genişliğinin arttığı, üzerine çıktıkça da  $f_0$  civarındaki empedans genliğinin arttığı ve band genişliğinin daraldığı gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- 1) Gürdal, O., “Algılayıcılar ve Dönüştürücüler”, *Nobel Yayınevi*, Ankara, 23-28 (2000).
- 2) Evans, D.H., Mcdicken., W.N., “Doppler ultrasound physics, instrumentation, and signal processing”, *Wiley Corp.*, England, 27-91 (2000).
- 3) Arnau, A., “Piezoelectric Transducer and Applications”, *Springer Academic Press*, New York, 1-7 (2004).
- 4) Katsura, N., Ishikawa, M., Sato, T., Takeuchi, M., “Development of water immerse type ultrasound probe with PZT film deposited by hydrothermal metod”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, Japan, 1300-1306 (2003).
- 5) Schröder, A., Kupnik, M., O’Leary, P., Benes, E. and Gröschi, M., “A Capacitance Ultrasonic Transducer for Fast Flow-Measurements in Hot Pulsating Gases”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, Austria, 240-243 (2004).
- 6) Mullin, W.J., Gerace, W.J., Mestre, J.P., Velleman, S.L., “ Fundamentals of Sound with Applications to Speech and Hearing”, *Ablongman*, Boston, 72-91 (2003).
- 7) Everest, F.A., “The Master Handbook of Acoustics”, *Mc Graw- Hill*, New York, 17-21, (2000).
- 8) Cheeke, J.D., “ Fundamentals and Aplications of Ultrasonic Waves”, *CRC Press*, Boston, 203-214 (2002).
- 9) Allin, J.M. and Cawley, P., “Design and construction of a low frequency wide band non-resonant transducer”, *Elsevier Ultrasonics* , 41: 147-155 (2003).
- 10) Jin, M., Xu, T., Shi, M., Wu, X. and Jang, J., “Growth of high performance piezoelectric crystal  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$  using  $PbO$  flux”, *Elsevier Ultrasonics* , 46: 129-132 (2007).
- 11) Ergün, Ş., “Disk şeklindeki ince piezoelektrik plakalar kullanılarak gerçekleştirilen geniş bantlı ultrasonik dönüştürücü tasarımı”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 30-55 (1992).
- 12) Desilets, C.S., Fraser, C., Kino, G.S., “The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducers”, *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, SU-25: 115-125 (1978).
- 13) Ramoz-Fernandez, A., Montaya-Vitini, F., Gallego-Juarez, J.A., “Automatic system for dynamic control of resonance in high power an high Q ultrasonic



- transducer”, *IEEE Ultrasonics*, 23 (3): 151-156 (1985).
- 14) O’donnell, M., Busse, L.J., Miller, J.G., “Piezoelectric transducers”, **Academic Press**, New York, 29-65 (1981).
  - 15) Yamada, K., Sakamura, J., Nakamura, K., “Broadband Ultrasound Transducer using effectively graded Piezoelectric Materials”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, Japan, 1085-1089 (1998).
  - 16) Kuttruff, H., “Ultrasonics Fundamentals and Applications”, *Springer publisher*, New York, 89-112 (1991).
  - 17) De Angelis, D.A., Schalcosky, D.C., “The effect of PZT8 piezoelectric aging on mechanical and electrical resonances in Ultrasonic Transducer”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, Washington, 1935-1938 (2006).
  - 18) Aziz, E., Kanev, Z., Barboucha, M., Maimouni, R., Staroswiecki, M., “An Ultrasonic Flowmeter designed According to Smart Sensors Concepts”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, Australia, 1371-1374 (1996).
  - 19) Thijssen, J.M., Verhoef, W.A., Cloostermans, M.J., “Optimization of Ultrasonic, Transducer”, *IEEE Ultrasonics*, 23 (3): 41-46 (1985).
  - 20) De Jong, N., Souquet, G., Faber, G., BOM, N., “Vibration Modes, Matching Layers and Greeting Lobes”, *IEEE Ultrasonics*, 23 (3): 176-182 (1985).
  - 21) Callens, D., Bruneel, C., Assad, J., “Matching ultrasonic transducer using Two matching layers where one of them is glue”, *Elsevier NTD & International*, 37: 591-596 (2004).
  - 22) Lancee. C.T., Souquet, H., Ohigashi, H., Bom, N., “Ferro electric ceramics versus polymer piezoelectric materials”, *IEEE Ultrasonics*, 23 (3): 138-142 (1985).
  - 23) Hunt, J.W., Arditi, M., Foster, F.S., “Ultrasonic Transducers for Pulse-Echo Medical Imaging”, *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, BME-30: 453 -481 (1983).
  - 24) Güler, İ., Güler N. F., “Construction and matching of ultrasonic transducer for pulsed doppler blood flowmeter”, *IEEE/EMBS, 12th Annu. Inter. Confer.*, USA, 12 (2): 321-322 (1990).
  - 25) Güler, İ., “Multigate pulse wave doppler unit: design and construction of transducer and analogue electronics”, *Leicester Royal Infirmary Internal Report*, England, 89 (1): 36-61 (1989).
  - 26) Parrini, L., “New techniques for the design of advanced ultrasonic transducer for wire bonding”, *IEEE Transactions on Electronics*, 26 (1): 37-45 (2003).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DENİZ, Cengiz  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 01.05.1976 Yozgat  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0(312) 255 42 58  
Faks : 0 (312) 326 04 15  
e-mail : cengzdenz@hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Marmara Üniversitesi / Elektronik-Haberleşme Eğitimi	2002
Lise	Ankara Gazi Lisesi	1993

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2004	Bahçelievler EML	Öğretmen
2004-2007	Keçiören EML	Öğretmen

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Futbol, Bilgisayar Teknolojileri, Basketbol, Maket