

151725

**KOMPOZİT PİEZOELEKTRİK
TRANSDÜSERLERİN
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE TASARIMI**

ERMAN ÜZGÜR
Yüksek Lisans Tezi /

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı
Temmuz 2000

Bu Tez Çalışması Anadolu Üniversitesi Araştırma Fon Saymanlığınca
Desteklenmiştir. Proje No: 000204

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Erman Üzgür'ün "Kompozit Piezoelektrik Transdüserlerin Bilgisayar Yardımı ile Tasarımı" başlıklı Seramik Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi ~~14.08.2000~~ tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<u>Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)		<i>Dr. Ayhan Döğün</i>
Üye	: Doç. Dr. Servet Türeci	
Üye	: Doç. Dr. Hüseyin NARINDAL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~01.09.2000~~ tarih ve ~~22/7~~ sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Orhan ÖZER
Fen Bilimleri Enstitüsü
M O D Ü R Ü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PİEZOELEKTRİK KOMPOZİT TRANSDÜSERLERİN BİLGİSAYAR YARDIMI İLE TASARIMI

ALİ ERMAN ÜZGÜR

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Seramik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Aydın Doğan

2000

Zil tipi transdüserler sağladıkları ortalama deplasman ve oluşan kuvvet ile çok katmanlı ve bimorf tepkileyiciler arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Ayrıca kolay üretimleri, istenilen özelliklerin boyut değişimleriyle kolayca elde edilmesi, bu transdüserleri tepkileyici uygulamaları için oldukça çekici kılmaktadır.

Bu tezde, malzeme ve boyut değişimlerinin zil tipi transdüserin performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak ve bilgisayar ortamında hesaplama metodları kullanılarak araştırılmıştır. Zil tipi transdüserler, değişik metal kapak malzemeleriyle, sürücü eleman olarak kullanılan yumuşak ve sert PZT'lerin farklı kombinasyonları şeklinde üretilmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırmak amacıyla transdüser çapı 12.7 mm olarak alınmıştır. Transdüserlerin deplasman ve rezonans karakteristikleri LVDT Sensör ve Empedans Analizör kullanılarak bulunmuştur. Aynı zamanda, benzer deneysel koşullar ANSYS FEA (Sonlu Elemanlar Analizi) programı kullanılarak bilgisayarda simüle edilmiştir. Her iki yöntem karşılaştırıldığında ise birbirleriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.

Zil tipi transdüserlerde diğer önemli geometrik parametreler ise oyuk çap ve derinliğidir. FEA ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları ispatlandıktan sonra, FEA kullanılarak boyut etkisi çalışmaları yapılmıştır. Transdüser çapları 3.2 mm, 9.5 mm, 12.7 mm, 15.8 mm, 35 mm olan transdüserlerin, deplasman ve rezonans karakterleri değişik oyuk boyutu ve derinliklerinde araştırılmıştır. Boyut değişimleriyle birlikte, 1 µm-100 µm arasında deplasman değerleri ve 2 µsec-200 µsec arasında tepki zamanları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esnek Transdüserler, Tepkileyiciler, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT**Master of Science Thesis****DESIGN OPTIMIZATION OF COMPOZITE PIEZOELECTRIC
TRANSDUCERS BY USING FINITE ELEMENT MODELLING****ALİ ERMAN ÜZGÜR****Anadolu University****Graduate School of Natural and Apllied Sciences****Ceramic Engineering Program****Supervisor: Asst. Prof. Dr. Aydın Doğan****2000**

Cymbal transducers fill in the blankes between multilayer and bimorph actuators due to the average displacement and generative force. Furthermore, the fact that they can be easily produced and desired properties can be easily achieved by adjusting diemensions make these transducers very attractive in actuator applications.

In this thesis, the effect of material and the size of the samples on the performance of the cymbal transducer were investigated by using experimental and computational methods. Cymbal transducers were fabricated with different endcap materials with various elastic modules in combination with hard and soft piezoelectric ceramic driving elements. Displacement and resonance characteristics of these transducers were tested by using LVDT sensor and Impedance analyzer. Similar experimental conditions were simulated on computer by using ANSYS FEA program. To be consistent with the former studies, 12.7 mm sample diameter was chosen to analyze the effect of the material. It has been observed that the experimental and FEA results are in good agreement.

In the cymbal transducer the cavity diameter and depth plays an important role. After being confident and obtaining consistent results with experimental and FEA analyses, size effect studies were performed on computer by using the FEA method. Displacement and resonance characteristics of 3.2 mm, 9.5 mm 12.7mm, 15.8 mm and 35 mm diameter samples with various cavity size and cavity depth were studied by using FEA method. It is possible to achieve 1 μm to 100 μm displacement values and 2 μsec -200 μsec response speeds by altering the size of the transducer.

Key words: Flextensional Transducer, Actuators, FEA,

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu yardımlarından ve anlayışından dolayı danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Aydın DOĞAN'a teşekkür ederim. Bilgisayar konusunda yardımları için Yrd. Doç. Dr. Hakan ŞENEL'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarım, Öğr. Grv. Gürsoy ARSLAN, Arş. Grv. Emrah DÖLEKÇEKİÇ, Arş. Grv. Güray KAYA, Arş. Grv. Şeniz KUŞHAN, Arş. Grv. İrfan TÖRE, ve diğer tüm Seramik Mühendisliği çalışanlarına teşekkürler.

Yardımlarından dolayı arkadaşlarım, Sema KULA, Göktuğ GÜNKAYA ve Ersin H. NUHUZ'a teşekkür ederim.

Bu çalışmada maddi ve manevi bana büyük destek veren aileme ve gelecekteki eşim Sinem ÇEVİK'e sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Savfa No</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ.	1
1.1. Transdüserler	1
1.1.1. Transdüserlerin Çalışma Prensipleri	2
1.2. Deplasman Transdüserleri (Tepkileyicileri)	4
1.2.1. Katı Hal Tepkileyicileri	6
1.2.1.1. Şekil Hafızası Etkisi	7
1.2.1.2. Manyetostriktif Etki	8
1.2.1.3. Piezoelektriklik	8
1.2.1.4. Elektrostriktif Seramikler	13
1.2.2. Katı Hal Tepkileyicisi Tasarımları	14
1.2.2.1. Esnek Transdüserler	17
1.2.2.2. Hilal ve Zil Tipi Transdüserler.....	18
1.2.2.3.Simetrimin Transdüser Tasarımı ve Performans Karakteristiğine Etkisi.....	32
1.2.2.4. Zil Tipi ve Hilal Tipi Transdüserler için Eş Devre.....	34
1.3. Sonlu Elemanlar Analizi	35
1.3.1. Sonlu Elemanlar Analizi Teorisi	37
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
2.1. Zil Tipi Kompozit Transdüser Yapı Üretimi.....	41
2.1.1. Piezoseramik Malzemeler	41
2.1.2. Metal Kapak Hazırlanması	41

İÇİNDEKİLER (Devam)

2.1.3. Yapıştırıcı Malzeme	44
2.2. Modelleme	45
2.2.1. Model Kurulması	45
2.2.2. Yükleme	48
2.2.3. Çözüm ve Çözüm Sonrası İşlemleri	48
2.2.4. Program Dosyaları	50
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53
3.1. Sonlu Elemanlar Analizi ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması...	53
3.1.1. Deplasman	53
3.1.2. Rezonans Frekansı	60
3.2. Malzeme Seçiminin Zil Tipi Transdüserin Performansına Etkileri...	63
3.3. Zil Tipi Transdüserde Boyut Etkileri	65
3.3.1. Geometrik Değişimlerin Deplasmana Etkisi	66
3.3.1.1. Transdüser Çapı	66
3.3.1.2. Oyuk Çapı	67
3.3.1.3. Düz Yüzey Çapı	70
3.3.1.4. Oyuk Derinliği	73
3.3.1.5. Metal Kapak ve PZT Kalınlığı	76
3.3.2. Geometrik Değişimlerin İlk Rezonans Frekansına Etkisi	82
3.3.2.1. Transdüser Çapı	82
3.3.2.2. Oyuk Çapı	83
3.3.2.3. Düz Yüzey Çapı	83
3.3.2.4. Oyuk Derinliği	88
3.3.2.5. Metal Kapak ve PZT Kalınlığı	91
4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
5.KAYNAKLAR DİZİNİ	98
6. EKLER	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Yağ basıncı tipli deplasman indirgeme mekanizması	5
1.2. Ferroelektrik seramiklerin gerilme alanı altında histeritik eğrileri.....	14
1.3. Bimorf ve çok katmanlı tepkileyici tasarımları	16
1.4. Hilal ve Zil tipli transdüserlerin çalışma mekanizmaları	20
1.5. Değişik tasarımda metal kapağa sahip kompozit transdüserlerin deplasman değerleri	22
1.6 Değişik metal kapak tasarımlı kompozit transdüserlerin pozisyona bağlı deplasman değerleri	23
1.7. Değişik kompozit ve tek elemanlı transdüserlerin yararlılık katsayıları...	25
1.8. Değişik tip transdüserlerin ivme ölçer uygulamaları için hassasiyetleri...	28
1.9. Metal seramik kompozit ultrasonik motorun çalışma prensibi.....	31
1.10. Zil ve Hilal tipli transdüserler için eş devre	34
1.11. Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı ve nodlar	38
2.1. Zil tipi transdüser üretimi için kullanılan kalıp	43
2.2. Zil tipi transdüserin parçalarının şematik gösterimi	44
2.3 Modellemede kullanılan üç ve iki boyutlu koordinat sistemi	46
2.4. Zil tipi kompozit transdüser yapısının ANSYS yardımı ile iki boyutlu olarak modellenmesi	49
3.1. Standart boyutlardaki zil tipi transdüser	54
3.2 Hesaplanan ve deneysel deplasman değerlerinin karşılaştırılması (0.3 mm kapak kalınlığı)	56
3.3. Hesaplanan ve deneysel deplasman değerlerinin karşılaştırılması (0.385 mm kapak kalınlığı)	57
3.4. Zil tipi transdüserde kullanılan PZT'nin piezoelektrik katsayılarının elektrik alanına bağımlılığı	58
3.5. Zil tipi transdüserde deplasman dağılımı	59
3.6. FEM ile hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş rezonans spektrumunun karşılaştırılması (0.5 mm kapak kalınlığı, 0.35 mm oyuk derinliği).....	61
3.7. FEM ile hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş rezonans spektrumunun karşılaştırılması (0.5 mm kapak kalınlığı, 0.20 m oyuk derinliği).....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

3.8. Zil tipi transdüserde elastik modülün deplasmana etkisi	64
3.9. Kapak malzemesinin transdüserin ilk rezonans frekansına etkisi.....	64
3.10. Transdüser çapının deplasman üzerindeki etkisi	67
3.11. Transdüser ve oyuk çapının deplasman üzerindeki etkisi	69
3.12. Transdüser ve düz yüzey çapının deplasman üzerindeki etkisi.....	72
3.13. Transdüser çapı ve oyuk derinliğinin deplasman üzerindeki etkisi.....	75
3.14. Transdüser çapı ve metal kapak kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi	78
3.15. Transdüser çapı ve PZT kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi.....	80
3.16. Transdüser çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	82
3.17. Transdüser çapının ve oyuk çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	85
3.18. Transdüser çapının ve düz yüzey çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	87
3.19. Transdüser çapının ve oyuk derinliğinin transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	90
3.20. Transdüser çapının ve metal kapak kalınlığının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	93
3.21. Transdüser çapının ve PZT kalınlığının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Transdüserlerin çalışma prensipleri	2
1.2. Geleneksel tepkileyicilerin deplasman karakteristiği	5
1.3. Katı hal tepkileyicilerinin karşılaştırılması	7
1.4. Farklı tasarımdaki tepkileyicilerin karşılaştırılması	30
2.1. Metal kapakların özellikleri	41
2.2. PZT seramiklerin özellikleri	42
3.1. Deneysel ve hesaplanan deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	55
3.2. Birinci titreşim modundaki dönüşüm faktörlerinin karşılaştırılması.....	60
3.3. Değişik transdüser çapları için temel boyutlar	65
3.4. Oyuk çapının deplasmana etkisi	68
3.5 Oyuk çapı eşitliği için katsayı değerleri	70
3.6. Düz yüzey çapının deplasmana etkisi	71
3.7 Düz yüzey çapı eşitliği için katsayı değerleri	73
3.8. Oyuk derinliğinin deplasmana etkisi	74
3.9 Oyuk derinliği eşitliği için katsayı değerleri	76
3.10. Kapak kalınlığının deplasmana etkisi	77
3.11. PZT kalınlığının deplasmana etkisi	79
3.12 Metal kapak kalınlığı eşitliği için katsayı değerleri.....	81
3.13 PZT kalınlığı eşitliği için katsayı değerleri	81
3.14. Oyuk çapının rezonans frekansına etkisi	84
3.15. Düz yüzey çapının rezonans frekansına etkisi	86
3.16. Oyuk derinliğinin rezonans frekansına etkisi	89
3.17. Kapak kalınlığının rezonans frekansına etkisi	92
3.18. PZT kalınlığının rezonans frekansına etkisi	94

1. GİRİŞ

1.1 Transdüserler:

Transdüserler herhangi bir enerjiyi algılayıp bunu kullanılabilir veya bilgi verici diğer bir enerjiye dönüştüren cihazlardır. Transdüserlerin ana amacı, kontrol veya ölçüm sistemleri için, algıladığı enerjiyi standart birimde bir değere dönüştürmektir. Transdüserler genelde kullandıkları alanlara göre isimlendirilirler: sıcaklık ve ısı akışı ölçümleri için algılayıcı, optik ölçümler için detektör ve kuvvet ölçümleri için yük pilleri isimleri altında kullanılırlar. Bir çok sistemde de özel ölçümler için kullanılır ve adlandırılırlar: ivme ölçer, akış ölçer ve ısı ölçer vb. Uygulama alanları ise çok geniştir ve günlük hayatımızda hemen hemen her yönde karşılaşılabılıriz. Kalp atış sayısının ölçümünden, deprem bilgilerinin ölçümüne kadar bir çok ölçüm sisteminde kullanılırlar. Bunun yanında robot teknolojisinde, enerji dönüşümlerinde, çevre kontrolünde, otomobil ve diğer taşımacılık endüstrisinde, güvenlik alarmlarında, tarımda, tıpta, askeri ve uzay teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Transdüserler yüksek teknolojinin en çok uğraşılan ve en çok gelişme sağlayan ürünleridir. Çoğu batı ülkesinde transdüser endüstrisinin gelişim hızı o ülkenin ekonomik gelişme hızından daha yüksektir. Bu teknolojideki genel amaç her zaman daha küçük ve daha ucuz transdüser üretimi olmuştur. Böylece özellikle elektronik teknolojisinde daha doğru ve kesin sonuçlar elde edilebilmektedir. Son günlerde ise, doğruluk payı çok yüksek olan, dijital sinyallerle uyumlu transdüserler güncellik kazanmaya başlamıştır. Ayrıca optik algılayıcılar ve fiber optik sistemler de günümüz teknolojisinde fazlasıyla yer bulmaktadır.

Transdüserler temel olarak iki ana elemandan oluşurlar. Birinci eleman istenilen enerjiyi algılayan ve dönüştüren elemandır. Diğer eleman ise dönüştürülen enerjiyi kullanan, bunu sistemden bir çıktı olarak gösteren veya bu enerjinin miktarına göre davranışta bulunan elemandır. Bu iki temel eleman bazen basit, bazen ise çok karışık bir transdüser sistemi içerisinde bir bütün oluştururlar

ve kullanım alanlarına göre değişik malzemelerle ve değişik tasarımlarla üretilirler [1].

1.1.1 Transdüserlerin Çalışma Prensipleri

Dönüştürücü elementin transdüserin en önemli parçası olduğu bir gerçektir. Bu element transdüserin ana fonksiyonunu belirtir. Transdüserlerde oluşan fiziksel ilişkilerin bir kısmı Çizelge 1.1 de özetlenmiştir. Bu çizelge değişik fiziksel dönüşümlerin temel mekanizmalarını vermekte, böylece transdüserlerin çalışma prensiplerini açıklamaktadır.

Çizelge 1.1. Transdüserlerin çalışma prensipleri [1]

Değişim	Değişimin Sebebi
Elemanın direncindeki değişim	<ul style="list-style-type: none"> * Gerilme altındaki malzemenin boyutlarındaki değişim * Çözelti içindeki kimyasal konsantrasyon değişimi * Varistör boyunca akım veya voltaj değişimi * İletken sıvı taşıyan borunun geometrisindeki değişim
Elemanın indüktansındaki değişim	<ul style="list-style-type: none"> * Manyetik yolun uzunluğunda değişim * Manyetik alandaki değişim * Malzemenin içinde gerilme oluşması veya kompozisyon değişiminden dolayı ferromanyetik malzeme geçirgenliğinin değişmesi
Elemanın kapasitansındaki değişim	<ul style="list-style-type: none"> * Kapasitans içeren iki elektrotun arasındaki mesafe değişimi * Malzemenin dielektrik sabitesindeki değişim

Çizelge 1.1. (Devam) Transdüserlerin çalışma prensipleri [1]

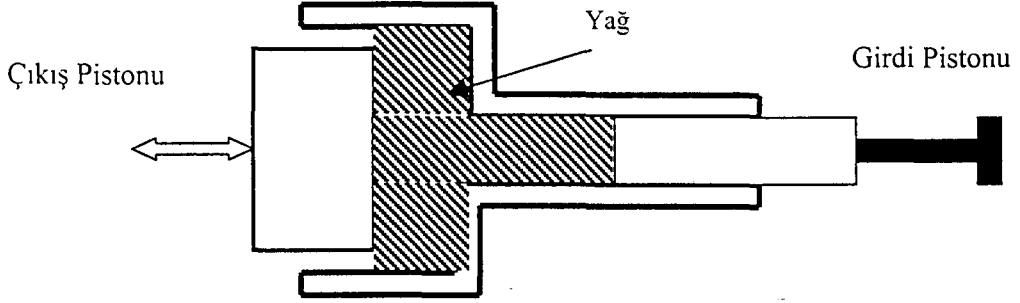
Elektriksel Yüklerdeki Değişim	* Radyasyona maruz kalmış gazların iyonizasyonu
Eleman tarafından oluşturulan voltaj veya akım	<ul style="list-style-type: none"> * Farklı metallere oluşan iki iletken içeren bağlantılardaki sıcaklık değişimi (Termokuplardaki Seebeck etkisi) * Isıtılan kristal tarafından oluşturulan elektrik yükü (Pyroelektrik etki) * Gerilme altındaki kristal tarafından üretilen elektrik yükü (Piezoelektrik etki) * p-n bağlantılı yarı iletkenlerde, yüzeye gelen ışığın yayılma enerjisi (Fotovoltaik etki) * Kimyasal olay esnasında üretilen elektrik enerjisi * Yapı boyunca elektriksel bir farklılık gösteren sabit tüp veya gözenekli malzemede ilerleyen sıvı (Elektrokinetik etki)
Doğal bir enerji kaynağı tarafından üretilen voltaj veya akım	<ul style="list-style-type: none"> * Akım taşıyan bir metal ya da yarı iletkene manyetik alan uygulanmasıyla oluşan elektrik potansiyeli (Hall Etkisi) * İletkendeki direnç ve kapasitans (Var-Yok etkisi)
Transparan malzemelerin optik özellikleri	* Malzeme gerilime tabi tutulduğunda oluşan çift yansıma (Fotoelastik etki)
Işığın Yayılımı	<ul style="list-style-type: none"> * Belli bir maddenin kızarma sıcaklığının altında ısıtılması (Örnek elmas) * Kimyasal reaksiyon * Hızlı elektron bombardımanı sebebiyle uyarılma * Güçlü elektrik alanı tarafından uyarılma * Fosforların radyoaktif taneler tarafından uyarılması

1.2 Deplasman Transdüserleri (Tepkileyiciler)

Çok geniş ürün ve tasarım çeşitlerine sahip olan transdüserler arasında tepkileyiciler, üzerinde en çok çalışılan ve tasarımı en hızlı geliştirilen transdüser çeşidi olarak göze çarpmaktadır. Bu transdüserler, mikro-pozisyon ayarında (mikro-positioners), bir cisimi dinamik olarak harekete geçirmede (küçük motorlar), ve gürültü salınımlarını ortadan kaldırmada (sönümleyici) kullanılırlar. Uygulama alanları ise özellikle optik sistemler, havacılık araçları ve malzemeleri hassas işleme için kullanılan araçlardır. Tepkileyiciler, genel olarak giren enerjiyi mekanik enerji çıkısına (deplasman veya kuvvet) çeviren transdüserler olarak tanımlanırlar ve iki temel çeşitten oluşurlar: Geleneksel tepkileyiciler ve katı faz tepkileyicileri. Geleneksel tepkileyiciler de üç grupta katagorize edilirler [2]. Bunlar;

- Yağ Basıncı Tipli Deplasman İndirgeyicisi
- Servo Motor
- Manyetik Bobin (Hoparlör)

Yağ basınçlı silindirler, hidrolik prensiplerini kullanırlar. Deplasman pistonu başka bir piston tarafından üretilen basınçla hareket eder (Şekil 1.1). Çok yer kaplaması ve uzun amplifikasyon (cevap) zamanı bu transdüserlerin dezavantajlarıdır (Çizelge 1.2). Servo motorları ise elektromanyetik motorun dönmesini zincir mekanizmasını kullanarak doğrusal harekete çevirir. Mekaniksel geri tepme bu motorlarda ciddi sorunlara yol açmaktadır. Ses bobinleri (hoparlörler) elektromanyetik bobin ve yaylardan oluşmuştur. Giriş kuvveti ile karşılaştırıldığında yarattığı oluşan kuvvet düşüktür. Ayrıca bu transdüserde amplifikasyon karakteristiği çok yavaştır. Çizelge 1.2 de geleneksel tepkileyicilerin deplasman karakterleri görülmektedir.



Şekil 1.1 Yağ basıncı tipli deplasman indirgeme mekanizması [3]

Çizelge 1.2 Geleneksel tepkileyicilerin deplasman karakteristiği [3]

Sürücü Güç	İsim	Deplasman Aralığı	Deplasman Doğruluğu	Oluşan Kuvvet	Cevap Hızı
Hava Basıncı	Hava Basıncılı Motor	Dönme	-	5 kgm	10 sn
	Hava Basıncılı Silindir	100 mm	100 μm	10^{-2} kg/mm^2	10 sn
Yağ Basıncı	Yağ Basıncılı Motor	Dönme	-	10 kgm	1 sn
	Yağ Basıncılı Silindir	1000 mm	10 μm	10 kg/mm^2	1 sn
Elektrik	AC Servo Motor	Dönme	-	3 kgm	100 msn
	DC Servo Motor	Dönme	-	20 kgm	10 msn
	Step Motor	1000 mm	10 μm	30 kg	1000 msn
	Ses Bobinli Motor	1 mm	0.1 μm	30 kg	1 msn

1.2.1 Katı Hal Tepkileyicileri:

Deplasman transdüserlerinin ikinci grubu ise katı hal tepkileyicileridir. Bu tepkileyicilerde deplasman; sıcaklık, manyetik alan veya elektrik alanı gibi dış parametreler tarafından kontrol edilir. Ferroelektrik, ferromanyetik ve ferroelastik geçişler ve bunların sonucunda oluşan genleşme ve büzüşme, tepkileyici uygulamalarında kullanılabilir. Terfenol-D gibi manyetostriktif malzemeler manyetik alan tarafından kontrol edilirler. Elektrik alanı tarafından kontrol edilen deplasman tepkileyicileri ise piezoelektrik ve elektrostriktif malzemelerden yapılırlar.

Bir tepkileyici elementi için istenen özellikler şunlardır:

- Büyük deplasman değeri
- İyi pozisyon tekrarlama
- Yüksek cevap hızı
- Sıcaklıktan etkilenmeme
- Düşük sürücü güç
- Küçük boyut ve hafiflik
- Çevreye zararının olmaması
- Kullanım sırasında bozunuma uğraması

Bu parametreler gözönüne alınarak, ısı genleşme, manyetostriktif, piezoelektrik uzama ve elektrostriktif özelliklerin karşılaştırılması Çizelge 1.3 de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Katı hal tepkileycilerinin karşılaştırılması

	Isıl Uzama	Manyetostriktif Uzama	Piezostriktif Uzama	Elektrostriktif Uzama
Uzama	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^{-9} - 10^{-3}$
Histerisiz	Küçük	Büyük	Büyük	Küçük
Yaşlanma	Küçük	Küçük	Büyük	Küçük
Cevap	Sec	nsec-µsec	msec	µsec
Sürücü Güç	Isı	Manyetik Alan	Elektrik Alanı	Elektrik Alanı
Örnek	Nitinol $Ni_{1-x}Ti_x$	Terfenol D (Tb, Dy)Fe ₂	Pb(Zr, Ti)O ₃	Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃

1.2.1.1 Şekil Hafızası Etkisi:

Şekil hafızası etkisi, bazı alaşımların termoelastik martensit faz dönüşümünde gözlemlenir [4]. Birinci dereceden deplasman etkisi olan bu olayda hacim merkezli kübik kristal, soğutma esnasında, kayma uzaması etkisiyle martensitik faza dönüşür. Şekil hafızalı alaşımlarda düşük sıcaklık martensit fazı deforme edilip tekrar ısıtıldıklarında martensit yapı komşu hacim merkezli kübiğe dönüşür ve böylece deformasyon yok edilir ve malzeme orjinal şeklini tekrar alır. Şekil hafızalı alaşımlar iki sınıfta toplanırlar: demir dışı ve demirsel. Sık kullanılan demir dışı alaşımlar Ni-Ti, Cu-Zn-Al, ve Cu-Ni-Al alaşımlarıdır. Demir içeren şekil hafızalı alaşımlar geliştirilme aşamasında olan Fe-Pt, Fe-Ni-C ve Fe-Ni-Co alaşımlarıdır.

Şekil hafızalı etki iki şekilde gözükabilir: Tek yol hafıza ve çift yol hafıza [5]. Tek yol hafızada, deforme edilmiş malzeme, ısıtma esnasında orjinal şekline dönüşür ve bu şekil termal dönüşüm işlemlerinde sabit kalır. Çift taraflı hafızada ise, şekil hafıza etkisi, ısıtma ve soğutma esnasında martensitik dönüşümün gerçekleştiği tüm durumlarda görülür.

Şekil hafızalı alaşımlar yüksek dönüştürülebilir uzama gösterdiklerinden dolayı selenoid yapılar, motorlar ve bimorf tepkileyciler için alternatif malzeme

gibi gözükmedirler. Fakat yüksek histerisiz ve martensitik dönüşüm için gerekli termal enerjinin büyüklüğü kullanım aşamasında zorluk çıkarmaktadır.

1.2.1.2 Manyetostriktif Etki:

Manyetostriktif etki, manyetik bir malzemenin, yapısındaki manyetik durumunun değişmesiyle birlikte boyutlarında değişimin olmasıdır [6]. Manyetostriktif uzama atomik manyetik momentlerin dizilimlerindeki değişmeden kaynaklanır. Ferromanyetik malzemelerde, uygulanan manyetik alan yönlenmiş bölgeler içindeki manyetizasyonu aynı yönde geliştirir ve yönlenmiş bölge duvarlarının hareketi boyutlarının değişmesine sebep olur.

İlk manyetostriktif osilatör, nikel tüp içeriyordu ve G. W. Pierce tarafından 1925 yılında yapılmıştı. Bu osilatör yaklaşık 25 kHz civarlarında çalışıyordu [7]. Şu anda ise en çok çalışılan manyetostriktif malzeme Tb-Dy-Fe kompozisyonunda olan Terfenol D'dir. Terfenol D % 0.6 ya kadar uzama ile birlikte 50 MPa dan büyük kuvvetleri taşıyabilir. Yüksek maliyeti, kompleks şekillerde üretim zorluğu ve Edi akımlarından dolayı oluşan yüksek elektriksel kayıplar ise Terfenol D'nin dezavantajlarıdır.

1.2.1.3 Piezoelektriklik

Bir kristalin uygulanan mekanik uzama ile orantılı olarak elektrik yükü üretmesine piezoelektrik özellik denir. Piezoelektrik kristalde bu olgunun terside gözlemlenir. Yani kristal uygulanan elektrik alanla orantılı olarak geometrik uzama gösterir [8].

Piezoelektrik seramiklerin mekaniksel davranışları, gerilme tensörü (T_{ij}), ve uzama tensörü (S_{ij}) tarafından tanımlanır. Piezoelektrik kristalin elektriksel davranışları ise elektrik alanı vektörü (E_k) ve elektriksel deplasmanla (D_k) ile tanımlanır. Piezoelektrik eşitlik, malzeme içindeki mekaniksel ve elektriksel davranışların birbirleriyle etkileşimlerini tanımlamada kullanılır. Bu eşitlik termodinamik potansiyel fonksiyonundan türetilir. Sabit sıcaklık altında seramiğin iç enerjisi U ise, serbest enerji fonksiyonu, G , aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$G = U - S_i T_i - D_m E_m - H_m B_m - \sigma \theta \quad (i=1-6, m=1-3) \quad (1-1)$$

Burada; H manyetik alan vektörünü,

B manyetik akı yoğunluğunu,

σ entropiyi,

θ sıcaklığı göstermektedir.

Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını kullanarak:

$$dQ = \theta d\sigma \quad (1-2)$$

ve

$$dU = dQ + T_i dS_i - E_m dD_m + H_m dB_m \quad (1-3)$$

Eğer birinci eşitliğin türevini alırsak;

$$dG = - S_i dT_i - D_m dE_m - B_m dH_m - \sigma d\theta \quad (1-4)$$

manyetik ve piroelektrik özellikler ihmal edilirse, tersinir bir süreç için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$dG = - S_i dT_i - D_m dE_m \quad (1-5)$$

Bu eşitlikten aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir.

$$S_i = (-\partial G / \partial T_i)_E \text{ ve } D_m = (-\partial G / \partial E_m)_T \quad (1-6)$$

Hem uzama S_i , hem de elektriksel deplasman D_m için toplam diferensiyel;

$$dS_i = (-\partial S_i / \partial T_j)_E dT_j + (-\partial S_i / \partial E_m)_T dE_m \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6; m = 1, 2, 3) \quad (1-7)$$

$$dS_i = (-\partial D_m / \partial T_j)_E dT_j + (-\partial D_m / \partial E_k)_T dE_k \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6; m, k = 1, 2, 3) \quad (1-8)$$

dG kusursuz diferensiyel olduğundan dolayı, eşitlik 1-6 bize piezoelektrik sabitini, d_{mi} , verir.

$$(-\partial S_i / \partial E_m) = (\partial / \partial E_m)(-\partial G / \partial T_i) = (\partial / \partial T_i)(-\partial G / \partial E_m) = (\partial D_m / \partial T_i) = d_{mi} \quad (1-9)$$

$$(-\partial S_i / \partial T_j)_E = s_{ij}^E, \quad (-\partial D_m / \partial E_k)_T = \varepsilon_{mk}^T \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6; m, k = 1, 2, 3) \quad (1-10)$$

Burada;

s_{ij}^E , sabit elektrik alanı altında elastik compliance i,

ε_{mk}^T , ise sabit gerilim altında dielektrik geçirgenliği ifade eder.

Bu parametreleri kullanarak aşağıdaki piezoelektrik eşitliği türetebiliriz.

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6; m, k = 1, 2, 3) \quad (1-11)$$

$$D_m = dT + \varepsilon_{mk}^T E^k \quad (1-12)$$

Bu piezoelektrik eşitlik matris şeklinde ifade edilebilir:

$$S = s^E T + d_t E$$

$$\left. \begin{aligned} & \end{aligned} \right\} \text{ d tipi} \quad (1-13)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E$$

Burada d_t , d matrisinin dönüştürülmüş matrisidir. Bağımsız değişkenlerin seçimine göre, üç değişik eşitlik ifade edilebilir;

$$S = s^E T + g_t D$$

$$\left. \begin{aligned} & \end{aligned} \right\} \text{ g tipi} \quad (1-14)$$

$$E = -gT + \beta^T D$$

$$T = c^E T - e_t E$$

$$\left. \begin{aligned} & \end{aligned} \right\} \text{ e tipi} \quad (1-15)$$

$$D = eS + \varepsilon^T E$$

$$T = c^D S - hD$$

$$\left. \begin{aligned} & \end{aligned} \right\} \text{ h tipi} \quad (1-16)$$

$$E = -hS + \beta^S D$$

Burada; elektrik alanı ve elektrik akı yoğunluğu sabit olduğu zaman, elastik stiffness c^E ve c^D ile ifade edilir. g ve e piezoelektrik voltaj sabiti ve gerilme sabiti olarak tanımlanırlar. ε^T ise sabit uzama altında bağıl dielektrik geçirgenliği olarak ifade edilir. β^T ve β^S , sabit gerilme ve uzamada, ters dielektrik sabitesini ifade ederler. Bu piezoelektrik sabiteleri birbirlerine bağımlıdır. Örneğin $g = d / \varepsilon^T$ dir.

Eşitlik 1-13 ve 1-14' den görüldüğü üzere, piezoelektrik (uzama) sabitleri olan d ve g yi tanımlamanın iki yolu vardır. d uzama (S) ve elektrik alanı (E) veya dielektrik deplasman (D) ve gerilme (T) cinsinden tanımlanabilir [9].

$d = \text{yaratılan elektrikselle yük} / \text{uygulanan mekanik gerilim} = \text{Coulombs} / \text{Newton}$
(E sabit)

veya

$d = \text{yaratılan uzama} / \text{uygulanan elektrik alanı} = \text{Metre} / \text{Volt}$ (T sabit)

Aynı şekilde g sabitesinde elektrik alanı (E) ve gerilme (T) veya dielektrik deplasman (D) ve uzama (S) cinsinden tanımlanabilir.

$g = \text{yaratılan elektrik alanı} / \text{uygulanan mekanik gerilme} = \text{Voltmetre} / \text{Newton (D sabit)}$

veya

$g = \text{yaratılan uzama} / \text{uygulanan dielektrik deplasman} = \text{metre}^2 / \text{Volt}$

Bunların dışında, piezoelektrik malzemelerdeki mekanik enerji ve elektriksel enerji arasındaki dönüşümü ifade etmek amacı ile, elektromekanik dönüşüm faktörü türetilmiştir:

Doğrudan etki için;

$k^2 = \text{elektrik enerjisine dönüştürülen mekanik enerji} / \text{mekanik enerji girdisi}$

ters etki için;

$k^2 = \text{mekanik enerjiye dönüştürülen elektrik enerjisi} / \text{elektrik enerjisi girdisi}$

olarak tanımlanır.

Tipik k değerleri kuvars (SiO_2) için 0.1, baryum titanat seramikleri için 0.4 ve PZT seramikleri için 0.5-0.7 arasındadır.

Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik etki, ilk olarak Langevin tarafından sonar transdüserlerde kullanılmıştır. Langevin, bu transdüserlerde piezoelektrik malzeme olarak kuvars (SiO_2)'dan faydalanmıştır. Kuvarsın sahip olduğu özelliklerden dolayı; düşük iç sürtünme, yüksek mekanik mukavemet ve kimyasal dayanımı; hala piezoelektrik malzeme olarak geniş bir kullanım alanı vardır. Kuvars kristalleri genelde frekans kontrollerinde ve elektrik filtre devrelerinde kullanılmaktadırlar.

1943'de, birbirlerinden bağımsız çalışan USA, Japon ve Rus bilim adamları baryum titanatın (BaTiO_3) çok yüksek dielektrik sabitesine sahip olduğunu buldular. 1946'da Von Hippel BaTiO_3 seramiğinin ferroelektrik özelliğe sahip olduğunu keşfetti. Robert ise ferroelektrik malzemelerin, yüksek DC elektrik alanı altında kutuplandıktan sonra piezoelektrik etkiye sahip olduklarını buldu. Bu keşif piezoelektrik polikristal seramiklerinin doğuşu olarak kabul edilir. Sonotone Corporation 1947 yılında ilk BaTiO_3 cihazı olan gramofon pikaplarını yaptı. Daha sonra 1951'de baryum titanat seramikleri balık bulucularda kullanıldı ve su altında çok iyi performans verdiler.

1954 yılında, Jaffe kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonattan (PbTiO_3) oluşan katı çözeltilinin morfortropik faz sınırında (MPB) yüksek piezoelektrik sabitelere sahip olduğunu keşfetti. Bu sınır hemen hemen sıcaklıktan bağımsız olduğu için, faz sınırında çok yüksek piezoelektrik etki elde etmek mümkündür. Böylece PZT (PbZrTiO_3) seramikleri, piezoelektrikleri baryumtitanatın yaklaşık iki katı olduğundan ve -50°C den 200°C ye kadar faz dönüşümüne uğramadıkları için baryumtitanatların yerini alıp baskın piezoelektrik malzeme oldular.

PZT'deki gelişmeler ise katı çözeltiye çeşitli katkıları eklenmesiyle elde edildi. Bu katkıları iki gruba ayrılırlar: (I) La_2O_3 , Nd_2O_3 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , Sb_2O_3 , Bi_2O_3 , ThO_2 , WO_3 ve (II) Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO , MnO_2 . Grup I deki katkıları metal iyon boşlukları yaratırlar, örneğin Nb^{+5} , Ti^{+4} veya Zr^{+4} ile yerdeğiştirirler, aynı şekilde La^{+3} de Pb^{+2} nin atomik yerlerine gider. Metal iyon boşluklarının oluşması, yönlendirilmiş alan duvarlarının daha kolay hareket etmesine yol açar ve böylece seramiğin coercive alanı azalır. PZT' nin elektriksel iletkenliği p-tipi olduğundan dolayı, Nb^{+5} gibi donör ilavesi p-tipi taşıyıcı konsantrasyonunu azaltır, böylece direnç $10^2 - 10^3$ kat artar. Aynı zamanda grup (I) ilavesi, kutuplama kolaylığından dolayı piezoelektrikliğini de artırır. Kutuplama kolaylığı ayrıca yaşlanmayı da azaltır. Çünkü kutuplama operasyonunda oluşan iç gerilmeler, kutuplama sonrasında hızlı olarak yok olurlar. Bu seramiklere yumuşak piezoelektrikler denir ve içlerindeki metal boşlukları elastik dalgayı zayıflatırlar; bundan dolayı da hem mekaniksel kalite faktörü Q_M hem de elektriksel kalite faktörü Q_E azalır. Diğer yandan, grup (II) oksitlerinin ilavesi direnci azaltır; böylece kutuplaşma daha zor gerçekleşir ve de piezoelektriklik azalır. Q_M ve Q_E artar ve bu seramikler sert piezoelektrikler olarak adlandırılırlar.

Piezoelektrik seramiklerin özellikleri zamanla, sıcaklıkla, elastik gerilmeyle ve elektrik alanıyla değişir. Elektrik alanı ve mekaniksel gerilmenin, doğrusallıktan sapmaya ve yumuşak piezoelektriklerde kutuplaşmanın bozulmasına sebep olması PZT5 gibi yumuşak PZT'lerin sıklıkla akustik algılayıcılarda kullanılmasına sebep olur. Sert piezoelektrik seramiklerde, PZT4 ve PZT8 gibi, kutuplaşma daha zor bozulur ve bunlar daha çok yüksek akım içeren ünitelerde kullanılırlar [10].

1.2.1.4 Elektrostriktif Seramikler

Bir malzemenin boyutlarının elektrik alanı altında değişmesine elektrostriktif özellik denir. Elektrostriktif etkinin piezoelektriklikten farkı, oluşturulan gerininin elektrik alanının karesiyle orantılı olmasıdır. Ayrıca deformasyon, uygulanan alanın işaretinden bağımsızdır. Elektrostriktif gerilim, x , elektrik alanı E veya polarizasyon P' ye elektrostriktif katsayıları olan M ve Q ile bağlanırlar.

$$x=ME^2 \text{ ve } x=QP^2 \quad (1-17)$$

Burada; polarizasyon P ile elektrik alanı E birbirlerine geçirgenlik ile bağlanırlar:

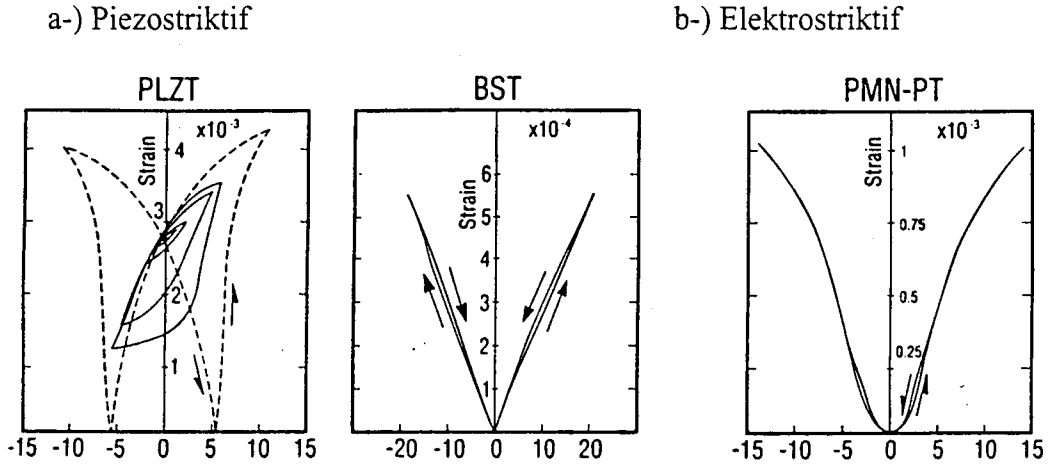
$$P=\epsilon E. \quad (1-18)$$

Kullanım açısından en iyi elektrostriktifler yüksek geçirgenliğe sahip olan rahatlatıcı ferroelektriklerdir. Bunlar arasından en önemlisi olan $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PMN) ile yüksek uzama elde edilebilir (0.1 %) [11]. Bunu yanında PMN seramikleri yüksek d_{33} (1400 pC/N) sabitesine sahiptirler ve pratikte histerisiz göstermezler [12].

Uchino piezoseramikler ile elektrostriktif seramiklerinin özelliklerini karşılaştırmıştır.

1. Elektrostriktif uzama, piezoelektrik uzama ile karşılaştırılabilecek boyutlardadır.
2. Elektrostriktif uzamada çok ufak histerisiz gözlemlenir. Şekil 1-2'de piezoelektrik ve elektrostriktif seramiklerin uzama eğrileri gösterilmektedir: Şekil 1-2a'da lantanyum ile katkı edilmiş kurşun zirkonat titanatın (PLZT) uzama eğrisi görülmektedir. Oluşturulan uzama, düşük elektrik alanında, uygulanan alanla orantılı olarak değişmektedir. Fakat, yüksek elektrik alanı altında kutuplaşmanın tekrar düzenlenmesinden dolayı uzama eğrisi doğrusallılığını kaybeder ve histerisiz oluşur. Baryumkalaytitanat ise sahip olduğu ilginç uzama eğrisi ile tepkileyici uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [13]. Bu kompozisyonda $[Ba(Sn_{0.15}Ti_{0.85})O_3]$, yönlenmiş alanların tekrar oryantasyonu sadece düşük elektrik alanında görülür ve daha yüksek

elektrik alanında ise uzama eğrisi doğrusallaşır. Elektrostriktif seramikde ise doğrusal uzama eğrisi gözlemlenir (Şekil 1-2b).



Şekil 1-2 Ferroelektrik seramiklerin gerilme alanı altında histeritik eğrileri
(a) Piezoelektrik, $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ve $\text{Ba}(\text{Sn},\text{Ti})\text{O}_3$ (b) Elektrostriktif, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1,3}\text{Nb}_{2,3}\text{Ti})\text{O}_3$ [14]

3. Piezoseramikler için kutuplama gerekirken, elektrostriktif malzemeler için kutuplama gerekmez.
4. Çeşitli şartlarda, örneğin yüksek sıcaklık veya yüksek yük altında piezoseramikler, elektrostriktif malzemelerden daha dayanıklıdır.
5. Piezoseramiklerin sıcaklık stabiliteleri elektrostriktiflerden daha iyidir.
6. Piezoelektrik amplifikasyon zamanı, elektrostriktif amplifikasyon zamanından yavaştır. Çünkü piezoseramikler düşük dielektrik sabiteye sahiptirler.

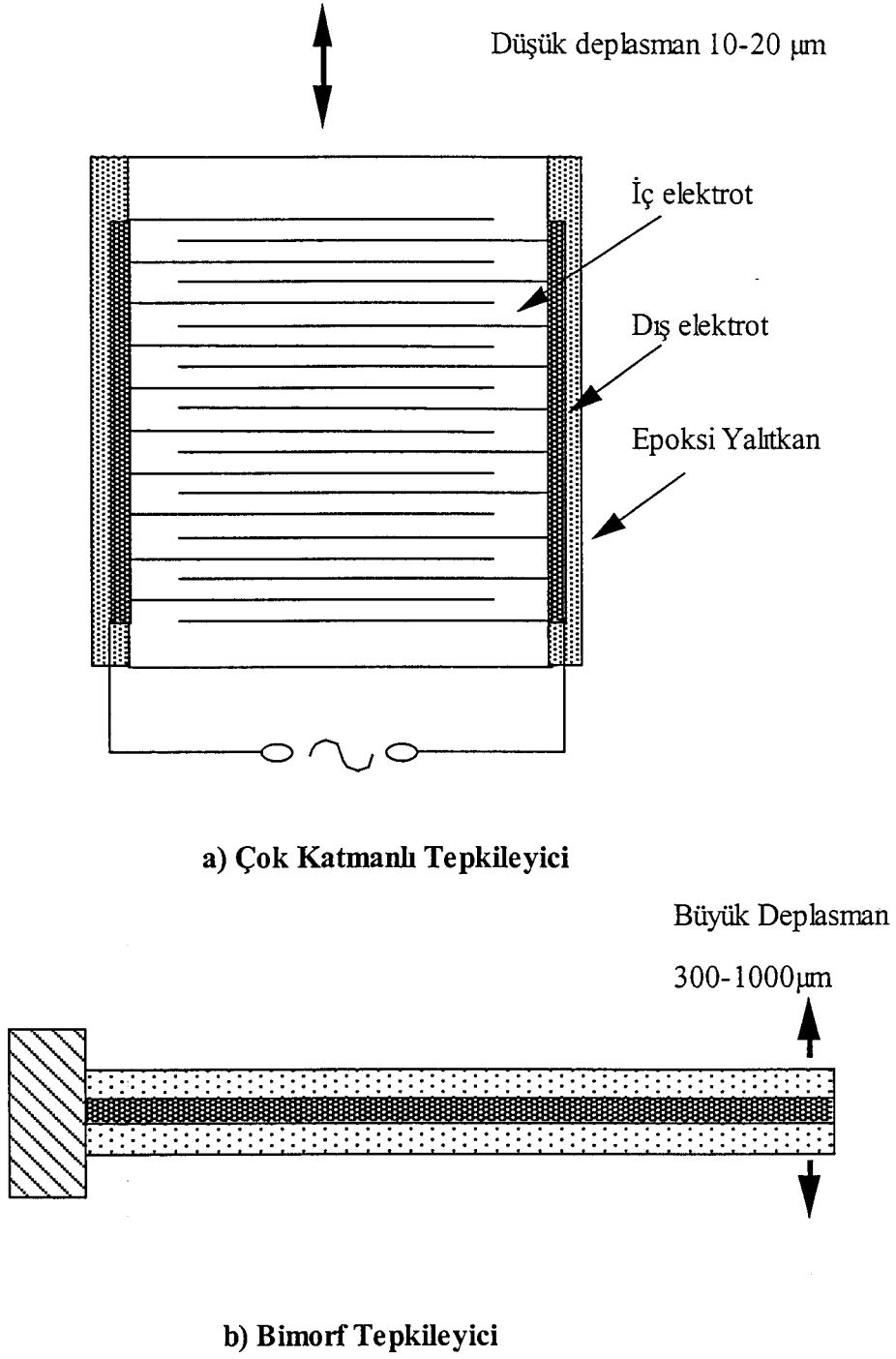
1.2.2 Katı Hal Tepkileyicisi Tasarımları:

Seramik tepkileyici tasarımları, tepkileyicilerin deplasman mekanizmalarına göre üçe ayrılırlar [15]. Doğrusal tip tepkileyiciler boylamasına veya enlemesine deplasman gösterirler. Basit disk ve çok katmanlı diskler veya basit silindir bu kategoride bulunurlar. Bimorf, monomorf (rainbow), unimorf, multimorf tepkileyiciler ise bükümlü deplasman gösterirler. Diğer tip

tepkileyiciler ise esnek tepkileyicilerdir. Bu tip transdüserlerde boyuna deplasman esnek metal yardımıyla radyal deplasmana çevrilir [16]. En yeni tepkileyici tasarımı olan hilal ve zil tipi transdüserler bu kategoridedirler.

En yaygın kullanılan tepkileyici tasarımları çok katmanlı tepkileyiciler ve bimorf tepkileyicilerdir. Çok katmanlı tepkileyicilerin (Şekil 1-3) deplasman değeri düşük olmasına rağmen ($10\mu\text{m}$) oluşan kuvvet yüksektir (100 kgf). Bunun yanında 10 μsec 'lik tepki zamanı, yüksek ömrü (10^{11} döngü) ve %70 lik dönüşüm faktörü " k_{33} " çok katmanlı tepkileyicilerin avantajlarıdır. Bimorf tepkileyicilerde iki piezoelektrik seramik plaka birbirlerine kutuplama yönleri zıt ve dik olacak şekilde yapıştırılırlar. Böylece tepkileyici elektrik alanı altında bükümlü deplasman gösterir. Üretim işlemi çok basit olduğundan ve yüksek deplasman değeri (300 μm gibi) kolayca elde edilebildiğinden dolayı bu tepkileyici tasarımının kullanım alanı çok geniştir. Fakat bunun yanında büküm modundan ötürü düşük tepki hızı (1 msec), düşük elektromekaniksel dönüşüm faktörü (%10) ve düşük oluşan kuvvete (100 gf) sahiptirler. Diğer bir dezavantajda ömrünün kısa olmasıdır (10^8 döngü).

Son dönemde dikkat çekici diğer bir tasarım ise RAINBOW tepkileyicilerdir. RAINBOW tepkileyiciler, yüksek kurşun içeren piezoelektrik seramiğin bir tarafının kimyasal olarak indirgenip monolitik metal/oksit yapısına dönüştürülmesiyle elde edilir [17]. Yüksek sıcaklıkta PZT karbon yapıyla temas ettirilir, böylece karbon oksitlenirken, PZT indirgenmiş olur. Bu ısıl işlemin neticesinde, iyi iletken olan ve piezoelektrik etki göstermeyen siyah bir katman elde edilir. İndirgenmiş katman ile PZT arasındaki termal genleşme katsayıları farklılığı sebebiyle ise soğutma esnasında, seramik katmanda büyük iç uzamalar oluşur ve bunlarda yapıda bükümlü deformasyona sebep olurlar. RAINBOW tepkileyiciler 70-80 μm deplasman gösterebilirler. Bunun yanında yapıda oluşan kuvvet, bimorflarla çok katmanlı tepkileyiciler arasındadır. Fakat elde edilmesi esnasında oluşan iç gerilmeler RAINBOW tepkileyicilerinin güvenilirliği açısından sorun yaratmaktadır.



Şekil 1.3 Bimorf ve çok katmanlı tepkileyici tasarımları

1.2.2.1 Esnek Transdüserler

Son yıllarda, özellikle düşük frekans (5kHz den az) uygulamalarda, yüksek güç ve deplasman değerleri elde edebilmek için üzerinde en çok çalışılan transdüser tasarımı esnek transdüserlerdir [18]. Bu tip transdüserler eğilmiş iki metal levha arasına sıkıştırılmış ve mekanik olarak metalle birleştirilmiş piezoelektrik veya manyetostriktif diskten oluşurlar. Esnek terimi aynı zamanda bu transdüserlerin çalışma prensibinde tanımlar. Transdüserlerde itici eleman olan piezoelektrik veya manyetik genişleyen malzemede oluşan boyuna deplasman, esnek metal tarafından radyal harekete dönüştürülür. Fakat standart esnek transdüserlerin büyük ve ağır yapıya sahip olmaları kullanım alanlarını sınırlamaktadır [19].

İlk esnek transdüserler 1920'lerin sonunda, sis giderici olarak tasarlanmıştır. Amerikan Ordusu Araştırma Laboratuvarında yapılan bu çalışmada Harvey Hayes itici element olarak manyetostriktif çubuk kullanmıştır ve transdüserin rezonans frekansı 540 Hz civarındaydı [20]. 1960 lı yıllarda itici eleman olarak piezoelektrik malzeme kullanılmasıyla birlikte esnek transdüserler üzerindeki çalışmalarda hızlandı. Günümüzde ise yedi farklı tipte esnek transdüser tasarımı bulunmaktadır .

Sınıf I transdüserlerinde silindirik seramik major eksen boyunca metal bir kabukla sıkıştırılır. Bu tasarım seramik miktarını sınırladığından dolayı elde edilen güç de sınırlıdır. Sınıf II tasarımlı transdüserler sınıf I tasarımının geliştirilmiş modelidir. Bu tasarımda amaç seramik kullanımını artıracak şekilde ana eksen boyunca uzamaya gidilmesidir. Böylece transdüserin güç kapasitesi arttırılmıştır. Sınıf III'te ise metal kabuk farklı boyutlara sahip iki adet sınıf I transdüserin birleşimi olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece çifte rezonans sistemi oluşturularak akustik bant genişliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Sınıf IV tasarımlı transdüserler en çok kullanılan esnek transdüserlerdir [21]. Hayes tarafından tasarlanan transdüserde piezoelektrik seramik kalın eliptikal konveks metalle sıkıştırılır. Eliptik şekil mekaniksel empedans dönüştürücü olarak davranır. Seramiğin bir ucundan verilen hız elipsde büyük hızlara dönüştürülebilir. Böylece, suyun içindeki yükün yayılım direnci ve etkin

kütlesi ölçülebilecek daha büyük değerlere dönüştürülebilir. Diğer sınıf transdüserler dairesel yapıya sahip olmalarına rağmen, sınıf IV tipi transdüserler boru biçimindedir. Sınıf IV transdüserleri güç kapasitesinin yüksek olmasıyla dikkat çekmektedir. Sınıf V sınıfında ince bir piezoelektrik disk veya halka, içinde boşluk olan iki küresel metale yapıştırılır. Piezoelektrik halkanın radyal genişlemeleri ve büzölmeleri metal kabuklarda radyal kuvvetler üretir ve bu şekilde metal kabuklarda şiddetlendirilmiş bir aksenal hareket gözlemlenir. Metal ve seramik arasındaki temas yüzeyi boyunca elektrotların ayrılmasıyla seramik disk elektriksel olarak izole edilir. Sınıf V tipi transdüserler ses dalgaları yayan şamandıralar için tasarlanmıştır. Diğer iki tip standart esnek transdüser tasarımı olan sınıf VI ve sınıf VII, sınıf IV ve V in geliştirilmiş tasarımlarıdır. Son iki tasarımda yayınım yüzeyi iç bükey şekildedir. Standart tip esnek transdüserlerin, tasarımlarının kesin doğru olarak uygulanma zorluğundan ve ağır ve büyük yer kaplayan yapılarından dolayı kullanımları sınırlanmaktadır.

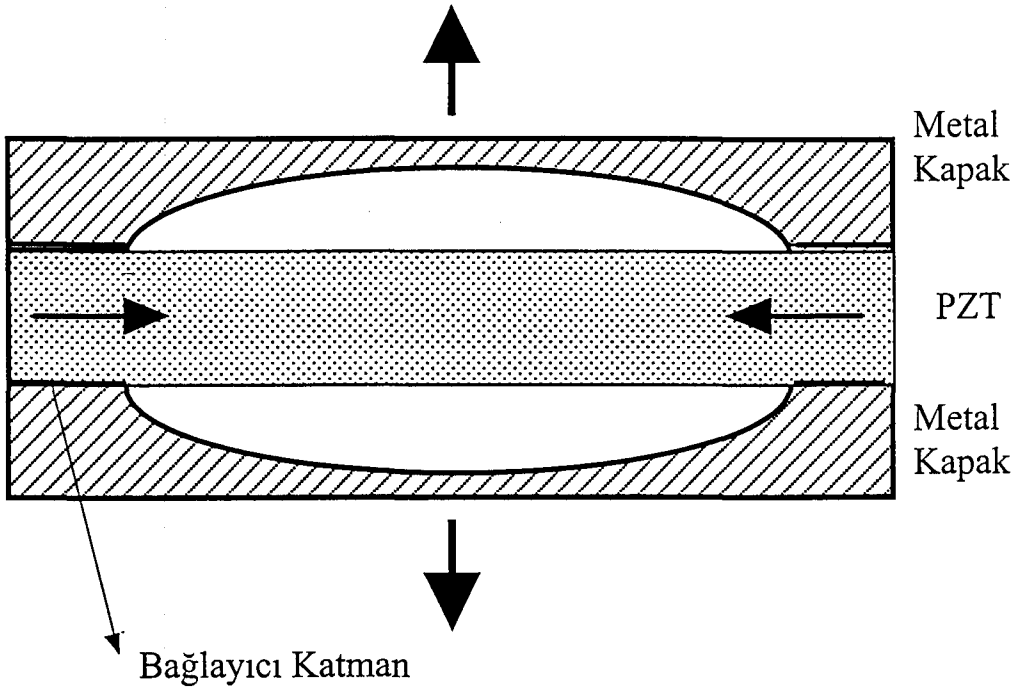
1.2.2.2 Hilal ve Zil Tipi Transdüserler:

Çok katmanlı ve bimorf tepkileyicilerin en önemli 3 özellikleri incelendiğinde (deplasman, oluşan kuvvet, ve tepki zamanı), aralarında performans açısından çok büyük farklar olduğu görülmektedir. Çok katmanlı tepkileyicilerde oluşan kuvvet çok büyük iken (>3000 N), deplasman değeri küçük kalmaktadır (yaklaşık $10 \mu\text{m}$). Bimorf tepkileyicilerde ise yüksek deplasman değeri elde edilmesine rağmen (yaklaşık $100 \mu\text{m}$), oluşan kuvvet değeri çok düşük kalmaktadır (yaklaşık 0.5 N). Aradaki büyük performans farklılığından dolayı bazı uygulamalar için, örneğin yüksek deplasman ve yüksek kuvvet isteyen bir uygulamada, yeni bir transdüser tasarımı ihtiyacı doğmaktadır. Bu boşluğu doldurmak için yapılan çalışmalar sonucunda Newnham, Xu ve grubu yeni tip bir esnek transdüser tasarladılar [22]. Bu yeni tip esnek hilal tipli transdüser, seramik disk ve metal kapaklardan oluşmaktadır. Seramik eleman ve metal kapaklar arasında ise bir miktar boşluk bulunmaktadır. Bu metal kapaklar mekaniksel dönüştürücü olarak davranmakta ve seramiğin radyal deplasmanını

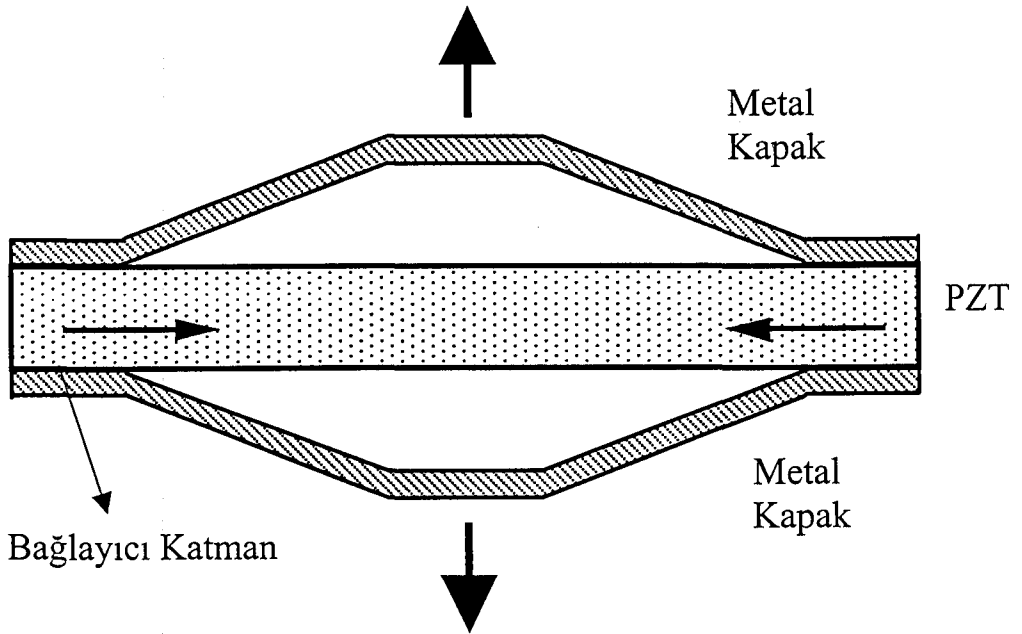
kapaklara dik olacak şekilde aksel deplasmana çevirmektedir. Böylece yapıda piezoelektrik katsayılar d_{33} ve d_{31} birbirlerini destekler konumda olurlar [23-24].

Şekil 1-4a hilal tipli transdüserin yapısını göstermektedir. Oklar deplasman yönünü gösterir. Piezoelektrik ve elektrostriktif eleman sürücü olarak kullanılabilir. Bu yapıda tek katmanlı olarak veya çok katmanlı seramik eleman kullanılabilir. Hilal transdüser tasarımı bimorf tasarımın üç boyuta çevrilmesi olarak düşünülebilir. Böylece yapıda oluşan kuvvet daha yüksek olmaktadır. Hilal tipli transdüserlerde deplasman değeri kapak üstündeki pozisyona bağlı olarak değişmektedir. Deplasman kapağın merkezinde en yüksek değere ulaşırken, merkezden uzaklaştıkça deplasman değeri düşer. Oluşan kuvvette ise bunun tam tersi gözlemlenir. Oluşan kuvvet kapağın merkezinde minimum iken, kapağın köşelerinde maksimuma ulaşır. Pirinç kapaklı, 12.7 mm çapında, kapak kalınlığı 0.3 mm, oyuk çapı 9 mm ve oyuk derinliği 200 μm olan hilal şekilli transdüserin etkin d_{33} 'ü yaklaşık 9,000 pC/N iken, elde edilen deplasman 22 μm (1 kV/mm alan altında) ve maksimum oluşan kuvvet 3N olarak bulunmuştur [25]. Zil tipi tepkileyciler ise hilal tipli tepkileycilerin sonlu elemanlar metodu (FEA) kullanarak geliştirilmiş modelidir (Şekil 1-4b).

Sonlu elemanlar analizlerinin sonucunda, hilal tipli tepkileycilerin köşe kısımlarında, bağlayıcı katmanının hemen üstünde yüksek gerilme konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir [26]. Bu gerilme konsantrasyonu seramikten metale aktarılan etkin kuvveti azaltır ve deplasman değerini düşürür. Bağlayıcının hemen üstünde metal kapağın bir kısmını yapıdan ayırmak gerilmeyi dar bir bölgeye hapsedebilir [27]. Dairesel kanal oluşturulmuş hilal tipi transdüserde kanal köşeye doğru yaklaştıkça deplasman çoğalır. En çok deplasman, kanal tam bağlayıcı katmanın üstündeyken elde edilir [28]. Fakat bu sefer de kanal köşelerinde oluşan gerilme konsantrasyonu yıpranmaya ve daha sonra da kırılma tehlikesine yol açar. Bu sebeplerden dolayı hilal tipli tepkileycideki gerilme konsantrasyonunu azaltmak ve böylece daha büyük ve standart üretilen deplasman değeri elde etmek için yeni bir metal kapak tasarımı yapılmıştır [29]. Bu yeni metal kapak, şeklinin benzerliğinden dolayı ismini müzik aleti olan zil'den almıştır. Zil tipi kapak, hilal kapaktan çok daha incedir ve şeklinin verdiği



Şekil 1-4a Hilal Tipi Transdüserin Çalışma Mekanizması



Şekil 1-4b Zil Tipi Transdüserin Çalışma Mekanizması

avantajla daha kolay üretilebilmektedir. Bir nokta dışında zil tipi transdüserin çalışma prensibi, hilal tipi transdüserinkine benzer. Hilal tipli transdüserde deplasman metal kapağın esnemesiyle hareketiyle elde edilir. Fakat zil tipli transdüserde deplasman metal kapaktaki esneme ve dönme hareketlerinin birleşimidir.

0.3 mm kapak kalınlığına sahip hilal tipli tepkileyici yaklaşık 22 μm deplasman gösterir. Kanallı tasarımı yapılarak bu deplasman değeri 32 μm ' ye kadar çıkarılmıştır. 0.2 mm pirinç kapaklı ve 200 μm oyuk derinliği olan zil kapaklı transdüserde 40 μm deplasman elde edilmektedir (1 kV/mm alan altında). Bu transdüserde d_{33} 15,000 pC/N ve maksimum oluşan kuvvet 15 N olarak bulunmuştur [29]. Değişik kapaklı transdüserlerde elde edilen deplasman değerleri Şekil 1-5 te görülmektedir.

Hilal tipli transdüserlerin dezavantajlarından biri de pozisyona bağlı deplasman karakteristiği göstermesidir. Böylece maksimum deplasman alanı çok küçük olduğundan dolayı çok katmanlı hilal yapısı imkansız olmaktadır. Hilal şekilli ve zil şekilli transdüserlerin kapak üzerindeki deplasman dağılımı Şekil 1-6'da görülmektedir. Kanallı hilalde deplasmanın pozisyon bağımlılığı biraz daha azalmış görülmektedir. Zil tipi tasarımda ise kapağın merkezinden itibaren geniş bir alanda homojen deplasman elde edilir. Bu alanın geniş olması da, zil tipi transdüserlerin birbirlerine yapıştırılmasını ve böylece daha büyük deplasman değeri elde etmemizi sağlar. Beş zil tipi tepkileyicinin birbirine yapıştırıldığında yaklaşık 175 μm lık deplasman değeri ürettiğini bulunmuştur [29]. Ayrıca, çok katmanlı yapı tek yönlü yüklemelerde daha kararlı bir karakteristik göstermektedir.

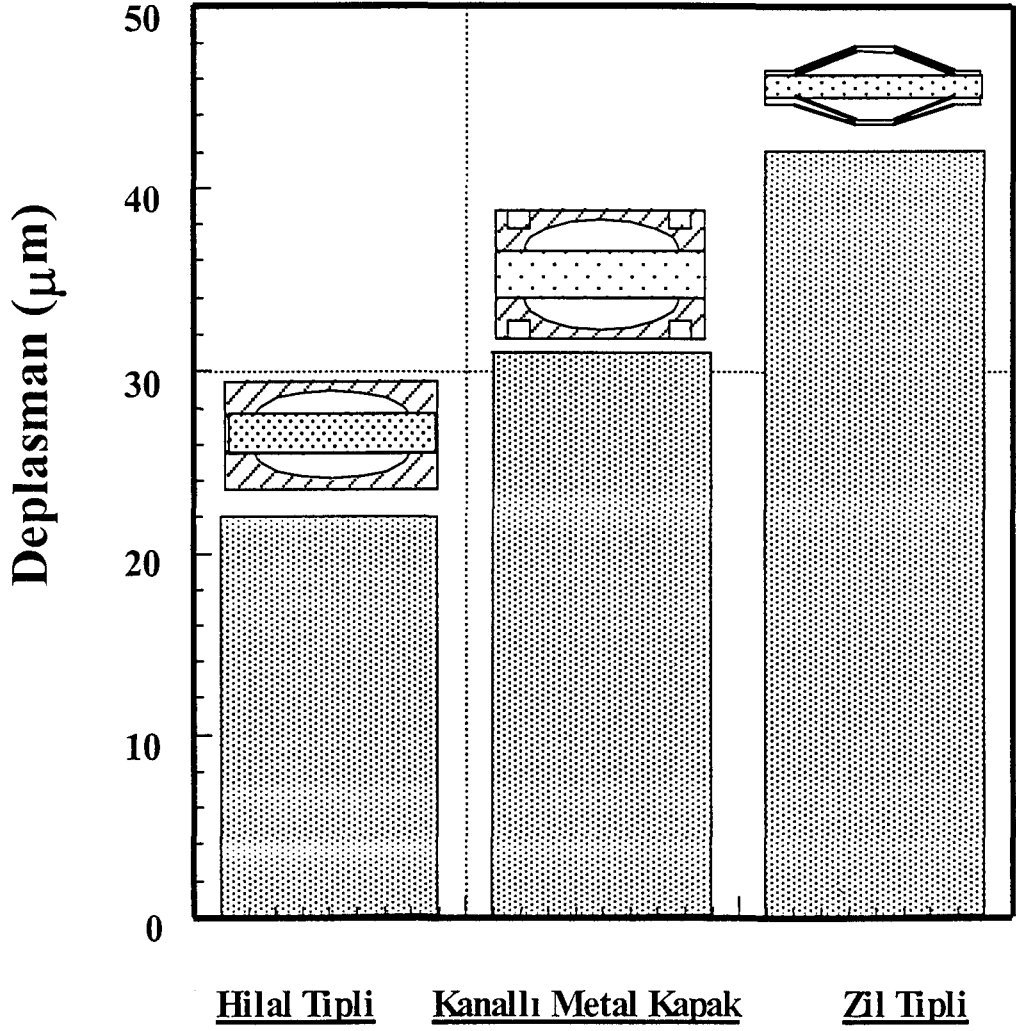
Diğer yandan zil tipi transdüserdeki ilk rezonans frekansı aşağıdaki eşitlikle açıklanmıştır [30].

$$f_r \propto \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\frac{1}{Q_c^2(1-\nu^2)} + \frac{1}{R^2} \right]} \quad 1.19$$

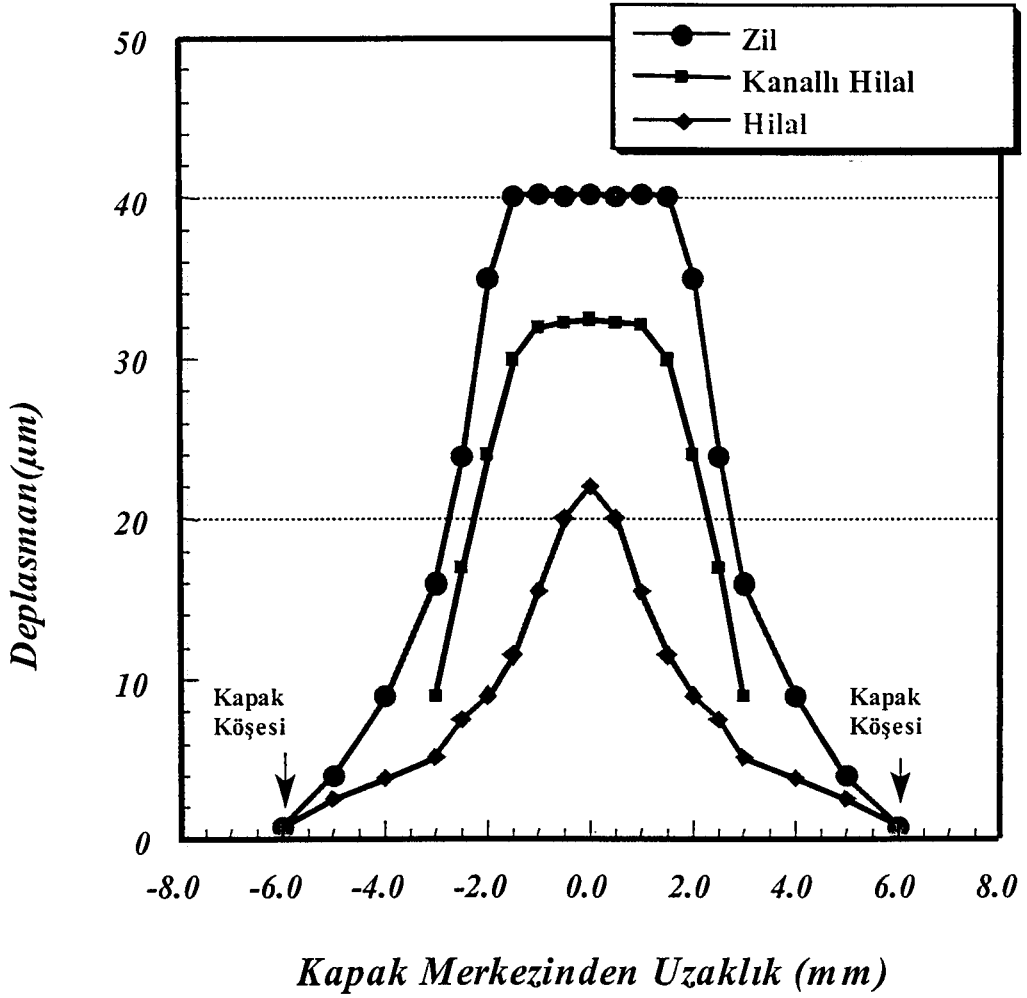
Burada; E, malzemenin stiffnesini

ρ , yoğunluğunu

Q_c , oyuk çapını



Şekil 1-5 Değişik tasarımda metal kapağa sahip kompozit transdüserlerin deplasman değerleri .



Şekil 1-6 Değişik metal kapak tasarımlı kompozit transdüserlerin pozisyona bağlı deplasman değerleri

ν , poisson oranını

R, etkin kapak yarıçapını gösterir.

Etkin kapak yarıçapının bulunuşu Ek 1 de gösterilmiştir.

Zil Tipi Transdüserlerin Potansiyel Kullanım Alanları:

i-) Deniz Kulaklığı Uygulamaları:

Kutuplanmış bir piezoelektrik seramik, hidrostatik bir basınca maruz kaldığında kutuplama yönünde elektrik yükü üretir. Bu yükün şiddeti malzemenin hidrostatik yük sabitesi olan d_h ve hidrostatik voltaj katsayısı g_h ile orantılıdır. d_h kalınlık modu olan d_{33} ve yanal mod olan d_{31} in 2 katının toplamına eşittir. Böylece bir hidrofona için yararlılık katsayısı,

$$d_h \cdot g_h = (2d_{31} + d_{33})^2 / k_{33} \epsilon_0 \quad 1-20$$

Burada; k_{33} dielektrik sabitesini,

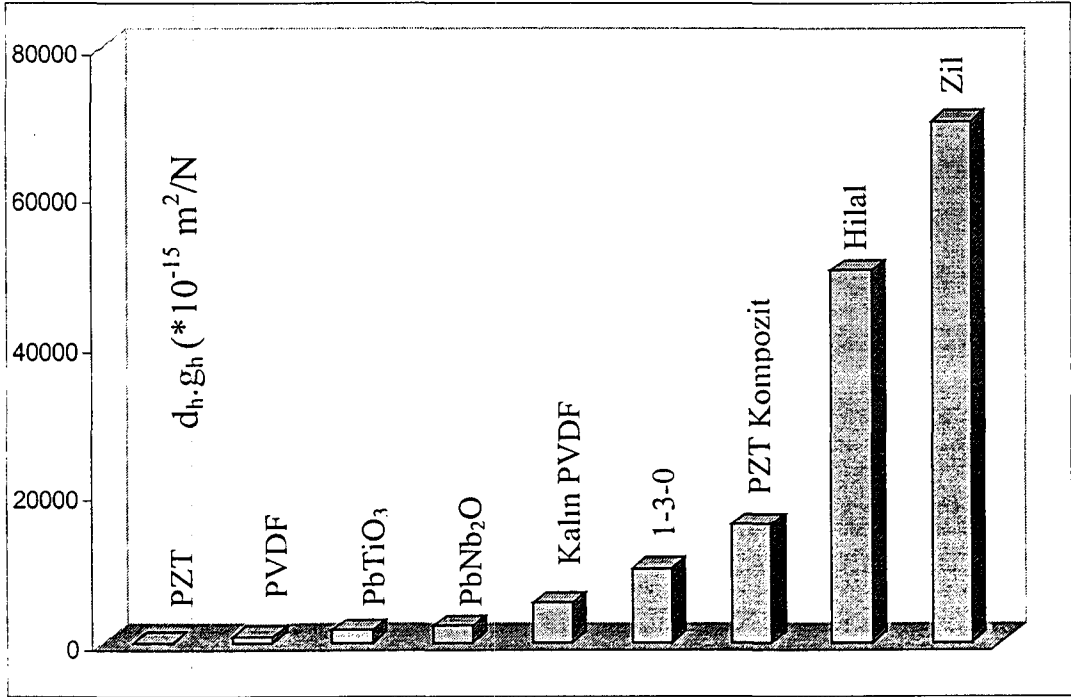
ϵ_0 havanın geçirgenlik katsayısını gösterir ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Böylece bir hidrofona uygulamasında, yüksek dielektrik sabitesi (K), yüksek hidrostatik piezoelektrik yük sabitesi (d_h) ve yüksek hidrostatik voltaj (g_h) ve sonuç olarak yararlılık katsayısının yüksek olması istenir. PZT seramikleri yüksek d_{33} ve d_{31} katsayılarına sahiptirler. Fakat bu iki değer birbirleriyle zıt işaretli olduğundan dolayı d_h değerleri düşüktür. Diğer yandan PZT'lerin geçirgenliği yüksek olduğundan ötürü g_h değerleride düşüktür. Örneğin PZT-552'inin d_h değeri sadece 50pC/N ve g_h değeri 2 mV.m/N dır. Sonuç olarak, katı PZT düşük duyarlılığa sahiptir ve bu yüzden hidrofona uygulamaları için yeterli değildir.

Son onbeş yılda, d_h ve g_h değerlerini geliştirmek için değişik bağlantı yapılarına sahip bir çok PZT- polimer kompozit transdüser geliştirilmiştir [30-31]. Bu yapılarda polimer, yanal gerilmeyi azaltarak d_{31} sabitesinin etkisini en aza indirmekte, böylece d_h değerini arttırmaktadır. Bu polimer-seramik karma yapılar, düşük yoğunluğa sahip olduklarından ötürü de su altında daha iyi akustik empedans gösterirler ve mekanik elastikiyetleri artar. Düşük dielektrik sabiteye

sahip olmaları, hassas tekniklerle üretiminden dolayı oluşan yüksek maliyetleri ve basınca bağlı özellik göstermesi ise bu yapıların dezavantajlarını oluşturur.

Hilal ve zil tip transdüserler ise 2-(0)-2 bağlantısına ve hilal tip yarım ay şeklinde, zil tipi ise koni şeklinde oyuklara sahiptirler. Bu oyuklar metal kapağın mekanik dönüştürücü olarak radyal gerinmesini ters işaretli açısall ve aksenel gerinmeye çevirmesini sağlar. Bunun terside yani aksenel gerinmenin açısall gerinmeye dönüştürülmesi de mümkündür. Böylece d_{33} ve d_{31} birbirleriyle toplanırlar ve yararlılık katsayısı yükselir. Şekil 1-7 de değişik tasarımdaki malzemelerin yararlılık katsayıları gözükmektedir. Xu [32] hilal tipli transdüserin yararlılık katsayısını $50000 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ olarak rapor etmiştir ki bu sayı PZT'nin yaklaşık 500 katıdır. Doğan, Tressler ve Newnham yaptıkları çalışmalar sonucunda bu değer zil tipli transdüserde daha da çoğaldığını göstermişlerdir [33]. Değişik kompozitlerin yararlılık katsayılarının karşılaştırılması Şekil 1-7'de gözükmektedir. Hilal ve zil tipli transdüserler, yüksek yararlılık katsayısına sahip olmalarının yanında, ince olmaları, kolay üretilebilmeleri ve hafif olmaları sebebiyle de hidrofona uygulamaları için en uygun transdüser tasarımı olarak gözükmektedir.



Şekil 1-7 Kompozit ve tek elemanlı transdüserlerin yararlılık katsayıları [34]

ii-) İvme Ölçer Uygulamaları:

Son yıllarda ivme ölçerler mühendislikte hem araştırma araçlarında hem de kontrol sistemlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Diğer yandan, ivme ölçerlerin en çok kullanıldığı alan otomotiv sektörüdür. Taşıt sektöründeki büyük finans ve rekabet ortamı da ivme ölçerler üstünde sürekli olarak tasarım ve malzeme çalışmasına sebep olmaktadır.

Günümüzde ivmeyi ölçmek için en çok kullanılan teknik, piezoelektrik etkiyi kullanmaktır. Piezoelektrik etkide hangi mod kullanılırsa kullanılsın, ivme algılaması piezoelektrik yük sabitesi ile ilişkilidir. Örneğin, boylamasına mod kullanıldığında, hassasiyet tamamen d_{33} ile doğru orantılıdır. Fakat PZT büyük d_{33} değeri göstermesine karşın hala bu değer ivme ölçümü için yeterli değildir. Bundan dolayı, Ohara ve Miyayama tarafından PZT-polymer karma yapıları denenmiş ve basit PZT'den 3 kat daha fazla hassasiyet elde edilmiştir. Hassasiyeti arttırmak için başka bir yöntem de Ohtsuki tarafından denenmiş ve çok katmanlı piezoelektrik seramik kullanarak d_{33} değerini arttırmıştır. Koç B. ve Doğan A., ise metal-seramik karma yapıların ivme ölçer olarak kullanımlarını araştırmışlardır [35]. Metal-seramik kompozit yapılar, çok yüksek d_{33} değerleri ile ivme ölçerler için iyi bir tasarıma sahiptirler.

Zil tipi transdüser yapısında ivmeden dolayı oluşan kuvvet ($F=ma$) metal kapak tarafından seramik diske iletilir ve seramik diskin çevresinde gerilmeye yol açar. Bu gerilmenin çoğu radyal olmakla birlikte, bir kısmında basma gerilmesi gibi davranır. Polikristal seramik disk üzerindeki gerilmeden dolayı oluşan kutuplanma vektörü şu matriks yazılımı ile açıklanabilir;

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} \quad 1-21$$

Burada ; P_x , P_y , P_z , kartezyen koordinattaki kutuplanma vektörlerini, d_{31} , d_{33} ve d_{15} sırasıyla radyal, boyuna ve kayma modundaki piezoelektrik yük katsayılarını,

$X_i(1...6)$ lerde gerilme bileşenlerini ifade eder.

Gerilme bileşenleri;

$$X_1=X_2=-K_r F \quad 1-22$$

$$X_3=K_z F \text{ ve } X_4=X_5=X_6=0 \text{ dır.} \quad 1-23$$

Kutuplanma vektörü;

$$P_z=(d_{33}K_z-2d_{31}K_r)F \quad 1-24$$

Burada; K_r ve K_z sabiteleri metal kapak ve seramik diskin geometrilerine, örneğin metal kapağın oyuk açısına, kalınlığa, çapa ve elastik sabiteye göre değişen parametrelerdir.

Disk için üretilen yük ise;

$$Q=\pi r^2(d_{33}K_z-2d_{31}K_r)ma \quad 1-25$$

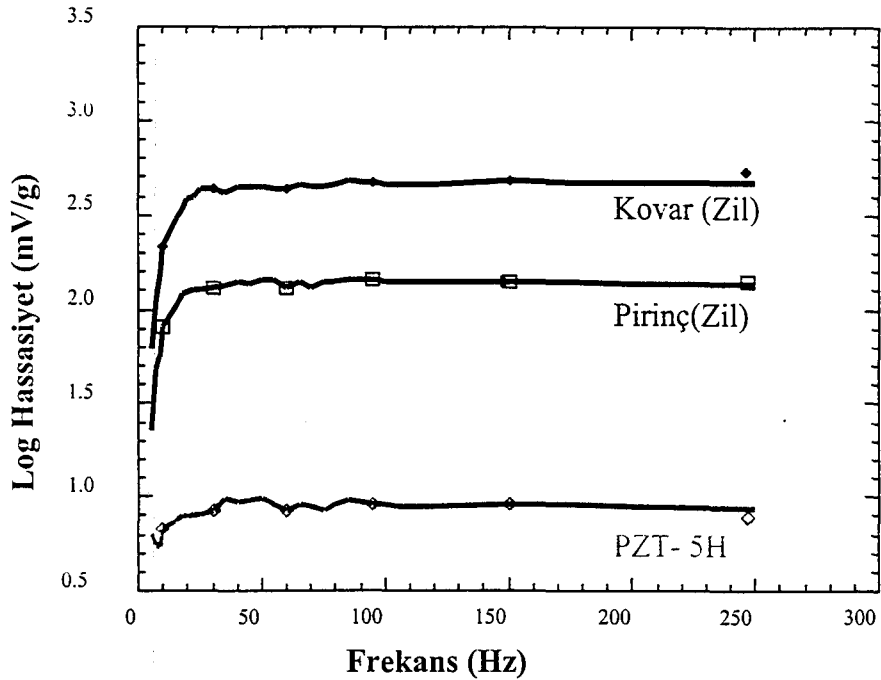
Burada; r , seramik diskin çapını ifade eder.

ve son olarak birim ivme ile oluşan yük üretiminden gelen ivme hassaslığı;

$$S_q=\pi r^2(d_{33}K_z-2d_{31}K_r)m \quad [pC/(m/s^2)] \quad 1-26$$

olarak ifade edilir.

Koç ve Doğan'ın yaptığı deneyler sonucunda, zil tipi transdüserler için yüksek piezoelektrik yük katsayısı (d_{33}), yaklaşık 15,000 pC/N, değeri gözlemlenmiştir. Basit piezoelektrik seramiklerde bu rakam 550 pC/N civarındadır. Bu d_{33} değeri ile zil tipi transdüserler yüksek hassasiyetli ivme ölçer uygulamaları için iyi bir aday olmaktadır. Değişik kapaklı zil tipi transdüser ivme ölçer ile basit PZT diskin frekansla birlikte log hassasiyeti değişimi Şekil 1-8 de görülmektedir. Düşük frekanslarda zil tipi kompozit ivme ölçerler PZT seramiklerinden yaklaşık iki kat daha fazla hassasiyet göstermektedirler.



Şekil 1-8 Değişik tip transdüserlerin ivme ölçer uygulamaları için hassasiyet ölçümleri

iii-) Tepkileyici Uygulamaları:

Esnek hilal ve zil tipi transdüserler sahip oldukları ortalama oluşan kuvvet ve deplasman değerleri ile çok katmanlı ve bimorf tepkileyiciler arasındaki boşluğu doldururlar. Her bir katı hal tepkileyicisi, içerdiği değişik özelliklerle değişik uygulamalar için kullanılabilir. Hilal ve zil tipi tepkileyicilerin avantajları ise kolay üretilebilmeleri ve ölçülerini değiştirerek kolayca istenilen tepkileyici özelliklerine ulaşılabilmesidir. Değişik tasarımdaki katı hal tepkileyicilerinin özellikleri Çizelge 1-4'te verilmiştir. Farklı tasarımdaki tepkileyicileri birbirleriyle karşılaştırmak zor olabilir çünkü hepsi değişik geometriye ve de özel uygulamalar için farklı çalışma koşullarına sahiptir. Çizelge 1-4'te iyi bir karşılaştırma yapabilmek için, seçilen tepkileyicilerin benzer boyutları karşılaştırılmıştır. Çizelgeden görüldüğü üzere gökkuşağımsı (rainbow) tepkileyicilerde kısmen çok katmanlı tepkileyiciler ile bimorf tepkileyiciler arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Diğer yandan gökkuşağımsı tepkileyicinin etkin dönüştürme

faktörü hilal tip ve zil tip'ten daha düşüktür. Zil tipi tepkileyici ile karşılaştırıldığında, yüksek elektrik alanı, pozisyona bağımlı deplasman ve yüksek maliyet rainbow tepkileyicinin diğer dezavantajlarıdır. Hem hilal tipi hemde zil tipi transdüserde uygulanan voltajı azaltmak için çok katmanlı seramik diskler kullanılabilir. Bu özelliklerini göz önüne aldığımızda, hilal tipi ve zil tipi transdüserler küçük boyut ve hızlı tepki isteyen mikropozisyon uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilirler. OMRON şirketi optik tarayıcılar için çok katmanlı hilal tipli tepkileyici kullanmayı başarı ile denemiştir [36]. Hilal ve zil tipi tepkileyiciler için diğer uygulama alanları:

- Otomotiv ve uzay sanayinde titreşim gidericiler,
- Vana tasarımlarında devre anahtarları,
- CD-ROM ve manyeto-optik hafıza depo ünitelerinde mikropozisyonerler,
- Mini pompalar,
- Yazıcı kafaları,
- Çizgisel ve döner ultrasonik motorlar,
- Anahtarlama elemanlarıdır.

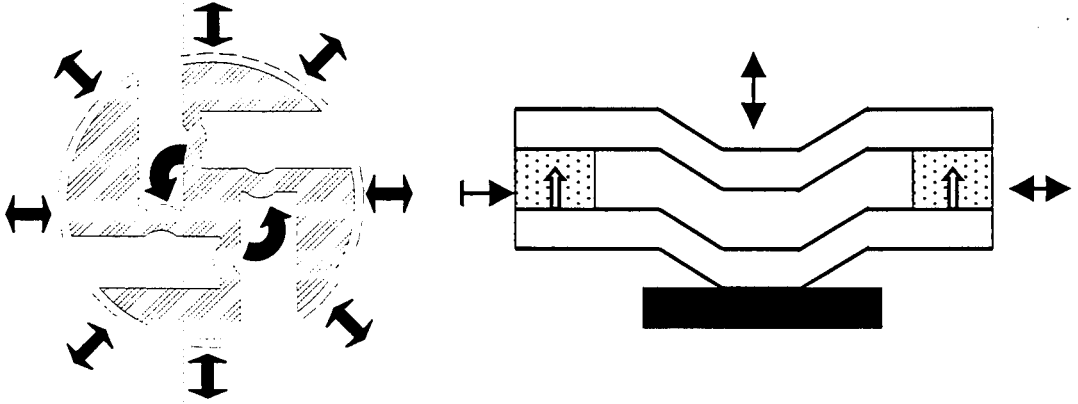
Çizelge 1-4 Farklı tasarımdaki tepkileycilerin karşılaştırılması

Özellikler	Çok Katmanlı (Multilayer)	Bimorf (Bimorph)	Gökkuşağımsı (Rainbow)	Zil Tipi (Moonie)	Hilal Tipi (Cymbal)
Boyutlar	5x5x12. mm ³	12.7x10x0.6 mm ³	12.7 mm 0.5 mm	12.7 mm 1.7 mm	12.7 mm 1.7 mm
İtici Voltaj (V)	100	100	450	100	100
Deplasman (µm)	10	35	20	40	20
Temas Yüzeyi (mm ²)	25	1	1	3	1
Oluşan Kuvvet (N)	900	0.5-1	1-3	15-60	3
Deplasmanın Pozisyon Bağımlılığı	Yok	Uçta maks.	Merkezde maks.	Merkezde maks. Fakat daha yayvan	Merkezde maks.
Yük Altında Kararlılık	Çok Yüksek	Çok Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük
En Hızlı Tepki Zamanı (µsec)	1- 5	100	100	5-50	5-50

iv-) Ultrasonik Motor Uygulamaları:

Geleneksel elektromanyetik motorlarda 1 cm'den küçük boyutlar ve yüksek verimlilik elde etmek genelde zordur. Diğer yandan ultrasonik motorlarda verimlilik boyuta bağlı değildir ve bu tür motorlar minimize edilebilir potansiyele sahiptirler. Ultrasonik motorlarda üç ana parça vardır: stator, rotor ve rulman. Şu andaki en küçük ultrasonik motor Seiko (37) ve AlliedSignal (38) tarafından üretilmiş gezen dalga tipi motorlardır. Piezoelektrik elemanda gezen dalga oluşturmak için en azından iki tane ve birbirleriyle 90° faz farklılığı olan itici güç kaynağı olmalıdır. Ek olarak, stator olarak kullanılan piezoelektrik aktif elementin sektörlere bölünmesine ihtiyaç vardır. Bu sektörler de ayrı ayrı ve zıt yönlerde kutuplanmalıdır. Bu yeni motor 1.3 Nm lik çok yüksek tork değeri göstermektedir. Koç ve Doğan ise metal kapaklı yeni bir stator geliştirmişlerdir

(39). Bu yeni statorda piezoelektrik halkanın her iki tarafındaki metal kapaklar 45° lik değişimle halkaya bağlanırlar. Bu metal kapaklar radyal titreşimi, aksenal ve açısıl titreşime çevirirler. İki hareketin birleşimi de, rotorun çevresi ve üst kapağın merkezi arasında sürtünmeye yol açar ve böylece dönme hareketi elde edilir (Şekil 1-9).



Şekil 1-9 Metal-seramik kompozit ultrasonik motorun çalışma prensibi

Bu yeni tasarım ultrasonik motorda, maximum tork 1.36 mNm civarında bulunmuştur ve 42 Voltta maksimum verimlilik % 21 olarak elde edilmiştir. Geleneksel motorlarla karşılaştırıldığında yeni tasarımın en büyük avantajı, motorun boyutlarının kolayca azaltılabilmesidir. Yeni tasarım motorun geleneksel motorlara karşı diğer avantajları:

- Çok fonksiyonlu metal-seramik stator aynı zamanda boyuna bükümsel titreşim yaratabilir.
- Piezoelektrik halkada tek kutuplama yönü olduğundan kutuplama işlemi daha kolaydır.
- Motor sadece dört parçadan, stator, rotor, bilye rulman ve tutucudan oluşmaktadır.
- Metal kapak aynı zamanda yay elementi gibi davrandığından ötürü, ekstra yaya ihtiyaç duyulmaz.

1.2.2.3 Simetrisinin Transdüser Tasarımı ve Performans Karakteristiğine Etkisi

Kompozit metal kapaklı transdüser tasarımında iki çeşit simetri vardır: yapısal simetri ve tasarım simetrisi. Kutuplanmış bir piezoelektrik seramik disk ∞m Curie grubunda yer alır. Seramik disk metal kapaklar arasında sıkıştırılırsa bile simetri element özelliği muhafaza edilir. Bu özelliği kristal simetriden ayırmak için "tasarım simetrisi" terimi kullanılır. Ters piezoelektrik etkide, uzama uygulanan elektrik alanıyla yaratılır ve çok kristalli seramik disk için aşağıdaki matris formunda ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad 1-27$$

Burada; ϵ_i = yaratılan uzamayı,

d_{ij} = piezoelektrik yük katsayısını,

E_j = uygulanan elektrik alanını, gösterir.

Elektriksel sürüm modlarını ele alırsak;

1.Durum: $E_1 \neq 0, E_2 = E_3 = 0$

$$\epsilon_1 = 0, \epsilon_2 = 0, \epsilon_3 = 0, \epsilon_4 = 0, \epsilon_5 = d_{15}E_1, \epsilon_6 = 0$$

2.Durum: $E_2 \neq 0, E_1 = E_3 = 0$

$$\epsilon_1 = 0, \epsilon_2 = 0, \epsilon_3 = 0, \epsilon_4 = d_{15}E_2, \epsilon_5 = 0, \epsilon_6 = 0$$

3.Durum: $E_3 \neq 0, E_1 = E_2 = 0$

$$\epsilon_1 = d_{31}E_3, \epsilon_2 = d_{31}E_3, \epsilon_3 = d_{33}E_3, \epsilon_4 = 0, \epsilon_5 = 0, \epsilon_6 = 0$$

4.Durum: $E_1=E_2 \neq 0, E_3=0$

$$\epsilon_1=0, \epsilon_2=0, \epsilon_3=0, \epsilon_4=d_{15}E_2, \epsilon_5=d_{15}E_1, \epsilon_6=0$$

5.Durum: $E_1=E_3 \neq 0, E_2=0$

$$\epsilon_1=d_{31}E_3, \epsilon_2=d_{31}E_3, \epsilon_3=d_{33}E_3, \epsilon_4=0, \epsilon_5=d_{15}E_1, \epsilon_6=0$$

6.Durum: $E_2=E_3 \neq 0, E_1=0$

$$\epsilon_1=d_{31}E_3, \epsilon_2=d_{31}E_3, \epsilon_3=d_{33}E_3, \epsilon_4=d_{15}E_2, \epsilon_5=0, \epsilon_6=0$$

7.Durum: $E_1=E_2=E_3 \neq 0$

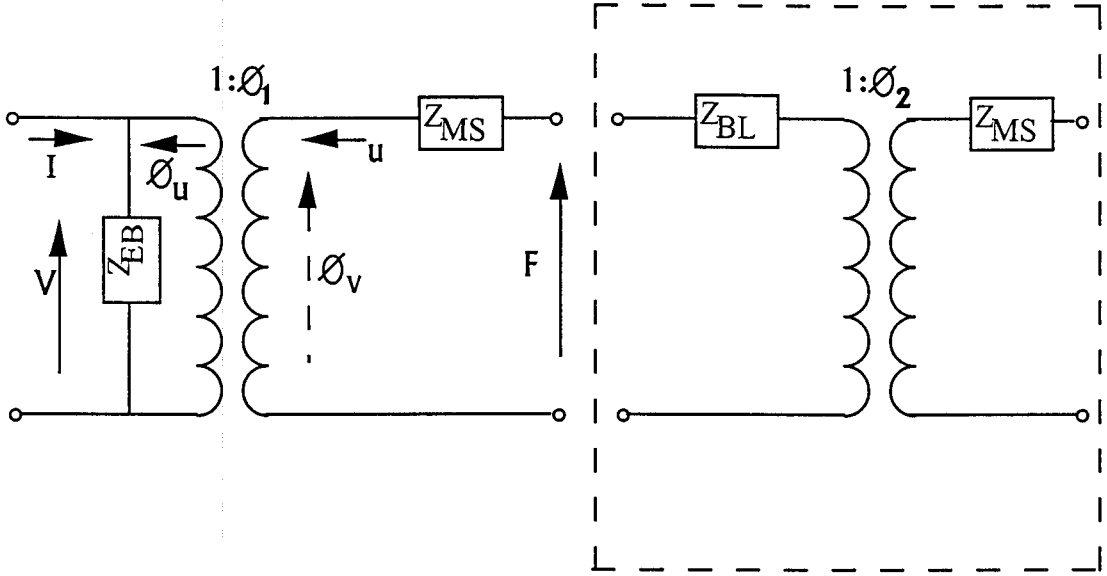
$$\epsilon_1=d_{31}E_3, \epsilon_2=d_{31}E_3, \epsilon_3=d_{33}E_3, \epsilon_4=d_{15}E_2, \epsilon_5=d_{15}E_1, \epsilon_6=0$$

Bu elektriksel durumlardan kayma uzaması içerenler zil tipi transdüserin tasarım simetrisini bozarlar ve üçüncü koşul haricinde hepside kayma uzaması içerirler. Üçüncü durumda elektrik alanının yönü piezoelektrik elemanın kutuplama yönüne paraleldir. Elektrik alanı uygulandığı zaman, birbirine dik olan radyal ve aksenal iki uzama, meydana gelir. Hilal tipi ve zil tipi transdüserlerde yanal uzama da boyuna uzamaya çevrilir ve böylece tasarım simetrisi korunmuş olur.

Tasarım simetrisi kompozit yapı içerisindeki elementlerin geometrileriyle de sıkı bir ilişki içerisinde. Bağlayıcı katmandaki düzensizlikler (çatlaklar, boşluklar ve oyuktaki zayıflıklar), simetrik olmayan metal kapaklar, boyutları ve ağırlığı aynı olmayan kapaklar da tasarım simetrisini bozan diğer faktörlerdir. Tasarım simetrisindeki bozulma anormal rezonans frekansı karakteristiğine ve elektromekaniksel davranışa sebep olur. Genelde simetrideki bozulma rezonans spektroskopisindeki değişikliklerle anlaşılır. Çok katmanlı seramiklerde ve bimorf yapıda ise simetriden sapma köşelerde ve ara yüzeylerde problemlere yol açar.

1.2.2.4 Zil Tipi ve Hilal Tipi Transdüserler için Eş Devre:

Zil ve hilal tipi transdüserler için eş devre Şekil 1-10 da gösterilmiştir.



Şekil 1-10 Zil ve Hilal Tipli Transdüserler için Eş Devre

burada; V = Transdüser'e doğru elektrik girdi boyunca voltajı,

I = Akım girdisini,

F = Yayınım yüzeyi boyunca olan kuvveti,

u = Yayınım kuvvetinin hızını,

$Z_{EB} = V/I(u=0)$ = Bloke edilmiş empedansı (Ω),

$Z_{MS} = F/u(V=0)$ =kısa devre mekaniksel empedansı ($N\ s/m$),

Z_{BL} = bağlayıcı katmanın mekaniksel empedansı (Ω),

Φ_1 = PZT için dönüşüm faktörünü,

Φ_2 = Kompozit yapı için dönüşüm faktörünü gösterir.

Piezoelektrik transdüser elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür yada tam tersi şekilde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Hilal ve zil tipli transdüserlerde her iki tip dönüşümde gözlenebilir. İlk dönüşümü piezoelektrik seramik gerçekleştirir. Piezoelektrik seramiğe elektrik alanı uygulandığı zaman ya deplasman görülür ya da mekanik enerji açığa çıkar.

Dönüştürülen mekaniksel enerji ve giren elektrik enerjisi arasındaki oran elektromekaniksel dönüşüm faktörü olarak adlandırılır. Bu faktör 1 değerini aşamaz. Piezoelektrik seramikler için ölçülmüş en yüksek elektromekanik faktör 0.7 dir (40).

İkinci enerji dönüşümünü ise metal kapaklar gerçekleştirir. Bu kapaklar mekanik-mekanik dönüştürücü olarak davranırlar. Piezoelektrik seramiğin elektromekaniksel dönüşüm faktörü malzeme sabitidir, boyuta ve pozisyona bağlı değildir. Fakat hilal ve zil tipli transdüser tasarımları pozisyona bağımlılık gösterirler. Bu transdüserlerin deplasman ve oluşan kuvvetleri pozisyona bağımlıdır, bu yüzden dönüşüm faktörleri de pozisyon bağımlıdır. Bu yüzden metal kapaklı kompozit transdüserlerde, malzeme özelliği olan dönüşüm faktörüyle karışmaması için etkin dönüşüm faktörü terimi kullanılır. Etkin dönüşüm faktörü doğrudan metal kapakların geometrisine bağımlıdır. Oyuk çapı, derinliği, kapak kalınlığı ve kapak malzemesi zil ve hilal tipli transdüserlerin etkin dönüşüm faktörünü belirlemede ana parametrelerdir. Eğer bağlayıcı katmandaki ve kapaklardaki kayıp ihmal edilirse, maksimum etkin dönüşüm faktörü PZT' nin dönüşüm faktörüne eşit olabilir.

1.3 Sonlu Elemanlar Analizi:

Sonlu elemanlar analizi (FEA) ilk olarak yapısal mühendislik uygulamalarında kullanılmasına rağmen, şu anda tüm mühendislik teknolojilerinde, nümerik ve simülasyon programı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin amacı, matematiksel olarak tanımlanmış değişik durumlardaki gerçek mühendislik sistemlerini karmaşık difrensiyel denklemlerle nümeriksel olarak çözümünü sağlamaktır. FEA tasarımcıya, gerçek sistemi ve prototipleri inşa etmeden bütün mümkün olan tasarım durumlarının sonuçlarını görmesini sağlar (41).

FEA teorisinin kurulması 1950'li yıllara dayanır. 1950'li yılların başında havacılık endüstrisinde pervaneli sistemlerden jet sistemlerine geçiş başlamıştır. Bu geçiş döneminde, yüksek hızın getirdiği yapı problemleri için aerodinamik çözümlere gidilmesi gerekmiştir. Bu problem üzerine olan çalışmalar ABD

Avrupa da aynı anda başlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Boeing Şirketi ve Londra Üniversitesi yeni bir analitik method geliştirdiler. "Matriks Yapısal Analizi" olarak adlandırılan bu yöntem, sonlu elemanlar analizinde temelini oluşturur. Bilgisayar gelişimiyle birlikte analiz yöntemleride ivme kazanmıştır. Aya ilk yoculukta, bir çok şirketin olağanüstü çabasıyla FEA, Apollo11 in yapımına büyük katkı sağlamıştır.

Bu yeni teknoloji, daha sonraları diğer mühendislik alanlarına girmeye başlamıştır. Clough (UCLA) sonlu elemanlar analizini ilk olarak inşaat mühendisliği alanına sokmuştur. İlk sonlu elemanlar kitabı 1967 yılında Zienkiewich ve Chung tarafından yayınlanmıştır. Bu kitapta sonlu elemanlar analizinin yapısal mühendislikten farklı olarak diğer alanlardada kullanabileceği gösterilmiştir. Zienkiewich yeraltı su baharları için FEA metodu geliştirmiş ve daha sonrada bunu akışkan mekaniğinde uygulamıştır. Potansiyel buhar analizi, viskoz akışkan analizi, liman titreşim analizi ve gelgit dalgası analizlerinde çok iyi sonuçlar elde etmiştir. Kitabının üçüncü baskısında (1977), sonlu elemanlar analizinin elektromanyetik alanlara, dalga tüplerine, piezoelektrik elementlere, elektromanyetik akışkanlara, plazma akışkanlarına, metal dislokasyon teorisine ve kimyasal reaksiyonlara uygulanmasını tartışmıştır (41).

Günümüzde, bilgisayar teknolojisindeki baş döndürücü gelişme hızı üniversitelerde ve endüstrilerdeki araştırmacılara bu yöntemin rahatlıkla kullanılmasını sağlamaktadır. Şu anda en çok kullanılan sonlu eleman analizi programları: ANSYS, ATILA, SAP, MARC, NASTRAN, PASSAGE ve ASKA ABACUS dür. Tüm bu programlar, hem iki boyutlu hemde üç boyutlu elemanlarda yapısal analizler için kullanılabilirler. Ayrıca doğrusal olmayan malzeme yapılarında (kompozitler), termal gerilme çözümleri, titreşim analizleri, ortak alan analizlerinde (piezoelektrikler), elastoplastiklik, viskoelastiklik, ve sürünme analizleri içinde kullanılabilirler.

Sonlu elemanlar analizinde altı değişik analiz yapılması mümkündür: statik, harmonik, dinamik, modal, spektrum ve bükülme analizleri. Statik analiz, basit yükler altında sistemdeki deplasmanı, gerilmeleri, uzamaları ve yapıdaki kuvvetleri bulmak için kullanılır. Harmonik analiz sinüzoidal olarak değişen yüke maruz kalan yapı analizinde kullanılır. Böylece, sistemdeki değişimler farklı

frekanslarda hesaplanabilir ve bu hesaplamaların frekansa karşılık grafikleri elde edilebilir. Bu analiz tekniği sadece denge halindeki kuvvet uygulanmış titreşen yapılarda kullanılabilir. Dinamik analiz ya da zaman tarifli analiz, zamana bağlı yük altındaki yapıdaki dinamik değişimleri bulmak için kullanılır. Yapı içinde zamanla değişen deplasman değerleri, uzama, gerilmeler ve kuvvetler statik, dinamik ve harmonik analiz tekniklerinin kombinasyonlarıyla hesaplanabilirler. Bu teknikle de kütle merkezi ve sönümlenme etkileri de hesaplamaların içine katılabilir. Modal analiz tekniği, yapının rezonans frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılır. Spektrum analiz tekniği, modal analizin genişletilmesidir ve spektrum veya rastgele titreşimlerden oluşan gerilmeleri ve uzamaları hesaplar. Son analiz tekniği bükülme analizi ise bükülme yüklerine maruz kalan ve bükülme mod şekli gösteren yapılardaki kritik yükleri hesaplamak için kullanılırlar (42).

1.3.1 Sonlu Elemanlar Analizi Teorisi

Sonlu Elemanlar Analizinde katı veya akışkan bir çok ince elementle inşa edilir. Elementler herhangi bir yönde dizilebileceğinden ötürü, FEA çok kompleks şekillerde bile kullanılabilir. Yüksek düzeyde matematik kullanan analitik metotların tam tersine, FEA basit cebirsel denklemler kullanır. Fakat, bir FEA çözümü binlerce bilinmeyenli binlerce denklem içerir. Bu yüzden, FEA kullanarak bir sistemi çözmek matriks metotlarını yüksek hızda çözebilen bilgisayar teknolojisi gerektirir.

Sonlu elemanlar analizinde yük altındaki yapı ayrı ayrı elementlerden oluşan ağ yapısıyla modellenir (Şekil 1-11). Ağ yapısı içindeki her element diğer elementle köşelerde birleşir ve birleşme noktalarına nodal noktalar denir. Sonlu elemanlar çözümü basit denklemleri kullanarak ve sistem kuvvetlerinin nodal noktalardan komşu elementlere transferiyle birlikte, her elementteki değişimler hesaplanır. Diğer yandan, her nodal noktadaki kuvvet sistem içindeki diğer nodal noktalara bağlı olduğundan dolayı problem ilk görüldüğünden daha zordur. Elemanlar yay sistemleri gibi davranırlar ve tüm kuvvetler dengeye gelene kadar saptmaya uğrarlar. Böylece benzer denklemlerin oluşturduğu karmaşık bir sistem

varolur. Bu denklemler sistemini çözmek içinde matriks cebirine ihtiyaç vardır. Çözüm için anahtar bilgi her elemanın katılık ve kütle matriksidir. Her eleman için hem kütle hemde elastik matriksleri ayrı ayrı hesaplanır. Yapısal bir katı için sonlu elemanlar analizinde aşağıdaki denklem geçerlidir (43);

$$([K_e] + [K_e^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e]\{u\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \quad 1-28$$

Burada: K_e = element katılık matriksini,

K_e^f = elemanın temel katılık matriksini,

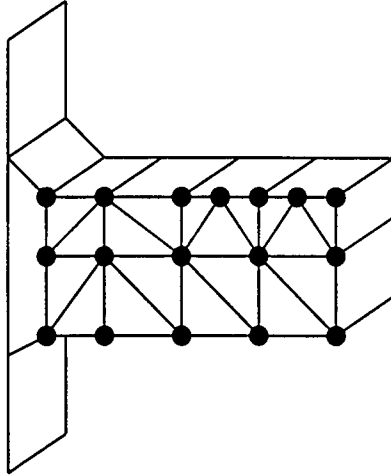
M_e = elemanın kütle matriksini,

F_e^{th} = elemanın termal yük vektörünü,

F_e^{pr} = elemanın basınç vektörünü,

F_e^{nd} = elemana uygulanan nodal yükleri,

u = deplasman vektörünü gösterir.



Şekil 1-11 Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı ve nodlar

Ortak Alan Analizi:

Eğer fiziksel özellikler arasında ortak bir ilişki varsa, sonlu elemanlar çözümünde ortak alan analizine gerek vardır. Piezoelektrik özellikde elektromanyetik bağdaşma etkisidir. Piezoelektriklik açısından, matriks denklemi aşağıdaki gibidir (43):

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} [X_1] \\ [X_2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{pmatrix} \quad 1-29$$

ve de ortak etkisi diagonal ifadeler olan K_{12} ve K_{21} ile açıklanabilir. Tam ve kesin matriks çözümü:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^z]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (F) \\ (L) \end{pmatrix} \quad 1-30$$

Burada $F = F^{nd} + F^{th} + F^{ac} + F^{pr}$,

$L = L^{nd}$,

L^{nd} = uygulanan nodal elektrik yükü vektörünü,

M = yapısal kütle matriksini,

C = yapısal sönümlenme matriksini

K = yapısal katılık matriksini,

K^z = piezoelektrik katılık matriksini,

K^d = dielektrik katsayısı matriksini,

u = deplasman vektörünü,

v = elektriksel potansiyel vektörünü

F^{nd} = uygulanan nodal yük vektörünü,

F^{th} = termal uzama kuvveti vektörünü,

F^{ac} = ivme etkilerinden oluşan vektörü,

F^{pr} = basınç yük vektörünü gösterir.

Piezoelektrik matriks denklemi, piezoelektrik elektromekaniksel denklemleri kullanan çeşitli prensipler ve sonlu eleman teorisinden türetilir:

$$(T) = [c](S) - [e](E) \quad 1-31$$

$$(D) = [e]^T(S) + [\epsilon](E) \quad 1-32$$

ya da matriks formunda;

$$\begin{pmatrix} (T) \\ (D) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & [e] \\ [e]^t & -[\varepsilon] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (S) \\ -(E) \end{pmatrix}$$

1-33

Burada; T = gerilme vektörünü,

D = Elektrik akısı yoğunluğu vektörünü,

S = uzama vektörünü,

c = elastiklik matriksini,

E = elektrik alanı vektörünü,

e = piezoelektrik gerilmeyi,

ε = dielektrik matriksini gösterir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR:

2.1 Zil Tipi Kompozit Transdüser Yapı Üretimi:

2.1.1 Piezoseramik Malzemeler:

Bu çalışmada dört çeşit piezoelektrik seramik malzemenin özelliklerinden faydalanılmıştır. Bunlardan ikisi yumuşak PZT olan PZT552 ve PZT5A, diğer ikisi sert PZT olan PZT4 ve PZT8 dir. Deneysel çalışmalarda PZT 552 transdüser için aktif eleman olarak kullanılmış, diğerleri ise modelleme çalışmalarında kullanılmıştır. Malzemeler ve piezoelektrik özellikleri Çizelge 2-2 de verilmiştir. Bu deneyde kullanılan PZT diskler Piezokinetics şirketinden satın alınmıştır. Kullanılan diskler 12.7 mm çapında ve 1 mm kalınlığındadırlar. Metal kapaklara yapıştırılmadan önce, gümüş elektrotlar asetonla temizlenmiş, böylece herhangi bir oksit tabakası varsa yok edilmiş ve iyi bir bağlanma yüzeyi yaratılmıştır.

2.1.2 Metal Kapak Hazırlanması:

Metal kapak olarak araştırılan dört değişik metalin özellikleri Çizelge 2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Metal kapakların özellikleri

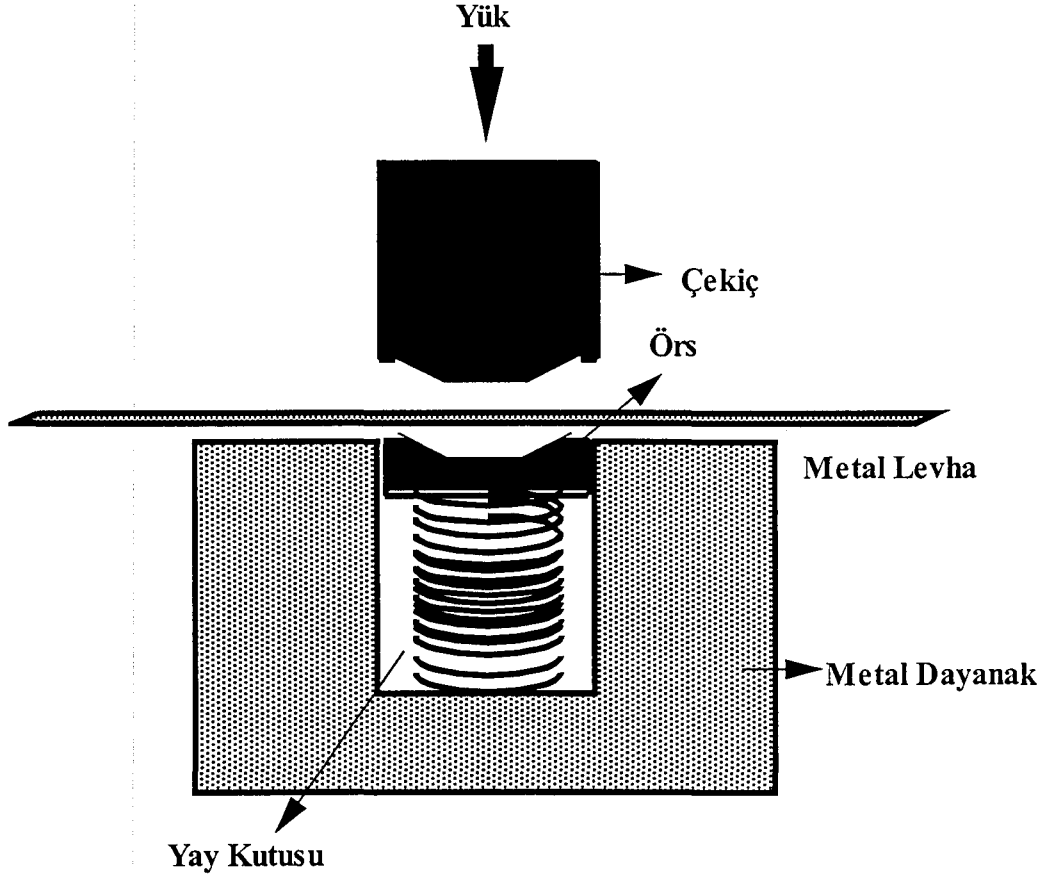
Metal	E (Gpa)	ρ (kg/m ³)	ν
Pirinç	100.6	8550	0.35
Titanyum	120.2	4500	0.361
Çelik	207	7860	0.3
Tungsten	411	19300	0.28

Çizelge 2.2 PZT seramiklerin özellikleri

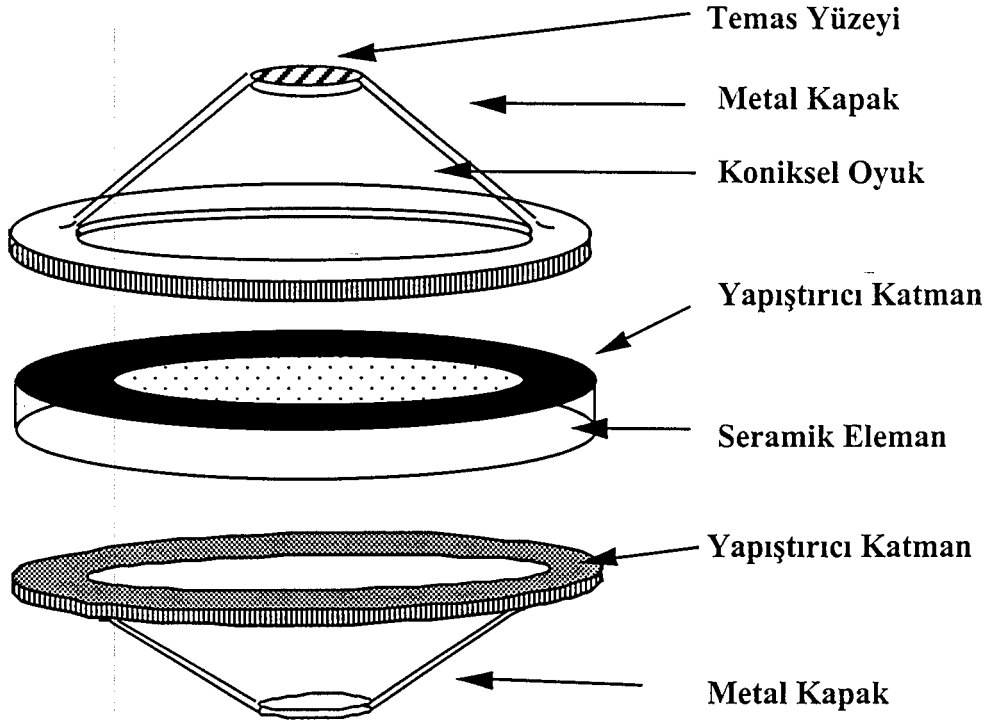
Özellik	Sembol/birim	PZT552	PZT5A	PZT-4	PZT-8
Yoğunluk	$\rho(\text{kg/m}^3)$	7500	7750	7600	7500
Elastik Modulus	E(GPa)	48.3	52.0	65.0	71.0
Piezoelektrik Uzama/Yük Katsayısı	$d_{31}(\text{pC/N})$ $d_{33}(\text{pC/N})$ $d_{15}(\text{pC/N})$	-274 593 741	-171 374 584	-123 289 496	-97 225 330
Piezoelektrik Gerilme Katsayısı	$e_{13}(\text{C/m}^2)$ $e_{33}(\text{C/m}^2)$ $e_{15}(\text{C/m}^2)$	-6.59 23.2 17.04	-6.8 17.6 14.3	-3.0 16.7 11.4	-5.2 15.1 12.7
Dielektrik Geçirgenlik	$\epsilon_{11}^T (*10^{-8} \text{ F/m})$	1.5	0.811	0.797	0.646
	$\epsilon_{33}^T (*10^{-8} \text{ F/m})$	1.3	0.735	0.531	0.562
Dielektrik Sabiti	K_{33}^T	3570	1750	1300	1000
Dielektrik Kaybı	$\tan \delta$	0.013	0.01	0.004	0.004
Elastik Katılık	$c_{11}^E (*10^{-8} \text{ N/m}^2)$	12.72	12.03	14.69	13.90
	c_{12}^E	8.02	7.51	8.11	7.78
	c_{13}^E	8.47	7.51	8.11	7.43
	c_{33}^E	11.74	11.09	13.17	11.54
	c_{44}^E	2.30	2.11	3.13	2.65
	c_{66}^E	2.35	2.26	3.29	3.06
Elastik Yumuşaklık	$s_{11} (*10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	16.5	16.4	11.5	12.3
	s_{12}	-4.78	-5.74	-3.7	-4.05
	s_{13}	-8.45	-7.22	-4.8	-5.31
	s_{14}	20.7	18.8	13.5	15.5
	s_{44}	43.5	47.5	31.9	39.0
	s_{66}	42.6	44.3	30.4	32.7
Mekaniksel Kalite Faktörü (Q)	Q_m	65	75	500	1000

Metal kapaklardan, çelik kapaklar ile deneysel çalışmalar yapılmış, diğer metal kapak özellikleri ise modelleme aşamasında kullanılmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Konik kapaklı zil tipi transdüserde metal kapak üretimi için kullanılan pres kalıp Şekil 2.1 ve zil tipi yapının şematik gösterimi Şekil 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.1 Zil tipi transdüser üretimi için kullanılan panç kalıp



Şekil 2.2 Zil tipi transdüserin parçalarının şematik gösterimi

2.1.3 Yapıştırıcı Malzeme:

Kompozit transdüserlerin performansları, kapak ile PZT disk arasındaki bağlayıcının özelliklerinden şiddetli derecede etkilenir. Bağlayıcının mekaniksel, elektriksel ve kimyasal kararlılığı transdüserin kullanım özelliklerini değiştirebilir. Düzgün bir esnek hareket için; güçlü, homojen ve aksisimetrik bir bağlanma gerekmektedir; çünkü bağlayıcı, metal kapak ve PZT disk arasında hareketi transfer eden tampon bölge konumundadır.

Elektronik parçaları, örneğin kapasitörler, resistörler ve entegre devre parçaları birbirine tutturmak için genelde kaynak veya organik yapıştırıcılar kullanılır. Paslanmaz çelik ve SiC veya Si_3N_4 ' ü birbirine bağlamak için yüksek sıcaklıkta pirinç kaynak alaşımlar kullanılır. Fakat çalışmalar göstermiştir ki pirinç kaynak PZT ile metal kapağı birbirine bağlamak için iyi değildir. Çünkü gerekli olan yüksek işlem sıcaklığı kurşun oksit kayıplarına ve bağlanma problemlerine yol açar. Bu sebepten, kompozit transdüser tasarımındaki bağlayıcı

ortam düşük sıcaklıkta kararlı kalabilecek lehim alaşımlarından seçilmelidir. Bunun içinde uygun bağlayıcı sistemleri, düşük sıcaklık kaynak alaşımları (erime noktaları 100°C - 250°C), gümüş pasta veya epoksi reçinelerdir. Bu çalışmada ise bağlayıcı ortam olarak Emerson ve Cuming epoksi kullanılmıştır. Bu epoksi iki çeşit reçine ihtiva etmektedir: % 40-50 kalsiyum karbonat, % 2-5 n-bütülglikol eter ve % 1 pigment içeren epoksi reçine (Eccobond 45LV), ve % 90 polyimit reçine ve % 10 trietilen tetramin içeren sertleştirici reçine. Bu çalışmada 1/3 oranında 45LV epoksi reçinesine 15LV reçine sertleştiricisi katılmıştır. Her ikisi iyice karıştırıldıktan sonra, epoksi metal yapışma yüzeyine yassı bir bıçakla sürülmüştür. Epoksi elle sürüldüğünden dolayı hem epoksi kalınlığı hem de epoksi genişliği kesin olarak kontrol edilememiştir (yaklaşık 20µm). Metal - seramik-metal yapı, tam bağlanma için oda sıcaklığında 24 saat basınç altında bekletilmiştir.

Kolay elde edilebilirliği, yüksek viskozite ve oda sıcaklığında kullanılabilme özellikleri bu çalışma için eccobond epoksiyi en uygun bağlayıcı yapmaktadır. Diğer yandan ise uygulama sıcaklık aralığının dar olması (-10 ile +70 arası) dezavantaj teşkil etmektedir.

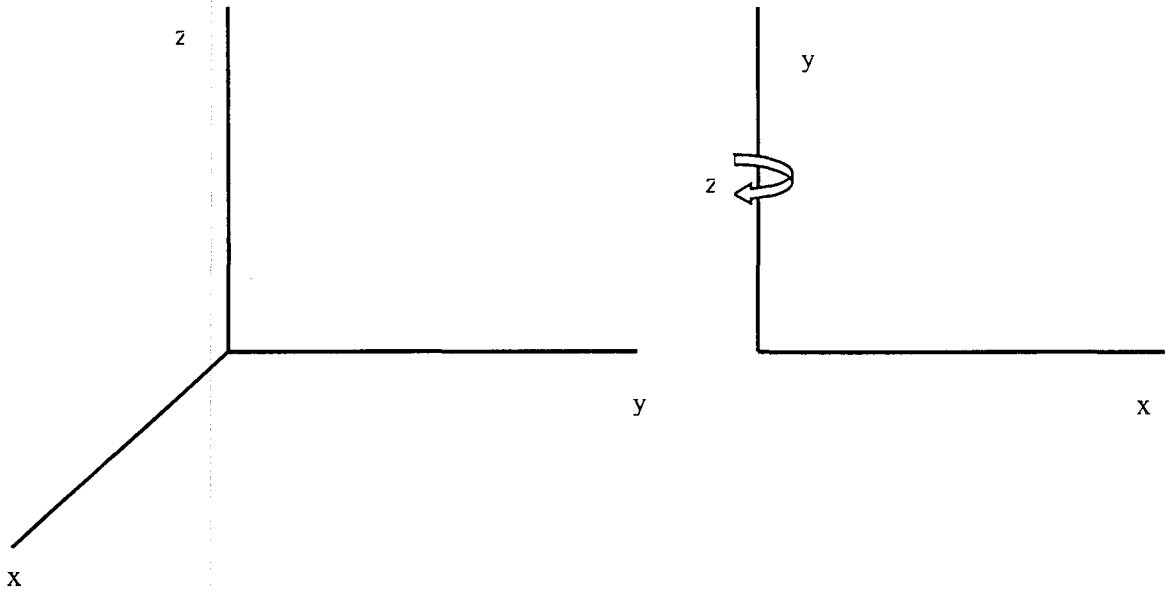
2.2 Modelleme

Deneysel çalışmalarla birlikte yürütülen ikinci kısımda, zil tipi kompozit yapı ANSYS 5.5 sonlu elemanlar analizi programı ile modellenmiş ve gene bu program yardımı ile elektromekaniksel özellikleri incelemiştir. Modelleme işlemi genel olarak ANSYS 5.5 kullanıcı kılavuzları yardımıyla yapılmıştır.

2.2.1 Model Kurulması

Sonlu elemanlar analizi yapılırken ilk aşama model kurulması aşamasıdır. Bu aşamada yapıyı oluşturan nodların ve elemanların geometrileri belirlenir. İlk seferde yapılması gereken modelin iki boyutlu mu yoksa üç boyutlu mu olarak kurulacağını belirlemesidir. Zil tipi kompozit transdüser yapısı merkez etrafında aksisimetrik özellik gösterdiğinden dolayı iki boyutlu olarak modellenebilir. Bu

çalışmada hem iki boyutlu hemde üç boyutlu modelleme yapılmıştır. Fakat çoğu analiz iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir çünkü nod sayısı azaldığından dolayı zamanda önemli bir avantaj sağlanmıştır. Diğer yandan üç boyutlu analizlerle de, rezonans modları değişik bakış açılarıyla gözlemlenebilmiştir. İki boyutlu koordinat sistemi Şekil 2.3 de görülmektedir. Bu durumda y-ekseni dikey yön olurken, x-ekseni yatay yön ve z-ekseni ise te eksen olurlar.



Şekil 2.3 Modellemede kullanılan üç ve iki boyutlu koordinat sistemi

Zil tipi transdüser üç parçadan oluşur: metal kapak, piezoelektrik eleman, ve epoksi yapıştırıcı. ANSYS eleman bankası yaklaşık 100 değişik eleman çeşidine sahiptir bu elemanlar analizin ve yapının özelliklerine göre, örneğin sıvı ya da katı veya iki boyutlu-üç boyutlu oluşuna, değişik amaçlarla kullanılabilirler. Zil tipi transdüser yapısında metal kapak ve epoksi yapıştırıcı için PLANE 42, piezoelektrik eleman için ise PLANE 13 kullanılmıştır.

PLANE 42 iki boyutlu katı yapılar için kullanılırlar. Eleman her noddaki serbestlik derecesine (x-y ekseninde geçiş) sahip dört köşe noddan oluşur ve aksisimetrik yapılar için kullanılabilir. Bu eleman kullanıldığında malzeme

özellikleri olarak elastik modulu, yoğunluk, poisson oranı girilmesi gereklidir. Metal kapağın ve epoksi yapıştırıcının tüm özelliklerinin doğrusal ve izotropik olduğu kabul edilmiştir.

PLANE 13 ise iki boyutlu ortak-alan katıları için kullanılır. Bu eleman da dört köşe noddan oluşur fakat burada her nod dört serbestlik derecesine sahiptir. Bunlar nodal x ve y yönlerinde deplasman, sıcaklık, voltaj veya manyetik vektör potansiyeli olabilirler. Yoğunluk haricinde, piezoelektrik seramiğin malzeme özellikleri anizotropiktir. Bunun sonucunda malzeme sabitleri (elastik katılık) ve piezoelektrik sabitleri (gerilme katsayıları) analiz için matriks şeklinde programa girilmiştir. İki boyutlu analiz yapıldığı içinde, üç boyutlu malzeme sabitleri iki boyutlu sisteme dönüştürülmüşlerdir.

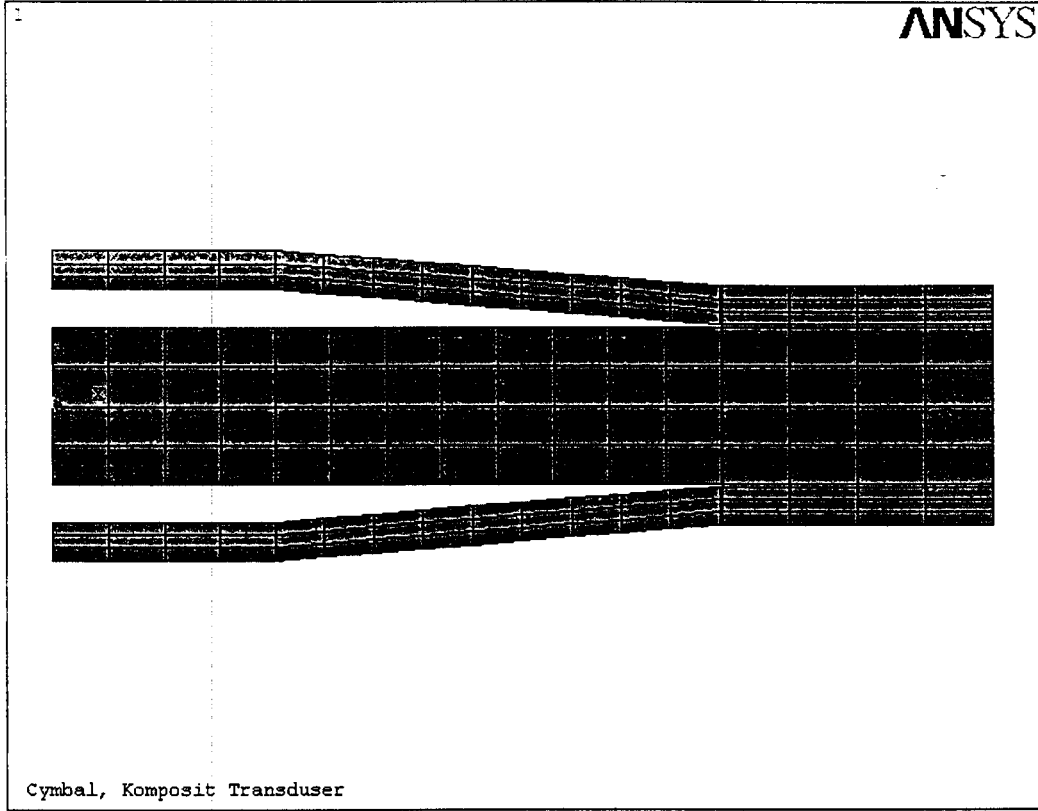
Model geometrisi kurulurken ilk olarak anahtar noktalar tanımlanmıştır. Daha sonra bu anahtar noktalar çizgilerle birbirine bağlanıp alanlar tanımlanmıştır. Son basamakta ise bu alanların hangi malzemeye sahip olduğu belirtilmiş (element tipi ve malzeme özellikleri tanımlaması) ve örgüleme yapılmıştır. Örgüleme yapılmış model Şekil 2.4 te gösterilmektedir. Örgüleme sonlu elemanlar analizinin en önemli basamaklarından biridir. Ağ ölçüleri uygun seçilmelidir, çünkü bu ölçüler hem çözümün hassasiyetini hem de işlem süresini doğrudan etkiler. Model içinde ne kadar çok bölüm olursa gerçek sonuçlara o kadar yaklaşılr fakat aynı anda işlemin süreside o kadar uzar. Bu yüzden, çalışmada uygun çözüm zamanı ve kabul edilebilir hassasiyette sonuç veren ağ ölçüsü kullanılmıştır.

2.2.2 Yükleme

Yükleme, uygun sınır koşullarının ve iç-dış kuvvetlerin model üzerine uygulanması işlemidir. Sonlu elemanlar analizinin öncelikli amaçlarından bir tanesi, yapının değişik yükler altında gösterdiği davranışın incelenmesidir. Kuvvetler, elektriksel potansiyel, deplasman, akustik basınç değişik yüklerle örnek olarak gösterilebilir. Yükler altı kategoriye ayrılırlar: (1) DOF kısıtlamaları, bunlar nodlardaki serbestlik derecelerini bilinen bir değere, örneğin sabitlenmiş deplasman ve simetri sınırları, kısıtlamak için kullanılırlar. (2) Kuvvetler, nodlardaki yük konsantrasyonlarını belirtmek için kullanılırlar. (3) Yüzey yükleri, yüzeyde yayılmış olan basınç gibi yükleri uygulamak için kullanılırlar. (4) Başlangıç yükleri (5) Yapı yükleri, sıcaklık gibi hacimsel veya alan yüklerini uygulamak için kullanılırlar. (6) Ortak-alan yükleri, bir analizde oluşan sonuçları diğer bir analizde yük olarak kullanılmasını sağlar. Bu çalışmada yukarıda yer alan yük çeşitlerinden, DOF kısıtlamaları, yüzey yükleri ve ortak alan yükleri kullanılmıştır

2.2.3 Çözüm ve Çözüm Sonrası İşlemleri

Bu aşamada analiz çözüm opsiyonları girildikten sonra, ANSYS, analiz tipine göre her nodda benzer denklemleri kullanarak sonuçları hesaplamıştır. Daha sonra ise çözüm sonrası işlemleri kullanarak ANSYS tarafından hesaplanan sonuçlara ulaşılmıştır. İki tip çözüm sonrası işlem vardır: POST1 ve POST26. POST1 genel bir işlem olup, spesifik yük veya frekans basamaklarında analiz sonuçlarını gözden geçirmek için kullanılmıştır. POST26 ise zamansal bir çözüm sonrası işlem olup model içindeki özel noktadaki sonuçları, zaman veya frekansa bağlı fonksiyon olarak elde edilmesinde kullanılmıştır. Aynı zamanda POST26 kullanılarak önceden tanımlanmış değişkenler arasında matematiksel operasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.4 Zil tipi kompozit transdüser yapısının ANSYS yardımı ile iki boyutlu olarak modellenmesi

2.2.4 Program Dosyaları

ANSYS sonlu elemanlar analizi programında tüm işlemleri interaktif olarak yapmak hem zaman açısından hemde işlemlerin standartı açısından uygun olmamaktadır. Bu sebepten dolayı, yapılacak işlemler 'mac' dosyası olarak hazırlanmış ve ANSYS programının bu 'mac' dosyalarından çözümü yapması kullanılmıştır. Aşağıda 'mac' dosyalarının hazırlanışı anlatılmıştır.

/PREP7 komutu başlangıç komutu olup, genel girdi data işlemcisini aktive eder. Daha sonra istenilen malzeme özellikleri *ET* komutu kullanılarak tanımlanmıştır. Sonraki aşamada ise *UIMP* komutu kullanılarak doğrusal malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bu komuttan sonra gelen ilk sayı malzeme tipini belli eder: metal kapak için 1, piezoelektrik malzeme için 2 ve epoksi yapıştırıcı için 3 kullanılmıştır. Sayılardan sonraki *EX* izotropik elastik sabitesi, *DENS* yoğunluk ve de *NUXY* Poisson oranını ifade eder.

PERX ve *PERY* piezoelektrik malzemenin x ve y eksenlerindeki geçirgenlik değerlerini ifade eder. Anizotropik elastik matrisi (piezoelektrik katılık katsayıları) *TB*, *ANEL* ve piezoelektrik matris *TB*, *PIEZ* komutları kullanılarak aktive edilmiştir.

Malzeme tanımlamaları bittikten sonra model geometrisi kurulmaya başlanmıştır. Öncelikle çalışma alanı içerisinde koordinat noktaları tanımlanmış ve daha sonra *k* komutuyla anahtar noktalar belirlenmiştir. Komuttan sonra gelen sayı anahtar noktanın numarasını belirtir. Anahtar noktalar tanımlandıktan sonra ise bu noktalar *A* komutuyla birbirine bağlanmış ve alanlar yaratılmıştır. Örgü ölçüleri alanları meydana getiren çizgilerin bölünmesiyle kontrol edilmiştir. Model yaratmadaki son basamak olarak meydana getirilen alanların hangi malzemeye ait olduğu belirtilmiş ve örgüleme işlemi yapılmıştır.

Çözüm işlemleri */SOLUTION* komutunu kullanarak aktive edilmiştir. ANSYS de analiz tipleri *antype*, *n* komutuyla ifade edilir. Bu komuttaki *n* sayı olup 0 olduğunda yapısal analizi, 1 olduğunda modal analizi, 2 olduğunda harmonik analizi ifade etmektedir. Aksisimetriyi belirtmek için simetri koşulları $x = 0$ noktasında uygulanmıştır. Ayrıca modelin yatay ortadüzlemi, dikey geçişleri önlemek için sabitlenmiştir. Rezonans frekanslarını elde edebilmek için

piezoelektrik elemanda kısa devre yapılması gereklidir. Bunun için piezoelektrik elemanın üstünde ve altındaki tüm ortak alan nodlardaki elektriksel potansiyelin sıfır olduğu belirtilmiştir.

/POST1 kullanıcıya hesaplanmış sonuçlarını grafik olarak veya çizelge halinde verebilir. Bu çalışmada da */POST1* kullanılarak malzemenin titreşim modları elde edilmiştir. Ayrıca bu modlardaki yapının gösterdiği şekil değişiklikleride figürel olarak elde edilmiştir.

Zil tipi transdüserin değişik yükler altındaki deplasman değerleri ve elektriksel geçirgenlik değerleri için ise harmonik analiz kullanılmıştır. Harmonik analiz mac dosyasındaki komutlar örgülemenin bitimine kadar aynıdır. Fakat daha sonra harmonik analiz için yapıda bir potansiyel farkı oluşturulmuştur. PZT diskin bir yüzeyindeki ortak alan nodlarına elektrik alanı uygulanırken diğer yüzeyindeki nodlarda elektrik alanı sıfır olarak belirtilmiştir. Uygulan voltaj ise 1 kV/mm dir.

Çözüm basamağına gelindiğinde simetri şartları modal analizle aynı olarak tanımlanmıştır. Admitans değerlerini bulmak için frekans aralıkları belirlenmiş ve bu aralıklarda çözümün 20 eşit basamakta gerçekleşmesi sağlanmıştır. Ayrıca çözüm esnasında elektriksel geçirgenliğin rezonans esnasında sonsuza gitmemesi için sönümlenme katsayısına ihtiyaç vardır ve bu çalışmada empirik değerlerle uyumlu olarak bulunan 0.005 değeri kullanılmıştır.

Elektriksel geçirgenlik ve deplasman hesaplamaları */POST26* işlemcisi kullanılarak yapılmıştır. Elektriksel geçirgenlik değerinin hesaplaması aşağıda açıklanmıştır. ANSYS programı nodlar üzerinde oluşan elektrik yüklerini (Q) hesaplar. Bu elektrik yükleri;

$$Q = Q_0 e^{j\omega t} \quad 2.1$$

oluşan akım;

$$I = \frac{dQ}{dt} = j\omega Q_0 e^{j\omega t} = j\omega Q \quad 2.2$$

ve uygulanan voltaj

$$V = V_0 e^{j\omega t} \quad 2.3$$

olarak ifade edilirler.

Admitans ise :

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{Q_0 j \omega e^{j\omega t}}{V_0 e^{j\omega t}} = j \omega \frac{Q_0}{V_0} \quad 2.4$$

eşitliği ile ifade edilir .

V_0 programda 1 volt olarak tanımlandığından:

$$Y = j \omega Q_0 \quad 2.5$$

burada $\omega = 2\pi f$ olduğundan dolayı sistemdeki elektriksel geçirgenlik değeri,

$$Y = j(2\pi f)Q_0 \quad 2.6$$

olarak bulunur.

ANSYS doğrudan yük şiddetini hesaplayabilir. Yazılan programlarda bulunan yük değeri frekansla çarpılmış ve daha sonrada 2π ile çarpılarak mhos cinsinden elektriksel geçirgenlik değerleri bulunmuştur. Deplasman değerlerini ise ANSYS doğrudan hesaplayabilmektedir. İstenilen noddaki ve istenilen yöndeki elektriksel geçirgenlik değerleri ANSYS zaman-tarihsel işlemcisi kullanılarak bulunmuştur.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1 Sonlu Elemanlar Analizi ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması:

Modelleme çalışmalarındaki en önde gelen amaç deneysel çalışmaları yapmadan bilgisayar yardımıyla sistemi kurup gerçek sonuçlara ulaşmaktır. Böylece çok sayıda deney yapımı ile gelecek olan zaman kaybı ve maliyet artışı engellenmeye çalışılır. Doğal olarak, modellemenin başarı ölçüsünde, hesaplanan sonuçların gerçek sonuçlara ne kadar yaklaştığı olarak kabul edilebilir.

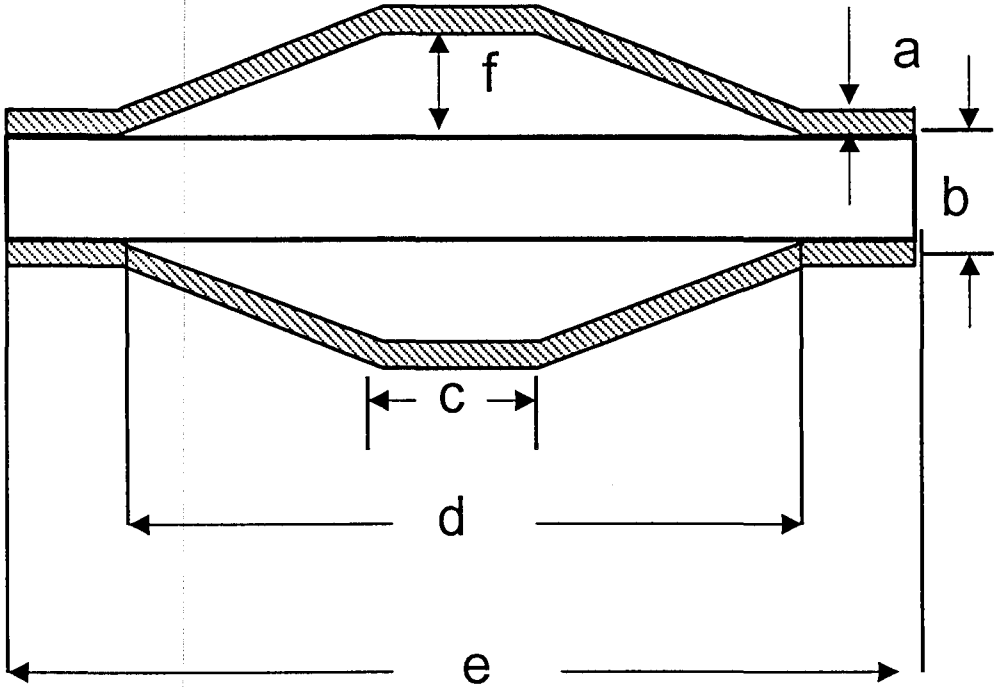
Modellemenin ilk aşamaları bittikten sonra, temelde hesaplanan sonuçların doğruluğunu en çok etkileyen faktör yapıyı kavrayan örgü sisteminin boyutlarıdır. Genelde, eleman boyutları küçüldükçe, hesaplanan sonuçlar teorik değerlere yaklaşır. Diğer yandan, nod sayısı arttıkça çözüm süreside uzar. Bu yüzden nod sayısı ve hesaplama süresi arasında optimum bir modelleme sistemi kurulmalıdır. Bu çalışmanın ilk aşamasında da optimum zaman ve nod sayısı belirlenmiş ve hesaplanan sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılırken, transdüserin deplasman ve rezonans frekansı özellikleri gözönüne alınmıştır.

3.1.1 Deplasman

Zil tipi transdüserde özellikleri etkileyen altı değişik boyut vardır (Şekil 3.1). Bunlar metal kapak kalınlığı, PZT kalınlığı, düz yüzey çapı, oyuk çapı, transdüser çapı ve oyuk derinliğidir. Bu boyutlardaki değişimler tepkileyici özelliklerinde de önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan boyutlar standart boyut olarak belirlenmiştir. Böylece çalışmaların karşılaştırılması sağlanmıştır.

Modelleme sonrası oluşturulan sistemde transdüserin deplasman değerlerini (dikey yönde) hesaplamak için FEM ile oluşturulan sisteme harmonik analiz uygulanmış ve transdüserin merkez tepe noktasındaki deplasman değerleri bulunmuştur. Hesaplanan deplasman değerlerinin, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge 3.1 ve Şekil 3.2 de verilmiştir. Deneysel verilerin elde

edildiği numunelerin transdüser çapları 12.7 mm, seramik disk kalınlıkları 1 mm, düz yüzey çapları 3 mm ve oyuk çapları 9 mm dir. Metal kapak kalınlıkları ise 0.3 ve 0.385 mm olarak basılmıştır. 0.3 ve 0.385 mm kapak kalınlığına sahip numuneler için, oyuk derinliği 0.35 ile 0.7 mm arasında değiştirilmiş ve hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Piezoelektrik malzeme olarak PZT 552,



a: Kapak kalınlığı, 0.25 mm

b: PZT kalınlığı, 1 mm

c: Düz yüzey çapı, 3 mm

d: Oyuk çapı, 9 mm

e: Transdüser çapı, 12.7 mm

f: Oyuk derinliği, 0.25 mm

Şekil 3.1 Standart boyutlardaki zil tipi transdüser

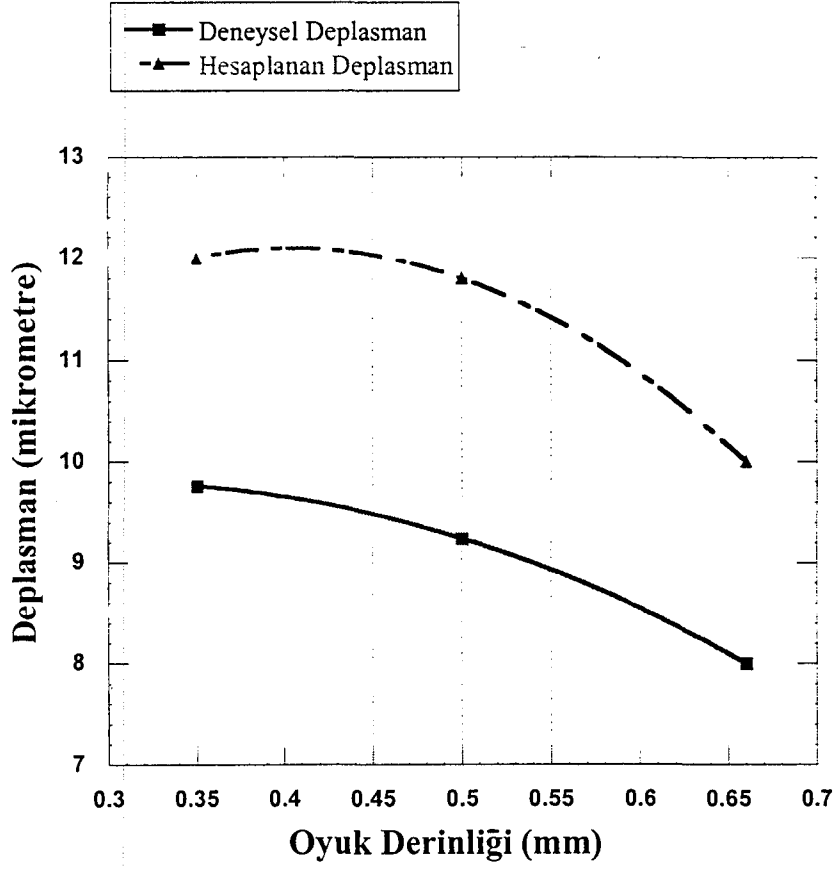
metal kapak malzemesi olarak da paslanmaz çelik kullanılmıştır. 0.3 mm ve 0.385 mm kalınlığında paslanmaz çelik kapaklı ve 0.5 mm oyuk derinliğine sahip transdüserin deplasman dağılımı Çizelge 3.1 de verilmiştir. Eğer hesaplanan ve deneysel deplasman değerlerini karşılaştırırsak (Şekil 3.2-3.3) birbirleri ile uyumlu oldukları görülmektedir. Aynı zamanda birbirleriyle aralarındaki fark da orantılı bir şekilde devam etmektedir. Aradaki farkın sebebi ise piezoelektrik etkiye katkısı olan yönlü alan hareketinin ANSYS tarafından hesaplanmamasıdır. Pratikte, yüksek voltaj altında piezoelektrik malzeme içinde, kutupların boyutlarındaki değişmeye ek olarak, domain boyutlarında da bir hareketlenme olur ve oluşan piezoelektrik etki, bu iki olayın toplamı olarak ortaya çıkar. Şekil 3.4' de görüldüğü üzere bu yönlü alan hareketinin etkisi ile birlikte, görülen deplasman, yüksek alan altında doğrusallıktan sapmaktadır. d değerleri oranlandığında:

$$d_{33}(\text{Yüksek alan})/d_{33}(\text{Düşük alan}) = 1.4 \text{ ve } d_{31}(\text{Yüksek alan})/d_{31}(\text{Düşük alan}) = 1.51$$

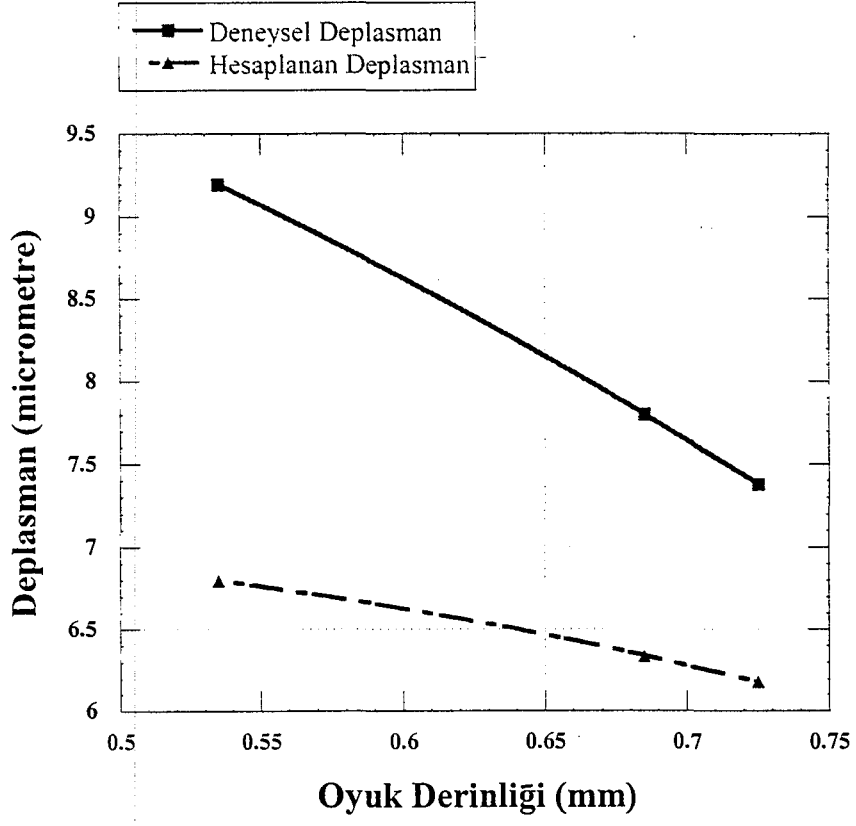
olarak bulunur. ANSYS yönlü alan hareketlerini hesaplamalara katmadığından dolayı deneysel ve hesaplanan deplasman değerleri arasındaki oranında yaklaşık 1.5 civarı olması beklenmektedir. Fakat, hesaplanan sonuçlar deneysel deplasmana bu orandan daha çok yaklaşmıştır. Bunun sebebini de metalin elastikiyet değerine bağlamak mümkündür. Elastik modülü ve yoğunluğu PZT 552'ye daha yakın olan malzemelerde (pirinç) bu oran yaklaşık 1.5 olarak

Çizelge 3.1 Deneysel ve hesaplanan deplasman değerlerinin karşılaştırılması

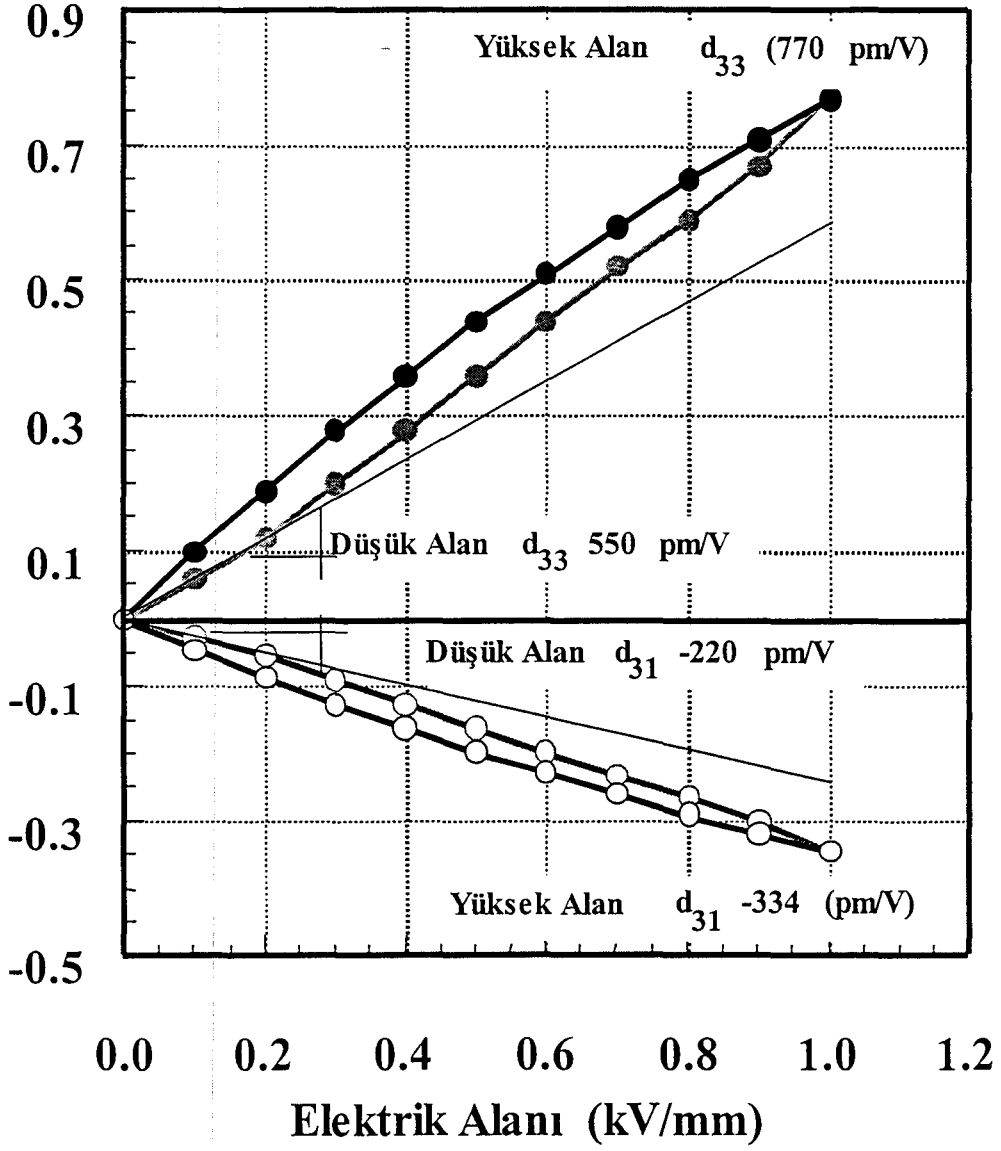
Metal Kalınlığı(mm)	Oyuk Derinliği	Deneysel Deplasman	Hesaplanan Deplasman	Oran (Deneysel/Hesaplanan)
0.3	0.35	12.0	9.76	1.22
0.3	0.5	11.8	9.24	1.27
0.3	0.66	10	8	1.25
0.385	0.535	9.2	6.8	1.35
0.385	0.685	7.8	6.34	1.23
0.385	0.725	7.38	6.18	1.19



Şekil 3.2 Hesaplanan ve deneysel deplasman değerlerinin karşılaştırılması (0.3 mm metal kapak kalınlığı)



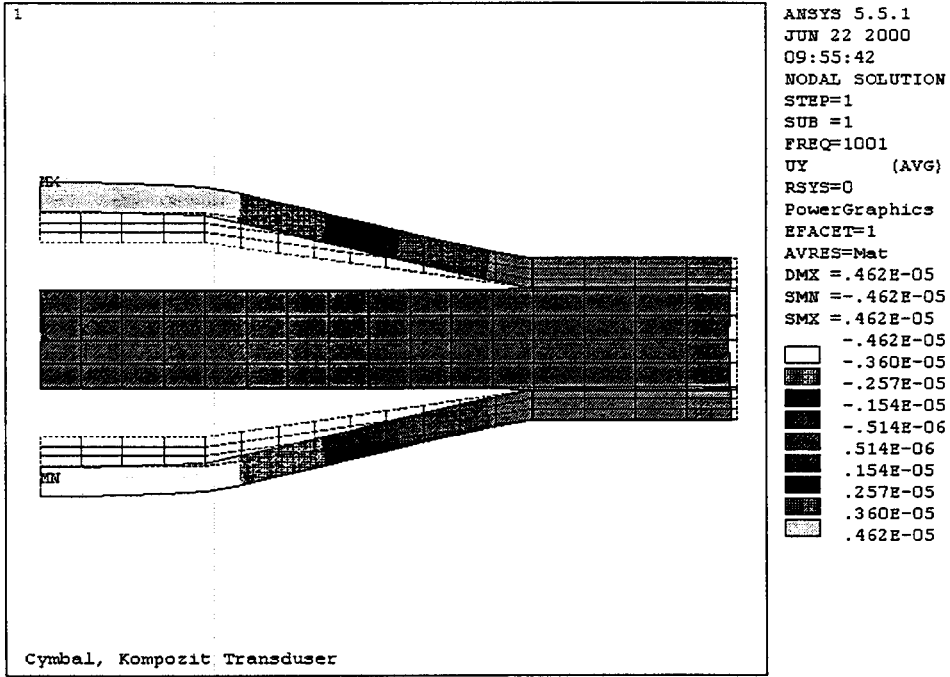
Şekil 3.3 Hesaplanan ve deneysel deplasman değerlerinin karşılaştırılması (0.385 mm metal kapak kalınlığı)



Şekil 3.4 Zil tipi transdüserde kullanılan PZT'nin piezoelektrik katsayılarının elektrik alanına bağımlılığı

görülmektedir. Modülüs değerinin yüksek olması ise PZT’de sıkıştırma etkisi yaratarak d_{31} ’de domain hareketlenmelerini kısmen engellemektedir. Böylece hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen değerler birbirlerine daha çok yaklaşmaktadır.

Şekil 3.5’te ise 0.3 mm kapak kalınlığı ve 0.5 oyuk derinliğine sahip transdüserin 1 kV/mm elektrik alanı altında deplasman dağılımını göstermektedir. Görüldüğü üzere deplasman, daha önceki çalışmalarda bulunan zil tipi transdüser deplasman dağılımına tam olarak uymaktadır.



Boyutlar

Transdüser çapı=12.7mm

Oyuk çapı=9 mm

Yassı Yüzey: 3 mm

PZT kalınlığı: 1 mm

Kapak kalınlığı: 0.3 mm

Oyuk Derinliği: 0.5 mm

Şekil 3.5 Zil tipi transdüserde deplasman dağılımı

3.1.2 Rezonans Frekansı

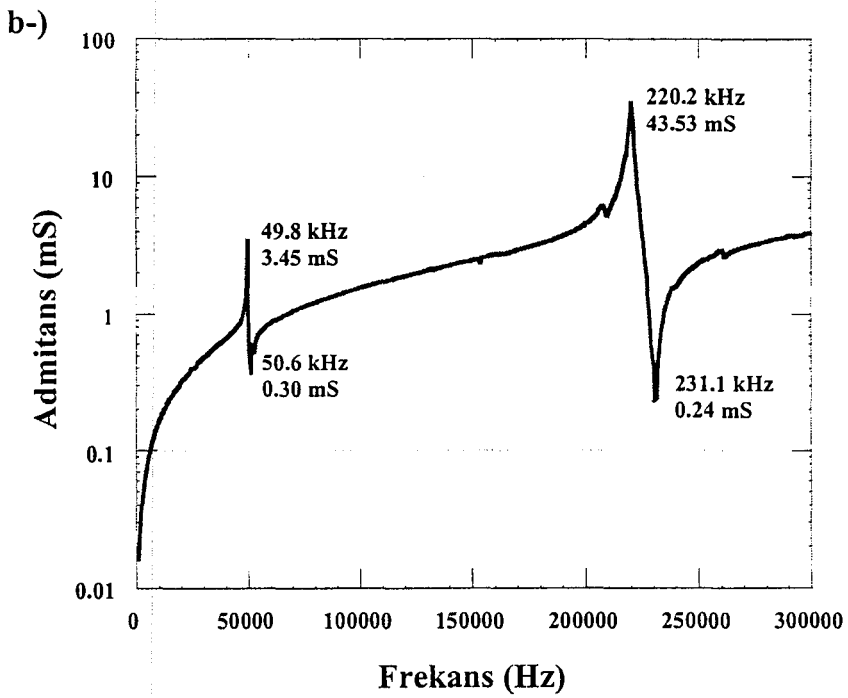
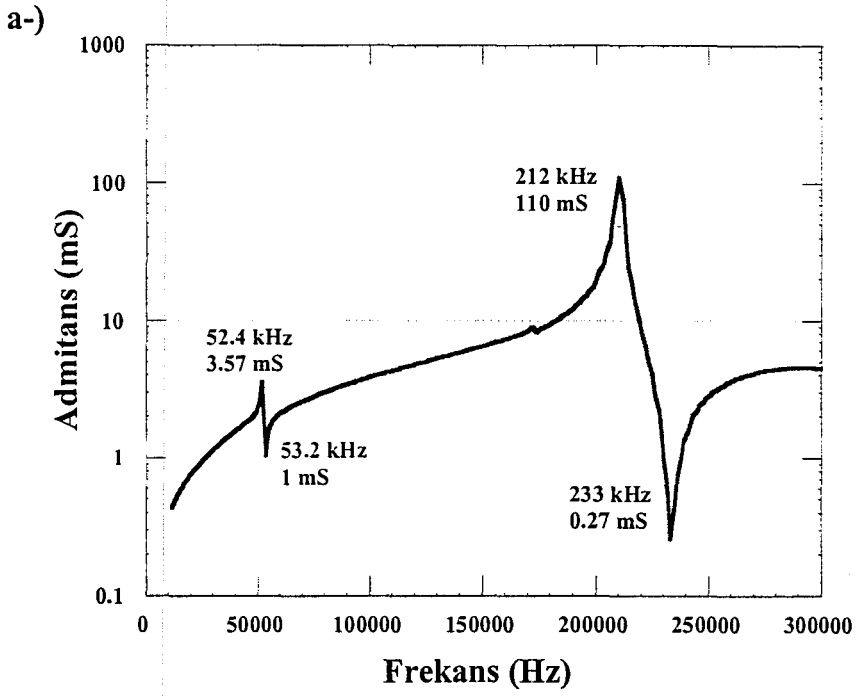
Standart transdüser çapında ve iki ayrı oyuk derinliğine sahip, çelik kapaklı zil tipi transdüserlerin rezonans frekansı sonlu elemanlar analizi kullanılarak hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş olup sonuçlar Şekil 3.6 ve 3.7'de verilmiştir. Her iki transdüser boyutunda da admitans spektrumları birbirlerine mükemmel uyum sağlamışlardır. Hatta düşük dönüşümlü modlar bile hem hesaplanmış hem de deneysel olarak ölçülmüş spektrumlarda, hemen hemen aynı frekans değerlerinde gözükülmektedirler. Düşük frekanslarda gözlemlenen modlar kapak malzemesinin modları olup kapak malzemesine ve boyutuna göre değişme göstermektedir. Daha yüksek frekanstaki modlar ise seramik malzemenin radyal titreşim modları olup seramiğin boyutlarına ve metalin sıkıştırma etkisinden dolayı metal kapağının Young modulüne bağlı olarak değişirler. Daha önce yapılan çalışmalarda pirinç kapaklı zil tipi transdüserdeki seramiğin radyal modlarının 150-160 kHz civarında görüldüğünü belirtmiştir. Çelik kapaklı transdüserde ise seramiğin radyal titreşim modları 210-220 kHz civarında görülmektedir.

Deneysel ve hesaplanmış dönüşüm faktörlerinin karşılaştırılmasında Çizelge 3.2 de verilmiştir. Dönüşüm faktörleri hesaplanırken aşağıdaki formülden yararlanılmıştır.

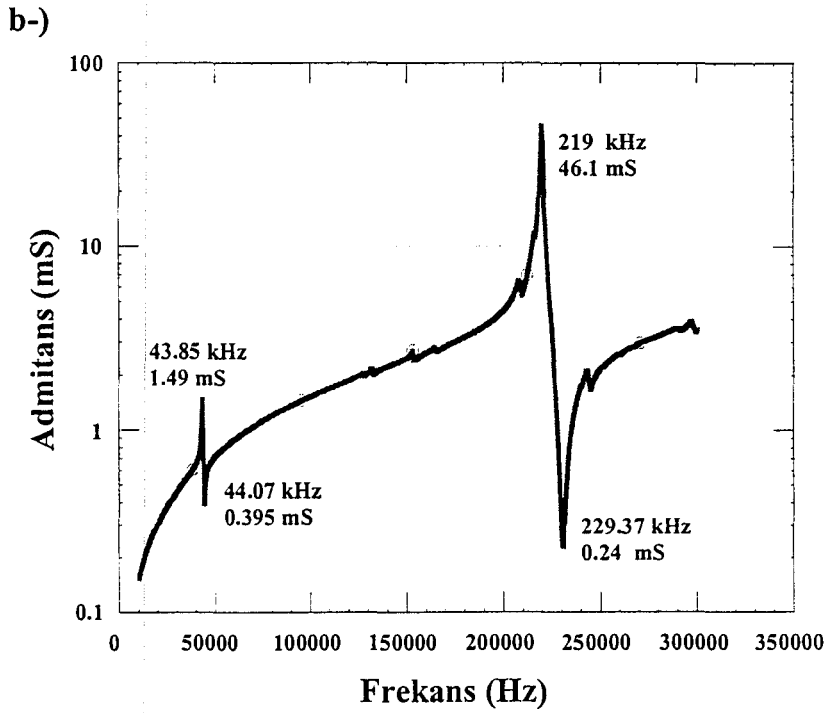
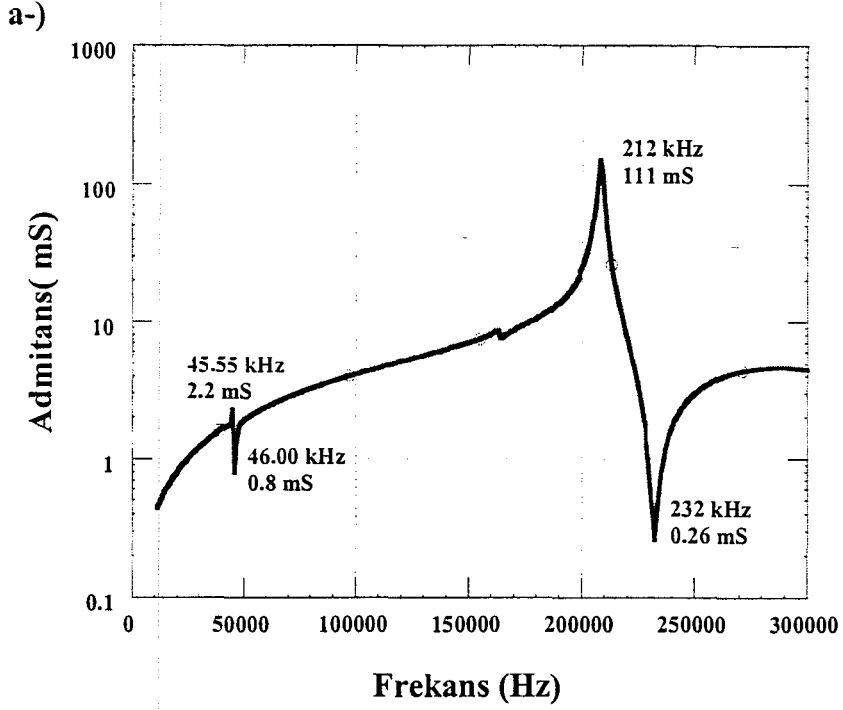
$$k^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad 3.1$$

Çizelge 3.2 Birinci titreşim modundaki dönüşüm faktörlerinin karşılaştırılması

Oyuk Derinliği	Deneysel Frekanslar (kHz)		Hesaplanan Frekanslar (kHz)		Deneysel Dönüşüm Faktörü(k)	Hesaplanan Dönüşüm Faktörü(k)	Faktör Tutma Oranı
	f_r	f_a	f_r	f_a			
0.35	49.8	50.6	52.4	53.2	0.177	0.172	1.02
0.20	43.58	44.07	45.5	46	0.148	0.147	1.00



Şekil 3.6 FEM ile hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş rezonans spektrumunun karşılaştırılması, a) FEM sonuçları b-) Deneysel sonuçlar, 0.50 mm kapak kalınlığı, 0.35 mm oyuk derinliği



Şekil 3.7 FEM ile hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüş rezonans spektrumunun karşılaştırılması, a) FEM sonuçları b-) Deneysel sonuçlar, 0.50 mm kapak kalınlığı, 0.20 mm oyuk derinliği

Deplasman değerlerinin, rezonans frekanslarının ve dönüşüm faktörlerinin birbirleriyle uyumlu olması, gerçekleştirilen modellemenin başarılı olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda çalışmanın diğer kısmında değişik uygulamalarda kullanılmak üzere transdüserin optimizasyonu için modelleme sonuçları kullanılmıştır.

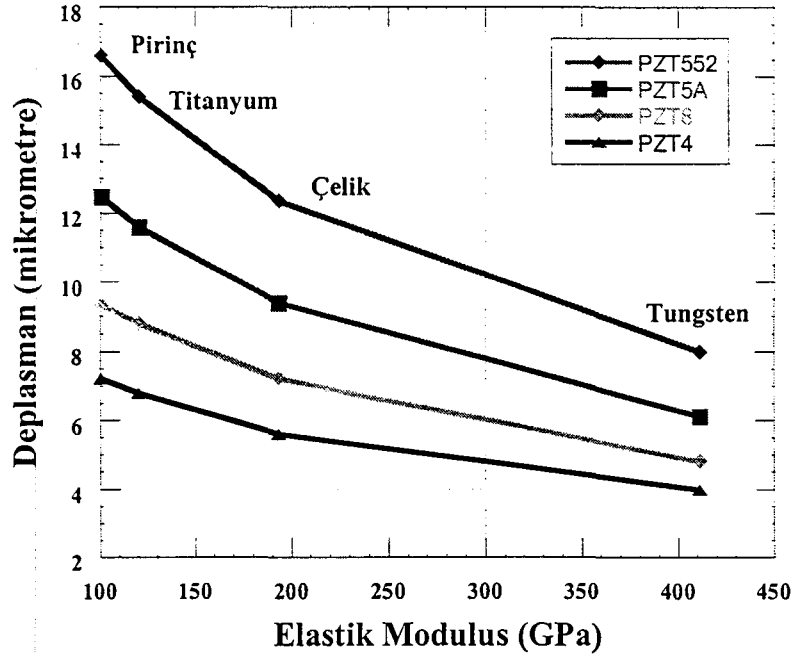
3.2 Malzeme Seçiminin Zil Tipi Transdüserin Performansına Etkileri

Zil tipi transdüserde oluşan deplasman ve rezonans frekansı metal kapak özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan, standart boyuttaki zil tipi transdüser için deplasmanla, metal malzemenin elastik modülü arasındaki ilişki Şekil 3.8'de verilmiştir. Metal kapağın elastik modülü arttıkça deplasmanda düşmektedir. Bu değişim yaklaşık olarak doğrusal olup aynı boyutlarda transdüser için % 50 leri geçen düşüşler meydana gelmektedir. Elastik modülün artmasıyla deplasmanda meydana gelen düşüş, metal kapakların elastik yay şeklinde davranışlarının azalmasından kaynaklanmaktadır.

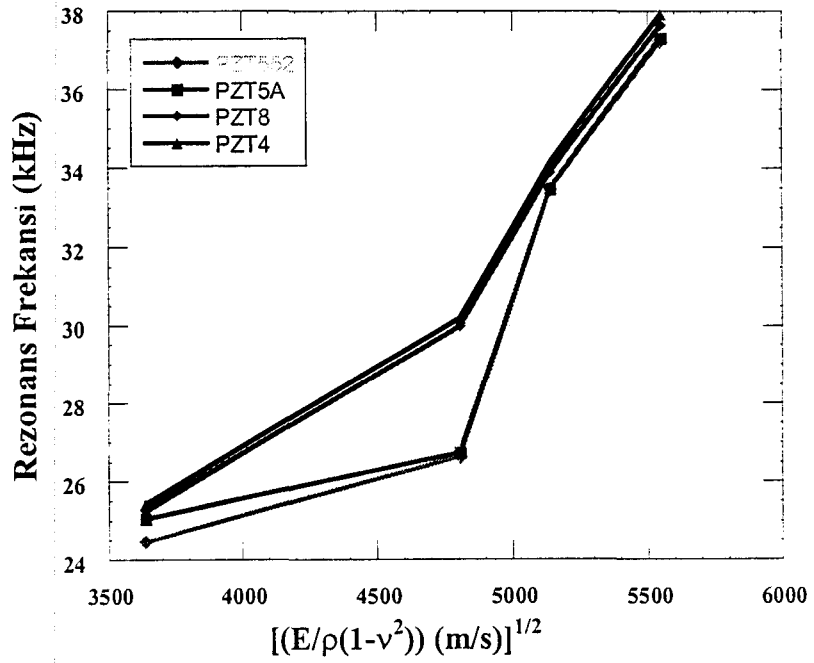
Piezoelektrik seramik malzemede transdüserin deplasman değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.8'den görüldüğü üzere seramik malzemenin piezoelektrik katsayıları düştükçe transdüserin gösterdiği deplasmanda düşmektedir. Standart boyutlarda pirinç kapaklı transdüserde deplasman 16 μm iken tungsten kapaklı transdüser de görülen deplasman 8 μm dir.

Eşitlik 1.19'dan görüldüğü üzere zil tipi transdüserin rezonans frekansı, değişik özellikteki malzemelerle değiştirilebilir. Malzemedeki değişim ile rezonans frekansındaki değişim $(E/\rho(1-\nu))^{1/2}$ terimi ile birbirlerine bağlanırlar. Standart boyutlardaki değişik malzemeler için hesaplanmış rezonans frekansları Şekil 3.9 de verilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, transdüserin rezonans frekansı kapak malzemesini değiştirerek kolayca istenilen seviyelerde elde edilebilir.

Seramik malzemesindeki değişiklik ise rezonans frekansını önemli ölçüde etkilememektedir (Şekil 3.9). Genel olarak sert PZT'ler, yumuşak PZT'lerden 1-5



Şekil 3.8 Zil tipi transdüserde elastik modülüsün deplasmana etkisi



Şekil 3.9 Kapak malzemesinin transdüserin ilk rezonans frekansına etkisi

kHZ daha yüksek rezonans frekansı göstermektedirler.

3.3 Zil Tipi Transdüserde Boyut Etkileri

Transdüser uygulamaları için en önemli parametreler transdüserin deplasman, rezonans frekansı ve oluşan kuvvet karakteristiğidir. Zil tipi transdüserin bu özelliklerinin kapak ve seramik malzemenin boyutlarından şiddetlice etkilendiği bilinmektedir. Fakat daha önce yapılan çalışmaların tümünde, tek bir transdüser çapı için boyut etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada modellemenin getirdiği kolaylıklardan yararlanılarak geniş bir transdüser boyut yelpazesi yaratılmış ve değişik transdüser boyutlarında zil tipi transdüser için optimum değerler bulunmaya çalışılmıştır. Değişik transdüser çapları için temel kabul edilen boyutlar Çizelge 3.3 de verilmiştir. Tüm çalışma için kabul edilen standart boyut ise 12.7 mm transdüser çapı için verilen temel boyutlardır. Modellemede genelde seramik malzemesi olarak PZT 552, kapak malzemesi olarak ise pirinç ve çelik kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Değişik transdüser çapları için temel boyutlar

Transdüser Çapı (mm)	Oyuk Çapı (mm)	Oyuk Derinliği (mm)	Metal Kalınlığı (mm)	Düz Yüzey Çapı (mm)	Seramik Kalınlığı (mm)
35	24.80	0.68	0.68	8.26	2.75
15.8	11.20	0.31	0.31	3.73	1.25
12.7	9	0.25	0.25	3	1
9.5	6.73	0.18	0.18	2.24	0.75
3.2	2.26	0.06	0.06	0.75	0.25

3.3.1 Geometrik Değişimlerin Deplasmana Etkisi

Zil tipi transdüserde, PZT elektriksel olarak uyarıldığında, PZT diskte bir büzüşme meydana gelir ve bu büzüşme bağlayıcı katman tarafından metal kapaklara iletilir. Bu hareket transferide metal kapakda dikey bir harekete sebep olur. İki boyutlu modelleme temel alınırsa toplam deplasman;

$$d = 2\Delta h + \Delta h_c \quad 3.2$$

Burada Δh oyuk derinliğindeki değişmeyi,

Δh_c ise elektrik alanı altında seramiğin boylamasına değişimini ifade eder.

$$\Delta h_c = d_{33} E t_p \quad 3.3$$

Burada d_{33} , boylamasın piezoelektrik katsayısını,

E , uygulanan elektrik alanını,

t_p , metal kapak kalınlığını gösterir.

Elektrik alanı uygulandığında oyuk derinliğinde oluşan değişme;

$$h + \Delta h = \{l^2 - [(d_c + \Delta d_c - d_t)/2]^2\}^{1/2} \quad 3.4$$

Burada l , metal kapağın yanal duvarını,

d_t , düz yüzey çapını gösterir.

Elektrik alanı altında seramikde oluşan büzüşme,

$$\Delta d_c = d_{31} E d_c \quad 3.5$$

Burada d_c , oyuk derinliğini,

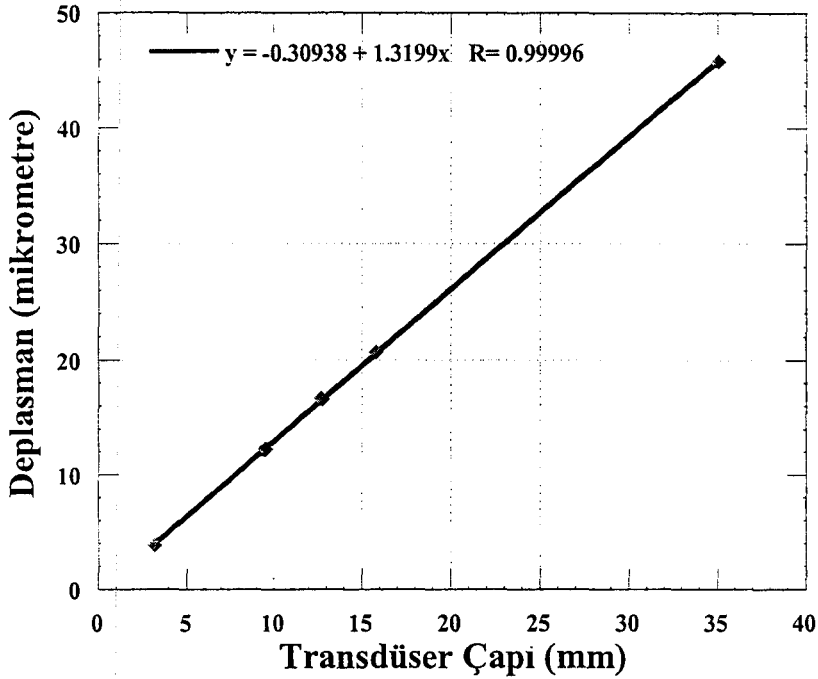
d_{31} , enlemesine piezoelektrik katsayısını gösterir.

Enlemesine piezoelektrik katsayısı olan d_{31} eksi (-) değerlikli olduğundan dolayı, Δd_c seramiğin büzülme hareketini desteklemektedir. Böylece yüksek d_{33} ve d_{31} katsayıları deplasmanı artırmaktadır.

3.3.1.1 Transdüser Çapı

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanan, pirinç kapaklı temel boyutlara sahip transdüserler için çaptaki değişim ile meydana gelen deplasman değişimi Şekil 3.10 de verilmiştir. Boyutlar büyüdükçe transdüserde meydana gelen deplasman değeri de artmaktadır. Değişik transdüser çaplarına göre diğer transdüser boyutlarında orantılı olarak değiştirildiğinden dolayı, deplasman

değişimlerinde tam olarak doğrusal olmaktadır. Transdüserin çapı 3.2 mm den 35 mm'ye çıkartıldığında deplasmanda 12 kat artmaktadır. Çapla meydana gelen bu doğrusal değişimde transdüserden değişik uygulamalar için istenilen deplasman değerinin elde edilmesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 3.10 Transdüser çapının deplasman üzerindeki etkisi

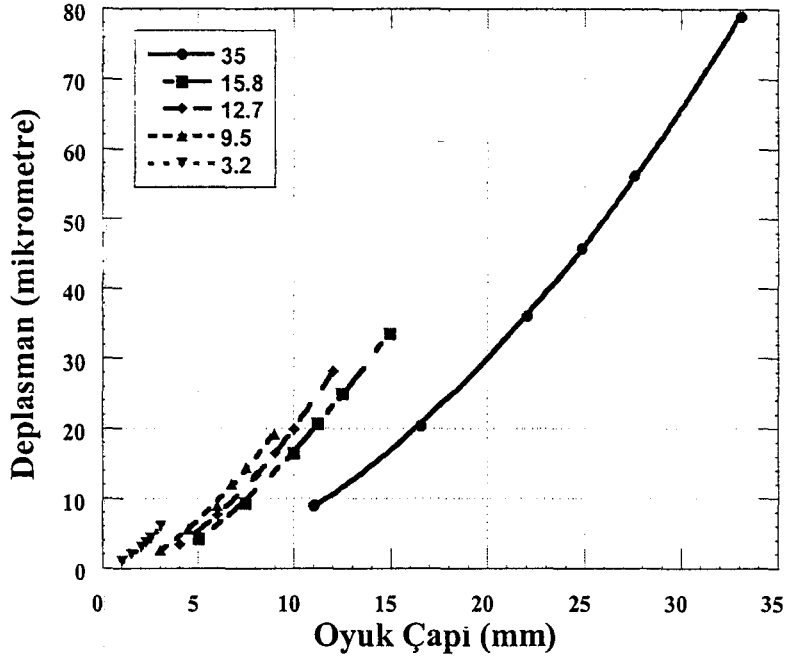
3.3.1.2 Oyuk Çapı

Eşitlik 3.4'ten görüldüğü üzere oyuk çapı artıkça, oluşan toplam deplasmanda artar. Sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmış değerler de Eşitlik 3.4'ü destekler niteliktedir (Çizelge 3.4 ve Şekil 3.11). Pirinç kapaklı standart numune için oyuk derinliği 4-12 mm arasında değiştirilmiştir. Deplasman 4 mm'lik oyuk derinliğinde 3.44 μm iken, oyuk derinliği 9 mm'ye çıkarıldığında 16.60 μm , oyuk derinliği 12 mm olduğunda ise 28.80 μm kadar çıkabilmektedir. Bu değişim transdüser çapı artıkça değersel olarak daha büyük olmasına rağmen diğer ufak boyutlardaki deplasman değişimleri ile aynı oranlarda olmaktadır.

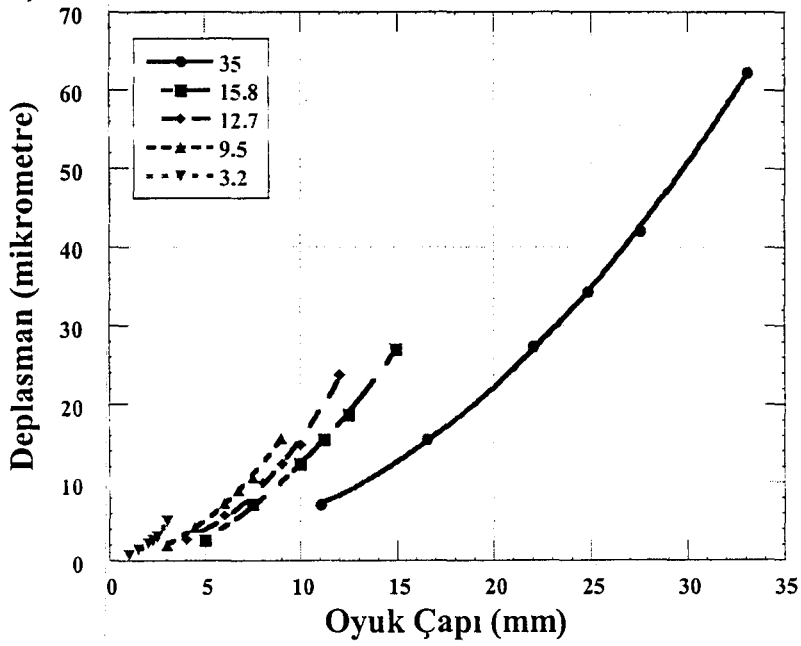
Çizelge 3.4 Oyuk çapının deplasman üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı	Oyuk Çapı	Deplasman (µm) Pirinç Kapak	Deplasman (µm) Çelik Kapak
35	33.07	78.90	62.26
35	27.55	56.20	41.98
35	24.80	45.80	34.32
35	22.04	36.12	27.32
35	16.53	20.40	15.52
35	11.02	9.00	7.1
15.8	14.92	33.58	27.03
15.8	12.44	25.00	18.67
15.8	11.196	20.68	15.50
15.8	9.95	16.57	12.40
15.8	7.46	9.42	7.19
15.8	4.97	4.26	3.22
12.7	12.00	28.18	23.68
12.7	10.00	19.94	14.84
12.7	9.00	16.6	12.36
12.7	8.00	13.3	10
12.7	6.00	7.64	5.8
12.7	4.00	3.44	2.68
9.5	8.97	19.24	15.7
9.5	7.48	14.54	10.74
9.5	6.73	12.18	9.02
9.5	5.98	9.08	7.32
9.5	4.48	5.68	4.3
9.5	2.99	2.59	2
3.2	3.02	6.00	5.08
3.2	2.52	4.26	3.06
3.2	2.26	3.77	2.72
3.2	2.01	3.06	2.20
3.2	1.51	1.9	1.40
3.2	1.00	0.9	0.70

a-)



b-)



Şekil 3.11 Transdüser ve oyuk çapının deplasman üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Eşitlik 3.4 ile deplasmanı hesaplırsak, 4 mm oyuk çapı için 5.13 µm ve 9 mm'lik oyuk çapı için 23.60 µm değerleri bulunmaktadır. Aradaki bu farklılık çelik kapak için ise daha büyük olmaktadır. Bunun sebebi de Eşitlik 3.4'te malzeme özelliklerinin hesaba katılmamasından kaynaklanmaktadır. Metal elastik modülü büyüdükçe, metal yay özelliğini kaybetmeye başlar ve deplasman düşer. Sonlu elemanlar analiziyle hesaplanan sonuçlarda malzeme özelliklerinden kaynaklanan deplasman değişimlerinde görülebilmektedir.

Şekil 3.11 de görülen oyuk çapındaki değişimle deplasman değişimi aşağıdaki eşitliğe uygun gerçekleşmektedir. M katsayıları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

$$Y = M_0 + M_1 \cdot x + M_2 \cdot x^2 \quad 3.6$$

Çizelge 3.5 Oyuk çapı eşitliği için katsayı değerleri

Çap (mm)	M0		M1		M2	
	Pirinç	çelik	pirinç	Çelik	pirinç	Çelik
3.2	-0.30	-1.8	0.8	0.4	0.41	0.1
9.5	-1.80	0.20	1.01	0.07	0.15	0.18
12.7	-1.30	3.10	0.55	-0.90	0.15	0.21
15.8	-4.01	-1.80	1.16	0.40	0.09	0.10
35	-3.30	2.70	0.41	-0.27	0.06	0.06

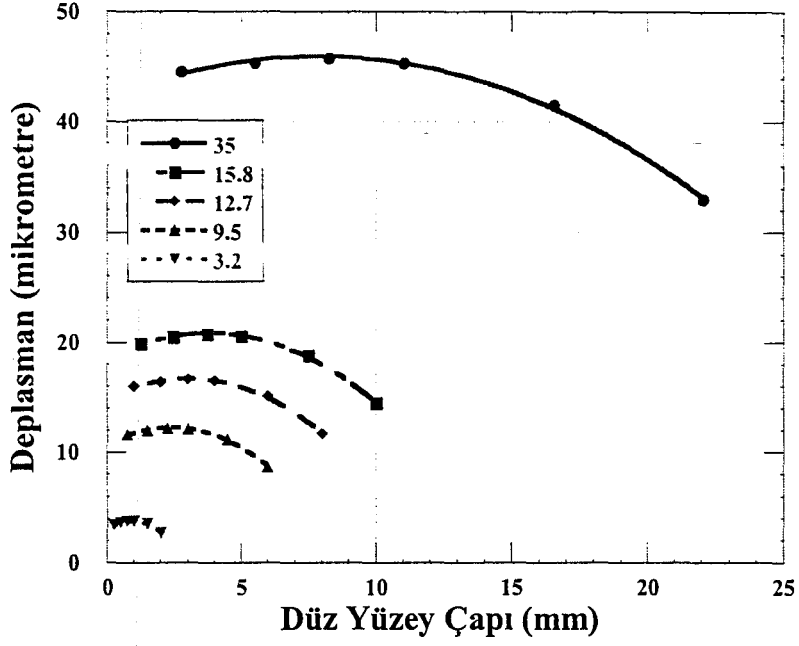
3.3.1.3 Düz Yüzey Çapı

Düz yüzey çapının artışıyla oluşan deplasman değişimi Şekil 3.12 ve Çizelge 3.6'da görülmektedir. Tüm boyutlarda, düz yüzey çapının artmasıyla deplasman önce optimum değerine ulaşmakta daha sonra hızlı bir düşüş göstermektedir. Bunun sebebidir, düz yüzey çapının artmasıyla birlikte dönme hareketinin sönümlenmesidir. Böylece yapı hilal tipi transdüser gibi davranmakta ve sadece esnek hareket göstermektedir. Optimum değere tüm transdüser çaplarında temel boyutların yakınında ulaşılmaktadır. Düz yüzey çapındaki değişim, deplasmanı

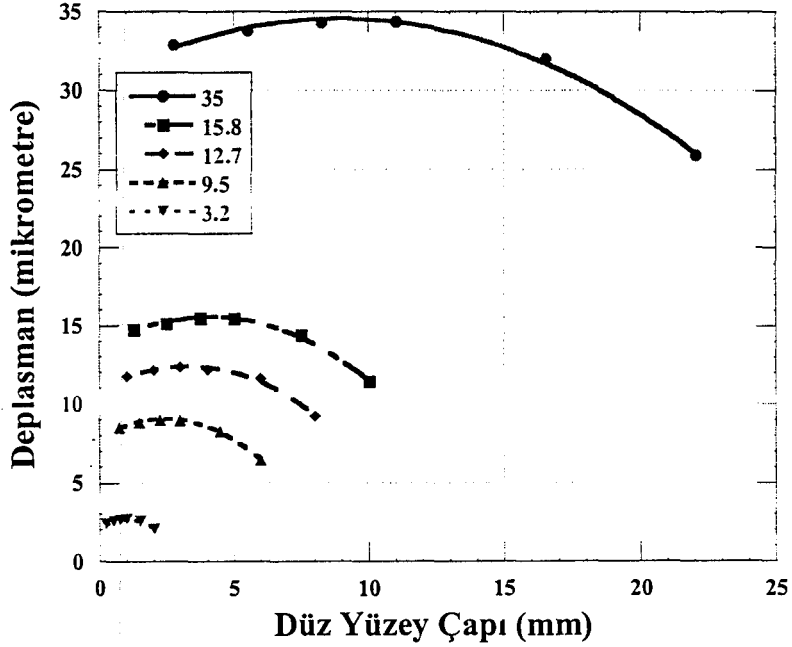
Çizelge 3.6 Düz yüzey çapının deplasman üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı	Düz Yüzey Çapı (mm)	Deplasman (μm) Pirinç Kapak	Deplasman (μm) Çelik Kapak
35	22.04	32.26	25.32
35	16.53	41.5	31.98
35	11.04	45.34	34.34
35	8.26	45.8	34.32
35	5.51	45.36	33.8
35	2.75	44.58	32.88
15.8	10.00	14.50	11.45
15.8	7.50	18.80	14.384
15.8	5.00	20.55	15.45
15.8	3.73	20.68	15.50
15.8	2.48	20.48	15.20
15.8	1.24	19.84	14.75
12.7	8.00	11.70	9.22
12.7	6.00	15.10	11.60
12.7	4.00	16.46	12.20
12.7	3.00	16.60	12.36
12.7	2.00	16.36	12.14
12.7	1.00	15.96	11.76
9.5	6.00	8.68	6.42
9.5	4.48	11.18	8.28
9.5	3.00	12.14	8.98
9.5	2.24	12.18	9.02
9.5	1.49	12.00	8.84
9.5	0.74	11.36	8.53
3.2	2.01	2.70	2.06
3.2	1.91	3.46	2.54
3.2	1.00	3.72	2.68
3.2	0.75	3.77	2.72
3.2	0.50	3.58	2.56
3.2	0.25	3.44	2.44

a-)



b-)



Şekil 3.12 Transdüser ve düz yüzey çapının deplasman üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

oyuk çapı kadar etkilememektedir. Pirinç kapaklı standart numunede düz yüzey çapı 1-8.5 mm arasında değişirken, deplasman 16 µm dan 11 µm'a kadar düşmektedir. Eşitlik 3.4 'te bu azalışı açıklar niteliktedir. Düz yüzey çapı ile deplasman arasında ilişki kurarsak, eşilik ikinci dereceden polinomsal bir ifade olur. Katsayılar çizelge 3.7 de verilmiştir.

$$Y = M0 + M1*x + M2*x^2 \quad 3.7$$

Çizelge 3.7 Düz yüzey çapı eşitliği için katsayı değerleri

Çap (mm)	M0		M1		M2	
	Pirinç	çelik	pirinç	Çelik	pirinç	Çelik
3.2	3.10	2.19	1.41	1.03	-0.79	-0.54
9.5	10.72	7.85	1.28	0.99	-0.26	-0.20
12.7	14.84	10.9	1.20	0.91	-0.19	-0.14
15.8	18.45	13.6	1.23	0.94	-0.16	-0.11
35	42.04	30.615	1.00	0.88	-0.06	-0.04

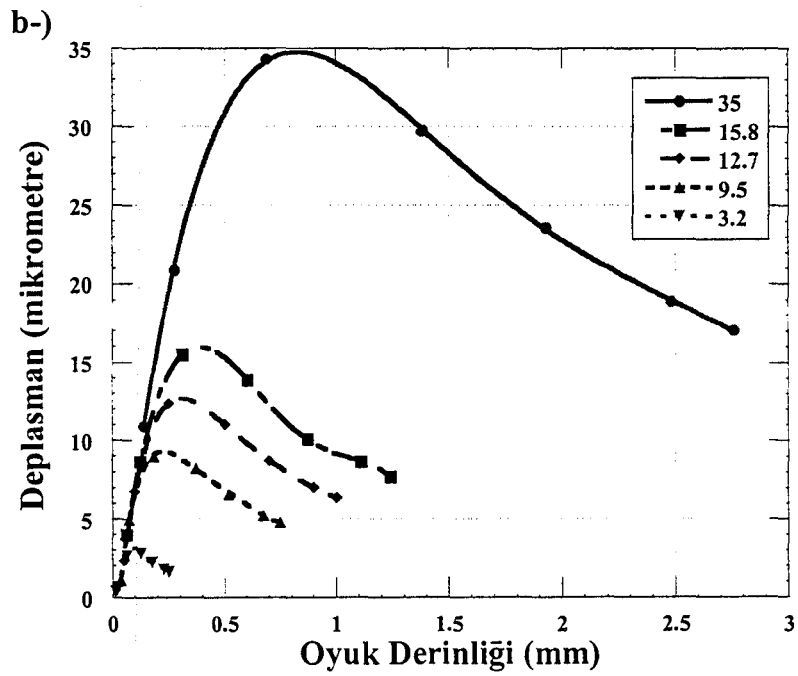
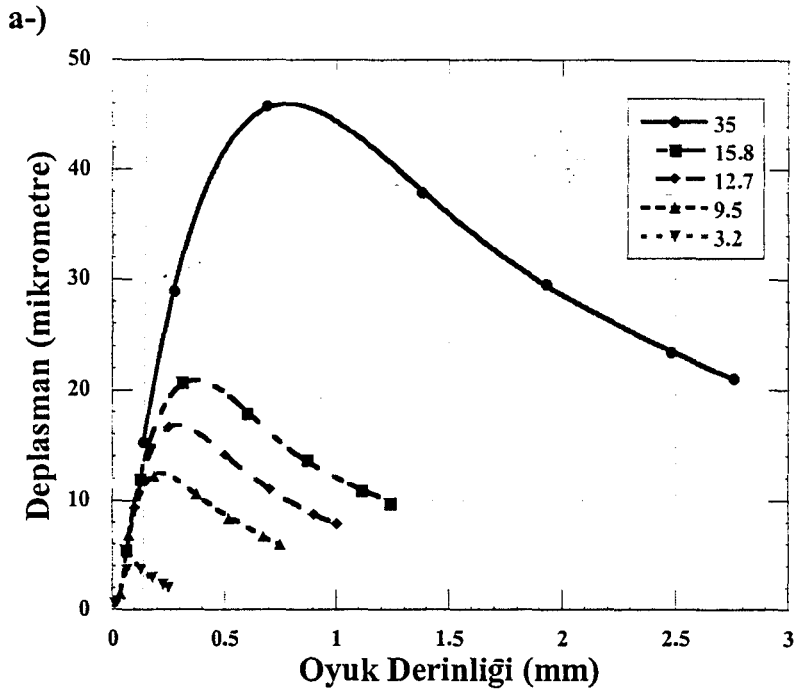
3.3.1.4 Oyuk Derinliği

Oyuk derinliği ve deplasman arasındaki ilişki Çizelge 3.8 ve Şekil 3.13'de görülmektedir. Buradaki deplasman değişiminde düz yüzey çapının etkisine benzemektedir. Deplasman önce maksimum bir değere ulaşmakta ve daha sonra hızlı bir düşüş göstermektedir. İlk önce görülen deplasman artışı, yapıdaki iç enerji artışıyla açıklanabilir. Fakat daha sonra, oyuk derinliği arttıkça yapı hilal tipi transdüser benzemekte ve sadece esnek hareket göstermektedir. Dönme hareketinin yavaş yavaş sönümlenmesiyle birlikte deplasmanda düşüş görülmektedir. Optimum değer gene standart boyutların etrafında görülmektedir. Eşitlik 3.8 ve Çizelge 3.9'da düz yüzey çapındaki değişimle, oyuk çapındaki değişimin deplasman üzerinde aynı etkisi olduğunu göstermektedir.

$$Y = M0 + M1*x + M2*x^2 \quad 3.8$$

Çizelge 3.8 Oyuk derinliğinin deplasman üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı	Oyuk Derinliği (mm)	Deplasman (μm) Pirinç Kapak	Deplasman (μm) Çelik Kapak
35	2.75	21.06	17.60
35	2.48	23.42	18.88
35	1.93	29.58	23.56
35	1.38	37.94	29.72
35	0.69	45.80	34.32
35	0.27	28.96	20.86
15.8	1.24	9.74	7.68
15.8	1.11	10.91	8.68
15.8	0.87	13.64	10.83
15.8	0.60	17.86	13.88
15.8	0.31	20.68	15.50
15.8	0.12	11.90	8.68
12.7	1.00	7.86	6.34
12.7	0.90	8.74	7.00
12.7	0.70	11.04	8.72
12.7	0.50	14.12	11.00
12.7	0.25	16.60	12.36
12.7	0.10	9.38	6.76
9.5	0.75	5.98	4.79
9.5	0.67	6.73	5.23
9.5	0.52	8.38	6.58
9.5	0.37	10.62	8.23
9.5	0.18	12.18	9.02
9.5	0.07	6.88	4.94
3.2	0.25	2.00	1.60
3.2	0.23	2.30	1.78
3.2	0.18	2.92	2.22
3.2	0.13	3.68	2.76
3.2	0.06	3.77	2.72
3.2	0.02	0.78	0.58



Şekil 3.13 Transdüser çapı ve oyuk derinliğinin deplasman üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Çizelge 3.9 Oyuk derinliği eşitliği için katsayı değerleri

Çap (mm)	M0		M1		M2	
	Pirinç	çelik	pirinç	Çelik	pirinç	çelik
3.2	3.10	2.19	1.41	1.03	-0.79	-0.54
9.5	10.72	7.85	1.28	0.99	-0.26	-0.20
12.7	14.84	10.9	1.20	0.91	-0.19	-0.14
15.8	18.45	13.6	1.23	0.94	-0.16	-0.11
35	42.04	30.615	1.00	0.88	-0.06	-0.04

3.3.1.5 Metal Kapak ve PZT Kalınlığı

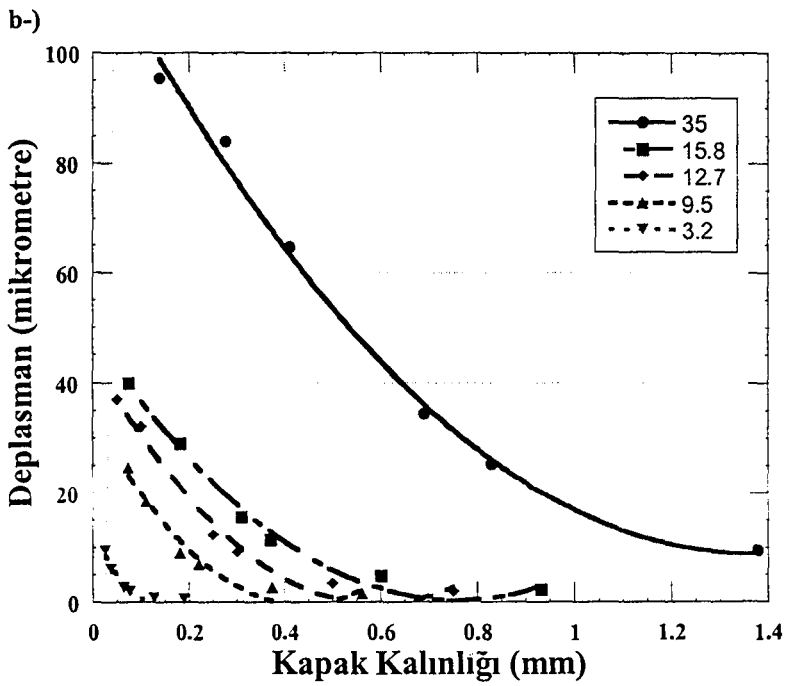
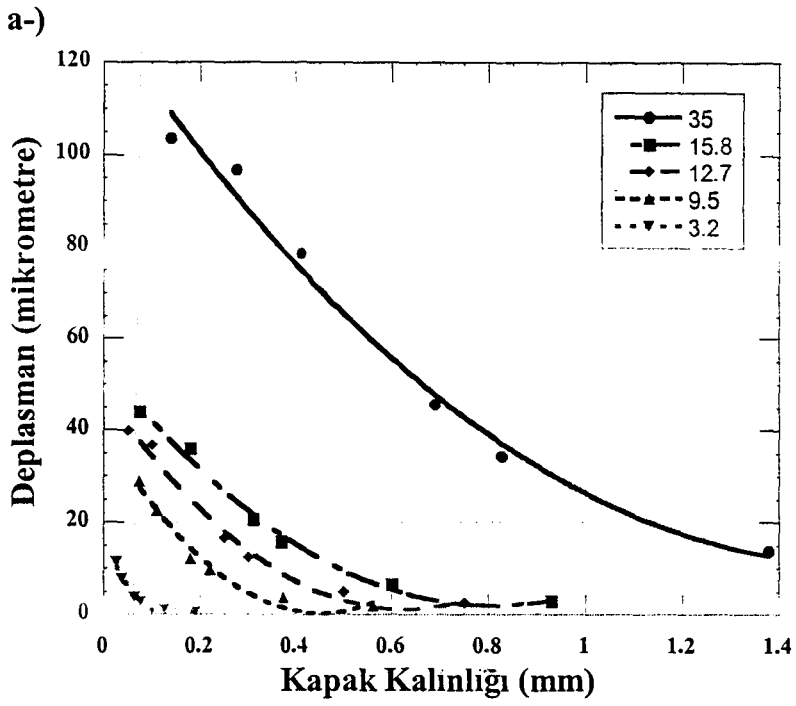
Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış, metal kapak kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi Şekil 3.14 ve Çizelge 3.10'da görülmektedir. Metal incelidikçe transdüserin gösterdiği deplasmanda azalmaktadır. Bunun sebebi ise, metalin incilmesiyle birlikte deformasyon özelliğinin artmasıdır. Metal kalınlaştıkça ise metal yaylanma özelliği gösterememektedir. Kalınlıktaki artış ilk başlarda deplasmanda hızlı bir düşüşe sebep olmakta, metal kalınlaştıkça ise artık metal çok az yay özelliği gösterdiğinden değişim olmamaktadır.

Pirinç kapak ve metal kapak karşılaştırıldığında ise kalınlığın arttıkça deplasman değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Metal kalınlaştıkça malzemenin deformasyon özelliği çok düştüğünden, elastik modül etkisi en aza inmektedir. 3.2 mm çapa sahip transdüserde, en kalın kapak boyutunda değişik kapaklı transdüserlerin gösterdikleri deplasman farkı sadece 0.14 μm dır.

PZT kalınlığının deplasman üzerindeki etkisini göstermek amacıyla hesaplanmış değerler Şekil 3.15 ve Çizelge 3.11'de verilmiştir. PZT kalınlığının artmasıyla birlikte transdüserin gösterdiği deplasmanda artmaktadır. Pirinç kapaklı standart boyutlardaki transdüserde PZT kalınlığı 0.1 mm'den 1 mm'e çıkarıldığında deplasmanda 3.6 μm 'dan 16.60 μm 'a kadar çıkmaktadır. Bu keskin değişimin sebebi ise PZT kalınlığının artması ile birlikte, seramiğin büzüşmesi esnasında oluşan boyuna atılımın artmasıdır. Eşitlik 3.4 te görüldüğü üzere bu boyuna deplasmanın artması, transdüserin toplam deplasmanını da artırmaktadır.

Çizelge 3.10 Kapak kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi

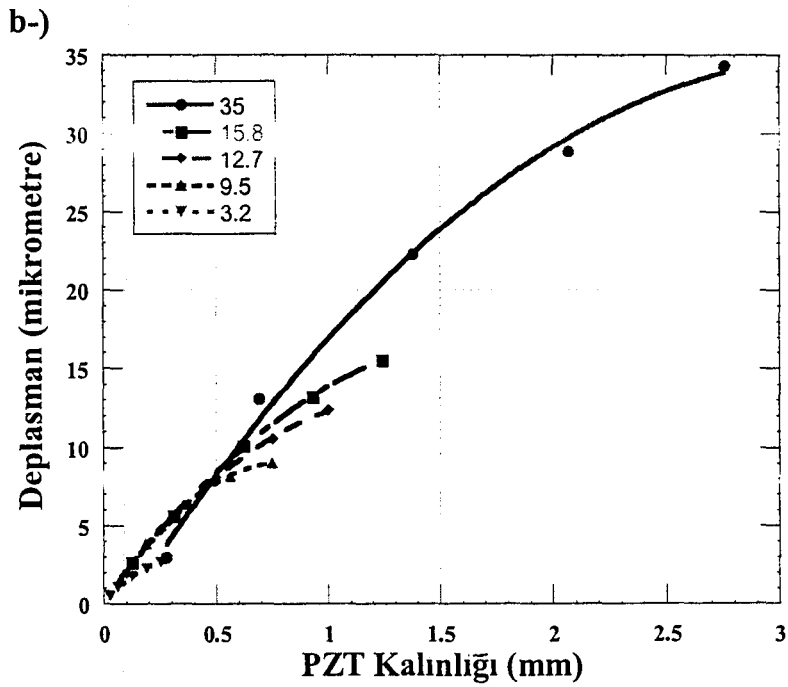
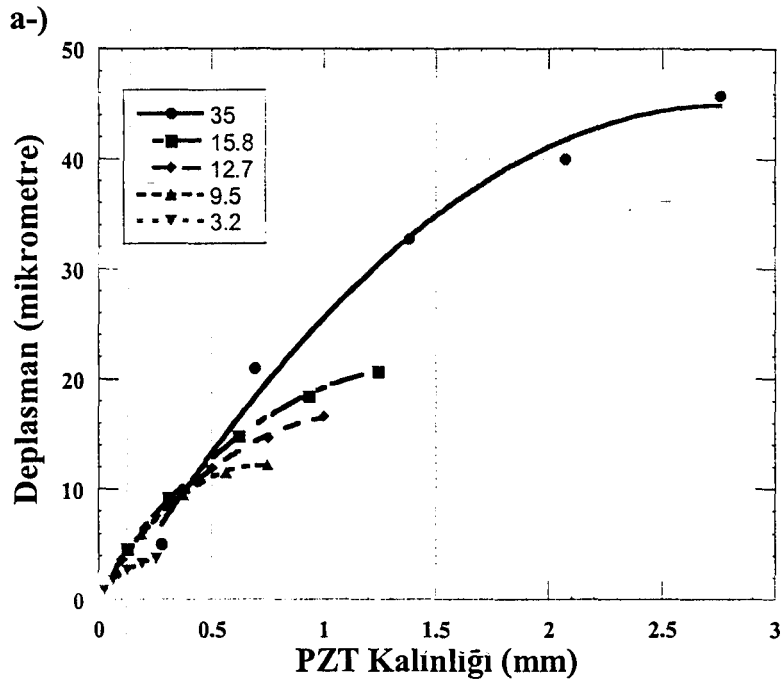
Transdüser Çapı (mm)	Kapak Kalınlığı (mm)	Deplasman (μm) Pirinç Kapak	Deplasman (μm) Çelik Kapak
35	1.37	13.78	9.38
35	0.82	34.32	29.24
35	0.69	45.80	34.32
35	0.41	78.74	64.66
35	0.27	96.72	84
35	0.14	103.60	95.40
15.8	0.93	3	2.2
15.8	0.60	6.62	4.66
15.8	0.37	15.78	11.46
15.8	0.31	20.68	15.50
15.8	0.18	36	29
15.8	0.12	44	40
12.7	0.75	2.58	1.86
12.7	0.5	4.96	3.40
12.7	0.3	12.48	9.04
12.7	0.25	16.60	12.36
12.7	0.1	36.76	32.00
12.7	0.05	39.8	36.96
9.5	0.56	1.94	1.43
9.5	0.37	3.80	2.63
9.5	0.33	9.70	7.00
9.5	0.18	12.18	9.02
9.5	0.11	22.60	18.41
9.5	0.07	28.84	24.70
3.2	0.19	0.66	0.52
3.2	0.13	1.06	0.78
3.2	0.08	2.64	1.86
3.2	0.06	3.77	2.72
3.2	0.04	7.78	6.00
3.2	0.02	11.34	9.40
3.2	0.01	14.20	12.8



Şekil 3.14 Transdüser çapı ve metal kapak kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Çizelge 3.11 PZT kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı (mm)	Seramik Kalınlığı (mm)	Deplasman (μm) Pirinç Kapak	Deplasman (μm) Çelik Kapak
35	2.76	45.8	34.32
35	2.06	40.00	28.86
35	1.38	32.70	22.24
35	0.69	21.00	13.06
35	0.28	5.06	2.94
15.8	1.24	20.68	15.50
15.8	0.93	18.44	13.20
15.8	0.62	14.80	10.10
15.8	0.31	9.20	5.60
15.8	0.12	4.60	2.66
12.7	1.00	16.60	12.36
12.7	0.75	14.62	10.52
12.7	0.5	11.86	8.08
12.7	0.25	7.60	4.76
12.7	0.1	3.66	2.00
9.5	0.75	12.18	9.02
9.5	0.56	11.50	8.20
9.5	0.37	9.54	6.40
9.5	0.19	6.00	3.88
9.5	0.07	2.80	1.60
3.2	0.25	3.77	2.72
3.2	0.19	3.28	2.28
3.2	0.13	2.70	1.78
3.2	0.06	1.74	1.08
3.2	0.02	0.82	0.50



Şekil 3.15 Transdüser çapı ve PZT kalınlığının deplasman üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Metal kapak ve PZT kapak değişiklikleri deplasmanı aynı matematiksel ifadeyle etkilemektedir. Her ikisi içinde değişen katsayılar Çizelge 3.12 ve 3.13’de verilmiştir.

$$Y = M0 + M1*x + M2*x^2 \quad 3.9$$

Çizelge 3.12 Metal kapak kalınlığı eşitliği için katsayı değerleri

Çap (mm)	M0		M1		M2	
	Pirinç	çelik	pirinç	Çelik	pirinç	Çelik
3.2	15.43	12.67	-219.5	-186.86	758.67	658.41
9.5	39.15	33.67	-171.95	-156.64	190.48	179.15
12.7	48.10	44.26	-150.39	-151.05	120.49	127.47
15.8	54.03	48.45	-128.85	-127.33	79.79	84.12
35	129.13	120.3	-163.44	0.88	48.66	59.92

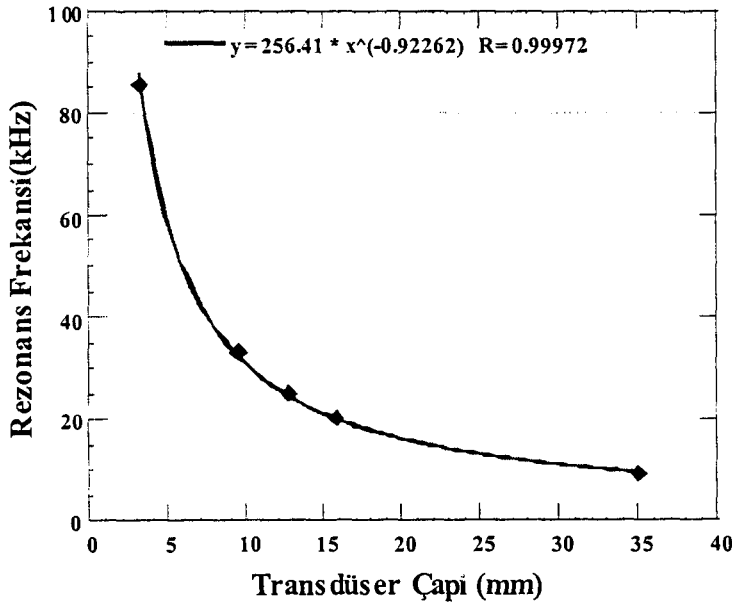
Çizelge 3.13 PZT kalınlığı eşitliği için katsayı değerleri

Çap (mm)	M0		M1		M2	
	Pirinç	çelik	pirinç	Çelik	pirinç	Çelik
3.2	0.28	0.13	24.68	16.07	-44.67	-24.19
9.5	0.60	0.08	22.16	22.17	-22.59	-13.69
12.7	1.29	0.24	26.92	19.23	-11.74	-7.17
15.8	1.46	0.36	27.44	18.88	-9.68	-5.39
35	-2.00	-2.12	33.53	22.39	-5.90	-3.38

3.3.2 Geometrik Değişimlerin İlk Rezonans Frekansına Etkisi

3.3.2.1 Transdüser Çapı

Daha önceden de belirtildiği gibi modelleme esnasında transdüser çapları standart numune baz alınarak 1/4 ve 3 kat şeklinde oranlanmıştır. Aynı şekilde transdüserin diğer boyutları da bu oranlarda değiştirilmiştir. Tüm transdüser çapları için diğer boyutlardaki değişimlerin etkileri aşağıda açıklanmıştır. Bu şekillerde transdüser boyutundaki küçülme veya büyümenin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkileri de görülmektedir. Pirinç kapaklı cihaz için eğer standart numunenin çapı 3.2 ye düşürülürse ve diğer boyutlarda bu şekilde oranlanırsa, ilk rezonans frekansı 24.94 kHz'den 85.575 kHz'e yükselmektedir. Transdüser çapı 35 mm'ye yükseltildiğinde ise ilk rezonans frekansı 9.46' ya düşmektedir. Şekil 3.16' da transdüser boyutuyla, rezonans frekansındaki değişimi görülmektedir.



Şekil 3.16 Transdüser çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi (pirinç kapak)

3.3.2.2 Oyuk Çapı

Sonlu elemanlar analizi kullanılarak hesaplanmış, oyuk çapının, zil tipi transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi Şekil 3.17' de gösterilmiştir. Oyuk çapı arttığı zaman zil tipi transdüserin efektif çapı artmaktadır . Eşitlik 1.19 dan de görüldüğü üzere efektif çap ve oyuk çapı arttıkça transdüserin de rezonans frekansı düşmektedir. Temelde, yapının toplam stiffnesinde azalma olmakta ve rezonans frekansıda düşmektedir. Standart transdüser çapı olan için (12.7), oyuk çapı 4-12 mm arasında değiştirildiğinde rezonans frekansında 103 kHz den 12 kHz 'e bir düşüş yaşanmaktadır.

Oyuk çapındaki değişim ilk rezonans frekansı üzerinde en çok etkisi olan geometrik parametredir. Bu büyük değişimin diğer bir sebebide epoksi katmanını genişlemesine de bağlanabilir. Daha önceden yapılmış çalışmalarda epoksi katmanın genişliğinin arttıkça, rezonans frekansında önemli düşüşler olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada da zil tipi transdüserde oyuğun başlangıç noktasına kadar epoksi katmanının sürdüğü kabul edilmiştir. Böylece oyuk çapı azaldıkça, epoksi genişliğide artmaktadır. Bu artışta rezonans frekansı üzerinde büyük değişimlere yol açmaktadır.

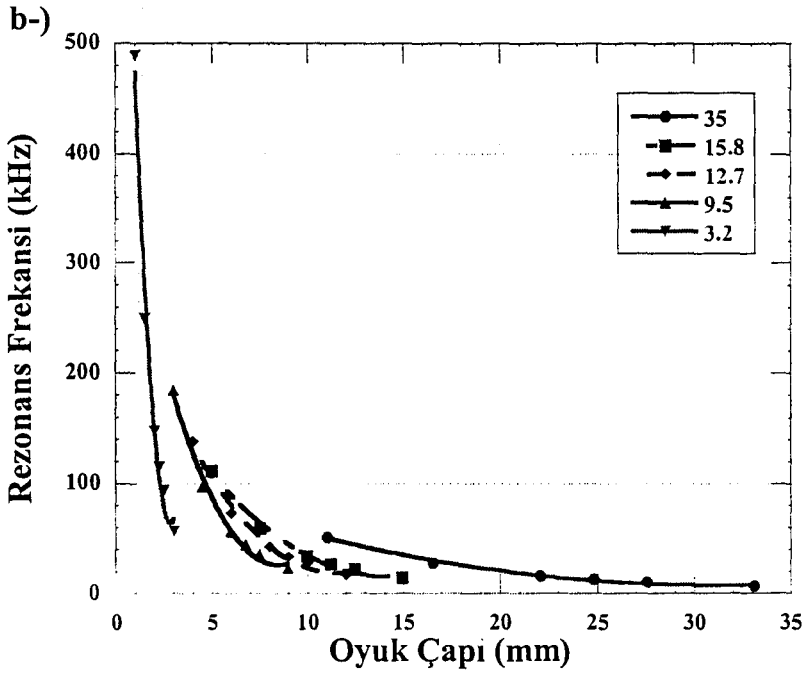
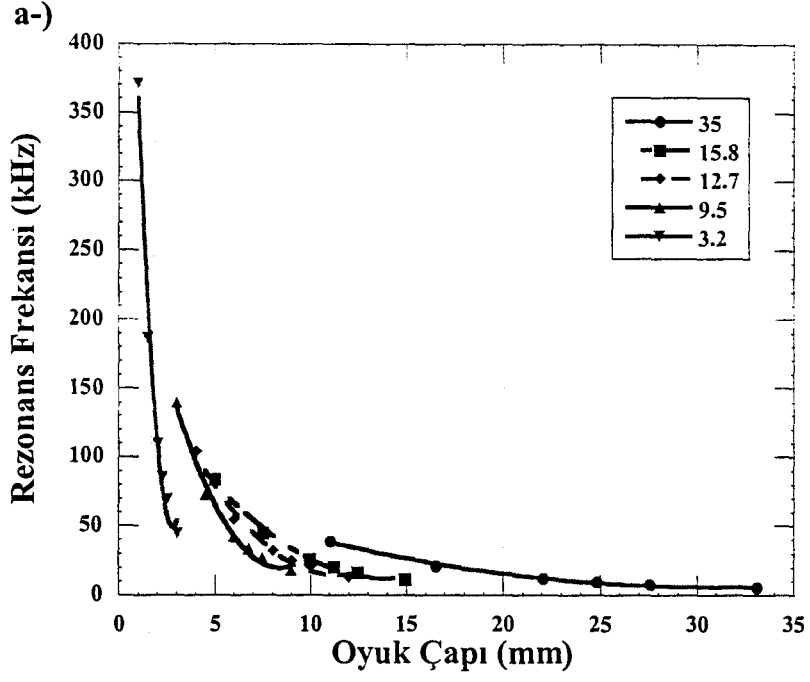
Her iki kapak çeşidini incelediğimizde, tüm transdüser çaplarında, en küçük ve en büyük oyuk çapı için değişimin %10 civarlarında olduğu görülmektedir.

3.3.2.3 Düz Yüzey Çapı

Düz yüzey çapının rezonans frekansı üzerinde oyuk çapı kadar önemli etkisinin olmadığı gözükmektedir. Düz yüzey çapı arttıkça öncelikli olarak, efektif çap azalmakta ve rezonans frekansı artmaktadır. Daha sonra ise efektif çaptaki artış, rezonans frekansını azaltma yönünde bir etki göstermektedir (Şekil 3.18). Bu değişim küçük boyutlu transdüserde daha belirgin oluken, büyük boyutlu transdüserlerde hemen hemen hiç rezonans frekansı değişimi olmamaktadır.

Çizelge 3.14 Oyuk çapının rezonans frekansı üzerindeki etkisi

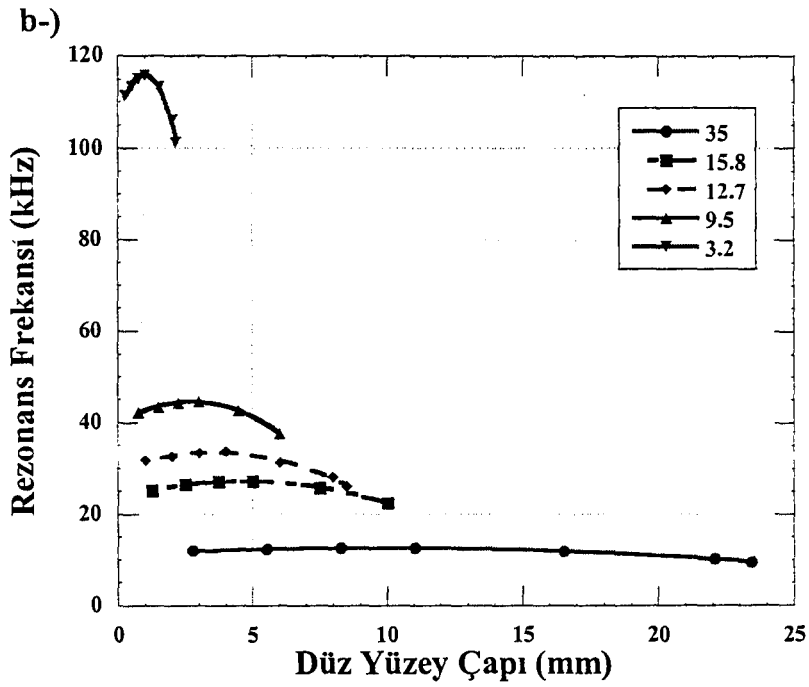
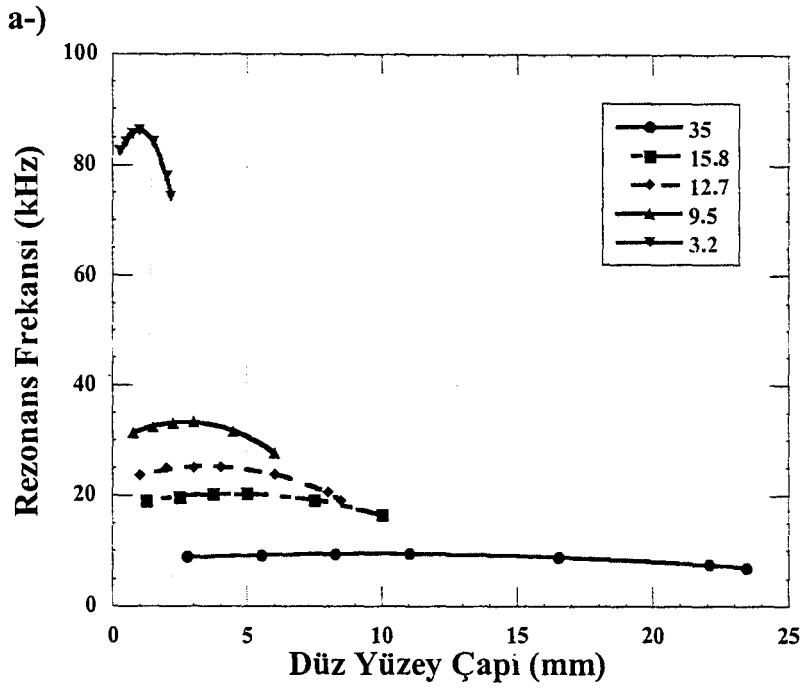
Transdüser Çapı	Oyuk Çapı(mm)	Rezonans Frekansı (kHz) Pirinç Kapak	Rezonans Frekansı (kHz) Çelik Kapak
35	33.07	5.18	6.86
35	27.55	7.60	10.20
35	24.80	9.43	12.66
35	22.04	11.96	16.04
35	16.53	20.73	27.75
35	11.02	38.72	51.41
15.8	14.92	11.07	14.52
15.8	12.44	16.31	21.88
15.8	11.19	20.21	27.11
15.8	9.95	25.59	34.31
15.8	7.46	44.52	59.54
15.8	4.97	84.06	111.51
12.7	12.00	12.91	16.58
12.7	10.00	20.12	27.00
12.7	9.00	24.94	33.46
12.7	8.00	31.59	42.36
12.7	6.00	54.81	73.28
12.7	4.00	103.96	137.84
9.5	8.97	18.09	23.59
9.5	7.48	26.77	35.93
9.5	6.73	33.09	44.38
9.5	5.98	42.05	56.35
9.5	4.48	73.07	97.59
9.5	2.99	139.65	184.71
3.2	3.02	44.40	56.34
3.2	2.52	69.37	93.53
3.2	2.26	85.57	115.11
3.2	2.01	109.58	147.08
3.2	1.51	186.67	249.05
3.2	1.00	371.23	488.72



Şekil 3.17 Transdüser çapı ve oyuk çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Çizelge 3.15 Düz yüzey çapının rezonans frekansı üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı	Düz Yüzey Çapı (mm)	Rezonans Frekansı (kHz) Pirinç Kapak	Rezonans Frekansı (kHz) Çelik Kapak
35	22.04	7.53	10.33
35	16.53	8.83	11.94
35	11.04	9.49	12.72
35	8.26	9.43	12.66
35	5.51	9.19	12.37
35	2.75	8.88	11.98
15.8	10.00	16.44	22.50
15.8	7.50	19.08	25.76
15.8	5.00	20.35	27.28
15.8	3.73	20.21	27.11
15.8	2.48	19.70	26.50
15.8	1.24	19.06	25.27
12.7	8.00	20.53	28.08
12.7	6.00	23.66	31.93
12.7	4.00	25.12	33.67
12.7	3.00	24.94	33.46
12.7	2.00	24.39	32.72
12.7	1.00	23.56	31.77
9.5	6.00	27.58	37.62
9.5	4.48	31.60	42.62
9.5	3.00	33.35	44.69
9.5	2.24	33.09	44.38
9.5	1.49	32.32	43.44
9.5	0.74	31.31	42.22
3.2	2.01	78.03	106.07
3.2	1.91	84.04	113.30
3.2	1.00	86.21	115.87
3.2	0.75	85.57	115.11
3.2	0.50	84.16	113.40
3.2	0.25	82.45	111.31



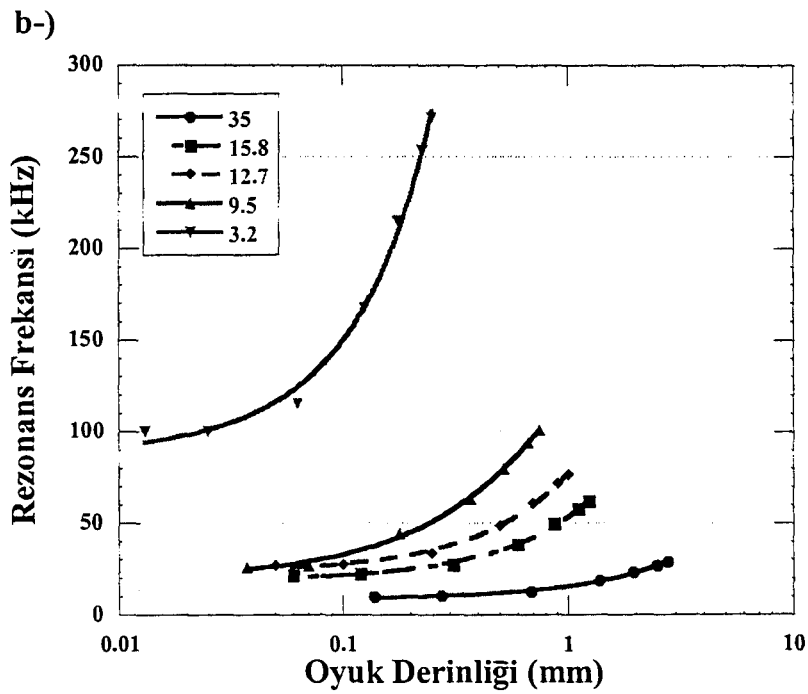
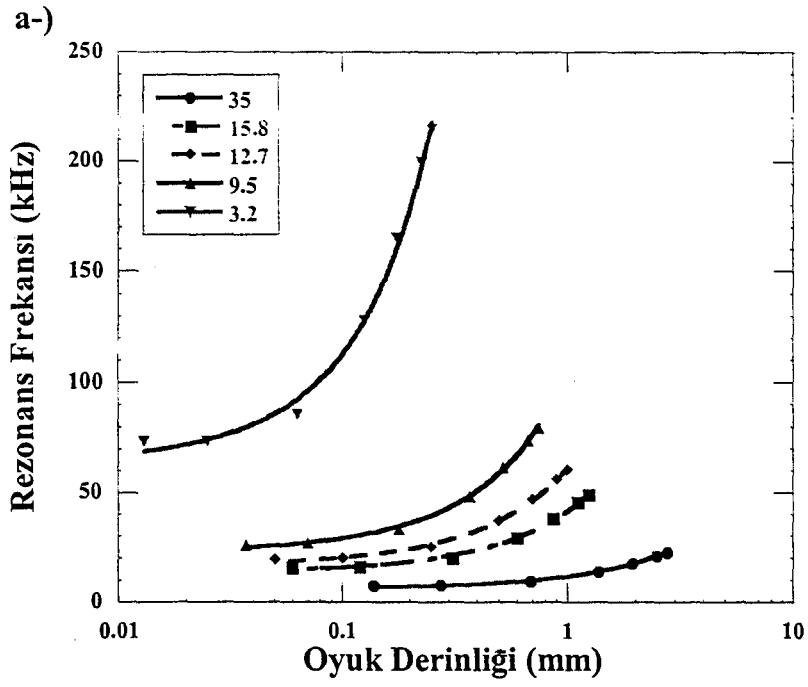
Şekil 3.18 Transdüser çapı ve düz yüzey çapının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

3.3.2.4 Oyuk Derinliği

Sonlu elemanlar analizi kullanılarak hesaplanan oyuk derinliği ve rezonans frekansı arasındaki ilişki Şekil 3-19 ve Çizelge 3-16 'da görülebilir. Oyuk derinliğinin artmasıyla rezonans frekasındaki artışıda efektif çaptaki azalışa bağlanabilir. Eşitlik 1-19'da efektif çapın azalmasıyla rezonans frekansının artacağı gzlmektedir. Standart transdüser çapı için 0.1 mm ve 1 mm arasında değiştirilmiş, rezonans frekansı ise 20 kHz'den 60 kHz'e kadar yükselmiştir. Diğer transdüser çaplarında da değişim, en küçük ve en büyük oyuk derinliği için, % 33 civarlarında görülmektedir. 35 mm transdüser çapı olan bir pirinç kapaklı zil tipi transdüserde, oyuk derinliği 0.27 mm iken rezonans frekansı 7 kHz'e kadar düşmüştür. Diğer yandan 3.2 mm transdüser çapına sahip olan pirinç kapaklı zil tipinde oyuk derinliği 0.25 iken ilk rezonans frekansı 215 kHz civarında görülmektedir.

Çizelge 3.16 Oyuk derinliğinin rezonans frekansı üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı	Oyuk Derinliği (mm)	Rezonans Frekansı (kHz) Pirinç Kapak	Rezonans Frekansı (kHz) Çelik Kapak
35	2.75	22.74	28.78
35	2.48	21.20	26.99
35	1.93	17.77	22.93
35	1.38	14.01	18.34
35	0.69	9.43	12.66
35	0.27	7.52	10.31
15.8	1.24	48.99	61.93
15.8	1.11	45.47	57.86
15.8	0.87	38.28	49.33
15.8	0.60	29.40	38.50
15.8	0.31	20.21	27.11
15.8	0.12	16.23	22.22
12.7	1.00	60.59	76.57
12.7	0.90	56.45	71.76
12.7	0.70	47.25	60.87
12.7	0.50	37.14	48.56
12.7	0.25	24.94	33.46
12.7	0.10	20.09	27.49
9.5	0.75	79.64	100.62
9.5	0.67	73.81	93.85
9.5	0.52	61.65	79.45
9.5	0.37	48.34	63.25
9.5	0.18	33.09	44.38
9.5	0.07	26.96	36.84
3.2	0.25	214.84	271.70
3.2	0.23	199.60	253.48
3.2	0.18	164.99	212.50
3.2	0.13	127.92	167.44
3.2	0.06	85.57	115.11
3.2	0.02	73.28	100.00



Şekil 3.19 Transdüser çapı ve oyuk derinliğinin transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

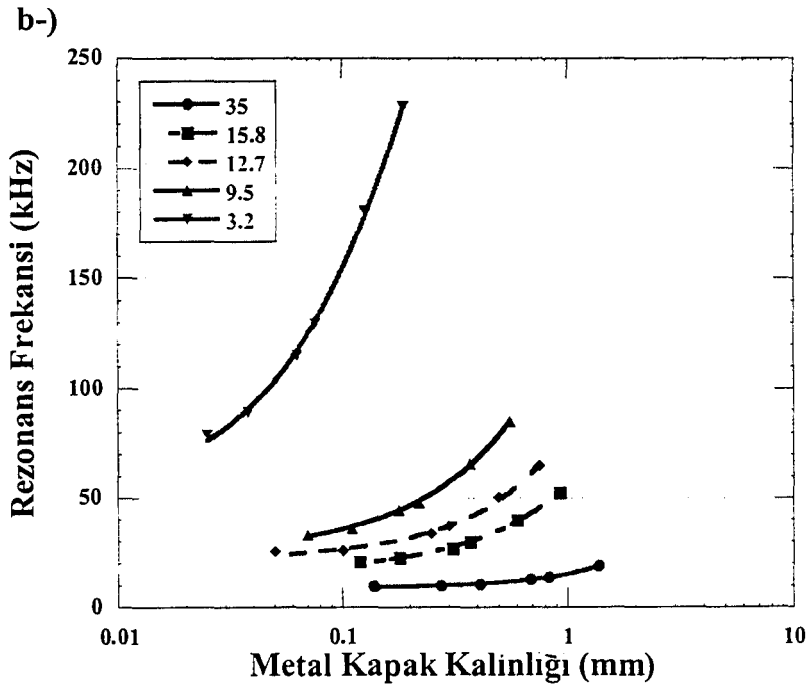
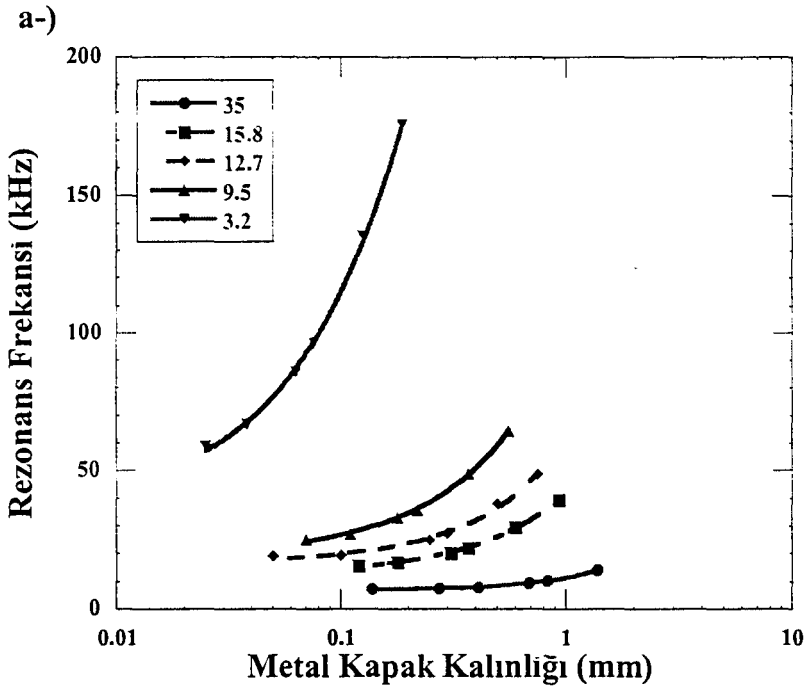
3.3.2.5 Metal Kapak ve PZT Kalınlığı

Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan, pirinç ve çelik kapaklı transdüserler için, değişik transdüser çapında ve metal kapak kalınlıklarında ilk rezonans frekansları Şekil 3.20 ve Çizelge 3-17'de verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki; metal kapak kalınlığı azaldıkça transdüserin ilk rezonans frekansında düşmektedir. Pirinç kapaklı standart transdüser çapı için, kapak kalınlığı 0.75 mm'den 0.05'e düşürüldüğünde rezonans frekansında 48.83 kHz'den 18.89 kHz'e kadar düşmektedir. Kapak kalınlığı azaldığında metalin bağıl elastik modulde düşmekte ve buna bağlı olarak rezonans frekansında da düşmeler yaşanmaktadır.

PZT kalınlığı için hesaplanmış rezonans frekansı değerleri ise Şekil 3.21 ve Çizelge 3-18'de görülmektedir. Büyük transdüser boyutlarında PZT kalınlığının rezonans frekansı üzerindeki etkisi çok küçük olurken, transdüser boyutu küçüldükçe bu etki artmaktadır. Pirinç kapaklı zil tipi transdüserde, 35 mm transdüser çapında rezonans frekansları 9.43-8.67 kHz değerleri arasında değişirken, 3.2 mm transdüser çapında rezonans frekansları 85.57-81.43 kHz arasında değişmektedir. Bu sonuçta, numune boyutu küçüldükçe, transdüserin geometrik değişimlere daha hassas tepki verdiğini göstermektedir. Genede PZT kalınlığının etkisi diğer boyut değişimlerinin rezonans frekansı üzerindeki etkilerine göre çok daha düşüktür.

Çizelge 3.17 Kapak kalınlığının rezonans frekansı üzerindeki etkisi

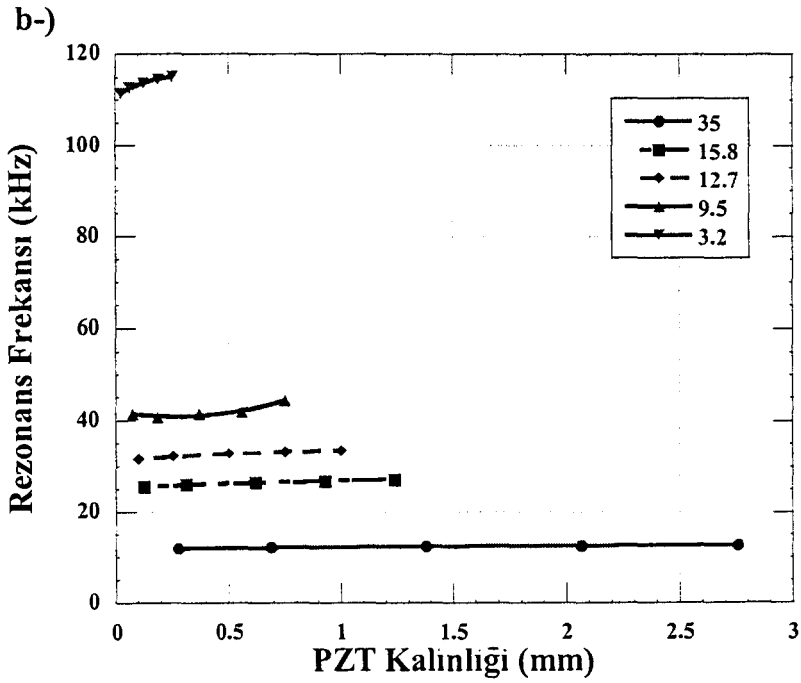
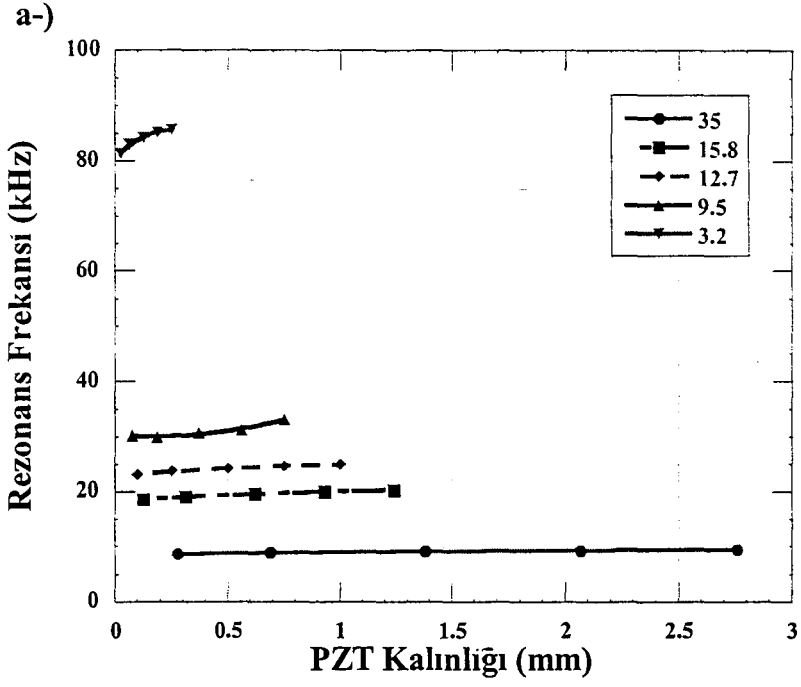
Transdüser Çapı (mm)	Kapak Kalınlığı (mm)	Rezonans Frekansı (kHz) Pirinç Kapak	Rezonans Frekansı (kHz) Çelik Kapak
35	1.37	14.10	18.97
35	0.82	10.33	13.89
35	0.69	9.43	12.66
35	0.41	7.91	10.54
35	0.27	7.38	9.83
35	0.14	7.15	9.63
15.8	0.93	39.52	52.51
15.8	0.60	29.60	39.79
15.8	0.37	22.11	29.71
15.8	0.31	20.21	27.11
15.8	0.18	16.92	22.52
15.8	0.12	15.59	20.75
12.7	0.75	48.83	60.76
12.7	0.5	37.92	50.37
12.7	0.3	27.39	36.80
12.7	0.25	24.94	33.46
12.7	0.1	19.22	36.76
12.7	0.05	18.95	25.46
9.5	0.56	64.17	84.89
9.5	0.37	49.09	65.58
9.5	0.33	35.69	47.93
9.5	0.18	33.09	44.38
9.5	0.11	27.08	36.09
9.5	0.07	25.00	33.31
3.2	0.19	175.55	227.87
3.2	0.13	135.33	180.68
3.2	0.08	96.11	129.29
3.2	0.06	85.57	115.11
3.2	0.04	66.62	89.24
3.2	0.02	58.58	78.60
3.2	0.01	56.67	76.29



Şekil 3.20 Transdüser çapı ve metal kapak kalınlığının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

Çizelge 3.18 PZT kalınlığının rezonans frekansı üzerindeki etkisi

Transdüser Çapı (mm)	Seramik Kalınlığı (mm)	Rezonans Frekansı (kHz) Piriç Kapak	Rezonans Frekansı (kHz) Çelik Kapak
35	2.76	9.43	12.66
35	2.06	9.35	12.57
35	1.38	9.15	12.35
35	0.69	8.90	12.13
35	0.28	8.67	11.95
15.8	1.24	20.21	27.11
15.8	0.93	19.97	26.83
15.8	0.62	19.65	26.50
15.8	0.31	19.13	26.04
15.8	0.12	18.68	25.69
12.7	1.00	24.94	33.46
12.7	0.75	24.66	33.14
12.7	0.5	24.27	32.74
12.7	0.25	23.68	32.20
12.7	0.1	23.11	31.75
9.5	0.75	33.09	44.38
9.5	0.56	31.19	41.94
9.5	0.37	30.68	41.41
9.5	0.19	29.97	40.76
9.5	0.07	30.21	41.53
3.2	0.25	85.57	115.11
3.2	0.19	85.04	114.54
3.2	0.13	84.27	113.77
3.2	0.06	83.01	112.63
3.2	0.02	81.73	111.56



Şekil 3.21 Transdüser çapı ve PZT kalınlığının transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi a) pirinç kapak b) çelik kapak

4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hızla gelişen transdüser teknolojisinde yeni tepkileyici tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yeni tasarımlar arasında zil tipi transdüser sağladığı ortalama deplasman ve oluşan kuvvet ile bir çok uygulama için ön plana çıkmaktadır. Özellikle hidrofon, tepkileyici, ultrasonik motor ve ivme ölçer uygulamalarında yüksek oranda kullanım potansiyeli göstermektedirler. Daha önce yapılan çalışmalarda zaman darlığı sebebiyle sadece bir transdüser çapı üzerinde çalışmalar yapılmış ve bu çap sabit kalırken diğer geometrik ölçüler değiştirilip transdüserin özelliklerine bakılmıştır.

Bu tezde, zil tipi transdüserlerin tepkileyici karakterlerini optimize etmek ve uygulama alanlarına göre hangi boyut ve malzemelerde zil tipi tasarımı yapılacağına belirlenmesi amacıyla geniş bir boyut ve malzeme dağılımında çalışmalar yapılmıştır. Fakat bu kadar çok değişkenin bir arada olduğu çalışma, deneysel olarak gerçekleştirildiğinde hem zaman hem de maliyet açısından verimli olmamaktadır. Bu yüzden çalışmalar esnasında sonlu elemanlar analizinden faydalanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi yük altındaki yapıyı ayrı ayrı elemanlardan oluşacak şekilde inşa eder ve her bir eleman için karmaşık denklemleri kullanarak, yapının yük altındaki davranışlarını bulur. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, sonlu elemanlar analizini kullanmak hem zamandan hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada da ANSYS sonlu elemanlar paket programından faydalanılarak zil tipi transdüser modellenmiş ve elektrik alanı altında davranışları incelenmiştir.

Öncelikli olarak modelleme sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda rezonans frekansları tam uyumluluk sağlarken, deplasman davranışları aynı olmasına rağmen, deplasmanda hesaplanan sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında ufak bir farklılık meydana gelmektedir. Bunu ANSYS programının sadece doğrusal piezoelektrik etkiyi hesaplamasıyla açıklayabiliriz.

Modelleme sonuçlarının doğrulanmasından sonra, sonlu elemanlar analizinde boyut ve malzeme etkileri incelenmiştir. En önemli tepkileyici özellikleri olan rezonans frekansı ve deplasman zil tipi transdüseri optimize etmek için kullanılmıştır. Metal kapak malzemesi olarak çelik, pirinç, tungsten ve titanyum seçilmiştir. Sürücü eleman olarak ise yumuşak PZT'ler olan PZT5, PZT552 ve sert PZT'ler olan PZT4 ve PZT8 kullanılmıştır. En yüksek deplasman değerini pirinç kapaklı transdüserler vermiştir.

Zil tipi transdüserin boyutlarının da uygulama özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Bu amaçla analizler esnasında, kapak kalınlığı, PZT kalınlığı, oyuk derinliği ve çapı, transdüser çapı değiştirilmiş ve optimum değerlerin bulunmasına çalışılmıştır. Bu geometrik parametrelerden deplasman ve rezonans frekansını en çok etkileyen parametreler olarak oyuk derinliği ve çapı olarak bulunmuştur. Ayrıca transdüser çapının ve kapak kalınlığının da transdüser özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. PZT kalınlığı ve malzemesi ise önemli değişikliklere sebep olmamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda zil tipi transdüser üç boyutlu olarak modellenip rezonans modlarının hareketi daha detaylı olarak incelenebilir. Ayrıca oluşan kuvvet karakteristiğini bulmak amacıyla, sonlu elemanlar analizinde malzeme üstüne statik bir kuvvet uygulanarak modelleme yapılabilir. Oluşan kuvvet karakteristiğinin de bulunmasıyla, deplasmanla arasındaki ilişki net olarak açıklanabilir. Böylece yapının tüm tepkileyici özellikleri bir arada değerlendirilebilir. Son olarak kapak şekli değiştirilerek aynı modelleme çalışmaları yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

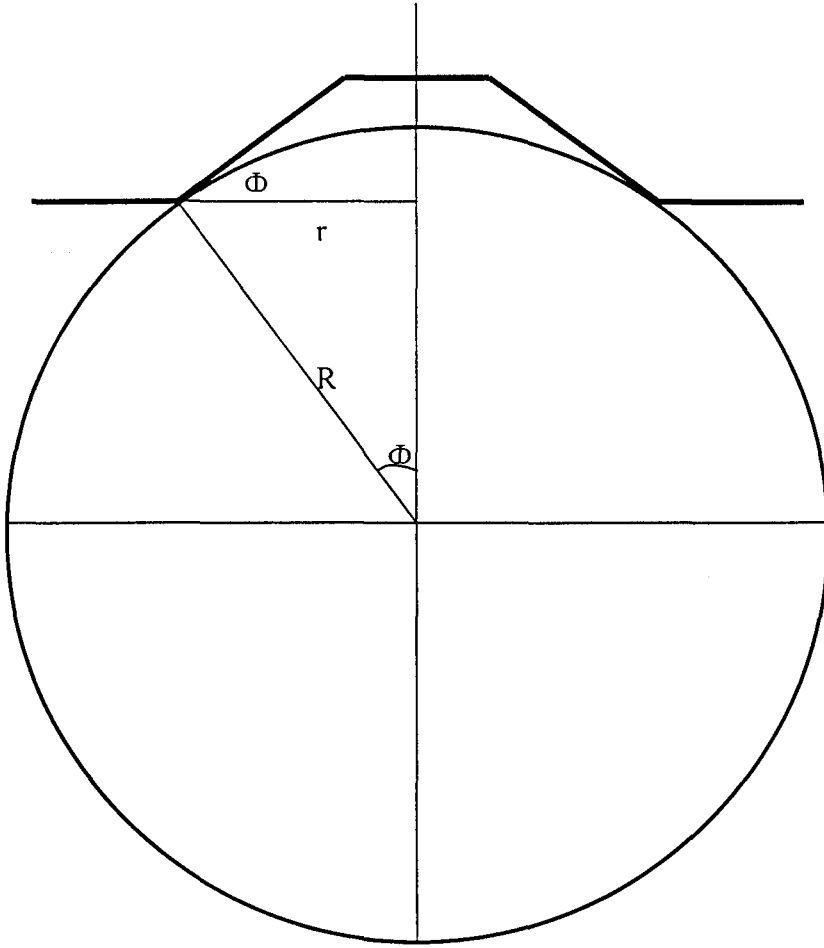
1. KHAZAN, A. D., Transducers and Their Elements: Design and Application, PTR Prentice Hall, 1994.
2. MORIYAMA, S, Mechanical Design 27, No.1, 32, 1983.
3. UCHINO, K., Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors, Kluwer Academic Publishers, 1997.
4. NEWNHAM, R. E., RUSCHAU, G. R., Smart Electroceramics, J. Am. Ceram. Soc., 74(3), 463-480, 1989
5. WAYMAN, C. M., Shape Memory Alloys, MRS Bulletin, 18(4), 49-56, 1993
6. HATHAWAY, B. K., CLARK, A. E., Magnetostrictive Materials, MRS Bulletin, 18(4), 34-41, 1993
7. LASKY, M., Review of Undersea Acoustics to 1950, J. Acoust. Soc. Am., 61(2), 283-297, 1997
8. BUCHANAN, Z. C., Ceramic Materials for Electronics: Processing, Properties and Applications, Second Edition, Marcel Deccer Inc., 1991
9. RANDERAAT, J., SETTERINGTON, R. E., Piezoelectric Ceramics, N. V. Philips Publishing, 1974
10. WILSON, O. B., Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, Peninsula Publishing, 1988
11. CROSS, E. L., YOUNG, S. J., NEWNHAM, R. E., NOMURA, S., UCHINO, K., Large Electrostrictive Effects in Relaxor Ferroelectrics, Ferroelectrics, 23, 187, 1980
12. RITTENMEYER, K. M, TING, R. Y., New Piezoelectric Ceramics for Sonar Applications, Electronic Materials: Technology, Here and Now, Fifth International SAMPE electronics Conference, vol. 5, NY, 1991
13. CIEMINSKI, V. J., BEIGE, H., J. Phys D, 24, 1182, 1991
14. UCHINO, K., Piezoelectric/Electrostriktive Actuators, Morishita Shuppan, 1986
15. TAKASHASHI, S., Japanese Journal of Applied Physics, 24, 1985

16. TRESSLER, F. J., CAO, W., UCHINO, K., Finite Element Analysis of the Cymbal-Type Flextensional Transducer, IEEE Transactions on Ultrasonic: Ferroelectrics and Frequency Control 45, 5, 1363-1368, 1998
17. HAERTLING, G. H., Rainbow Ceramics- a New Type Ultra High Displacement Actuator, Am. Cer. Soc. Bull., 73, 93-96, 1994
18. BUTTLER, S. C., BUTLER, A. L., BUTLER, J. L., Directional Flextensional Transducer, J. Acoust. Soc. Am., 92(5), 2977-2979, 1992
19. CHIN, L. C., VARADAN, V. V., VARADAN, K., Finite Element Analysis of Flextensional Electroacoustic Transducer, IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 481-484, 1991
20. ROLT, K. D., History of the Flextensional Transducer, J. Acoust. Soc. Am., 87(3), 1340-1348, 1990
21. ROYSTER, L. H., The Flextensional Concept: A New Approach to Design of Underwater Acoustic Transducers, Appl. Acoustics, 3, 117-126, 1970
22. NEWNHAM, R.E., XU, Q. C., YOSHIKAWA, S., Metal-Electroactive Ceramic Composite Actuators, U.S. Patent , 5, 276, 657, 1994
23. SUGARAVA, Y., ONITSUKA, K., YOSHIKAWA, S., XU, Q.C., NEWNHAM, R.E, Metal-Ceramic Composite Actuators, J. Am. Ceram. Soc., 75(1), 996-998, 1992
24. DOĞAN, A., XU, Q. C., ONITSUKA, K., YOSHIKAWA, S., UCHINO, K., NEWNHAM, R.E, High Displacement Metal-Ceramic Actuators, Ferroelectrics, 156, 1-6, 1994
25. ONITSUKA, K., DOĞAN, A., TRESSLER, F., XU, Q. C., YOSHIKAWA, S., NEWNHAM, R.E, Metal-Ceramic Composite Transducers: The Moonie, J. Intell. Mat. Sys. And Struct., 6, 447-455, 1995
26. ONITSUKA, K., Ph. D. Thesis: Effects of Bonding and Geometry on the Flextensional Transducer Moonie, The Pennsylvania State University, 1993
27. SUGARAVA, Y., M. S. Thesis: Development of Metal Ceramic Composite Piezoelectric Actuators and Their Applications, Tokyo Sophia University, 1991
28. ONITSUKA, K., DOĞAN, A., XU, Q. C., YOSHIKAWA, S., NEWNHAM, R.E, Design Optimization for Metal-Ceramic Composite Actuator, Ferroelectrics, 156, 37-42, 1994

29. DOĞAN, A., UCHINO, K., NEWNHAM, R.E, Composite Piezoelectric Transducers with Truncated Conical Endcaps, *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 44(3), 1997
30. TING, R. Y., Evaluation of New Piezoelectric Composite Materials for Hydrophone Applications, *Ferroelectrics*, 67, 143-157, 1986
31. TING, R. Y., A. Review on the Development of Piezoelectric composites for Underwater Applications, *IEEE Transactions on Inst.*, 41(1), 64-67, 1992
32. XU, Q. C., YOSHIKAWA, S., BELSICK, J. R., NEWNHAM, R. E., Piezoelectric Composites with High sensitivity and Capacitance for Use at High Pressure, *IEEE Trans. On UFFC*, 38,634-639, 1991
33. TRESSLER, J. F., DOĞAN, A., FERNANDEZ, J. F., FIELDING, J. F., UCHINO, K., NEWNHAM, R. E., Capped Ceramic Hydrophone, *IEEE Ultrasonic Symposium Proceeding*, 897-900, 1995
34. DOĞAN, A., Ph.D Thesis: Flexensional Moonie and Cymbal Actuators, Penn. State, 1994
35. KOÇ, B., DOĞAN, A., FERNANDEZ, J. F., UCHINO, K., NEWNHAM, R. E., Accelerometer Application of the Modified Moonie (Cymbal) Transducer, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35(1), 4547-4549, 1996
36. GOTO, H., IMANAKA, K., Super Compact Dual Axis Optical Scanning unit Applying a Torsional Spring Resonator Driven by Piezoelectric Actuator, *Proc. Of SPIE*, 1544, 272-281, 1991
37. KASUGA, M., SATOH, T., TSUKADA, N., *J. Soc. Precis. Eng.*, 57, 63, 1991
38. STUTTS, D., CUMMINGS, J., *Smart Actuator Symp.*, 1994
39. KOÇ, B., DOĞAN, A., XU, Y., NEWNHAM, R. E., UCHINO, K., An Ultrasonic Motor Using a Metal Ceramic Composite Actuator Generating Torsional Displacement, *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 5659-5662, 1998
40. JAFFE, B., COOK, W., JAFFE, H., *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, new York, 1971
41. CHANDRUPATLA, R. T., BELEGENDU, A. D., *Introduction to Finite Element in Engineering*, Prentice Hall Inc., 1991
42. TRESSLER, F., Ph.D Thesis: Capped Ceramic Underwater Sound Projector The Cymbal, Penn. State, 1997

43. ANSYS 5.5 User Manuals, Swanson Analysis System Inc., 1992

EK 1
Efektif Yarıçapın Bulunuşu



$$r/R = \sin\Phi$$