

**ZİL TİPİ PİEZOKOMPOZİT TRANSDÜSER
TASARIMLARI VE AKUSTİK UYGULAMALARI**

Ali Erman ÜZGÜR

Doktora Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2006

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 040204**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ali Erman Üzgür'ün “**Zil Tipi Piezokompozit Transdüser Tasarımları ve Akustik Uygulamaları**” başlıklı **Seramik Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, doktora tezi 15/08/2006 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. AYDIN DOĞAN	
Üye :	Doç. Dr. ENDER SUVACI	
Üye :	Doç. Dr. A. SAVAŞ KOPARAL	
Üye :	Yard. Doç. Dr. METİN ÖZGÜL	
Üye :	Yard. Doç. Dr. HAKAN ŞENEL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

ZİL TİPİ PİEZOKOMPOZİT TRANSDÜSER TASARIMLARI VE AKUSTİK UYGULAMALARI

Ali Erman ÜZGÜR

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

2006, 177 sayfa

Bu çalışmada malzeme ve boyutsal parametrelerin zil tipi (cymbal) transdüserin sualtı ve hava akustik performansına etkileri deneysel ve sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemleriyle çalışılmıştır. FEA ile deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları ispatlandıktan sonra, cymbal transdüserin sualtı performansı ve hidrostatik basınç altındaki davranışlarının tesbiti için FEA kullanılarak geniş bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra cymbal transdüserin hidrostatik basınç altındaki bozunum mekanizmasının sebepleri açıklanmıştır. Daha yüksek bant genişliğine ulaşılması için metal kapakların altındaki oyuk boşluğu polimer ile doldurulmuştur. Böylece visko-elastik sönümlenme yaratılmaya çalışılmıştır. Sualtı çalışmalarına ek olarak cymbal transdüserin hava akustik transdüseri olarak kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır.

Su içerisinde malzeme ve boyutsal parametrelerin değiştirilmesiyle ilk rezonans modunda 3-250 kHz aralığında ayarlama yapılabilmektedir. Ölçek faktörü, oyuk derinliği ve PZT kalınlığının sualtı alıcı/verici (TVR/FFVS) performansı üzerinde güçlü etkileri olduğu bulunmuştur. Ayrıca transdüserin sualtı hassasiyeti ve hidrostatik basınç toleransı üzerine en önemli etkiyi oyuk derinliği ve kapak malzemesinin gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Bant genişliği üzerine yapılan ilk çalışmalarda, bant genişliğinde istenen düzeyin kapak altında polimer kullanımıyla elde edilebileceği gösterilmiştir. En son olarak cymbal transdüserin hava akustik transdüseri olarak kullanılması için geliştirilen yeni tasarımla hava akustik ortamında yüksek değerlerde ses basıncı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cymbal transdüser, elektroakustik, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), tasarım optimizasyonu, piezoelektrik

ABSTRACT

PhD Dissertation

CYMBAL PIEZOCOMPOSITE TRANSDUSER DESIGNS and ACOUSTIC APPLICATIONS

Ali Erman ÜZGÜR

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Ceramic Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Aydın DOĞAN
2006, 177 pages**

The effects of changes in materials and dimensions on the cymbal-type flextensional transducers, in water-loaded and in air were examined experimentally and through finite-element-analysis (FEA). After gaining experience and confidence in the FEA models, extensive parametric studies were performed using FEA to investigate the size and material effects on cymbal underwater transducer characteristics and pressure dependence. The failure mode in cymbal transducers under hydrostatic pressure is described. Cavity beneath the endcaps of the cymbal transducer was partially filled with polymeric media to cause visco-elastic damping in order to reach higher bandwidth. In addition, feasibility of cymbal transducer for air acoustic applications was investigated.

Adjusting the dimensions and materials used for drivers and endcaps provides a range in the fundamental flexural frequency from about 3 to 250 kHz in water. The scaling factor, cavity depth, and PZT thickness had the strongest effects on the projector/receiver performance (TVR/FFVS). It was found that cavity depth and endcap material have a very strong effect on the stability of underwater sensitivity and pressure tolerance of these devices. Initial studies showed that bandwidth of the cymbal transducer can be tuned to the desired value by filling the cavity beneath the endcaps with polymeric materials. Finally, it was showed that the new air acoustic design of piezocomposite cymbal transducer posses very high sound pressure level and it can be used in air acoustic applications.

Keywords: Cymbal transducer, electroacoustic, Finite Element Analysis (FEA), optimization, piezoelectricity

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bilgi ve desteğini hep yanımda bulduğum, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum değerli danışman hocam Prof. Dr. Aydın Doğan'a en derin şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarımın yönlendirilmesi ve değerlendirilmesinde bana yol gösterici olan tez izleme jürimdeki hocalarım Doç. Dr. Ender Suvacı ve Doç. Dr. Savaş Koparal'a da teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım süresince bana her türlü desteği veren başta oda arkadaşım Dr. Şeniz R. Kuşhan Akın'a ve tüm bölüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. Grubumuzdaki çalışma arkadaşlarım Göktuğ Günkaya, Ceren Pekşen, Mevlüt Gürbüz ve Onur Gençöğlü'na ise ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında beni Pennsylvania State Üniversitesi'ne davet ederek doktora çalışmalarımın gelişmesinde büyük rol oynayan ve bana aileden biri gibi davranan Prof. Dr. Robert E. Newham ve eşi Patricia Newnham'a çok teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca sevgi ve desteklerini her zaman yanımda hissettiğim annem Nesrin Üzgür, babam Metin Üzgür ve tüm aileme çok teşekkürler.

Son olarak yıllardır beni sabırla destekleyen ve sevgisini hiç esirgemeyen eşim Sinem Üzgür'e sonsuz teşekkürler.

A. Erman Üzgür
Eylül-2006

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii

1. GİRİŞ	1
1.1. Piezoelektrik Özellik ve Piezoelektrik Malzemeler.....	1
1.2. Elektroakustik Transdüserler-Giriş.....	9
1.2.1. Empedans ve Admitans.....	10
1.2.2. Empedans ve Admitans Grafikleri.....	11
1.2.3. Akustik Parametreler.....	12
1.2.4. Diğer Uygulama Parametreleri.....	16
1.3. Akustik ve Biomedikal Uygulamalar için Elektroakustik Transdüser Tasarımları.....	17
1.3.1. Düşük Frekansta Çalışan Transdüserler (10-5000 Hz).....	18
1.3.2. Yüksek Frekans Transdüserleri.....	21
1.3.2.1. Cymbal Tip Esnek Kompozit Transdüser.....	25
1.4. Cymbal Transdüserde Simetrisinin Transdüser Tasarımı ve Performans Karakteristiğine Etkisi.....	28
1.5. Cymbal Transdüser için Eşdeğer Devre.....	30
2. AMAÇ	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	34
3.1. Ölçüm Teknikleri.....	35
3.2. Boyut.....	40
3.3. Analitik Teori Ve Sonlu Elemanlar Analizi.....	43

4. CYMBAL TRANSDÜSERİN SUALTI ALICI VE	
PROJEKTÖR PERFORMANSI -	
SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	50
4.1. Titreşim Modları.....	51
4.2. Yönlenme Paternleri.....	52
4.3. Sualtı Performansı.....	53
4.3.1. PZT Malzeme ve Kalınlığının Etkisi.....	56
4.3.2. Oyuk Derinliğinin Etkisi.....	58
4.3.3. Kapak Malzemesi ve Kalınlığının Etkisi.....	61
4.3.4. Oyuk Çapının Etkisi.....	63
4.4. Rezonans Frekansı.....	66
4.4.1. Kapak Malzemesinin ve Kalınlığının Etkisi.....	68
4.4.2. PZT Malzemesinin Etkisi.....	71
4.4.3. Oyuk Derinliğinin Etkisi.....	71
4.4.4. Oyuk Çapının Etkisi.....	72
4.5. Kısım Özeti.....	73
5. CYMBAL TRANSDÜSERİN HİDROSTATİK BASINÇ	
ALTINDA KARARLILIĞI-SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	75
5.1. Kapak Boyutlarının Etkisi.....	81
5.2. Malzeme Etkisi.....	84
5.3. Kısım Özeti.....	91
6. CYMBAL TRANSDÜSERİN GENİŞ BANT ARALIĞI İÇİN	
TASARIM OPTİMİZASYONU	
SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	92
6.1. Transdüser Tasarımları.....	93
6.2. Oyuk Boşluğunda Sıvı ve Polimer Kullanımı.....	94
6.2.1. Oyuk Boşluğunda Polimer.....	102
6.2.1.1 Geometri Etkisi.....	102
6.2.1.2 Malzeme Etkisi.....	119
6.3. Kapak Üstünde Polimer veya Metal Kullanımı.....	131

6.4. 3x3 Seri Analizleri.....	136
6.5. Kısım Özeti.....	139
7. HAVA AKUSTİK CYMBAL TRANSDÜSER-	
SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	141
7.1. Cymbal Hava Akustik Transdüserde Boyut	
Parametrelerinin Etkileri.....	153
7.1.1. Horn Tasarımının ve Malzemesinin Etkileri.....	153
7.1.2. Üst Metal Malzeme Kalınlığının Etkileri.....	166
7.2. Kısım Özeti.....	166
8. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	170
8.1. Cymbal Transdüserin Sualtı Alıcı ve Projektör Performansı.....	170
8.2. Cymbal Transdüserin Hidrostatik Basınç Altında Kararlılığı.....	170
8.3. Cymbal Transdüserin Geniş Bant Aralığı İçin Tasarım	
Optimizasyonu.....	171
8.4. Hava Akustik Cymbal Transdüser.....	171
8.5. Gelecek Çalışmalar.....	172
KAYNAKLAR	174

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Doğrudan ve ters piezoelektrik etki.....	2
1.2. Piezoelektrik element üzerinde etkili kuvvetlerin yönleri.....	4
1.3. PZT için ideal perovskit yapıda iyon pozisyonları.....	6
1.4. Kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonat (PbZrO_3) katı çözeltilisinin denge faz diyagramı.....	7
1.5. Hava ve su ortamında partikül hızı ve akustik basınç arasındaki ilişki.....	13
1.6. Elektroakustik transdüserlerin akustik frekans aralıkları uygulama alanları ve bu uygulama alanlarındaki transdüser tasarımları.....	17
1.7. Bilaminar esnek disk transdüserin şematik gösterimi.....	19
1.8. Esnek transdüser çeşitleri.....	20
1.9. Piezoelektrik seramik–polimer kompozit transdüserlerde dizilimler.....	23
1.10. Tonpils transdüserin yapısının şematik gösterimi.....	24
1.11. Moonie transdüser yapısının şematik gösterimi.....	25
1.12. Cymbal transdüserin kesit görünümü ve referans boyutlar.....	26
1.13. Cymbal serilerinin ultrasonik ilaç taşınımı sisteminde kullanımı.....	27
1.14. Cymbal serilerinin sualtı projektör sistemlerinde kullanımı.....	27
1.15. Cymbal transdüserler için eşdeğer devre.....	30
3.1. Cymbal transdüser üretimi için kullanılan kalıp.....	34
3.2. Kapaklar seramik üstüne yerleştirilirken kullanılan ipek elek ve pozisyon ölçer.....	35
3.3. TVR ölçümü için ARL’de kullanılan ölçüm sisteminin blok diyagramı.....	36
3.4. Hava akustik ölçümü için UME’de kullanılan ölçüm sistemi.....	37
3.5. Hidrostatik basınç altında piezoelektrik katsayı ölçüm sistemi.....	39
3.6. Hidrostatik basınç altında numune ve referans transdüser için tutucu sistemi.....	40

3.7. Piezoelektrik elementin etrafında akustik bir bölge bulunması durumundaki (gaz veya sıvı) notasyonların şematik gösterimi.....	44
3.8. Cymbal transdüserin ANSYS kodu kullanılarak gerçekleştirilen modellemesi.....	48
3.9. Cymbal transdüserin ATILA kodu kullanılarak yapılan sualtı modellemesi.....	49
4.1. Zil tipi transdüserde FEA sonucunda bulunan titreşim modları.....	52
4.2. Zil tipi transdüserin hesaplanan (sol kolon) ve deneysel (sağ kolon) yönlenme paternleri.....	53
4.3. Serbest mekaniksel koşullar altında, 0.32 mm oyuk derinliğine sahip referans boyutlu pirinç kapak ve PZT-5H diskten oluşan cymbal transdüser için deneysel ve FEA (ATILA) ile bulunan TVR spektrumunun karşılaştırılması.....	54
4.4. FEA ile hesaplanan, boyut faktörünün transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	55
4.5. FEA ile hesaplanan, PZT malzemesinin transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	57
4.6. FEA ile hesaplanan, PZT kalınlığının transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	59
4.7. FEA ile hesaplanan, oyuk derinliğinin transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	60
4.8. Oyuk derinliğinin dönüşüm sabiti ve mekaniksel kalite faktörü üzerindeki etkisi.....	61
4.9. FEA ile hesaplanan, kapak malzemesinin transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	62
4.10. FEA ile hesaplanan, kapak kalınlığının transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	64
4.11. FEA ile hesaplanan, oyuk derinliğinin transdüserin sualtı özelliklerine etkisi.....	65
4.12. Referans zil tipi transdüser için FEA ve deneysel admitans spektrumları.....	67

4.13. Zil tipi transdüserlerin FEA ile hesaplanmış havada ve sualtında ilk temel rezonans frekansları.....	68
4.14. Referans boyutlu transdüserde kapak malzemesinin ultrasonik hızının ilk rezonans frekansı üzerindeki deneysel ve hesaplanan etkisi.....	69
4.15. Su yoğunluğunun kapak yoğunluğuna oranına bağlı olarak sualtındaki rezonans frekansının havadaki rezonans frekansından % değişimi.....	69
4.16. Referans transdüserde kapak kalınlığının sualtında ilk rezonans frekansına etkisi.....	70
4.17. Referans transdüserde PZT kalınlık ve malzemesinin sualtında ilk rezonans frekansına etkisi.....	71
4.18 Referans boyutlu transdüserde oyuk derinliğinin sualtında ilk rezonans frekansına etkisi.....	72
4.19. Referans transdüserde oyuk çapının sualtında ilk rezonans frekansına etkisi.....	73
5.1. Değişik oyuk derinliğine sahip cymbal transdüserlerin basınç kararlılığı.....	77
5.2. Basınç altında plastik deformasyona uğramış metal kapaklar.....	78
5.3. Transdüser kapaklarının basınç testinden önce ve sonraki profil haritaları: a) 150 μm b) 320 μm c) 600 μm oyuk derinliği.....	79
5.4. Deneysel çalışmalar esnasında bozunuma sebep olan basınçlardaki gerilme konsantrasyonları.....	80
5.5. Cymbal transdüser üstündeki basma gerilmeleri.....	81
5.6. Değişik oyuk derinliğine sahip cymbal transdüserler için hesaplanan d_h değerleri.....	82
5.7. Değişik oyuk derinliğine sahip cymbal transdüserler için 450 psi basınç altında hesaplanan gerilme konsantrasyonları.....	83
5.8. Değişik boyutlardaki cymbal transdüserlerde değişen oyuk derinliğinin yararlılık katsayısı üzerindeki etkisi.....	84
5.9. Değişik PZT malzemesine sahip cymbal transdüserler için 450 psi basınç altında hesaplanan gerilme konsantrasyonları.....	86

5.10. Yumuşak ve sert PZT den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserler için basınç limitleri ve maksimum etkin d_h değerleri.....	87
5.11. Yumuşak ve sert PZT den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserler için basınç limitleri ve maksimum etkin g_h değerleri.....	87
5.12. Yumuşak ve sert PZT den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserler için basınç limitleri ve maksimum etkin $d_h g_h$ değerleri.....	88
5.13. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde FEA ile hesaplanan hidrostatik piezoelektrik katsayı değişimi.....	89
5.14. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde FEA ile hesaplanan yararlılık katsayısı değişimi.....	90
5.15. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde hesaplanmış basınç limitleri ve d_h değerleri.....	90
6.1. Yeni transdüser tasarımlarının şematik gösterimleri.....	97
6.2 Oyuk boşluğunda polimer bulunan cymbal transdüserin sualtında ATILA FEA kod kullanılarak modellenmesi.....	98
6.3 Oyuk boşluğunda sıvı bulunan cymbal transdüserin sualtında ATILA FEA kod kullanılarak modellenmesi.....	99
6.4. Oyuk boşluğunda sıvı veya poliüretan bulunan cymbal transdüserin sualtı projektör performansının referans cymbal transdüser ile karşılaştırılması.....	100
6.5 Oyuk boşluğunda poliüretan içeren transdüserde yönlendirme paterni.....	101
6.6 Oyuk boşluğunda su içeren transdüserde yönlendirme paterni.....	101
6.7. Oyuk boşluğunda poliüretan bulunan transdüserin 3-D kesit gösterimi.....	102
6.8 Poliüretan dolgu çapının transdüserin sualtı admitans karakteristiği üzerindeki etkisi.....	105

6.9	Oyuk boşluğundaki poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim.....	105
6.10.	Oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserin deplasman hareketi.....	106
6.11.	Poliüretan çapının transdüserin sualtı TVR (projektor) karakteristiği üzerindeki etkisi.....	106
6.12.	Oyuk boşluğunun tamamının poliüretan ile doldurulması.....	107
6.13	Oyuk boşluğunun tamamı poliüretan ile doldurulduğundaki TVR değerleri.....	108
6.14	Oyuk boşluğunun tamamı poliüretan ile doldurulduğunda ilk rezonans frekansında cymbal transdüserin deplasman hareketi.....	108
6.15.	Oyuk boşluğunda 1.5 mm çapında poliüretan içeren transdüserde PZT kalınlığının su altı performansına etkisi.....	109
6.16.	1 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	110
6.17.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	111
6.18.	3 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	111
6.19.	1 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	112
6.20.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	113
6.21.	3 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	113

6.22. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde değişen oyuk çaplarında a-) 4.5, b) 9, c) 12 mm ve ilk rezonans frekanslarında deplasman hareketi.....	114
6.23. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliği-oyuk çapı kombinasyonlarının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	116
6.24. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde kapak kalınlığının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	117
6.25. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde kapak kalınlığının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	117
6.26. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde apex çapının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	118
6.27. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde apex çapının TVR ve bant genişliğine etkisi.....	119
6.28. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde kapak malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	120
6.29. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına, 0.6 mm oyuk derinliğine ve 7 mm apex çapına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde kapak malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	120
6.30. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde polimer malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	122

6.31	2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına, 0.6 mm oyuk derinliğine ve 7 mm apex çapına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde polimer malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi.....	122
6.32.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda değişen polimer dolgu a) kauçuk b) poliüretan, içeren cymbal transdüserlerin ilk rezonans frekanslarında deplasman hareketi.....	123
6.33.	Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin TVR sonuçları.....	125
6.34.	Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin FFVS sonuçları.....	126
6.35	Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin (polimer dolgu üretan) a-) polcymbal_1 b) polcymbal_2, ilk rezonans frekanslarında yönelme paternleri.....	127
6.36.	Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin oyuk boşluğunda kauçuk kullanıldığında ilk rezonans frekanslarında yönelme paternleri a) polcymbal_1 boyutları b) polcymbal_2 boyutları.....	127
6.37.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan dolgu içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde TVR değerleri.....	128
6.38.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde FFVS değerleri.....	128
6.39.	2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde ilk rezonans modunda yönelme paterni.....	129
6.40.	2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki düz kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulmasının 3-D kesit gösterimi.....	130

6.41. 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulması ile elde edilen TVR değerlerinin “polcymbal_1” ile karşılaştırılması.....	130
6.42. 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulması ile elde edilen ilk rezonans modundaki yönelme paterni.....	131
6.43. Cymbal transdüserin üzerinde metal-polimer kütle kullanımının 3-D kesit gösterimi.....	132
6.44. Cymbal transdüserde metal kapaklar üzerindeki pirinç malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim.....	133
6.45. Cymbal transdüserde metal kapaklar üzerindeki poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim.....	134
6.46. Metal kapak üstünde bulunan pirinç kütle çapının transdüserin sualtı TVR (projektor) karakteristiği üzerindeki etkisi.....	135
6.47. Metal kapak üstünde bulunan poliüretan çapının transdüserin sualtı TVR (projektor) karakteristiği üzerindeki etkisi.....	135
6.48. Metal kapak üstünde a-) metal b-) poliüretan kütle bulunduğunda ilk rezonans modundaki yönelme paternleri.....	136
6.49. 3x3 Cymbal serisinde transdüserlerin dizilimi.....	137
6.50. Oyuk boşluğunda polimer içeren 3x3 cymbal transdüser serisinin a) modellenmesi b) örgü yapısı ve yüzey elemanları.....	138
6.51. Oyuk boşluğunda polimer içeren 3x3 cymbal transdüser serisinde TVR değerleri.....	139
7.1 Ticari hava akustik transdüserin şematik gösterimi.....	142
7.2. Cymbal hava akustik transdüserin şematik gösterimi.....	143
7.3 Ticari ve cymbal hava akustik transdüserinin TVR değerlerinin karşılaştırılması (hesaplanan).....	147
7.4 Ticari ve cymbal hava akustik transdüserinin FFVS değerlerinin karşılaştırılması (hesaplanan).....	147

7.5	Cymbal hava akustik transdüser için hesaplanan ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması.....	148
7.6	Ticari ve cymbal hava akustik transdüserlerinin admitans spektrumları...	148
7.7	Ticari ve cymbal hava akustik transdüserlerinin 0-50 kHz aralığındaki rezonans modları.....	149
7.8	Cymbal hava akustik transdüseri ve ticari hava akustik transdüserinin ilk rezonans frekanslarında 10 V uygulama voltajında yarattıkları ses basıncı.....	151
7.9.	a-) Cymbal hava akustik transdüseri ve b) ticari hava akustik transdüserin rezonans frekanslarındaki akustik yönelme paternleri.....	152
7.10	Huni içeren ve içermeyen cymbal hava akustik transdüserlerin TVR değerlerinin karşılaştırılması.....	154
7.11	Cymbal hava akustik transdüserde huni optimizasyonu için incelenen oyuk derinlikleri.....	154
7.12	Cymbal hava akustik transdüserde huninin oyuk derinliğinin a-) TVR b-) FFVS üzerinde etkisi.....	156
7.13	Değişen oyuk derinliklerinde huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönelme paternleri a) 0.25 mm b-) 0.60 mm c-) 1.00 mm.....	157
7.14	Cymbal hava akustik transdüserde huni optimizasyonu için incelenen oyuk çapları.....	158
7.15	Cymbal hava akustik transdüserde huninin oyuk çapının a-) TVR b-) FFVS üzerinde etkisi.....	159
7.16	Değişen oyuk çaplarında huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönelme paternleri a) 4 mm b-) 9 mm c-) 11.5 mm.....	160
7.17	Cymbal hava akustik transdüserde hornun malzemesinin a-) metal b-) polimer olduğu durumlarda TVR üzerine etkisi.....	163
7.18	Değişen metal malzemeden hornlara sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönelme paternleri a) pirinç b-) titanyum c-) çelik.....	164

7.19	Değişen polimer malzemeden ve referans pirinç huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlendirme paternleri a) pirinç b-) poliüretan c-) kauçuk.....	165
7.20	Cymbal hava akustik transdüserde üst metal kalınlığının a-) TVR b-) FFVS üzerinde etkisi.....	168
7.21	Değişen kalınlıkta üst metala sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlendirme paternleri a) 0.40 mm b-) 1.00 mm.....	169

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1	Piezoelektrik yük (d) ve piezoelektrik voltaj katsayıları (g) tanımları.....	3
1.2	PZT kompozisyonunda kullanılan katkıların listelenmesi.....	9
3.1.	Ölçeklendirilmiş cymbal transdüserlerin boyutları.....	41
3.2	Deneylerde ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan metal kapakların fiziksel özellikleri.....	41
3.3	Deneylerde ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan PZT seramiklerin fiziksel özellikleri.....	42
5.1	Metal Kapakların Fiziksel Özellikleri.....	89
6.1.	Oyuk boşluğunda poliüretan ve sıvı içeren cymbal transdüserlerin karşılaştırılması.....	100
6.2.	Oyuk boşluğundaki poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim.....	104
6.3	Oyuk boşluğunda kullanılan poliüretan ve kauçuk malzemelerinin karşılaştırılması.....	121
6.4.	Kapak altında polimer kullanarak optimum TVR bant genişliğini veren transdüserlerin parametreleri ve transdüser isim kodları.....	124
6.5.	Metal kapak üstünde bulunan pirinç malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim.....	132
6.6.	Metal kapak üstünde bulunan poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim.....	133
7.1.	Ticari ve cymbal hava akustik transdüser boyutları.....	144
7.2.	Huni için sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri.....	161

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ARL	:Uygulamalı araştırma merkezi, Pennsylvania State Üniversitesi, USA
ac	: Alternatif akım
B	: Elektriksel süseptans
BaTiO ₃	: Baryum titanat
C	: Kapasitans
°C	: Santigrad derece
d _h	: Hidrostatik piezoelektrik katsayısı
d _{mj}	: Piezoelektrik yük katsayısı
D	: Birim alana düşen piezoelektrik yük
dB	: Desibel
dc	: Doğru akım
E	: Elektrik Alanı
E	: Young's Modülü
e	: Piezoelektrik gerilme katsayısı
ε ₀	: Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ε _r	: Bağlı geçirgenlik, dielektrik sabiti
ε	: Uzama
FEA	: Sonlu elemanlar analizi
FFVS	: Serbest alan voltaj hassasiyeti
f _r	: Rezonans frekansı
f _a	: Antirezonans frekansı
G	: Elektriksel kondüktans
g _{ij}	: Piezoelektrik voltaj katsayısı
K ₃₃	: Serbest dielektrik sabiti
kHz	: Kilohertz
kPa	: Kilopaskal
M	: Hidrofon hassasiyeti
Mpa	: Megapaskal
MPB	: Morfotropik faz sınırı
k _{ij}	: Elektromekaniksel dönüşüm faktörü

k_{eff}	: Etkin elektromekaniksel dönüşüm faktörü
p	: Serbest alan ses basıncı
ρ	: Yoğunluk
Pa	: Paskal
Psi	: İnç kareye düşen birim basınç
$PbZrO_3$	: Kurşun zirkonat
$PbTiO_3$	: Kurşun titanat
PZT	: Kurşun zirkonat titanat
R	: Elektriksel rezistans
s_{ij}	: Malzeme elastik modülü
S	: Mekaniksel gerinim
T	: Mekaniksel gerilme
TVR	: İletilen voltaj tepkisi
V	: Voltaj
Q	: Mekaniksel kalite faktörü
Q_{eff}	: Etkin mekaniksel kalite faktörü
X	: Elektriksel reaktans
Y	: Elektriksel admitans
Z	: Elektriksel empedans

1. GİRİŞ

19. yüzyıldaki endüstri devrimi ve daha sonrasında 20. yüzyılın getirdiği hızlı teknolojik gelişmeler hayatımıza birçok kolaylık getirmiştir. Günümüzde teknoloji ile çevrilmiş bir topluluk olma yolunda hızla ilerlerken günlük yaşamda kullanılan elektronik cihazların ve yüksek teknoloji malzemelerinin sayısı da hızla artmaktadır. Ulaşılan noktada sadece beş duyumuza güvenmeyip, algılarımızı sensörlerle geliştirmektediriz. Artık çevreyle etkileşim için sadece kaslarımızı değil transdüserleri, tepkileyicileri ve sensörleri veya bir çok transdüserden oluşmuş robotları kullanıp geçmişte imkansız gibi görünen görevleri yerine getirebilmekte ve fikirleri beynimizde işlemek yerine yoğun biçimde bilgisayarları kullanmaktayız.

Günümüzde sıkça kullanılan transdüserler arasında piezoelektrik transdüserler de bulunmaktadır. Piezoelektrik transdüserlerin tıbbi teşhis cihazlarından, sualtı askeri sonarlarına kadar geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Bu tez çalışması zil tipi (cymbal) piezokompozit transdüser kullanılarak elektroakustik transdüser gelişimi üzerinedir. Elektroakustik cymbal transdüserin elektromekaniksel ve akustik karakterizasyonu ve sonlu elemanlar analizi ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

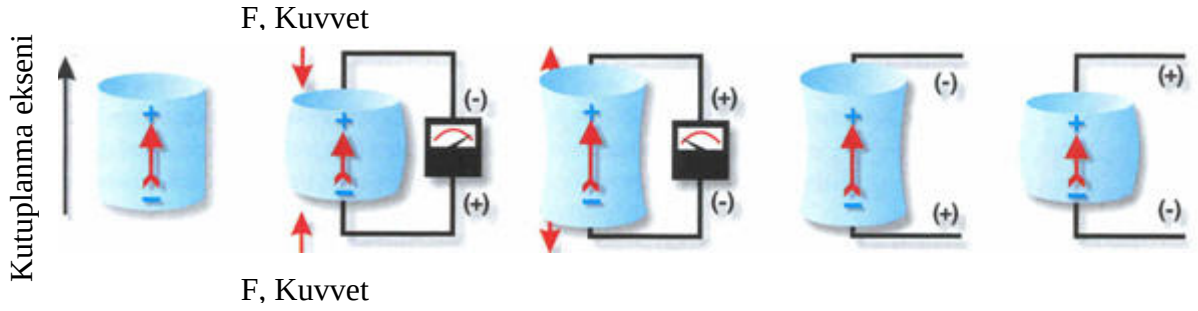
Tezin giriş kısmı okuyucu için:

- Piezoelektrik özellik ve piezoelektrik seramikler,
- Elektroakustik transdüserler-tanım ve uygulama parametreleri,
- Elektroakustik transdüser-uygulama alanları,
- Elektroakustik transdüserler-tasarımlarının

prensipleri, tanımları, terminolojileri ve sınıflandırmaları hakkında bilgi vermektedir.

1.1 Piezoelektrik Özellik ve Piezoelektrik Malzemeler

Bir kristalin uygulanan mekanik gerilme ile orantılı olarak elektrik yükü üretmesine piezoelektrik özellik denir. Piezoelektrik kristalde bu olgunun tersi de gözlemlenir. Yani piezoelektrik kristal uygulanan elektrik alanla orantılı olarak geometrik uzama/daralma gösterir [1] (Şekil 1.1)



Şekil 1.1. Doğrudan ve ters piezoelektrik etki [1]

Piezoelektrik malzemeler için genel parametreler aşağıda verilmiştir:

Gerilme “T” (N/m²)

Gerinim “S” (birimsiz)

Elektrik Alanı “E” (V/m)

Elektriksel Deplasman “D” (C/m²).

Bu parametreler genelde tensör biçimindedirler, fakat basit bir seramik yapıda değişken sayıları azaltılabilir. Bu parametreleri kullanarak piezoelektrik malzeme için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$T = c^E S - e_t E \quad 1.1$$

$$D = e S + \varepsilon^S E \quad 1.2$$

Burada c, elastik katılık katsayısını (N/m²)

ε , dielektrik geçirgenliği(F/m)

e, ise piezoelektrik gerilme sabitini (C/m² veya N/Vm) ifade etmektedir.

Üst ifadeleri sabit parametreleri, alt ifade ise matriks tranzposunu ifade etmektedir.

Sabit tutulan eşitliklerin yer değiştirmesiyle eşitlikler:

$$S = s^E T - d_t E \quad 1.3$$

$$D = d T + \varepsilon^T E \quad 1.4$$

şeklinde yazılabilir. Burada s elastik katsayısı (m²/N, s=1/c) ve d piezoelektrik yük katsayısını (C/N veya m/V) ifade etmektedir.

Yukarıdaki eşitliklere ek olarak 2 adet daha çiftli eşitlik yazılabilir ve bunlar 2 adet daha piezoelektrik katsayı verirler; g ve h. Böylece elde edilen dört adet piezoelektrik sabit aşağıda verilmiştir.

$$d = \frac{\partial D}{\partial T}(sabitE) = \frac{\partial S}{\partial E}(sabitT) \quad 1.5$$

$$e = \frac{\partial D}{\partial S}(sabitE) = -\frac{\partial T}{\partial E}(sabitS) \quad 1.6$$

$$g = -\frac{\partial E}{\partial T}(sabitD) = \frac{\partial S}{\partial D}(sabitT) \quad 1.7$$

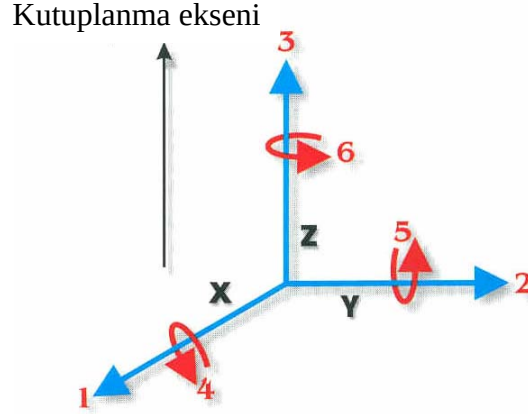
$$h = -\frac{\partial E}{\partial S}(sabitD) = -\frac{\partial T}{\partial D}(sabitS) \quad 1.8$$

Bu katsayılar arasında en çok kullanılanları ve faydalı olanları; piezoelektrik yük katsayısı “d” (uygulanan elektrik alanıyla oluşan gerinimi veya uygulanan mekanik gerilme ile oluşan elektriksel yükü ifade eder) ve piezoelektrik voltaj sabiti “g” (uygulanan basınç altında oluşan elektrik alanını ifade eder) piezoelektrik katsayılarıdır [2] (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 Piezoelektrik yük (d) ve piezoelektrik voltaj katsayıları (g) [2]

d=	oluşan elektriksel yük / uygulanan mekanik gerilme	Coulombs / Newton
	oluşan uzama / uygulanan elektrik alanı	Metre / Volt
g=	oluşan elektrik alanı / uygulanan mekanik gerilme	Voltmetre/ Newton
	oluşan uzama /uygulanan dielektrik deplasman	Metre ² / Volt

Piezoelektrik katsayılar kutuplanma eksenlerine göre belirtilirler. Bu kutuplanma eksenleri 3 ana ortogonal eksen temelinde olup 1, 2 ve 3 olarak isimlendirilirler ve 2 alt rakamla belirtilirler (Şekil 1.2). İlk alt rakam kutuplanma yönünü veya uygulanan elektrik alanı yönünü belirtirken ikinci alt rakam ilgili gerilme ve uzamayı belirtir. Böylece, d_{33} piezoelektrik katsayısı 3 yönünde polarize olmuş piezoelektrik malzemede yine 3 yönünde oluşan uzamayı göstermektedir. Kutuplama yönüne dik gerilme ile ilgili piezoelektrik katsayı ise d_{31} ile ifade edilir. Bazı uygulamalarda elektrik alanı kutuplama eksenine dik uygulanabilir ve bu uygulama 2 eksen etrafında kesme gerilmelerinin oluşmasına sebep olur ve bu uygulamalarda oluşan uzamalar veya voltaj “15” ile ifade edilir; d_{15} gibi. Piezoelektrik yük sabitesi d ve piezoelektrik voltaj sabitesi g arasında $g = d/\epsilon$ ilişkisi vardır. Burada ϵ malzemenin dielektrik geçirgenlik katsayısını ifade etmektedir [1-2].



Şekil 1.2 Piezoelektrik element üzerinde etkili kuvvetlerin yönleri

Sualtında malzeme hidrostatik veya akustik basınca maruz kaldığında elde edilen yük veya voltaj çıktısını bulmak için kullanılan katsayı ise hidrostatik yük veya voltaj katsayısı olarak tanımlanır. Bu durumda, elde edilen yük d_{33} katsayısından gelen yük ile negatif değerler olan d_{31} ve d_{32} katsayılarının toplamına eşittir. d_{31} ve d_{32} katsayıları birbirine eşit olduğundan dolayı sonuç “hidrostatik piezoelektrik yük katsayısı” (d_h)

$$d_h = d_{33} + 2d_{31} \quad 1.9$$

eşitliği ile tanımlanır. d_{31} katsayısı negatif bir değer olduğundan ötürü tek parçalı seramiklerde “hidrostatik piezoelektrik yük katsayısı” (d_h) oldukça düşük olmaktadır.

Piezoelektrik malzemelerde diğer bir önemli parametre ise mekaniksel dönüşüm katsayısıdır (k). Bu katsayı akustik dönüşüm verimliliğini göstermesi yanında ulaşılabilecek maksimum bant genişliğini de belirler.

Doğrudan piezoelektrik etki için;

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

ters piezoelektrik 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 [1-2].

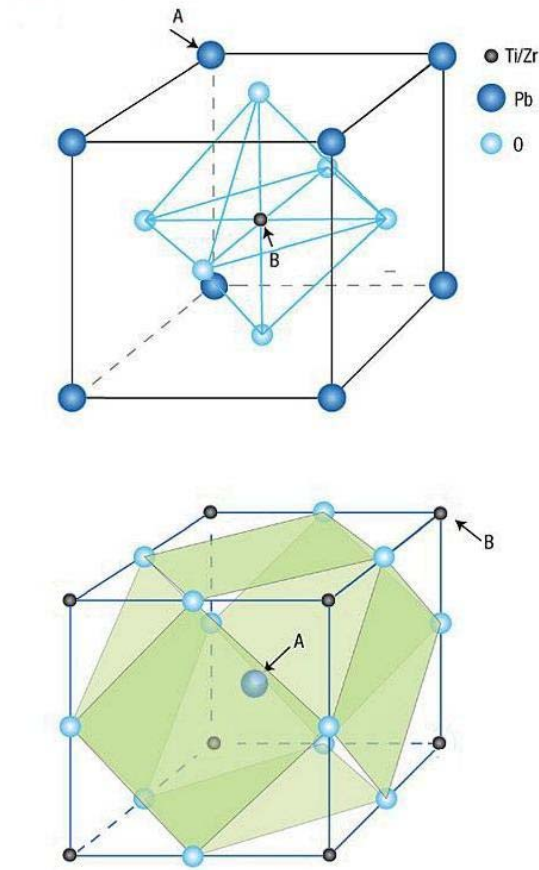
Piezoelektrik Malzemeler

Uygulama açısından 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 Amerikan, Japon ve Rus bilim adamları baryum titanatın (BaTiO_3) çok yüksek dielektrik katsayısına 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 çok kristalli piezoelektrik 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 [1].

1954 yılında, Jaffe kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonattan (PbZrO_3) oluşan katı çözeltinin morfortropik faz sınırında (MPB) yüksek piezoelektrik katsayılarına sahip olduğunu keşfetti [3-4]. Bu sınır hemen hemen sıcaklıktan bağımsız olduğu için, faz sınırında çok yüksek piezoelektrik etki elde etmek mümkündür. Böylece PZT (PbZrTiO_3) seramikleri, piezoelektrik özellikleri baryumtitanatın yaklaşık iki katı olduğundan ve -50°C ’den 200°C ’ye kadar faz dönüşümüne uğramadıkları için baryum titanatların yerini alıp baskın piezoelektrik malzeme oldular.

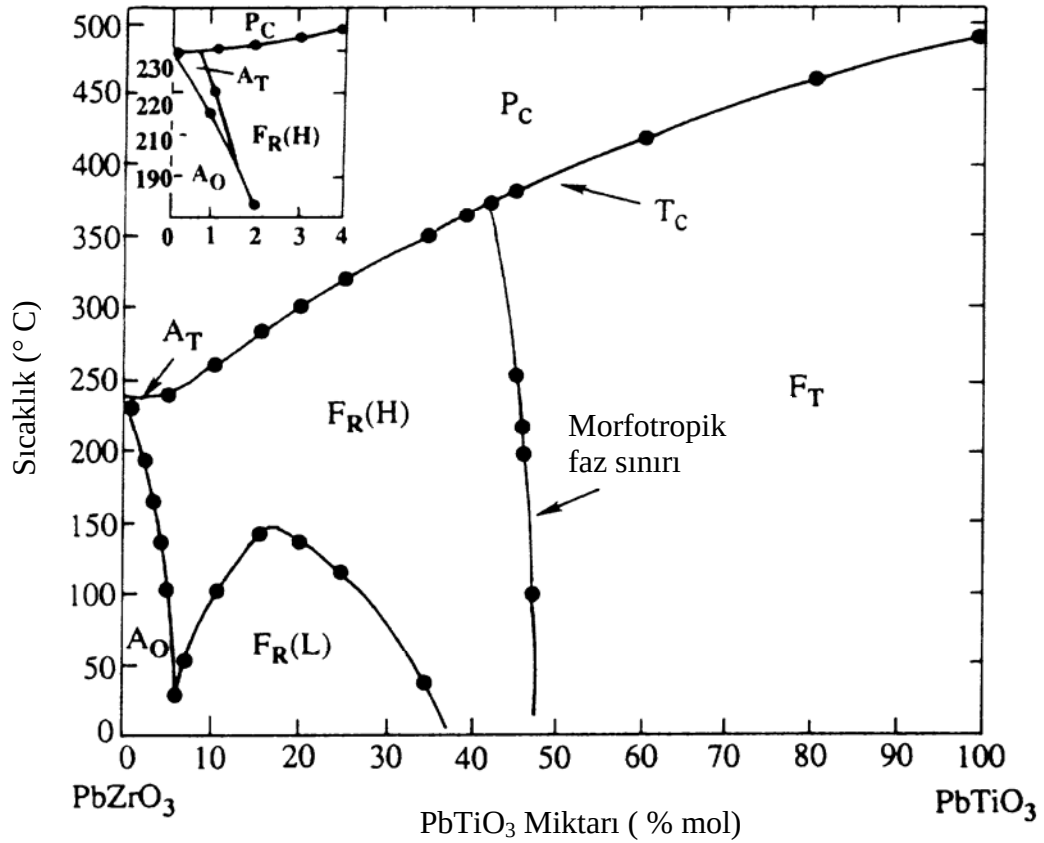
PZT perovskit kristal yapısına sahiptir. Her büyük Pb atomu 12 komşu oksijen atomuna ve her titanyum/zirkonyum atomu oktahedral koordinasyonda 6 oksijen atomuna sahiptir. Kurşun ve oksijen atomları birlikte yüzey merkezli kübik yapıyı oluştururken titanyum/zirkonyum atomları oktahedral arayerlere yerleşirler. İdeal perovskit yapıda iyonların pozisyonları Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3 PZT için ideal perovskit yapıda iyon pozisyonları

PZT'nin kristal yapısının yanında, kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonat (PbZrO_3) katı çözeltilisinin faz denge diagramı da PZT'deki üstün dielektrik ve piezoelektrik özelliklerinin açıklanmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 1.4'te kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonat (PbZrO_3) katı çözeltilisinin denge faz diyagramı görülmektedir. Burada T_c çizgisi yüksek sıcaklık paraelektrik kübik kristal yapı ile düşük sıcaklık ferroelektrik kristal yapıyı birbirinden ayırır. Morfotropik faz sınırı (MPB) ise ferroelektrik alanı iki bölgeye ayırır: $\langle 111 \rangle$ boyunca 8 adet yönelmiş alan düzeyine sahip rombohedral PbZrO_3 ile $\langle 100 \rangle$ boyunca 6 adet yönelmiş alan düzeyine sahip tetragonal PbTiO_3 . Bu sınır (MPB) oda sıcaklığında $\text{Zr/Ti} = 52/48$ değerindeyken elde edilmektedir [3]. Bu faz diyagramında görüldüğü üzere PZT katı çözeltisi değişik avantajlara sahiptir [5]:

- Simetri kübik ve Curie sıcaklığının üstünde yapı perovskittir.
- Bağıl olarak yüksek Curie sıcaklığına sahip olması, ferroelektrik yapının sürdürüldüğü kullanım sıcaklık aralığını artırmaktadır.
- MPB birinci derecedendir ve bu yüzden bu sınır yakınında iki faz içeren bölge bulunmaktadır.
- MPB etrafındaki 2 faz içeren bölgede toplam 14 olası polarizasyon durumu bulunmaktadır ve bu PZT'nin kolay kutuplanmasına sebep olmaktadır.
- MPB hemen hemen düşey olduğundan dolayı bu sınır etrafında elde edilen özellikler geniş sıcaklık aralığında sürdürülebilmektedir.



Şekil 1.4 Kurşun titanat (PbTiO_3) ve kurşun zirkonat (PbZrO_3) katı çözeltisinin denge faz diyagramı [3]

Baryum titanat (BaTiO_3) geliştirilen ilk piezoelektrik malzeme olmasına rağmen, günümüzde piezoelektrik uygulamalarda baryum titanatın yerini tamamen PZT seramikleri almıştır. PZT, BaTiO_3 'ün yerini almasını şu özelliklerine borçludur [6].

- i. PZT, BaTiO_3 den daha yüksek elektromekaniksel dönüşüm katsayısına sahiptir.
- ii. PZT, BaTiO_3 den daha yüksek Curie sıcaklığına sahiptir.
- iii. PZT daha kolay kutuplanabilmektedir.
- iv. Düşük sıcaklıklarda sinterlenmesi bağl olarak daha kolaydır.
- v. PZT'deki değişik katı çözeltiler PZT'ye yeni ve geniş bir aralıkta özellikler vermekte ve kullanım alanlarını yüksek oranda artırmaktadır.

PZT'lerin tarihindeki en büyük gelişme çeşitli katkılarla elde edilen katı çözeltiler ile piezoelektrik özelliklerin belli uygulamalara göre kolaylıkla optimize edilmesinin keşfiyle olmuştur. Bu katkılar dört gruba ayrılabilirler: donör, akseptör, izovalans ve multivalans [5-6].

Nb^{+5} (Zr^{+4} yerine) ve La^{+3} (Pb^{+2} yerine) gibi donörler katyon (metal) boşlukları ile kompanse edilirler. Metal iyon boşluklarının oluşması, yönlendirilmiş alan duvarlarının daha kolay hareket etmesine yol açar ve bu yüzden yüksek piezoelektrik katsayılarına sahiptirler. Yüksek elektrik alanı altında kare histeresis döngüsüne sahiptirler ve yüksek dielektrik kayıpları vardır. Kutuplama operasyonunda oluşan iç gerilmeler, kutuplama sonrasında hızlı olarak yok olurlar bu da yaşlanmayı azaltır. Bu PZT katı çözeltilerine yumuşak PZT denir ve içlerindeki metal boşluklar elastik dalgayı zayıflatırlar; böylece hem mekaniksel kalite faktörü Q_M hem de elektriksel kalite faktörü Q_E azalır.

Akseptör katkılarda, katkı katyonunun yükü yer değiştirdiği iyonun yükünden daha düşüktür. Örneğin Fe^{+3} , Zr^{+4} veya Ti^{+4} ile yer değiştirir. Yük dengesizliği genel olarak oksijen boşlukları ile kompanse edilir. Bu oksijen boşlukları akseptör-boşluk dipollerinin oluşmasına ve bu dipollerin domainlerin tekrar oryantasyonlarının engellemesine yol açarlar. Böylece “sert PZT” olarak adlandırılan bu seramikler yüksek koersivite, düşük piezoelektrik katsayılar, yüksek derecede asimetrik histeresis döngüsü, yüksek Q_m ve düşük kayıplarla karakterize edilirler.

Pb^{+2} ile yer değiştiren Ba^{+2} veya Sr^{+2} yada B site katyonları ile yer değiştiren Sn^{+4} gibi katyonlar izovalans katkı grubunu oluştururlar ve domain tekrar oryantasyonunu engellerler. Curie sıcaklığını düşürürler ve dielektrik kayıpları azaltırlar. Multivalans katkılar ise Ti^{+4} veya Zr^{+4} ile yer değiştirirler ve yaşlanma

etkisini azaltırlar [6]. PZT kompozisyonunda genelde kullanılan katkıların listesi Çizelge 1.2 de verilmiştir.

Çizelge 1.2 PZT kompozisyonunda kullanılan katkıların listelenmesi

Pb-site donörleri	$\text{La}^{+3}, \text{Bi}^{+3}, \text{Nd}^{+3}, \text{Sb}^{+3}, \text{Th}^{+4}$
(Ti-Zr)-site donörleri	$\text{Nb}^{+5}, \text{Ta}^{+5}, \text{Sb}^{+5}, \text{W}^{+6}$
Pb-site akseptörler	$\text{K}^+, \text{Na}^+, \text{Rb}^+$
(Ti-Zr)-site akseptörler	$\text{Fe}^{+3}, \text{Al}^{+3}, \text{Sc}^{+3}, \text{In}^{+3}, \text{Cr}^{+3}, \text{Co}^{+3}, \text{Ga}^{+3},$ Mg^{+2}
İzovalans katkılar	$\text{Sr}^{+2}, \text{Ca}^{+2}, \text{Ba}^{+2}$ (Pb^{+2} için) Sn^{+4} (Ti^{+4} veya Zr^{+4} için)
Multivalans katkılar	$\text{Cr}, \text{U}, \text{Mn}$

Günümüzde yukarıdaki çizelgedeki katkıların kullanılmasıyla ticari olarak kullanılan çeşitli PZT kompozisyonları geliştirilmiştir. Genelde PZT-5A gibi yumuşak PZT kompozisyonlarının çoğunda ‘Nb’ ve PZT-4 gibi sert PZT kompozisyonlarının çoğunda ‘Fe’ katkı olarak kullanılmaktadır.

Yukarıdaki katkı maddeleriyle oluşturulan piezoelektrik seramiklerin özellikleri zamanla, sıcaklıkla, elastik uzamayla ve elektrik alanıyla değişmektedir. Elektrik alanı ve mekaniksel gerilmenin, doğrusallıktan sapmaya ve yumuşak piezoelektriklerde kutuplaşmanın bozulmasına sebep olması PZT-5 gibi yumuşak PZT’lerin sıklıkla akustik algılayıcılarda kullanılmasına sebep olur. Sert piezoelektrik seramiklerde, PZT-4 ve PZT-8 gibi, kutuplaşma daha zor bozulur ve bunlar daha çok yüksek akım içeren ünitelerde kullanılırlar.

1.2 Elektroakustik Transdüserler-Giriş

Transdüserler herhangi bir enerji formunu diğer bir enerji formuna dönüştüren cihazlar olarak tanımlanabilirler. Elektroakustik transdüserlere odaklandığımızda ise, bu dönüşüm elektrik ve akustik enerji arasında olmaktadır. Eğer transdüser akustik basınçdaki değişimleri elektrik sinyaline dönüştürüyorsa alıcı olarak adlandırılır. Sualtı transdüserlerinde alıcılar özel bir isimle (hidrofon) olarak adlandırılırlar. Diğer yandan elektroakustik transdüser elektrik enerjisini akustik

enerjiye çeviriyorsa projektör olarak isimlendirilir. Projektörlerde genelde istenen ve aslında gerekli olan elektrik-akustik dönüşüm verimliliğinin çok yüksek olmasıdır ki bu da transdüserin rezonans frekansının operasyon frekansına yakın olmasıyla sağlanır. Çoğu elektroakustik transdüser hem iletici hem de alıcı özelliğe sahip olduğundan bu transdüserlerin aynı sistem içerisinde hem projektör hem de alıcı olarak kullanılmaları ekonomik olmaktadır. Sualtı elektroakustik transdüser sistemlerinde aynı anda hem projektör hem de hidrofon olarak davranabilen transdüserler aktif sonar olarak adlandırılırlar [7-16].

1.2.1 Empedans ve Admitans

Bir elektrik devresinde, alternatif akım; akımın şiddeti ve faz farkı ile karakterize edilir. Her iki çoklukta kompleks düzlemdeki fazör “i” tarafından temsil edilirler. Benzer olarak zamanla birlikte sinüzoidal olarak değişen voltaj da fazör “V” ile gösterilir.

Eğer rezistör üstüne sabit bir voltaj uygulanırsa, uygulanan voltajın değerinin akıma bölünmesiyle rezistörün direnci belirlenir (Ohm kanunu). Alternatif akımdaki V ve i fazörleri tarafından tanımlanan benzer ilişki devrenin empedansı (Z) olarak tanımlanır ve empedans Z’de kompleks bir vektördür. Empedans Z gerçel ve sanal değerlerine ayrılabilir ki bunlar rezistans (R) ve reaktans (X) olarak tanımlanmıştır ($Z = R + jX$). Empedansın matematiksel tersi olan admitansın ($Y = 1/Z$) gerçel ve sanal kısımları ise kondüktans (G) ve süseptans (B)’dir, $Y = G + jB$.

Hem admitans hem de empedans birbirlerinin bileşenleriyle yazılabilirler.

$$Z = R + jX = 1/Y = 1/(G + jB) = (G - jB)/(G^2 + B^2) \quad 1.10$$

Her iki eşitliğinde gerçel ve sanal kısımları birbirlerine eşitlenirse;

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2} \quad \text{ve} \quad B = \frac{-B}{G^2 + B^2} \quad 1.11$$

veya, Pisagor teoreminden, $Y^2 = G^2 + B^2$;

$$R = G/Y^2 \text{ ve } X = -B/Y^2 \quad 1.12$$

Aynı şekilde;

$$Y = 1/Y = (R - jX)/(R^2 + X^2) \quad 1.13$$

Ve böylece

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \text{ ve } X = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad 1.14$$

olarak tanımlanır.

Eğer devreyi oluşturan elemanlar seri bağlı iseler toplam empedans her elemanın empedanslarının toplamına eşittir. Eğer devreyi oluşturan elemanlar paralel ise, devrenin empedansı toplam admitansın tersine eşittir ki bu admitansda devre elemanlarının admitanslarının toplamına eşittir.

Admitans ve empedans kavramları aynı şekilde mekanik kavramlara da uygulanabilirler. Eğer mekanik sisteme sinüzoidal kuvvet uygulanıyor ise fazör F tarafından tanımlanabilir ve de sonuç deplasmanı fazör “u” dur. Böylece sistemin mekaniksel empedansı;

$$Z_M = F/u \quad 1.15$$

ile tanımlanır. Akustik yayılım problemlerinde kuvvet genelde akustik basıncın yayılan alan ile çarpımı sonucu bulunur. Böylece kuvvet yerine kullanılabilecek “spesifik akustik empedans” akustik basıncın partikül hızına oranı olarak ifade edilebilir. Bu parametre genelde herhangi bir ortamda yayılan ses dalgası içeren problemlerde kullanılırlar. Ortam alandan bağımsız olup ortam empedans değeri ortamın yoğunluğu ve ortamdaki ses yayılım hızının çarpımına eşittir (ρc) [13].

1.2.2 Empedans ve Admitans Grafikleri

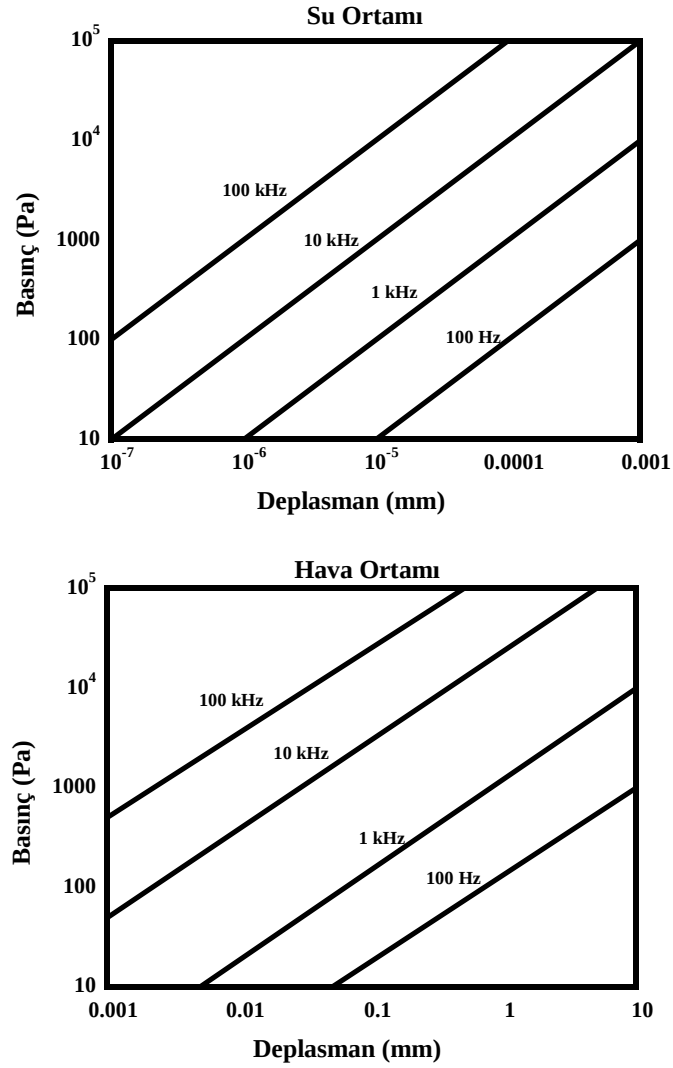
Herhangi bir devrenin değişen frekans altındaki davranışı çeşitli yollarla gösterilebilir. Örneğin, kondüktans ve süseptans frekansa bağlı fonksiyonlar şeklinde grafikleri çizilebilir. Ama genelde kullanılan ve daha açıklayıcı olan frekansa bağlı empedans (veya admitans) grafikleridir. Empedans eğrisinde reaktans değerleri, frekansa karşılık değişen rezistans değerlerine karşı çizilir.

Admitans eğrisi için ise süseptans değerleri frekans ile değişen kondüktans değerlerine karşı çizilir [13].

Frekansa karşı çizilen admitans ve empedans grafikleri transdüserdeki olası geometrik ve malzeme problemlerini göstermesinin yanında rezonans frekanslarını tesbitinde, permitivite, mekaniksel kalite faktörü, bağdaşma katsayı gibi parameterlerin hesaplamasında kullanılır. Admitans ve empedans grafiklerinde tesbit edilebilen transdüserin rezonans frekansı bölgesinde aynı zamanda rezonans (f_r) ve anti-rezonans (f_a) frekansları belirlenebilir.

1.2.3 Akustik Parametreler

Elektroakustik transdüserde frekansa ve transdüserin deplasmanına bağlı olarak akustik basınçdaki değişim Şekil 1.5'te verilmiştir. Havanın akustik empedansı, suyun akustik empedansından 3.6×10^3 kadar daha az olduğundan dolayı, bir elektroakustik transdüserin su ortamında elde ettiği basıncı elde etmek için hava ortamında aynı transdüserin çok daha fazla deplasman göstermesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı hava ortamında kullanılacak olan elektroakustik transdüser malzemesinin su ortamında kullanılacak olandan daha düşük elastik modüle sahip olması istenmektedir [14].



Şekil 1.5 Hava ve su ortamında partikül hızı ve akustik basınç arasındaki ilişki

Yönlendirme paternleri yönler bağı olarak bağıl akustik ses basınç şiddetini (yaratılan ve alınan) gösterirler. Eğer transdüser tüm yönlerde aynı şiddette ses yayıyor ve aynı şiddette alıcı görevi görüyorsa transdüser omni-yönlendirme sahiptir. Bir çok uygulamada transdüserin tek bir yöndeki ses şiddeti ve hassasiyetin yüksek olması istenmektedir. Bu yöne transdüserin akustik eksenidir ve genelde bu eksen transdüserin elektroakustik özelliklerinin karakterizasyonunda referans olarak kabul edilir. Yönlendirme sahip elektroakustik transdüserlerde ana akustik lobun genişliği bant genişliği olarak ifade edilir. Ana lobun etrafında yer alan diğer loblara ise yan loblar denir.

Yönlenme indeksi (DI), doğrusal-yönlenmeye sahip elektroakustik transdüser yerine yönlenmiş transdüser kullanımı esnasındaki sinyal-gürültü oranındaki iyileşmeyi dB değeri olarak gösterir. Bir transdüserin DI'sı hem projektör hemde alıcı performansında gözönüne alınır. Transdüserin yönlenme indeksi yönlenme paternlerinden bulunabilir.

Eğer bir ortamda yayılan akustik dalganın basınç değeri p_0 ise akustik şiddet veya birim alandaki güç akışı;

$$I = p_0^2 / 2\rho c \quad 1.16$$

ile ifade edilir. Burada ρ yoğunluğu ve c sesin ortamdaki yayılım hızını ifade etmektedir.

Akustik problemlerde çoklukların geniş ve dinamik aralığa sahip olması bu çoklukların logaritmik formda ifade edilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Akustik şiddet desibel olarak;

$$I = 10 \log (I/I_{\text{ref}}) \text{ dB} \quad 1.17$$

ile ifade edilir.

Akustik şiddet akustik basınç düzeyinin karesi ile doğru orantılı olduğundan dolayı desibel olarak akustik basınç düzeyi;

$$\text{Akustik basınç düzeyi (SPL)} = 20 \log (p/p_{\text{ref}}) \text{ dB} \quad 1.18$$

Su altı akustiğinde referans basınç düzeyi $1\mu\text{Pa}$ hava akustik sistemlerinde ise $20 \mu\text{Pa}$ olarak alınmaktadır. Örnek verilirse sualtında $5.5 * 10^4$ Paskallık basınç yaratan sistemin ses basınç düzeyi $20 \log (5.5 * 10^{10}) = 214.8 \text{ dB}$ referans $1 \mu\text{Pa}$ 'dır.

Transdüser 1 V'luk bir potansiyel uygulandığında transdüserin 1 m uzakta yarattığı ses basıncı yukarıdaki denkleme uygulanarak SPL bulunuyorsa, yeni çokluk TVR (Transmitting Voltage Response) olarak adlandırılır. 1 m de bulunan SPL ile TVR arasındaki bağıntı:

$$\text{SPL} = \text{TVR} + 20\log(V) \quad 1.19$$

ile belirtilir. Bazı kaynaklarda 1 metre'de bulunan SPL kaynak düzeyi (SL) olarak da adlandırılabilir.

Elektroakustik transdüserin yarattığı ses düzeyi belirli faktörler tarafından sınırlanabilir.

Bu faktörler:

- 1 Voltaj Bozunum
- 2 Elektriksel/Mekaniksel Gerilmeler
- 3 Termal Etkiler
- 4 Oyuklanma (Cavitation)
- 5 Projektörler arasındaki akustik etkileşim olabilir.

Elektroakustik transdüserde hassasiyet ise (M) birim ses basıncına karşılık (1 μPa) açık devredeki elektriksel voltaj eldesi olarak tanımlanmaktadır. Genelde desibel formunda ifade edilmektedir:

$$M \text{ (dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}) = 20 \log(V/p) \quad 1.20$$

Örneğin bir yönlenmiş transdüserin hassasiyeti -180 dB re V/ μPa ise bu transdüserin 1 μPa 'lık ses basıncına maruz kaldığı zaman ürettiği açık devre voltajı 10^{-9} V'dir. Eğer gelen ses dalgası 20 μPa ise, transdüserin ürettiği açık devre voltajı da 10^{-9} V'dan 20 kat daha fazla olacaktır.

Hassasiyet hesaplamalarında mutlaka ölçüm frekansı belirtilmelidir. Ölçümler esnasında iki çeşit hidrofon hassasiyeti kullanılmaktadır. Genel olarak kullanılan "Serbest Alan Hassasiyeti" (FFVS) akustik basınç hidrofonun bulunduğu pozisyonda ve hidrofonun ortamda olmadığı kabul edilerek hesaplamalarda kullanılır. "Basınç Hassasiyeti"nde ise hidrofonun ortamda bulunduğu yüzeyinde oluşan akustik basınç hesaplamalarda kullanılır. Eğer hidrofon akustik olarak yeteri kadar sert ve küçük ise bu iki çeşit hassasiyet birbirine eşit olmaktadır.

Mekaniksel kalite faktörü (Q_m) basitce transdüserin rezonansının keskinliğini ifade eder. Mekaniksel kalite faktörü kondüktans eğrisinden bulunabilir:

$$Q_m = \frac{f_r}{f_u - f_l} \quad 1.21$$

burada rezonans frekansını (G eğrisindeki maksimum değerinin frekansını) ve f_u ve f_l maksimum değerin yarısındaki frekansları belirtmektedir [15].

Sonar transdüserleri için diğer önemli uygulama parametresi ise yararlılık katsayısıdır. 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 hidrofon için yararlılık katsayısı,

$$d_h \cdot g_h = (2d_{31} + d_{33})^2 / K_{33} \epsilon_0 \quad 1-22$$

Burada; k_{33} dielektrik sabitesini,

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

Böylece bir hidrofon uygulamasında, düşük 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 dolayı g_h değerleride genelde düşüktür. Örneğin PZT-552'nin d_h değeri sadece 50 pC/N ve g_h değeri 2 mV.m/N'dır. Sonuç olarak, katı PZT düşük duyarlılığa sahiptir ve bu yüzden hidrofon uygulamaları için yeterli değildir.

1.2.4 Diğer Uygulama Parametreleri

Özellikle sualtı elektroakustik transdüserlerinde bir çok uygulama parametresi elektroakustik transdüserin performansını etkilemektedir. Sualtı basıncına bağlı olarak piezoelektrik malzemenin bozunumu ve transdüserlerin belli bir süre sonra üzerlerinde oluşan gerilmeye gösterebilecekleri direnç, gerilme limitleri elektroakustik transdüserin kullanımını ve tasarımını önemli ölçüde etkilemektedir.

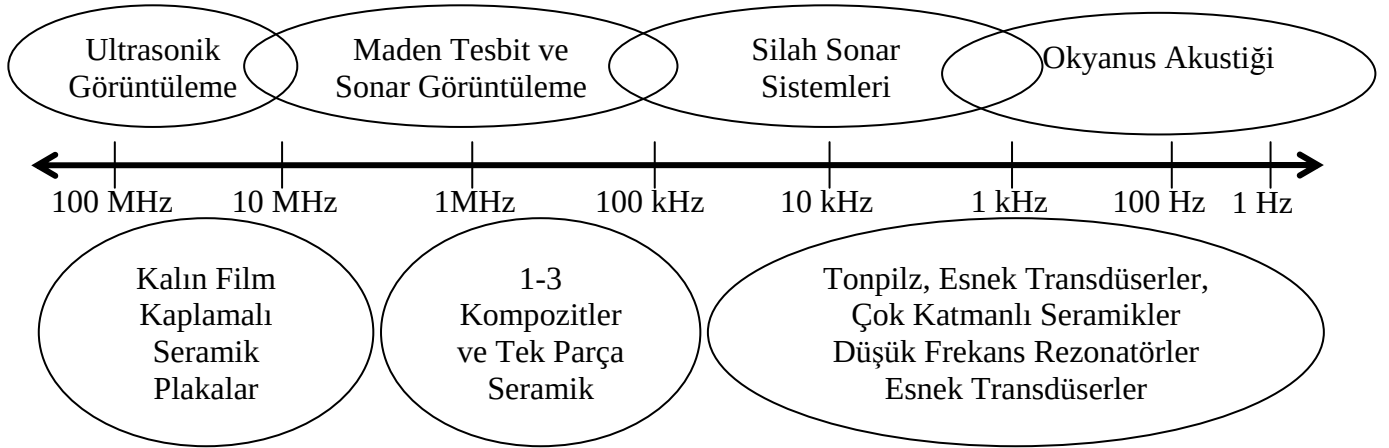
Akustik ve elektriksel parametrelere ek olarak aşağıdaki unsurlar akustik transdüserin tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır:

1. Kablo tipi ve uzunluğu
2. Ağırlık ve boyut sınırlamaları
3. Çevre koşulları (ortam sıcaklığı, ortamdaki titreşim, güneşe maruz kalma zamanı vs.)
4. Servis ömrü
5. Maliyet

Elektroakustik bir transdüserin genellikle admitans, TVR ve hassasiyet testleriyle performansı ölçülmektedir. Bu testlere ek olarak ani yük testleri, titreşim testleri, sıcaklık ve hidrostatik basınç testleri uygulanabilir [15].

1.3 Akustik ve Biyomedikal Uygulamalar için Elektroakustik Transdüser Tasarımları

Bundan önceki kısımda belirtildiği üzere geniş tanımıyla transdüserler herhangi bir enerji formunu diğer bir enerji formuna dönüştüren cihazlar olarak tanımlanabilirler. Elektroakustik transdüserler akustik enerjiyi elektrik enerjisine veya elektrik enerjisini akustik enerjiye çevirirler. Elektromekanik transdüserler ise mekanik enerjiyi elektrik enerjisine veya elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirirler. Her iki tip transdüserde aynı temel prensipleri, malzemeleri ve uygulama tasarımlarını kullansalarda, elektromekanik transdüserler kuvvet ve basınç sensörü gibi tepkileyici, ultrasonik motor ve sensör uygulamalarını temsil ederler. Elektroakustik transdüserler ise esas olarak duyulabilir veya ultrasonik frekans aralığında oluşturulan akustik dalgaların kullanıldığı gaz ve sıvı ortamlarındaki akustik uygulamalarını ve biyomedikal uygulamaları temsil ederler. Uygulama temel alındığında bir çok değişik tasarımdaki elektroakustik transdüserler çok geniş frekans aralığında kullanılmaktadır (Şekil 1.6) [16].



Şekil 1.6. Elektroakustik transdüserlerin akustik frekans aralıkları, uygulama alanları ve bu uygulama alanlarındaki transdüser tasarımları

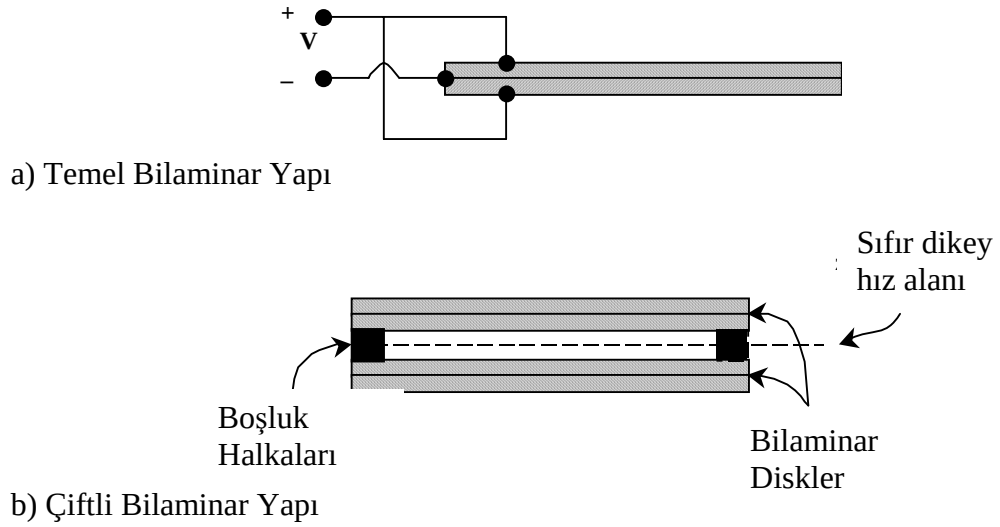
Şekil 1.6 temel alınarak elektroakustik transdüseler genel olarak iki grup altında toplanabilirler:

- Düşük frekansta çalışan elektroakustik transdüseler (10-5000 Hz)
- Dikey (Longitudinal) titreşimli elektroakustik transdüseler (3 kHz->100 MHz)

1.3.1 Düşük Frekansta Çalışan Transdüseler (10-5000 Hz)

Düşük frekansta çalışan elektroakustik transdüseler veya transdüseler serileri düşey titreşim temeline dayanan tasarımlarından farklı olmak zorundadırlar. Bu frekanslarda çalışan transdüseler de düşük güç çıkışıyla birlikte yüksek deplasman karakteristiği beklenmektedir. Ayrıca makul boyutlarda üretilebilmeleri için basit bir seramik diskten farklı yapıda mekaniksel amplifikasyon mekanizmasına sahip olmaları gerekmektedir. Bu gereklilikler düşük yoğunluğa ve düşük rezonans frekansına sahip katman (plate) veya kabuk yapısının esneme hareketiyle elde edilebilir [17].

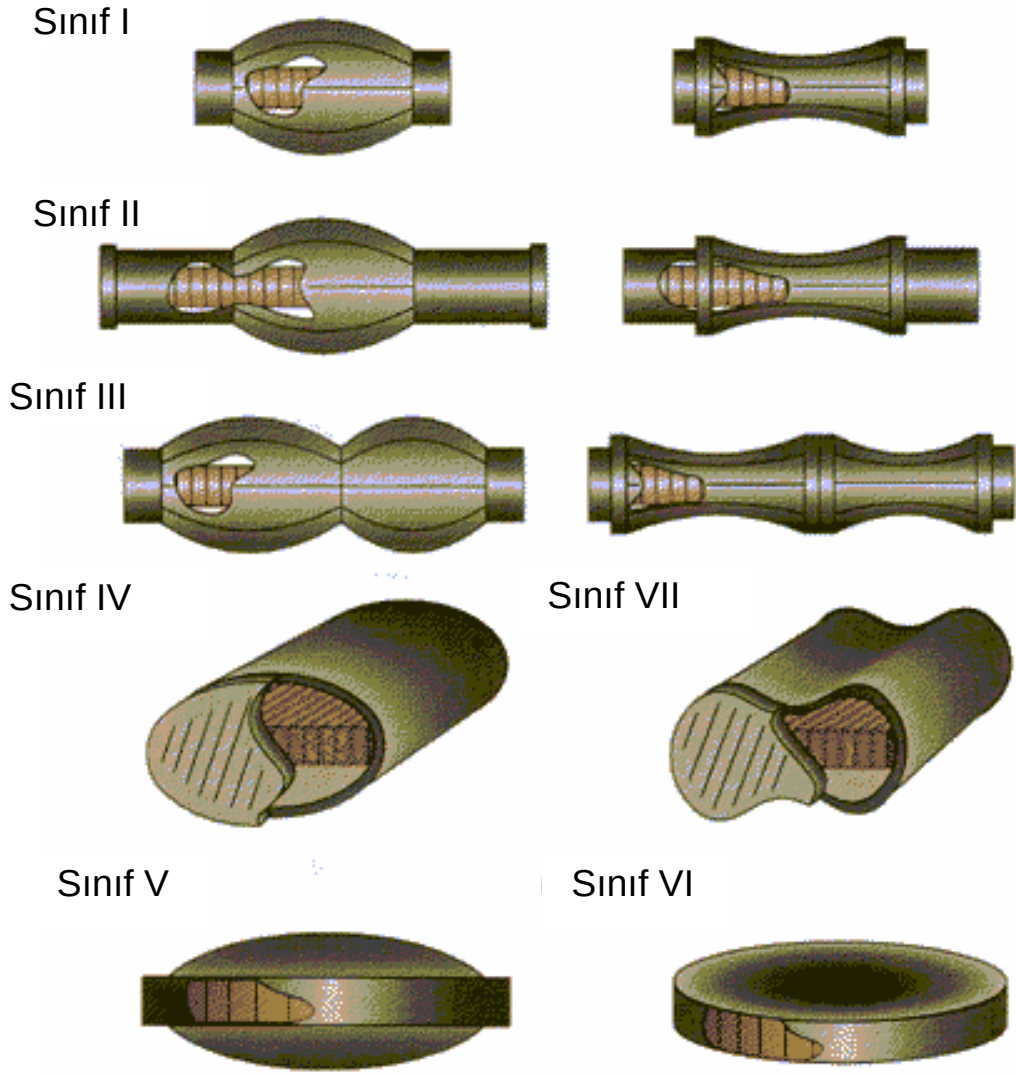
Böyle tip bir elektroakustik transdüsere esnek disk örnek gösterilebilir (Şekil 1.7-a). Bu tip transdüselerde farklı polarizasyon yönlerine sahip iki piezoelektrik disk birbirine bilaminar yapı oluşturacak şekilde bağlanır. Uygulanan elektrik alanı her iki diskte farklı yönlerde yanal (transverse) deplasmanlara yol açar ve bu da disklerin merkezinde esneme hareketinin oluşmasına yol açar. Daha yüksek verimliliğe sahip monopol akustik yönlenebilir transdüseler ise çiftli bilaminar yapının kullanılmasıyla elde edilebilir (Şekil 1.7-b). Esnek disk transdüseler basit yapılı ve küçük güç düzeyli transdüseler olarak tanımlanabilirler.



Şekil 1.7. Bilaminar esnek disk transdüserin şematik gösterimi [17]

Son yıllarda, düşük frekans (5kHz'den az) uygulamalarda, yüksek güç ve deplasman değerleri elde edebilmek için üzerinde en çok çalışılan transdüser tasarımı ise esnek transdüser tasarımlarıdır [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 prensibini de tanımlar. Metal kapaklar mekaniksel dönüştürücü olarak davranırlar. Metal kapaklar eksensel gerilmeleri radyal ve teğetsel gerilmelere çevirip değersel olarak amplife ederler. 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 sürücü eleman olarak manyetostriktif çubuk kullanmıştır. Bu ilk esnek transdüserin rezonans frekansı 540 Hz civarındaydı [19]. 1960'lı yıllarda sürücü eleman olarak piezoelektrik malzeme kullanılmasıyla birlikte esnek transdüserler üzerindeki çalışmalarda hızlandı. Günümüzde ise yedi farklı tipte esnek transdüser tasarımı bulunmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Esnek transdüser çeşitleri [19]

Sınıf I transdüserlerinde silindirik seramik ana eksen boyunca metal bir kabukla sıkıştırılır. Bu tasarım seramik boyutunu 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 artırılmıştır. 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. Hayes tarafından tasarlanan transdüserde piezoelektrik seramik kalın eliptik 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 tasarımında 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 eksenel 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 yayılım yüzeyi iç bükey şekildedir. Standart tip esnek transdüserlerin, tasarımlarının kesin doğru olarak uygulanma zorluğundan ve ayrıca ağır ve büyük yer kaplayan yapılarından dolayı kullanımları sınırlanmaktadır [16-22].

Free-Flooded Ring olarak adlandırılan tasarım ise diğer yaygın kullanım alanına sahip düşük frekanslı elektroakustik transdüserdir. Silindirik kabuk şeklinde tasarıma sahiptirler. Free-flooded tasarımından dolayı içerisindeki basıncın serbest bırakılmasına ihtiyacı yoktur ve bu yüzden hidrostatik basınçtan etkilenmezler. Bu tip transdüserler genelde 4 kHz'den yüksek frekanslarda çalıştırılırlar [17].

1.3.2 Yüksek Frekans Transdüserleri

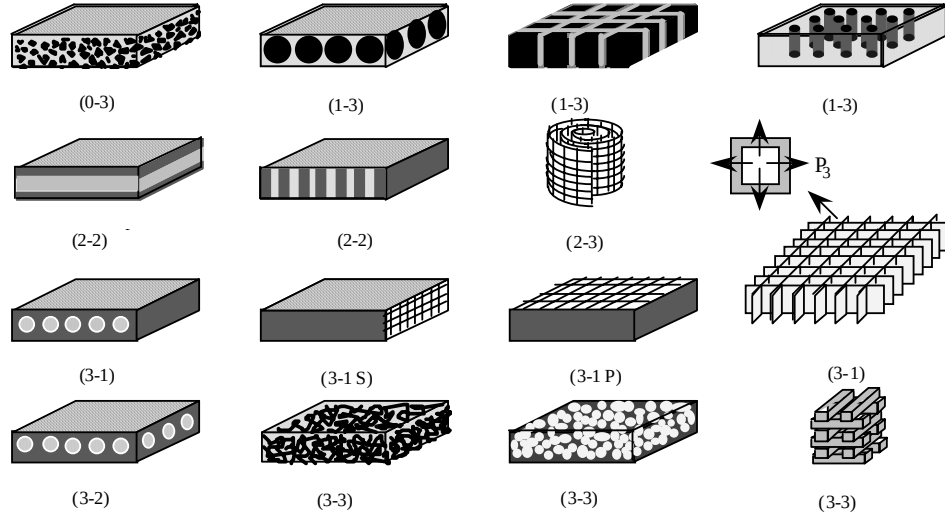
Yüksek frekansda çalışan bu tip transdüserler düşey deplasman tasarım karakteristiğine sahiptirler ve 3 kHz'den 100 MHz'i aşan geniş frekans aralığında uygulama alanları bulunmaktadır. Bu geniş aralıktaki uygulamalarda, silah ve tesbit sonarları 5-50 kHz aralığında, maden tesbit, okyanus topografya profil tesbit ve balık bulucu transdüserleri 50-600 kHz aralığında, sualtı yüksek çözünürlük görüntüleme serileri 600 kHz-3 MHz aralığında, medikal ultrasonik görüntüleme ve tahribatsız muayene cihazları 3 MHz'den yüksek ve ultrasonik mikroskoplar

gigahertz civarındaki frekanslarda kullanılırlar [16-22]. Değişik frekanslarda kullanılan transdüserler değişik malzeme içeriklerinin yanında değişik tasarımlara ve farklı üretim yöntemlerine sahiptirler. 1 MHz'in üzerinde bulunan ultrasonik uygulamalar için tek parça seramik kalınlık modunda kullanılabilir. 300-500 kHz seviyesindeki daha düşük uygulamalarda ise 1-3 kompozit transdüserlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. 100 kHz'in altındaki uygulamalar ise Tonpiz transdüserler tarafından domine edilmektedir [8].

100 kHz'den > MHz seviyelerindeki transdüserlerde sürücü eleman olarak sadece seramik kütlenin kullanılması uygulama açısından verimli olmamaktadır. Çünkü gerekli olan boyutlarda, yüksek frekanslarda kalınlık modundan önce radyal ve bükülme modları görülmekte ve bu modların harmonikleri oluşabilmektedir. Bu probleme ek olarak bu tip transdüserlerin düşük hidrofoni katsayısına sahip olmaları da yeni tasarımlara ihtiyaç gerektirmiştir. Birbirinden bağımsız transdüserlerden seriler oluşturmak, istenmeyen radyal ve bükülme modlarının elimine edilmesine yardımcı olabilir. Yüksek frekanslar için diğer bir tasarım yönteminde ise tasarımdaki boşlukların polimer gibi daha esnek bir yapıyla doldurulması planlanmıştır. Polimer faz g_{31} ile bağdaşmakta ve daha yüksek yararlılık katsayısının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tip transdüserler piezoelektrik-polimer piezokompozit sınıfını oluştururlar ve fazların dizilimlerine göre adlandırılırlar. Aralarında en yaygın kullanıma sahip olanı özellikle medikal ultrasonik görüntüleme sistemlerinde kullanılan 1-3 piezokompozitlerdir [23].

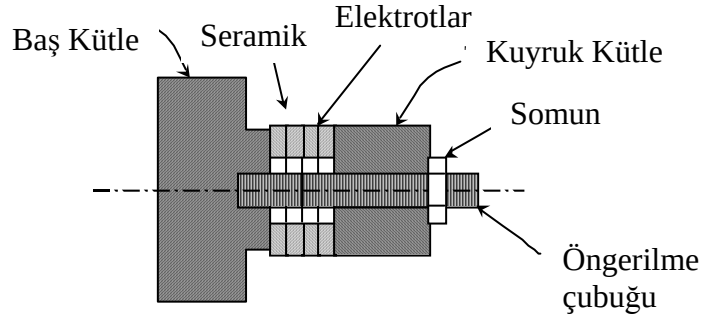
Bu tip piezokompozit tasarımı ihtiyacı sualtı transdüserlerinde kullanılan serilerde boy ve ağırlık parametrelerini azaltmak üzere doğmuştur. İlk tasarım prototipleri Pennsylvania State Üniversitesinde Newnham ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Bu tip kompozit transdüserler aktif piezoelektrik seramiğin yanında değişik dizilimlere sahip polimer faz içerirler. Newnham fazların kendisiyle temas halinde olabileceği eksen sayısına göre adlandırma yapmıştır. Bu şekilde 10 adet dizilim mümkün olmaktadır. Bu isimlendirme iki adet rakam kullanılarak yapılmakta ve ilk rakam aktif fazı ve ikinci rakamda pasif fazı temsil etmektedir. Böylece bu tip transdüserler toplam 10 adet olan 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 3-2, ve 3-3 dizilimleri ile temsil edilirler. Günümüze kadar on adet tasarımdan sekiz farklı dizilim üzerine çalışılmıştır. Çalışılan dizilimlerin şematik

gösterimi Şekil 1.9’da verilmiştir. Polimer faz d_{33} ve d_{31} katsayılarını etkin olarak azaltmaktadır. Fakat aynı zamanda dielektrik sabitin azalması yüksek hidrostatik voltaj katsayısına, g_h , sebep olmaktadır. Ayrıca azalan yoğunluk transdüserin ortamla akustik empedans uyumunu artırmaktadır. Geniş bant aralığı ve düşük elektriksel kayıplarda bu transdüserlerin özellikleri arasındadır [23-25].



Şekil 1.9. Piezoelektrik seramik-polimer kompozit transdüserlerde dizilimler [23]

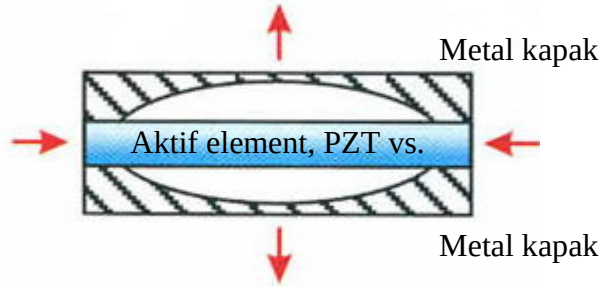
10-100 kHz aralığındaki uygulamalarda büyük kalınlıklar gerektirdiğinden dolayı yarım dalgaboyu ($\lambda/2$) rezonant seramik blok doğrudan rezonator olarak kullanılamaz. Çünkü kalın seramiklerin kutuplanması uygulamayı engellemektedir. Bu yüzden transdüserin rezonans frekansını düşürmek amacı ile seramik bloğun her iki tarafında baş ve kuyruk kütleleri olarak adlandırılan ağırlıklar kullanılabilir. Ayrıca transdüserin yüksek hacime sahip olması da yüksek akustik güç çıkışı için önemli olmaktadır. Böylece transdüserin yayılım alanını artırarak oluşan yüksek gerilme altında yüksek hacim değişimi ve su ile transdüser arasında daha iyi bir akustik empedans uyumu elde edilebilir. Bu gereklilikler göz önüne alınarak geliştirilen Tonpilz transdüser mantar yapısına benzerliği ile ‘singing mushroom (şarkı söyleyen mantar)’ olarak adlandırılmıştır [17] (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Tonpiz transdüsünün yapısının şematik gösterimi

Tonpiz transdüser her iki ucundaki ağırlık ve seramik halkalar ve seramik halkalara öngerilim uygulayan merkezi çubuktan oluşmaktadır. Kuyruk ve baş kütleleri transdüsünün rezonans frekansını düşürmektedir. Seramik halkalara elektrik alanı uygulandığında, uç kütleler zıt yönlerde hareket ederek merkezi çekimin sabit olmasını sağlarlar. Eğer her iki kütle birbirine eşit ise tasarımın dengede olduğu söylenebilir ve böylece ön ve arka taraftaki akustik güç birbirine eşit olacaktır. Diğer yandan eğer arka kütle ön kütleden çok daha ağır ise deplasmanın büyük bölümü ön tarafta gerçekleşir ve bu da yönlendirilmiş akustik saçılma sağlar. Tonpiz transdüser tasarımında uygulama döngüsü esnasında piezoelektrik halkalar çekme gerilmelerine maruz kalırlar. Bu çekme gerilmelerinden dolayı seramik halkaların kırılmasını önlemek amacıyla transdüser tasarımında seramiklere çekme gerilmelerinden daha yüksek bir basma gerilmesi sağlayan merkezi çubuk bulunmaktadır. Merkezi çubuk transdüsünün uç kütlelerinin hareketini engelleyebilir fakat bu dezavantajda eğer çubuğun katılığı seramik halkaların oluşturduğu sistemden yeteri kadar küçükse tolere edilebilir. Böylece çubuk için tasarım gerekliliğini halkalara yeteri kadar güç uygulayabilecek olması ve aynı zamanda uç kütlelerin hareketini engellemeyecek elastikiyetde olması belirlemektedir. Seramik halkaların kalınlığı ise 5-15 mm arasında değişmektedir. Sistemin gereksinimlerine göre sert PZT (PZT-4, PZT-8) veya yumuşak PZT (PZT-5A, 5H) kullanılabilir. PZT seramikler ve uç kütle bağlantıları genelde epoksi reçine ile sağlanır. Uygulamalar için bağlayıcı mukavemetinin en azından 10 MPa civarında olması beklenmektedir [17]

Son yıllarda esnek transdüserlerin minyatüre edilmesi, yüksek verimlikte esnek transdüser elde edilmesi ve akustik uygulamalarda tonpilz transdüserine alternatif yaratmak için çalışılan diğer transdüserler ise hilal tip (moonie) ve zil tipi (cymbal) transdüserlerdir. Her iki tip transdüserde esnek transdüserler temel alınarak tasarlanmıştır. Bu tip transdüserler 100'kHz in altında kullanılabilirler. Moonie transdüserler de hilal şeklinde boşluklara sahip metal kapaklardan ve seramik sürücü elemandan oluşurlar (Şekil 1.11) [26]. Bu çalışmanın konusu olan cymbal transdüserler ise moonie transdüserlerin bir sonraki neslini temsil ederler ve daha ince farklı oyuk şekline sahip metal kapak ve sürücü elemanlardan oluşurlar.



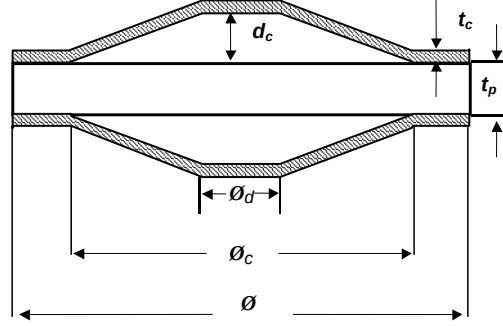
Şekil 1.11. Moonie transdüserin yapısının şematik gösterimi

1.3.2.1 Cymbal Tip Esnek Kompozit Transdüser

Tek bir cymbal transdüser, iki adet koniksel boşluğa sahip metal, seramik veya plastik kapaklar arasına sıkıştırılmış piezoelektrik diskten oluşur. Zil tipi transdüserin tasarımı Şekil 1.12'de gösterilmiştir. Basit bir piezoelektrik disk için, hidrostatik piezoelektrik katsayı d_h Eşitlik 1.9'da verilmiştir.

Kurşun-zirkonat-titanat (PZT) seramikleri yüksek piezoelektrik katsayılarla (d_{31} ve d_{33}) sahip olmalarına rağmen bu katsayıların ters işaretli olması sonucunda hidrostatik piezoelektrik katsayıları (d_h) düşük olmaktadır. Cymbal transdüser tasarımındaki metal kapaklarda bulunan koniksel boşluklar, bu kapakların mekaniksel dönüştürücü olarak davranmalarını sağlar. Eksensel gerilimler metal kapaklar tarafından yanal gerilimlere dönüştürülür. Böylece etkin d_h değerinin bulunmasında d_{31} ve d_{33} katsayıları birbirleriyle toplanır konuma gelir. Diğer yandan, seramiğin yanal deplasmanı metal kapaklarla eksensel deplasmana

çevrilir ve amplifiye edilir. Bu sebeplerden, cymbal transdüserler hem sensör hemde tepkileyici olarak kullanılabilirler [27-28].



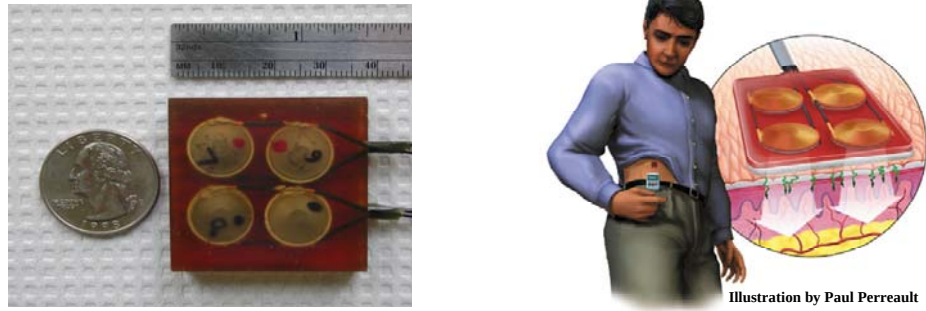
Parametre	Sembol	Referans Boyutlar (mm)
Metal Kalınlığı	t_c	0.25
Oyuk Çapı	$\varnothing_c$	9.00
Oyuk Derinliği	d_c	0.25
PZT Kalınlığı	t_p	1.00
Cihaz Çapı	$\varnothing$	12.7
Düz Yüzey Çapı	$\varnothing_d$	3.00

Şekil 1.12. Zil tipi transdüserin kesit görünümü ve çalışmada kullanılan referans boyutlar.

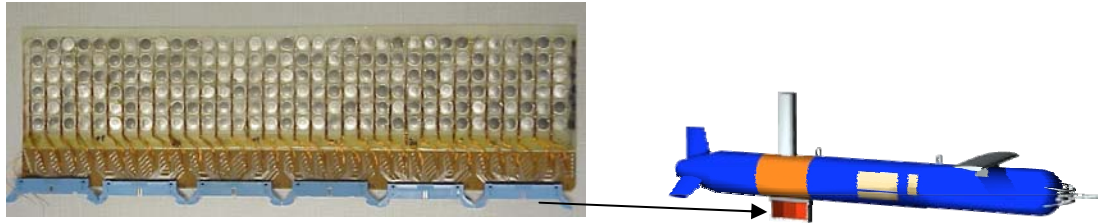
Piezoelektrik, elektrostriktif ve antiferroelektrik-ferroelektrik malzemeler tek veya çok katmanlı olarak aktif eleman görevinde kullanılabilirler [27-28]. Cymbal transdüser tasarımında metalin esnekliği ve seramik elemanın aktif gücü birleştirilmiş ve özellikle sualtı ve akustik sistemlerde geniş kullanım potansiyeli olan bir transdüser yaratılmıştır.

Kutuplanmış ferroelektrik seramikler üç tane birbirinden bağımsız piezoelektrik katsayıya sahiptirler; d_{31} , d_{33} ve d_{15} . Her bir piezoelektrik katsayı itici kuvvet olarak kullanılabilir. Cymbal transdüserin, kutuplama ve uygulanan elektrik alanı yönü sistematik olarak değiştirilerek bu üç bağımsız piezoelektrik katsayıdan yararlanılabilir [29-31].

Cymbal transdüserin çeşitli alanlarda kullanılma potansiyeli çok yüksektir. Araştırmalar 100-200 adet zil tipi transdüserin seriler şeklinde başarıyla bağlanabildiğini göstermiştir. Bu seriler sualtı projektör ve alıcılarında, duyma implantlarında ve biomedikal ilaç taşınımında kullanılabilirler (Şekil 1.13-1.14) [31-33]. Öte yandan tek bir zil tipi transdüserin sağladığı yüksek deplasman (12.7 mm zil tipi transdüser için, parametrelerin ayarlanmasıyla 10-100 μm) ve yüksek blok kuvveti (Referans transdüser için 27 N) [34], bu transdüserlerin mini pompalarda, pozisyon tepkileyicilerinde ve optik sistemlerde kullanılmasını sağlamaktadır. Bir çok zil tipi transdüserden oluşan katmanlı sistem ise elde edilen deplasmanı artırmaktadır. Zil tipi transdüserin tepkileyici ve algılayıcı performansı, metal kapakların malzeme özelliklerinin ve geometrik parametrelerin değiştirilmesiyle rahatlıkla istenilen uygulamaya göre modifiye edilebilir [34].



Şekil 1.13. Cymbal serilerinin ultrasonik ilaç taşınımı sisteminde kullanımı [32]



Şekil 1.14. Cymbal serilerinin sualtı projektör sistemlerinde kullanımı [33]

1.4 Cymbal Transdüserde Simetrinin 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 sıkıştırılsa 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 matriks formunda ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad 1-23$$

Burada; ϵ_i = oluşan 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: $E_1=E_2=E_3 \neq 0$

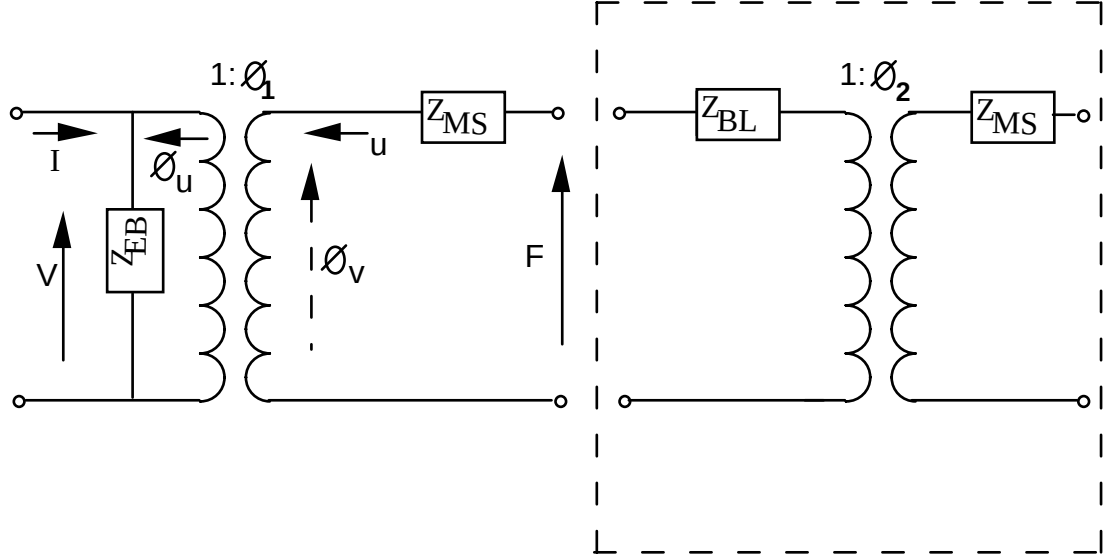
$$\epsilon_1=d_{31}E_3, \epsilon_2=d_{31}E_3, \epsilon_3=d_{33}E_3, \epsilon_4=d_{15}E_2, \epsilon_5=d_{15}E_1, \epsilon_6=0$$

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 eksenel iki uzama, meydana gelir. Cymbal transdüserde yanal uzama, dikey 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.

1.5 Cymbal Transdüserler için Eşdeğer Devre:

Cymbal transdüserler için eşdeğer devre Şekil 1.15’de gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Cymbal transdüserler için eşdeğer devre

burada; V = Transdüsera 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 ya da tam tersi şekilde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Cymbal 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.

İkinci enerji dönüşümünü ise metal kapaklar gerçekleştirir. Bu kapaklar mekanik-mekanik dönüştürücü olarak davranırlar. Piezoelektrik seramiğin elektromekaniksel dönüşüm faktörü (k) malzeme sabitidir, boyuta ve pozisyona bağlı değildir. Fakat cymbal 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 (k_{etkin}) kullanılır. Etkin dönüşüm faktörü doğrudan metal kapakların geometrisine bağımlıdır. Oyuk çapı, derinliği, kapak kalınlığı ve kapak malzemesi cymbal 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.

2. AMAÇ

Bu doktora çalışmasının amacı cymbal transdüserin hem sualtında hem de hava ortamında akustik özelliklerini karakterize etmek, geliştirmek ve uygulama alanlarına yönelik cihaz ve tasarım geliştirmektir. Çalışma dört ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

1. Cymbal transdüserin sualtı projektör ve alıcı performansının optimizasyonu
2. Cymbal transdüserin sualtında değişen basınç altındaki performansının saptanması ve transdüserin kullanılabilecek sualtı derinliğinin tesbiti
3. Cymbal transdüserin çalışma prensibine dayalı, geliştirilmiş tasarıma sahip transdüserlerle sualtı bant genişliğinin artırılması ve akustik yönlendirme eldesi
4. Cymbal transdüserin hava akustik transdüseri olarak kullanımıdır.

Doktora tezinin ilk basamağında cymbal transdüserin sualtı performansı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Değişen geometri ve malzeme parametreleri ile cymbal transdüserin projektör ve alıcı (hidrofon) performansları hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi kullanılarak karakterize edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında cymbal transdüserin hangi derinliklerde kullanılabileceğinin ve bu derinliklerdeki performansının bulunması amacıyla; hidrostatik basınç altında değişik geometriye ve malzemeye sahip cymbal transdüserlerin performansları incelenmiştir. Böylece cymbal transdüserlerin hangi hidrostatik basınç altında bozunuma uğradığı bulunmuştur. Cymbal transdüserlerdeki bu bozunumun sebepleri sonlu elemanlar analizi ile araştırılmıştır.

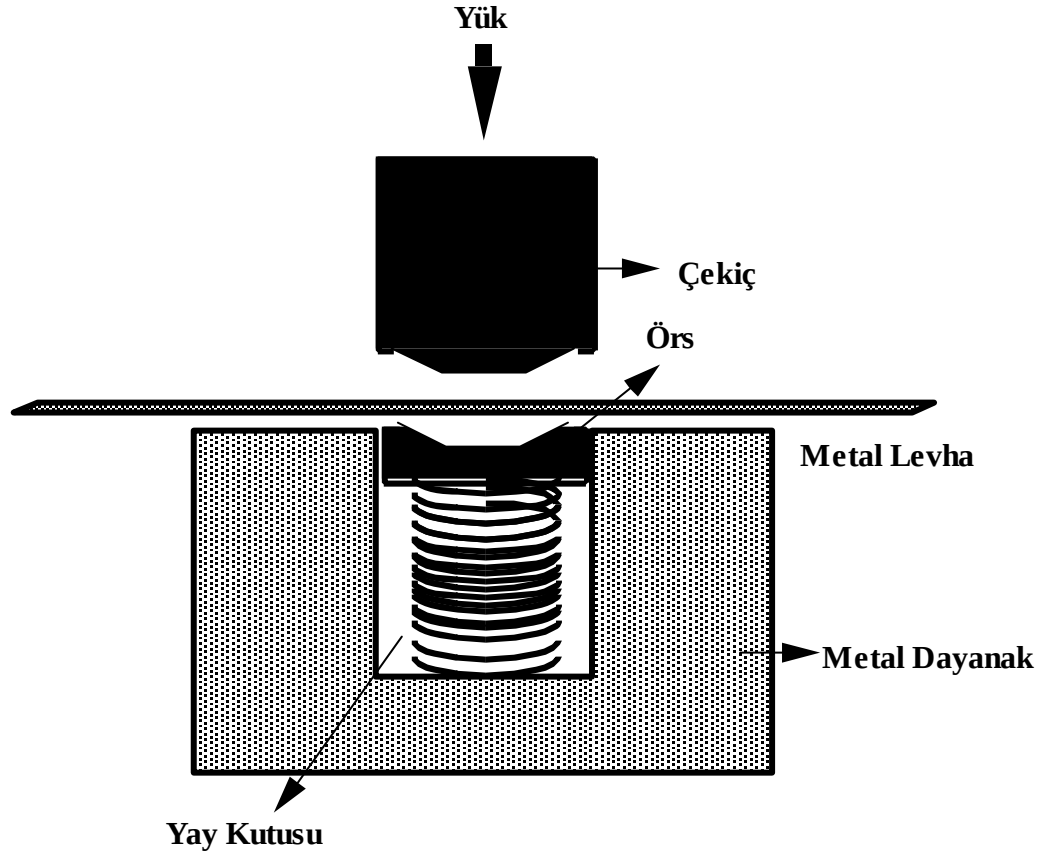
Cymbal transdüserin sualtı uygulamalarında kullanılmasını sınırlayan önemli dezavantajları dar bant genişliği karakteridir. Cymbal transdüserin bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için bu çalışmada yeni tasarımlar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tüm tasarımlar cymbal transdüserin çalışma prensibi gözönüne alınarak geliştirilmiştir. Bu tasarımlarla cymbal transdüserin diğer üstün özelliklerinin yanında (yüksek TVR, FFVS, düşük maliyet ve kolay üretilebilirlik) akustik kullanım bant genişliğinin artırılması ve daha yüksek derinliklerde

alışabilen transdüser tasarımları hedeflenmiştir. Yeni tasarımların sualtı performansları sonlu elemanlar analizi programlarıyla test edilmiştir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında ise cymbal transdüserin hava akustik performansı test edilmiştir. Yüksek düzeyde ses ölçümü için ses kabini kurulmuştur ve FEA yardımıyla transdüserlerin hava akustik performansları ticari hava akustik transdüseri tasarımlarıyla karşılaştırılmıştır. Hava akustik uygulamalarında cymbal transdüserin alarm sistemlerinde, akustik mesafe ölçüm ve yaklaşma sensör sistemlerinde kullanılması düşünülmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Çalışmanın ilk aşamasında değişik boyutlarda transdüserler üretilmiştir. Konik şeklindeki zil tipi kapaklar panç kalıplar kullanılarak üretilmektedir (Şekil 3.1). Referans cymbal transdüser 0.25 mm metal kapak kalınlığına, 12.7 mm transdüser çapına, 9 mm oyuk çapına ve 3 mm konik tavanına sahiptir. Pirinç ve paslanmaz çelikten yapılan zil tipi kapaklar, PZT disklere Ecobond&Epoxy (Eccobond 45LV/ Catalyst 15LV, 3:1, Emerson and Cuming Inc., Woburn, MA) reçine kullanılarak yapıştırılmaktadır. Kapak ve PZT'lerin yapıştırılması esnasında epoksi yapıştırıcının kolay ve fazla yayılmadan istenen bölgeye uygulanması ipek baskı ünitesi kullanılarak sağlanmıştır (Şekil 3.2). Kullanılan seramik PZT diskler (Piezo Kinetics, Inc. Bellefonte, PA/ABD) referans cymbal transdüser için 12.7 mm çapında ve 1 mm kalınlığındadır. Seramikle metal kapakların birbirine yapışmasını geliştirmek amacıyla epoksi uygulandıktan sonra transdüser 70 °C'de 24 saat tutucularla birlikte basınç altında tutulmuştur.



Şekil 3.1. Cymbal transdüser üretimi için kullanılan kalıp



Şekil 3.2. Kapaklar seramik üstüne yerleştirilirken kullanılan ipek elek ve pozisyon ölçer

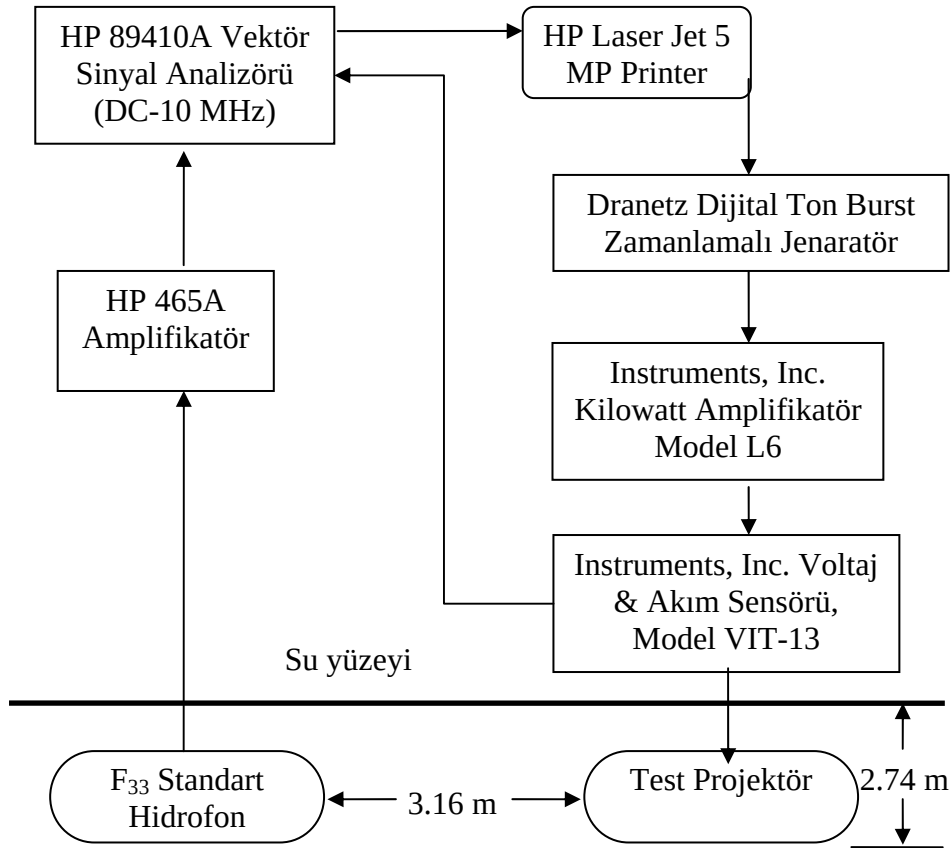
3.1 Ölçüm Teknikleri

Rezonans frekansı, efektif dönüşüm faktörü ve mekaniksel kalite faktörü için gerekli admitans karakteristiği oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta HP 4194A empedans/kazanç fazı analizörü kullanılarak ölçülmüştür.

Sualtı karakteristiği Penn State Uygulamalı Araştırma Laboratuvarındaki (ARL) su tankında incelenmiştir. ARL sualtı tankı 5.49 m derinliğe, 5.33 m genişliğe ve 7.92 m uzunluğa sahiptir. Tankın içindeki su sıcaklığı 22 °C de tutulmaktadır. Tank 233 Ton su içermektedir. Tankın dış duvarlarıyla bina yapısı arasında 15 cm'lik hava boşluğu bulunmaktadır. Tankın iç duvarları ses yansımalarını minimuma indirmek üzere ses absorblayıcı malzeme (Saper, T) ile kaplıdır. Tankın üstündeki hareketli sistem aynı zamanda transdüserler için numune tutucuya sahiptir. Transdüserler bu tutucuya yerleştirildikten sonra, ölçümün gerçekleştirilmesi için hareketli sistem kullanılarak tankın içine gönderilir [29].

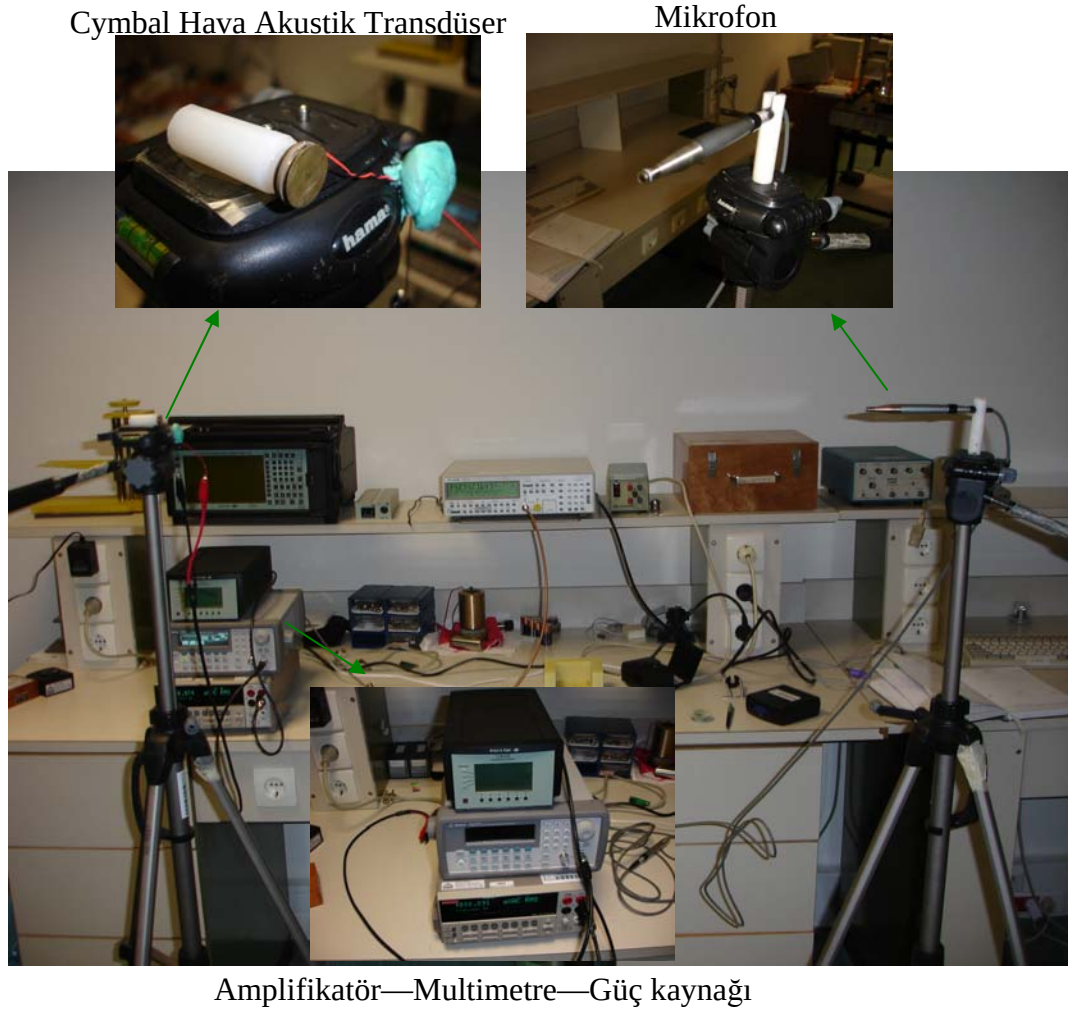
Şekil 3.3 ARL sualtı TVR ölçüm sisteminin blok diyagramını göstermektedir [29]. Kişisel bilgisayardan kontrol edilen HP 89410A vektör sinyal analizörü sistemi kalibre etmek için zamana bağlı sinyal işlemi kullanmaktadır. Dranetz

dijital zamanlama jeneratörü her 2 milisaniyede sinyal üretmektedir. Bu sinyal duvarlarda kaynaklanan etkiyi azaltmak için kullanılmaktadır. Üretilen sinyal amplifikatör ve voltaj akım sensöründen geçirildikten sonra test projektörünün üzerine gönderilmekte ve performansı standard bir F_{33} hidrofon ile test edilmektedir.



Şekil 3.3 TVR ölçümü için ARL’de kullanılan ölçüm sisteminin blok diyagramı [29]

Cymbal hava akustik transdüserlerin hava ortamında akustik ölçümleri Ulusal Metroloji Enstitüsünde (UME) akustik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Değişik mesefelerde ses basınçlarının ölçümleri için 0-100 kHz aralığında çalışabilen Bruel & Kjaer 4939 mikrofon kullanılmıştır. Mikrofondan elde edilen sinyal Nexus düzenleyici amplifikatörden geçirildikten sonra multimetre üzerinde okunan potansiyel değerine göre yaratılan ses basıncı bulunmuştur. Şekil 3.4’de akustik ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.4 Hava akustik ölçümü için UME’de kullanılan ölçüm sistemi

Cymbal transdüserin yük akümülyasyonundaki basınçla değişim, piezoelektrik katsayısı d_h ölçülerek bulunmuştur. Hidrostatik piezoelektrik katsayısı d_h transdüserin sualtında akustik ses basıncına karşı gösterdiği hassasiyettir.

$$d_h = \frac{E}{P} \quad 3.1$$

Burada E transdüser tarafından yaratılan elektrik alanını (V/m) ve P de transdüser üzerine uygulanan basınç (Pa) ifadesidir. d_h piezoelektrik katsayısının birimi 10^{-12} C/N veya basitce pC/N olarak ifade edilir. Piezoelektrik voltaj katsayısı g_h ($= d_h/\epsilon$) ise 10^{-3} Vm/N veya mV m/N ile ifade edilir.

Cymbal transdüserin basınç altındaki etkin d_h parametresinin bulunması amacıyla kullanılan ölçüm cihazı Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Sistem içerisindeki hidrostatik basınç 0-1000 psi arasında ve yaklaşık 0-700 metrelik su derinliğine eşittir. Numunenin içerisine yağ sızmasını önlemek amacıyla numuneler poliüretan ile kaplanmıştır. Sistem çemberi içerisinde (Şekil 3.6) referans transdüser olarak 5 mm kalınlığında, 25.4 çapında ve hidrostatik piezoelektrik katsayısı bilinen seramik disk kullanılmaktadır. Hidrostatik çember içindeki yağ, referans PZT disk ile oluşturulan 30 Hz sinüzoidal sonik basıncı numune üzerine iletir. Bu sırada kutuplama yönündeki elektriksel yük ölçülür:

$$\frac{Q}{A} = d_h P \quad 3.2$$

burada Q = elektrotlarda oluşan yükü,

A = elektrot alanını,

d_h = hidrostatik piezoelektrik yük katsayısını ve

P = dinamik uygulanan ses basıncını ifade eder.

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafınında zaman bağıl türevi alınırsa:

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = d_h \frac{dP}{dt} \quad 3.3$$

burada dQ/dt numunedeki akımı, i, vermektedir. Böylece voltaj V:

$$V = R_f i = R_f d_h A \frac{dP}{dt} \quad 3.4$$

olmaktadır. Burada R_f geri besleme direncidir. Yukarıdaki eşitlikte d_h yalnız bırakılırsa

$$d_h = \frac{V}{R_f A \frac{dP}{dt}} \quad 3.5$$

olur. Yağ çemberinin içinde oluşan basınç bilinmediğinden dolayı çıkış voltajının (V_s) bulunması için referans transdüser PZT disk kullanılmaktadır:

$$V_s = R_f A_s d_{h,r} \frac{dP}{dt} \quad 3.6$$

ve bu eşitlikten

$$d_h = \frac{V A_s}{V_s A} d_{h,r} \quad 3.7$$

burada

d_h = numunenin piezoelektrik hidrostatik yük katsayısını,

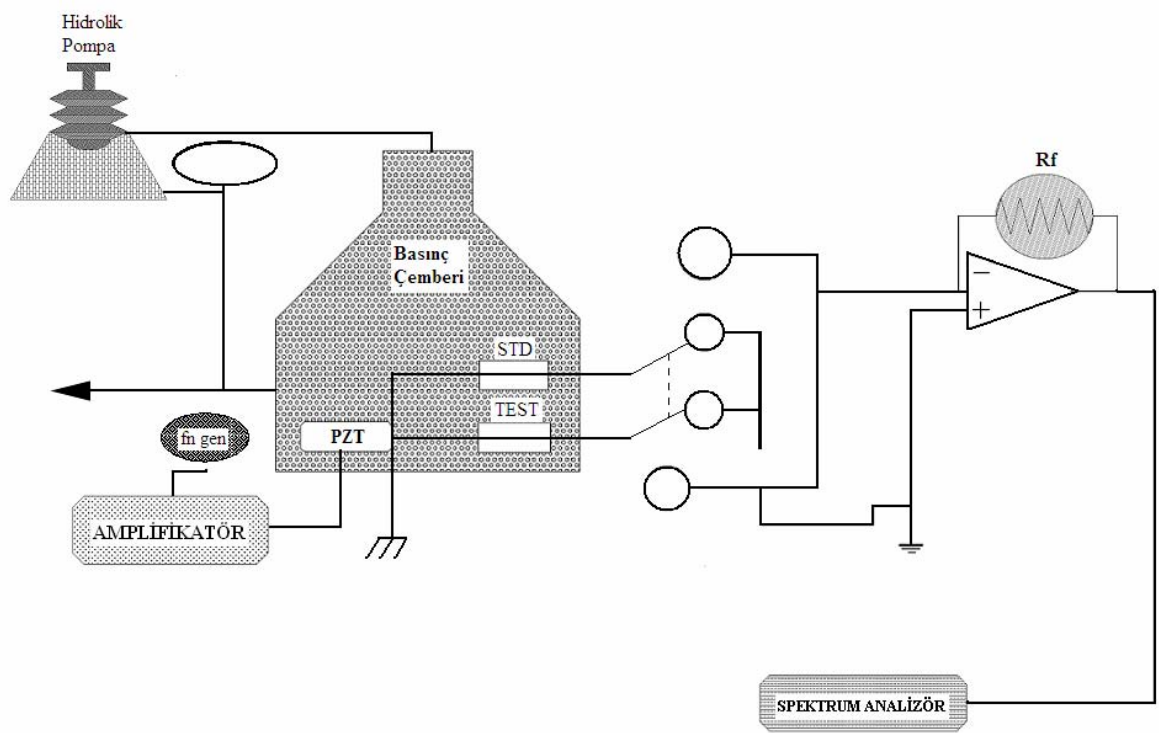
V = numune üzerinden ölçülen voltaj değerini,

V_s = referans numune üzerinden ölçülen voltaj değerini,

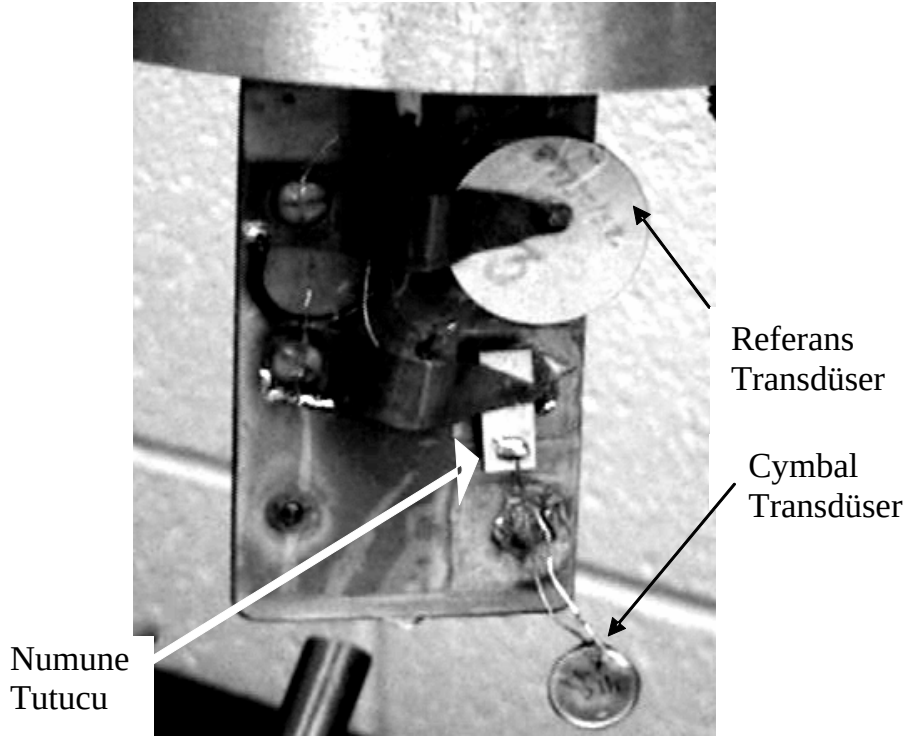
A = numune elektrot alanını,

A_s = referans numunenin elektrot alanını,

d_h, d_s = referans numunenin önceden ölçülmüş piezoelektrik hidrostatik yük katsayısını ifade eder.



Şekil 3.5. Hidrostatik basınç altında piezoelektrik katsayı ölçüm sistemi



Şekil 3.6. Hidrostatik basınç altında numune ve referans transdüser için tutucu sistemi

3.2 Boyut

12.7 mm transdüser çapına sahip olan transdüser hem deneysel olarak hemde sonlu elemanlar analizi kullanılarak (FEA) ayrıntılı bir biçimde çalışılmıştır. Beş değişik boyuta sahip transdüserlerin sualtı özellikleri ise FEA kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmalar esnasında parametreler; oyuk derinliği, oyuk çapı, PZT malzemesi ve kalınlığı, kapak malzemesi ve kalınlığı ve düz yüzey çapı araştırılmıştır. Çizelge 3.1 referans ve diğer ölçeklendirilmiş transdüserlerin boyutlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1. Ölçeklendirilmiş cymbal transdüserlerin boyutları

Ölçek Faktörü	Transdüser Çapı (mm)	Oyuk Derinliği (mm)	Oyuk Çapı (mm)	Metal Kalınlığı (mm)	Düz Yüzey Çapı (mm)	PZT Kalınlığı (mm)
2.75	35	0.68	24.80	0.68	8.26	2.75
1.25	15.8	0.31	11.20	0.31	3.73	1.25
1.0	12.7	0.25	9	0.25	3	1
0.75	9.5	0.18	6.73	0.18	2.24	0.75
0.25	3.2	0.06	2.26	0.06	0.75	0.25

Aksi bahsedilmediği sürece bu çalışmada aktif eleman olarak PZT-5H, metal kapak olarak pirinç ve bağlayıcı katman olarak da Emerson ve Cuming epoksi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan metal ve piezoelektrik seramiklerin özellikleri Çizelge 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 Deneylerde ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan metal kapakların fiziksel 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 3.3 Deneylerde ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan PZT seramiklerin fiziksel özellikleri

Özellik	Sembol/birim	PZT-552	PZT-5A	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	$\epsilon_{11}^T (*10^{-8} \text{ F/m})$ $\epsilon_{33}^T (*10^{-8} \text{ F/m})$	1.5 1.3	0.811 0.735	0.797 0.531	0.646 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	$c_{11}^E (*10^{-8} \text{ N/m}^2)$ c_{12}^E c_{13}^E c_{33}^E c_{44}^E c_{66}^E	12.72 8.02 8.47 11.74 2.30 2.35	12.03 7.51 7.51 11.09 2.11 2.26	14.69 8.11 8.11 13.17 3.13 3.29	13.90 7.78 7.43 11.54 2.65 3.06
Elastik Yumuşaklık	$s_{11} (*10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$ s_{12} s_{13} s_{14} s_{44} s_{66}	16.5 -4.78 -8.45 20.7 43.5 42.6	16.4 -5.74 -7.22 18.8 47.5 44.3	11.5 -3.7 -4.8 13.5 31.9 30.4	12.3 -4.05 -5.31 15.5 39.0 32.7
Mekaniksel Kalite Faktörü (Q)	Q_m	65	75	500	1000

3. 3 Analitik Teori Ve Sonlu Elemanlar Analizi

Günümüzün hızla gelişen teknolojisinde, sürekli değişen koşullara adaptasyon sağlayabilecek tepkileyici ve sensör üretimlerinde sonlu elemanlar analizi ile tasarım geliştirilmesi önemini sürekli artırmaktadır. Bu bağlamda sonlu elemanlar analizi programları kullanılarak yapılan boyut ve malzeme optimizasyonları, gelişen uygulamalara göre transdüserin adaptasyonunu hızla sağlamaktadır. Bu doktora tezinde de ANSYS ve ATILA sonlu elemanlar analizi programları kullanılarak cymbal transdüserin tasarım optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır. ANSYS ve ATILA sonlu elemanlar analizi programları bu alandaki en güçlü programlardır. ANSYS özellikle rezonans modlarının bulunmasında ve rezonans modlarındaki hareketin gözlemlenmesinde, üç boyutlu tasarımlar, güçlü hesaplama ve grafik sistemleri ile gerçek sonuçlarla tamamen eşdeğer sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. ATILA ise Kuzey Fransa Elektronik Yüksek Enstitüsü (ISEN, www.isen.fr) tarafından sadece piezoelektrik ve manyetik analizler yapabilmek için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar analizi programıdır. ATILA ile piezoelektrik malzemelerin özellikle sualtında ve havadaki modal ve harmonik akustik analizleri rahatlıkla gerçekleştirilebilmekte ve elde edilen analiz sonuçları deneysel sonuçlara çok yakın olmaktadır. [34-42].

Sonlu elemanlar analizinde piezoelektrik malzeme söz konusu olduğunda elastik malzemelerde için geçerli üç adet serbestlik katsayısına elektriksel serbestlik katsayısı eklenir. Piezoelektrik malzemelerin sonlu elemanlar analizi ile çözümünde kullanılan temel formülasyon aşağıda verilmiştir [43].

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^T & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ -Q \end{pmatrix} \quad 3-8$$

Burada

$[K_{uu}]$, yapının katılık matriksini,

$[M]$, yapının kütle matriksini,

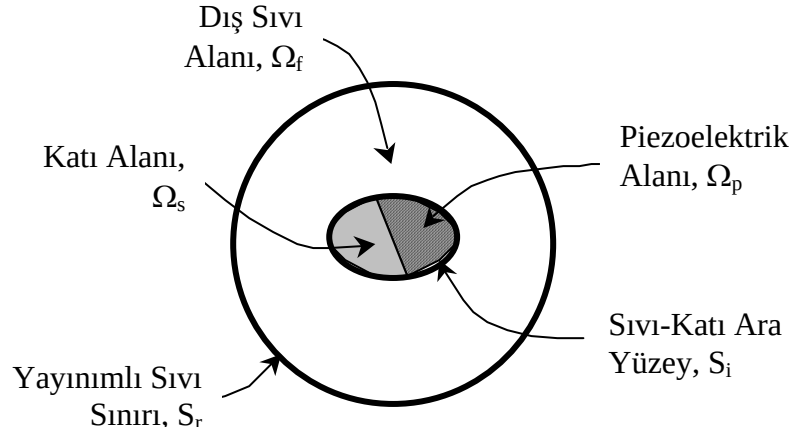
$[K_{u\phi}]$, piezoelektrik katılık matriksini,

$[K_{\phi\phi}]$, dielektrik katılık matriksini,

ω , açısal frekansı,

U, deplasmanın nodlardaki değerinin vektörel gösterimini,
 Φ , elektriksel potansiyelin nodlardaki değerinin vektörel gösterimini,
F, uygulanan yüklerin nodlardaki değerinin vektörel gösterimini,
Q, elektriksel yükün nodlardaki değerinin vektörel gösterimini,
T, ise matriks transpozisyonunu ifade etmektedir.

Piezoelektrik elementin etrafında akustik bir bölge bulunması durumundaki (gaz veya sıvı) notasyonlar Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bu durumda elektriksel ve mekanik alanlar piezoelektrik alan Ω_p içerisinde bağdaşırlar. Katı yapı, Ω_s , sonsuz sıvı alanı, Ω_f ile yüzey alanı, S_r , boyunca temas halinde bulunmaktadır.



Şekil 3.7 Piezoelektrik elementin etrafında akustik bir bölge bulunması durumundaki (gaz veya sıvı) notasyonların şematik gösterimi

Hesaplanması gereken fiziksel çokluklar katıda oluşan deplasman ve sıvı içerisinde oluşan basınç alanları olmaktadır. Bu oluşan deplasman ve basınç alanları U ve P nodal vektörleri ile belirtilir. Böylece oluşan sistem için tüm eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [-L] \\ -\rho^2 c^2 \omega^2 [L]^T & [H] - \omega^2 [M]_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ \rho c^2 g \end{pmatrix} \quad 3.9$$

burada

[H], sıvı sıkıştırılabilirlik matriksi,

[M], koherent kütle matriksi,

[L], yapı ve sıvı arasındaki bağdaşmayı temsil eden matriksi,

ρ , sıvı yoğunluğunu,

c, ses hızını,

ϕ , sıvı domain sınırına dik olan basınç alanlarını temsil eden vektörü temsil etmektedir.

Eğer ki yüzeye yansız bir sınır koşulu uygulanırsa, kullanıcı sıvının örgü yapısını sınırlandırabilir. Yüzey uzak alanın (far field) içinde varsayılırsa, dış sıvı sınırlarında ϕ ve P_α arasındaki ilişki şu şekilde olmaktadır [44].

$$\phi = -[\alpha + jkR](D)\frac{P_\infty}{R} \quad 3-10$$

Burada

R dış sıvı sınırının yarıçapını,

[D] monopolara yayılım matriksini belirtmektedir.

α eğer yapı 3 boyutlu ve aksisimetriye sahip ise 1 değerini, eğer plain strain'e sahip ise $\frac{1}{2}$ değerini almaktadır.

Eğer yansız olmayan bir sıvı sınır durumu var ise sıvı alan yüzey alanı boyunca sınırlandırılır. Yansız durum sadece sıvı sınırı uzak alanın içerisinde ise geçerli olmaktadır ($kR \gg 1$). Uyarıcı deplasman ve kuvvet ve monopol yayılım kondisyonu sistemin içine alınır ise eşitlik aşağıdaki şekilde olmaktadır:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] + j\omega[C_{uu}] - \omega^2[M] & [-L] \\ -\rho^2 c^2 \omega^2 [L]^T & [H] - \omega^2[M] + \frac{\rho c^2}{R} [\alpha + jkR][D] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \quad 3-11$$

Tez çalışması esnasında aksi-simetriden dolayı cymbal transdüser 2 boyutta tasarlanmıştır. Böylece az nod sayısı ve hızlı çözüm hedeflenmiştir. Basınç altındaki yanal, eksensel ve teğetsel gerilme konsantrasyonları ANSYS harmonik analiz ile bulunmuştur. Etkin piezoelektrik katsayılar ise elektrik alanı altındaki hacim değişimi gözönüne alınarak hesaplanmıştır.

ANSYS ile 2 boyutta modellenen ve daha sonra ANSYS içeriğindeki özel grafik programları sayesinde 3 boyutta görülebilen çözüm yapısı Şekil 3.8'de ve ATILA ile oluşturulan model, çevresindeki su alanı ile birlikte Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Yapının kesinlikle 3 boyutlu olarak modellenmesi gerekiyorsa yapının çevresine sıvı alanı koymak nod sayısını büyük miktarda artırmakta ve önemli bir zaman kaybına sebep olmaktadır. Fakat özellikle cymbal transdüserlerin serilerinin modellenmesinde üç boyutlu model kullanılması zorunlu olmaktadır.

ATILA ile 3 boyutlu akustik simülasyon esnasında nod sayısını azaltmak ve çözüm sresini kısaltmak için yüzey elementlerinin akustik hesaplama için kullanılmasını sağlayan EQI adlı özel bir program ISEN tarafından geliştirilmiştir ve bu tez çalışmasında da kullanılmıştır. Bu program sayesinde katı yapı yüzey elemanlarını kullanarak akustik yayılım problemleri için integral hesaplamaları yapabilmektedir. Bu yolla nod sayısı ve çözüm zamanı önemli ölçüde azalmaktadır [45].

EQI için aşağıda gösterilen Helmholtz-Kirchhoff İntegral Eşitliği temel alınmıştır [46].

$$\iint \left\{ p(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n'} - \frac{\partial p(r')}{\partial n'} G(r, r') \right\} dr' = \begin{cases} \alpha(r) p(r) / 4\pi & r \in \Gamma \\ p(r) & r \in \Omega_f \end{cases} \quad 3-12$$

Burada, $G(r, r') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|r-r'|}}{|r-r'|}$ Green fonksiyonunu,

Γ , katı yapının dış yüzeyini,

Ω_f , katı yüzeyin etrafındaki sonsuz sıvı domain i,

r , Γ dışında herhangi bir noktayı

r' , Γ üzerinde bir noktayı ve

$\alpha(r)$, r noktasındaki katı açısını belirtmektedir.

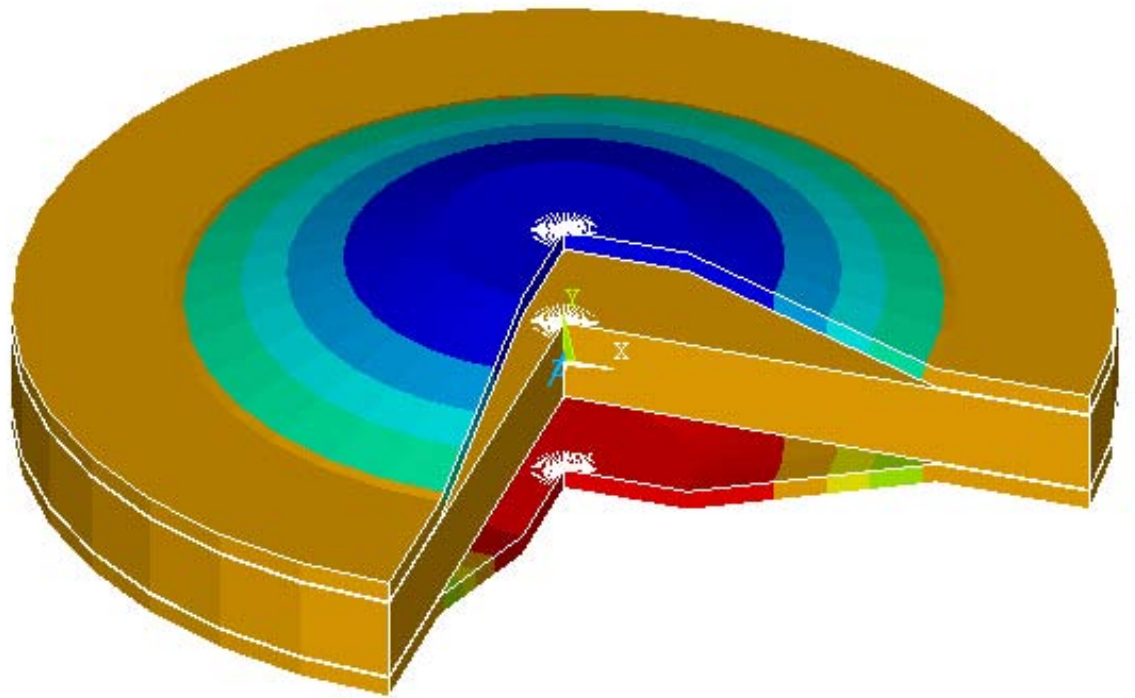
Γ üzerinde integral eşitliğinin çözümü esnasında katı yapının yüzeyi, birbirine nodlarla bağlanmış elementlere bölünür. Her elementteki basınç alanı interpolasyon fonksiyonları ile nodlarla ilişkilendirilir. İntegralin böylece çözümü esnasında nod sayısı 'N' kadar bilinmeyene sahip N tane eşitlik meydana gelir. Bu sistemin matriks formunda tanımlanması aşağıdaki gibidir.

$$[A]\{p\} = [B]\left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \right\} \quad 3-13$$

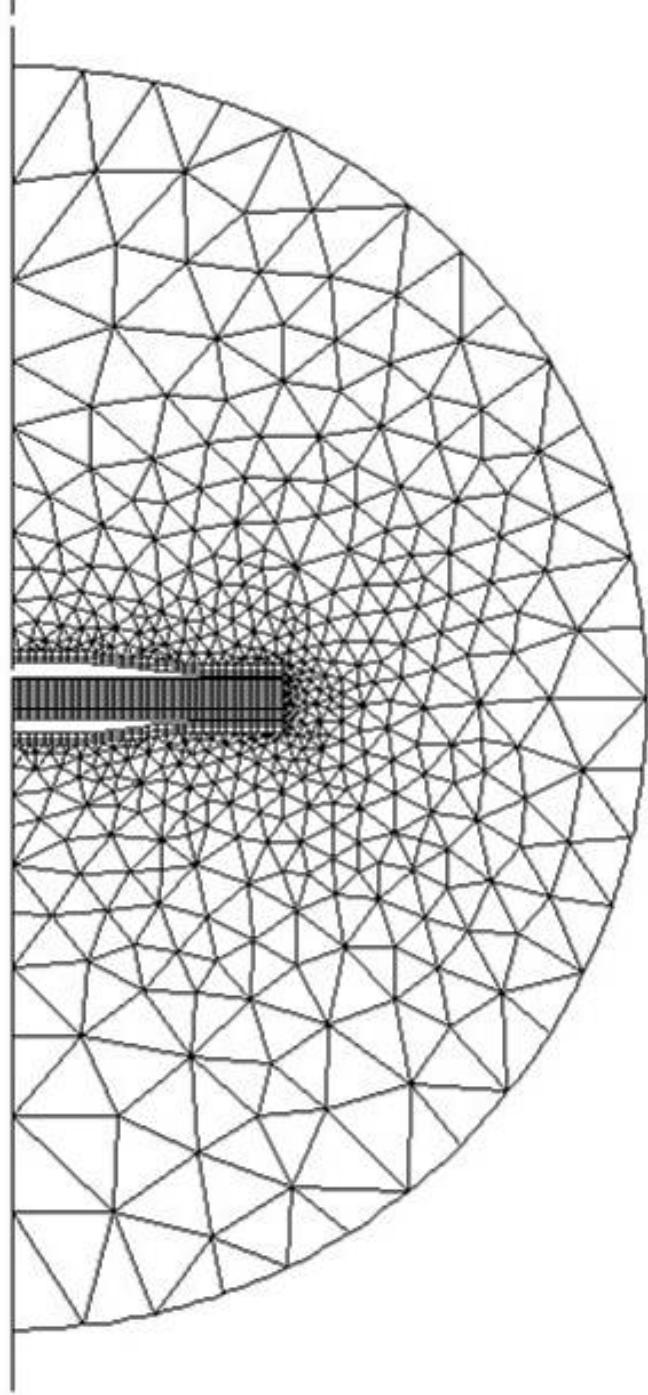
$[B]$ ve $[A]$ matriksleri Green fonksiyonunun integrallenmesinden gelmektedirler. Vektör $\{p\}$ ve vektör $\{\partial p / \partial n\}$ sistemin nodal basınç değerlerini ve bu değerlere dik türevleri belirtmektedir. Yüzeye dik deplasman ise aşağıdaki eşitlikle belirtilir.

$$\frac{\partial p(r)}{\partial n} = \rho \omega^2 u_n(r) \quad 3-14$$

Bu eşitlikleri kullanarak yapılan doğrusal sistemlerin çözümleri yüzey nodlarında oluşan basınç değerlerini ve bu noktalardan belli uzaklıkta ve sıvı alanı içerisinde bulunan noktalardaki basınç değerleri hesaplanabilmektedir. Böylece 3 boyutlu simülasyonlarda katı yapının etrafına sıvı hacmi koymadan yüzey elementleri kullanılarak yakın alan ve uzak alan basınç hesaplamaları yapılabilmektedir. Bu yöntem özellikle seri yapıların hesaplanması esnasında element sayısını önemli ölçüde düşürmekte ve hesaplamayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.8 Cymbal transdüserin ANSYS kodu kullanılarak gerçekleştirilen modellemesi.



Şekil 3.9 Cymbal transdüserin ATILA kodu kullanılarak yapılan sualtı modellemesi.

4. CYMBAL TRANSDÜSERİN SUALTI ALICI VE PROJEKTÖR PERFORMANSI-SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmanın temel amacı cymbal transdüserin sualtı ve hava akustik uygulamalardaki performansının araştırılması ve optimize edilmesidir. Bu amaçla çalışmalar ilk olarak cymbal transdüserin sualtı sonar uygulamalarında projektör ve hidrofon olarak performanslarının karakterize edilmesi ile başlamıştır.

Daha öncede belirtildiği üzere cymbal transdüserler hem alıcı (receiver) modda hemde verici (transmit) modda kullanılabilirler. Elektroakustik transdüser için her iki modda da yönelme paternleri birbirine eşittir. Öte yandan aynı transdüser için projektör ve hidrofon uygulamaları için frekans uygulama aralıklarında bazı farklılıklar vardır. Transdüser projektör olarak kullanıldığı zaman elde edilebilecek en yüksek ses düzeyi eldesi için, su altı rezonans frekansında çalıştırılırlar. Hidrofon olarak kullanıldığında ise rezonans frekansındaki alıcı hassasiyetindeki dalgalanmalardan sakınmak için rezonans frekansının altında çalıştırılırlar.

Daha önceki kısımlarda tartışıldığı üzere, tek parça seramikler hidrostatik basınç altındaki uygulamalar için iyi seçim değildirler. Diğer yandan tek parça seramiklerin hidrostatik performanslarının artırılması için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler şöyle sıralanabilir.

- (i). Seramik elementin bir tarafının akustik yastıklanması
- (ii). Seramik elementin esnekliği yüksek bir polimer ile kaplanması
- (iii). Cymbal transdüserde bulunduğu üzere transdüserin içinde hava boşlukları bulunan mekaniksel amplifikasyon sistemleri oluşturulması.

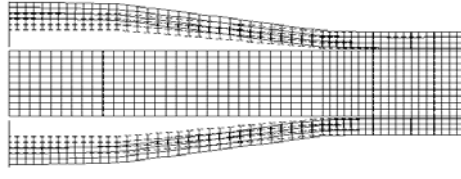
Tek parça seramiklerin hidrostatik basınç altında performanslarının artırılması için kullanılan yöntemlerden üçüncü metoda uyan cymbal transdüserler Sınıf V esnek tip kompozit transdüserlerdir. Çok hafif ve ince yapıdadırlar ve diğer transdüserlerle karşılaştırıldığında büyük miktarlarda serilerde düşük maliyetle kullanılabilirler.

Tez çalışmasının bu bölümünde transdüserin boyut ve malzeme parametrelerinin sualtı performansı üzerindeki etkileri deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmalar esnasında

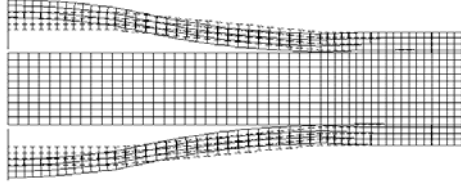
sonlu elemanlar analizi (FEA) ile deneysel çalışmalar iyi uyum göstermiştir. Deneysel çalışmalar ile FEA çalışmalarının uyumluluğu ispatlandıktan sonra malzeme ve boyut parametrelerindeki değişimin cymbal transdüserin sualtı performansına etkileri FEA kullanılarak çok geniş bir malzeme ve boyut parametre spektrumunda incelenmiştir. Transdüser boyutunun, metal yoğunluğunun ve oyuk derinliğinin rezonans frekansı üzerinde önemli etkileri olduğu bulunmuştur. Malzeme ve boyut parametrelerinin ayarlanmasıyla 3 kHz'den 350 kHz'e kadar geniş bir aralıkta rezonans frekansı değerleri elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar transdüserin kullanım alanına göre rezonans frekansının ayarlanabileceğini göstermektedir. Transdüser boyutu, oyuk derinliği ve PZT kalınlığının ise transdüserin sualtı projektör/alıcı performansına etkileri büyük olmaktadır (TVR/FFVS). Transdüserin sualtı performansı tesbit edildikten sonra çalışmalar daha geniş bant aralığı eldesi ve verimliliği artırmak üzerine yapılan çalışmalar ile devam etmiştir. Bu çalışmaların sonuçları ve transdüserin hangi derinlikler altında performansını devam ettirebildiği daha sonraki bölümlerde açıklanmaktadır.

4.1 Titreşim Modları

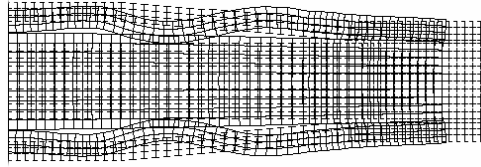
Şekil 4.1 serbest koşullar altında referans transdüserin ilk iki ve seramiğin radyal rezonans modunu göstermektedir. Cymbal transdüserde ilk üç mod metal kapakların rezonans modlarıdır. Birinci mod saf esnek mod olup metal kapağın üst kolları flexural hareket gösterirler. İkinci modda metal kollar üzerinde durağan nodal bölgeler oluşmaktadır ve kolların alt tarafı birbirlerinin tersi yönde hareket etmektedir. TVR grafiklerinde ikinci modda gözlemlenen ani düşüşün sebebi kollar üzerindeki bu hareketlenmeyen bölgeler olmaktadır. Burada gösterilmeyen üçüncü mod da aynı şekilde nodal hareketsiz bölgelere sahiptir Metal kapakların bu modlarını takiben yüksek frekanslarda seramiğin radyal modu gözlemlenir.



(0,1) mod (24.6 kHz)



(0,2) mod (69 kHz)

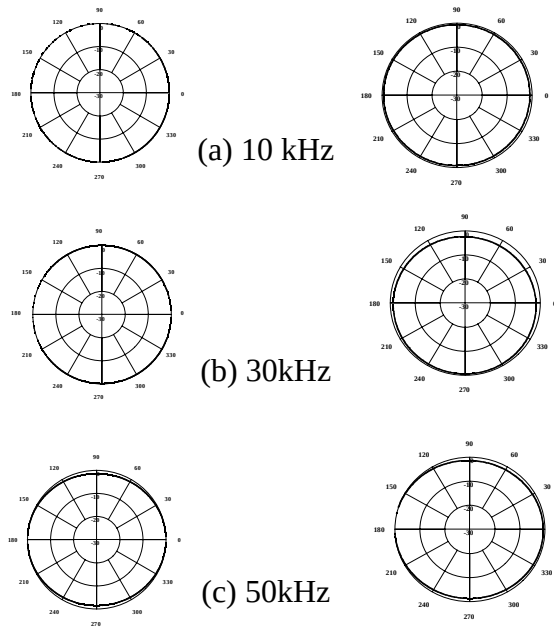


Disk radyal mod (168 kHz)

Şekil 4.1. Zil tipi transdüserde FEA sonucunda bulunan titreşim modları. Kesik çizgiler ilk pozisyonu, düz çizgiler ise deplasman pozisyonlarını göstermektedir.

4.2 Yönlenme Paternleri

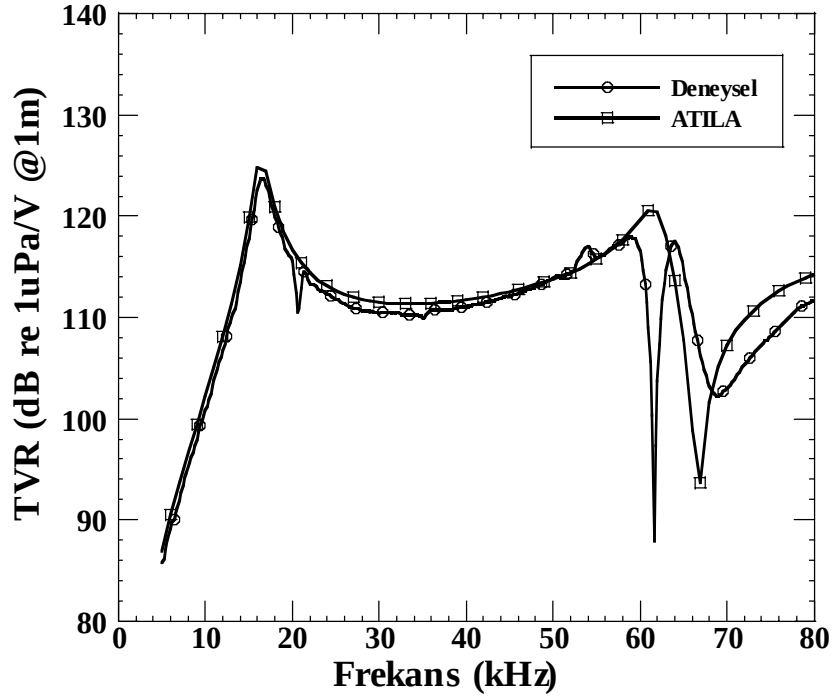
DeneySEL (ARL, Uygulamalı Sualtı Laboratuvarı/ Pennsylvania Eyalet Üniversitesi-ABD, Su Tankında yapılan) ve FEA ile hesaplanan yönlenme paternleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu paternler transdüserle dik alanlar için bulunmuştur. İlk rezonans frekansı ve biraz üstündeki frekanslarda (30-50 kHz) dairesel yönlenme paternleri görülmektedir. Özellikle yüksek frekanslarda, mekaniksel şartların ve test cihazlarındaki değişmelerin zil tipi transdüserin performansı üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 Cymbal transdüserin hesaplanan (sol kolon) ve deneysel (sağ kolon) yönlenme paternleri (Referans boyut, PZT-5H disk ve pirinç kapak).

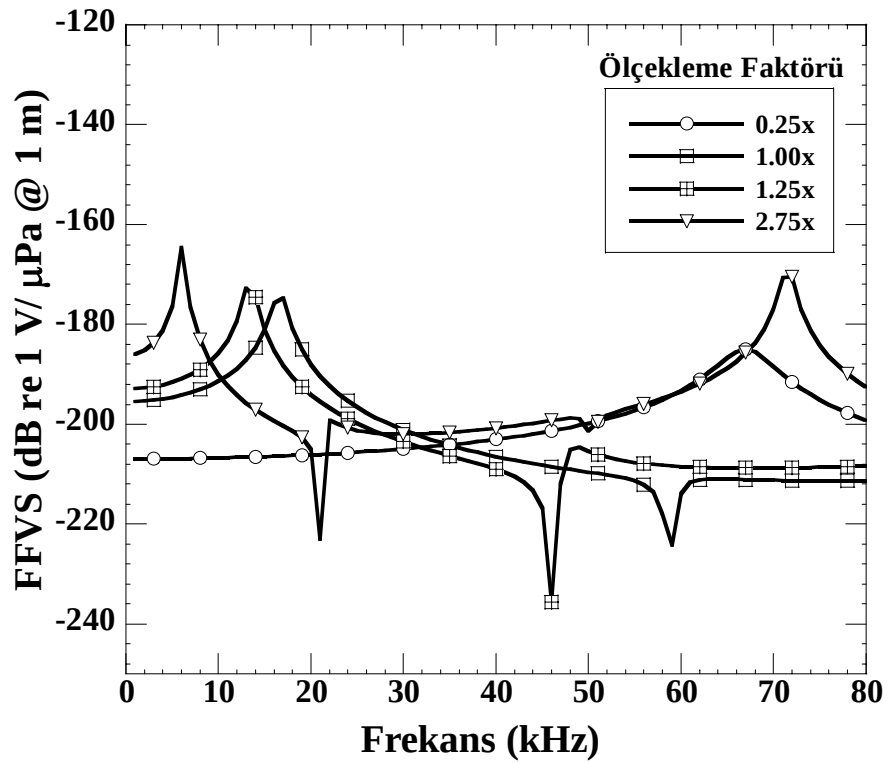
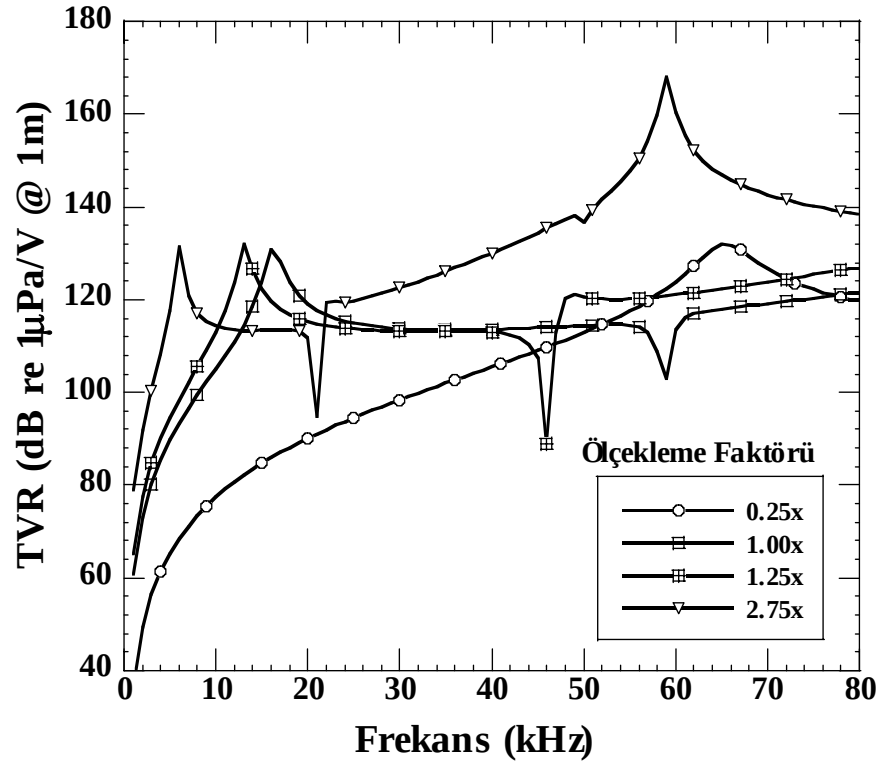
4.3 Sualtı Performansı

Referans boyutlu transdüser için FEA ile bulunan TVR ile deneysel TVR değerlerinin karşılaştırılmaları Şekil 4.3’de görülmektedir. Her iki sonuç birbiriyle uyumludur. İlk esnek modun hemen altında TVR doğrusal artış göstermektedir. İlk iki mod arasında TVR 112 dB’lere kadar düşmektedir ve (0,2) modunda (65 kHz civarı) dip yapmaktadır. Bu esnada metal kapaklar farklı bölgelerinde oluşan gerinimler birbirlerini yok etmektedir. Referans boyutlu tek element cymbal transdüserde mekaniksel Q faktörü diğer esnek transdüserlere oranla bir miktar yüksek değerdedir (~ 14). Öte yandan mekaniksel Q ve elektromekaniksel dönüşüm sabiti (k_{eff}), boyut ve geometrik parametrelerle optimize edilebilmektedir.



Şekil 4.3. Serbest mekaniksel koşullar altında, 0.25 mm oyuk derinliğine sahip referans boyutlu pirinç kapak ve PZT-5H diskten oluşan zil tipi transdüser için deneysel ve FEA (ATILA) ile bulunan TVR spektrumunun karşılaştırılması.

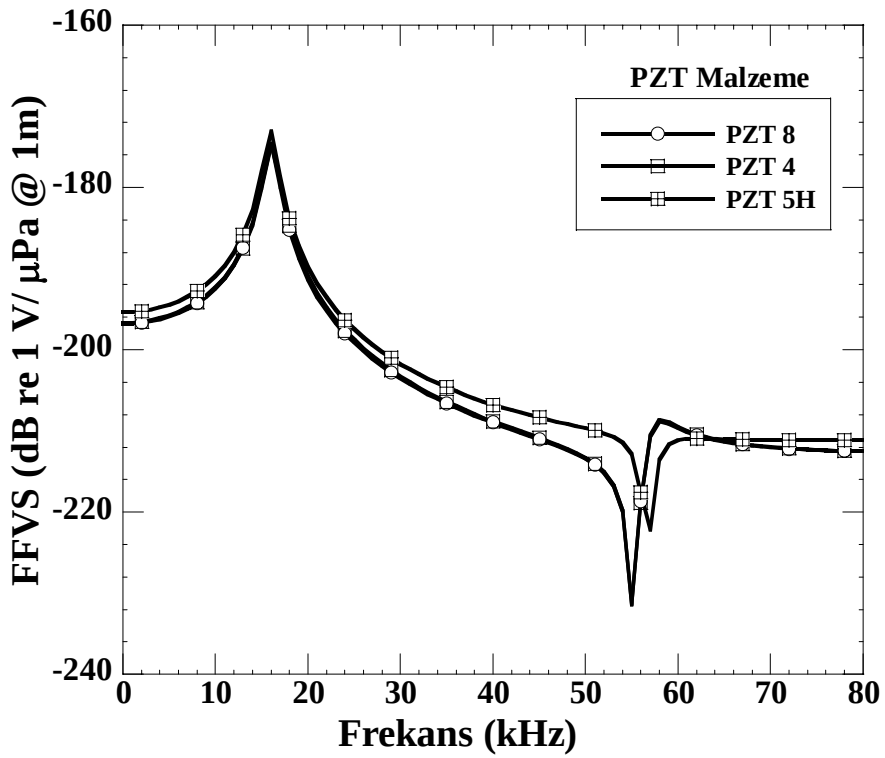
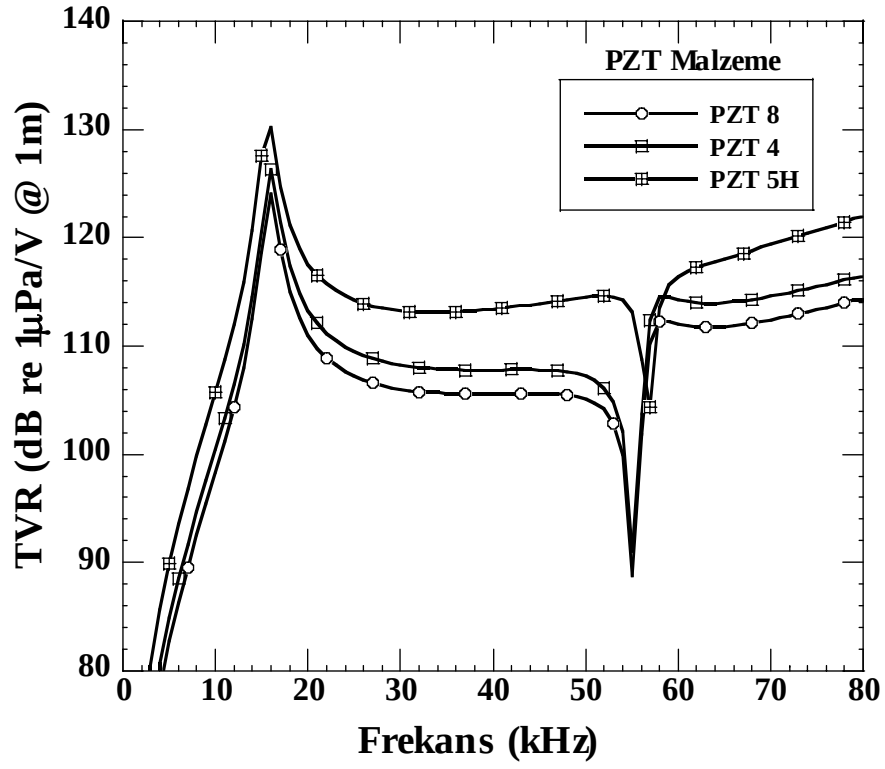
Rezonans frekansındaki ayarlamalar kapak malzemesinin değiştirilmesiyle yapılabilir. Diğer yandan rezonans frekansındaki çok büyük değişimler sadece transdüser boyutunu değiştirerek gerçekleştirilebilir. Şekil 4.4 tüm parametreleri boyut faktörü ile çarpılmış pirinç kapaklı zil tipi transdüserlerin FEA ile hesaplanmış TVR ve FFVS değerlerini göstermektedir. Her transdüser boyutu için frekansdan bağımsız olarak TVR tepe değerleri aynı olmaktadır. 35 mm transdüser çapında ilk mod 6 kHz civarında gözükmemekte ve bu boyutta (0,1) ve (0,2) modları birbirine çok yakınlaşmaktadır. Boyut küçüldükçe su içerisindeki rezonans frekansı da artmaktadır. FFVS tepe değerlerinin ise boyut arttıkça azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.4. FEA ile hesaplanan, boyut faktörünün transdüserin sualtı özelliklerine etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk).

4.3.1 PZT Malzeme ve Kalınlığının Etkisi

Zil tipi transdüserin yapısında, aktif eleman olarak kutuplanmış PZT, mekaniksel dönüştürücü olarak ise epoksi ve metal kapaklar görev yaparlar. Bundan dolayı, zil tipi transdüserin sualtı özellikleri esas olarak PZT element veya özelleştirirsek radyal harekete yol açan piezoelektrik katsayı (d_{31}) tarafından kontrol edilir. Şekil 4.5. değişik sürücü elemana sahip zil tipi transdüserlerin TVR ve FFVS değişimlerini göstermektedir. Rezonans frekanslarının hemen hemen aynı oldukları bulunmuştur ki bu sonuç da rezonans frekansının temelde kapak malzemesine ve geometrisine bağlı olduğunu göstermektedir. Yumuşak PZT (PZT-5H, PZT-5A) kullanılan zil tipi transdüserlerde, yüksek d_{31} katsayısı yüksek TVR değerlerine sebep vermiştir. Sert PZT (PZT-4, PZT-8) kullanılan zil tipi transdüserlerde bu durumun tersi gözlenmektedir. Yumuşak PZT kullanımıyla hassasiyet (FFVS)'de önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte yumuşak PZT'lerin yüksek d sabitesinin yanında, yüksek dielektrik kayıp ve yüksek dielektrik sabitine sahip olmalarıdır. Diğer yandan yüksek kapasitans değerleri çalışma frekans bantları açısından avantaj sağlarlar. Bu sebepten yumuşak PZT'ler hidrofon uygulamaları için tercih edilmelidir.



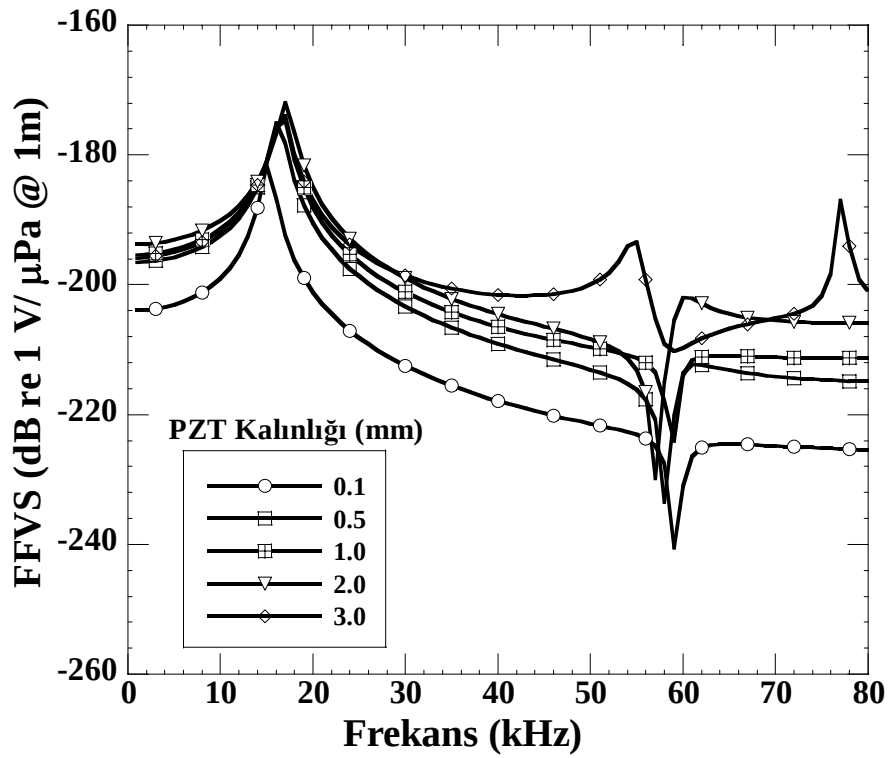
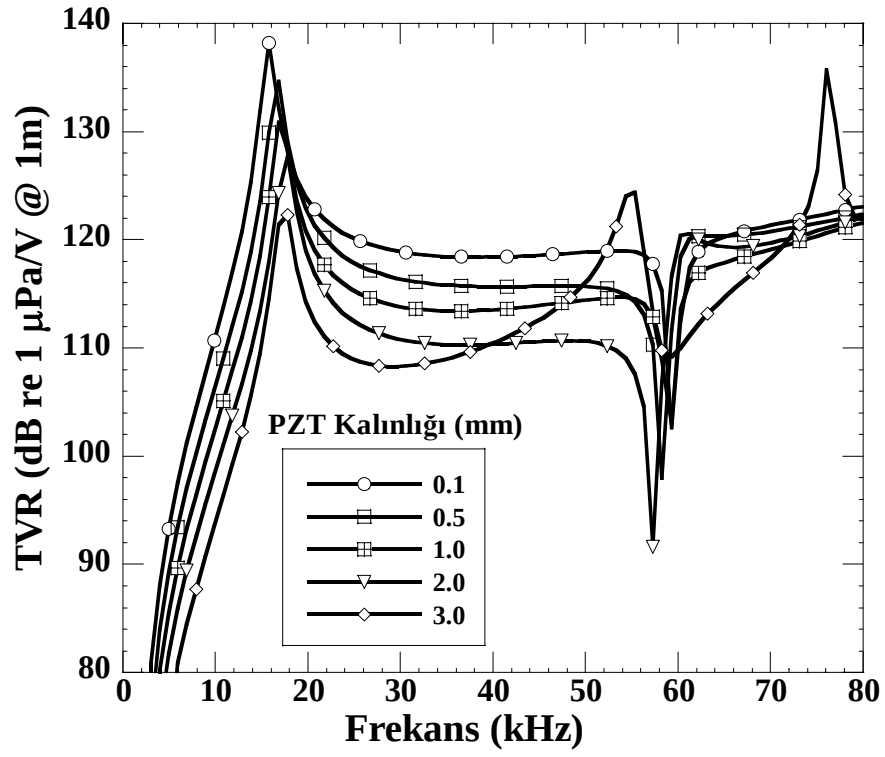
Şekil 4.5. FEA ile hesaplanan, PZT malzemesinin transdüserin sualtı akustik özelliklerine etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk).

Şekil 4.6. PZT kalınlığının TVR ve FFVS üzerindeki etkilerini göstermektedir. Referans boyutlu zil tipi transdüserde 0.1-3 mm arasında değişen PZT kalınlıklarında FEA analizleri yapılmıştır. Beklendiği üzere temel rezonans modu, PZT kalınlığı ile birlikte optimum noktaya kadar artış göstermiştir. Daha kalın sürücü eleman, yapıdaki katılığı artırır ve bu da ilk rezonans frekanslarının artmasına sebep olur. Fakat belli bir kalınlıktan sonra rezonans frekansı hemen hemen sabit kalmaktadır. Kalınlıktaki artmanın ikinci moda etkisinin ise küçük olduğu gözlemlenmiştir. Kalınlık arttıkça ikinci mod daha düşük frekanslara doğru kaymaktadır.

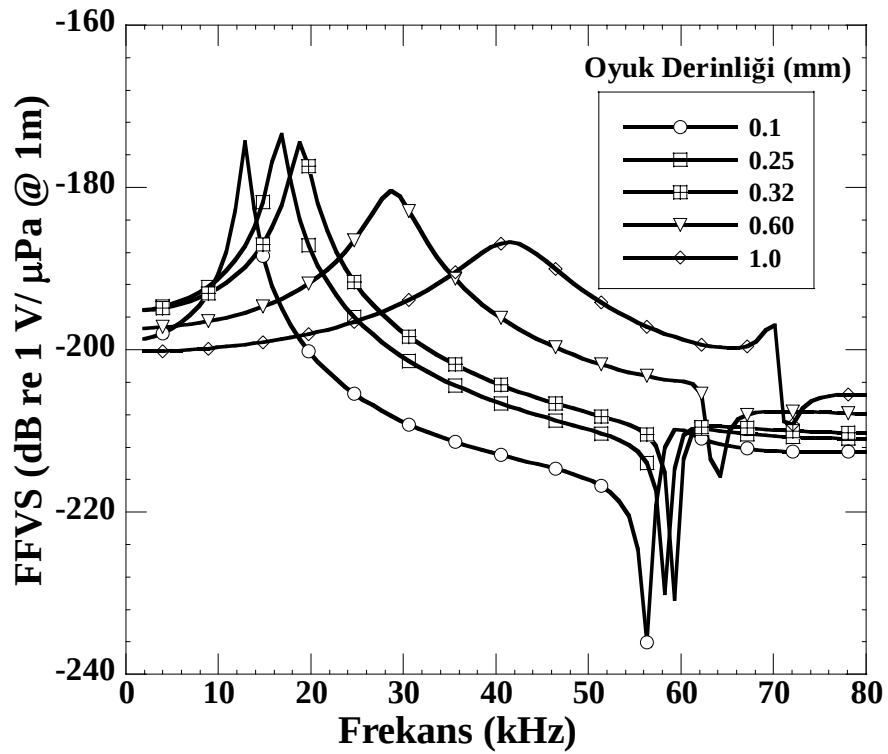
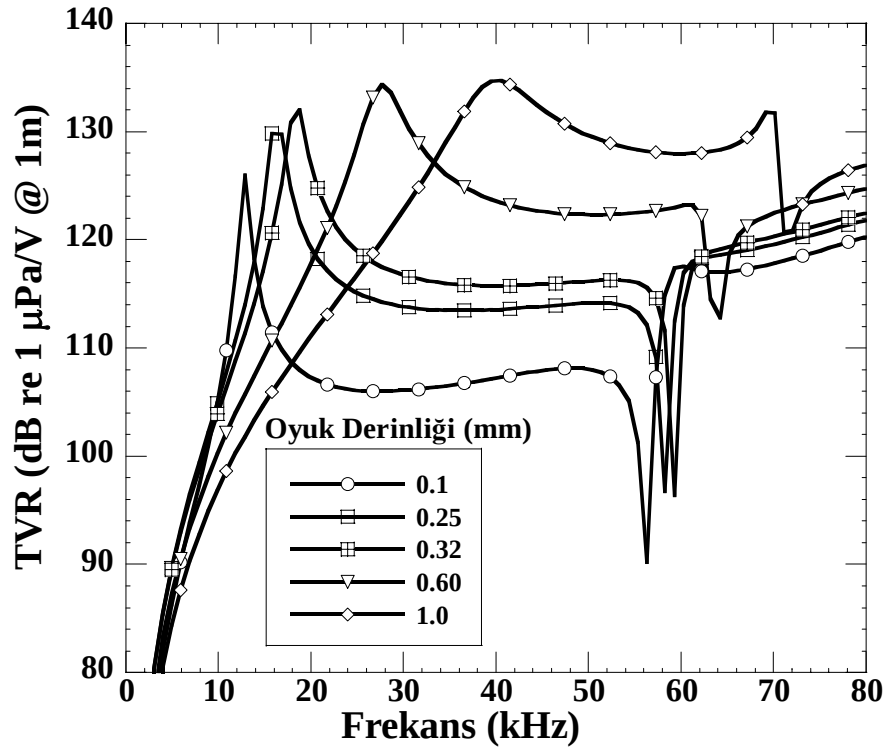
Kalınlık arttıkça TVR değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunu empedansdaki değişime bağlayabiliriz. Bunun yanında seramik kalınlığındaki artış, cihazın daha yüksek voltajlarda çalıştırabilmesine olanak sağladığından ses düzeyinde belirgin bir artış sağlanır. FFVS ele alındığında, temel rezonans frekansı çevresinde hassasiyet göreceli olarak değişme göstermemiştir. Kalınlıkla birlikte FFVS hafifçene artmış ve 2 mm civarında tepe değerine ulaşmıştır. 2 mm PZT kalınlığından sonra elde edilen değişik karakterdeki TVR ve FFVS spektrumları üzerinde ise çalışmalar devam etmektedir.

4.3.2 Oyuk Derinliğinin Etkisi

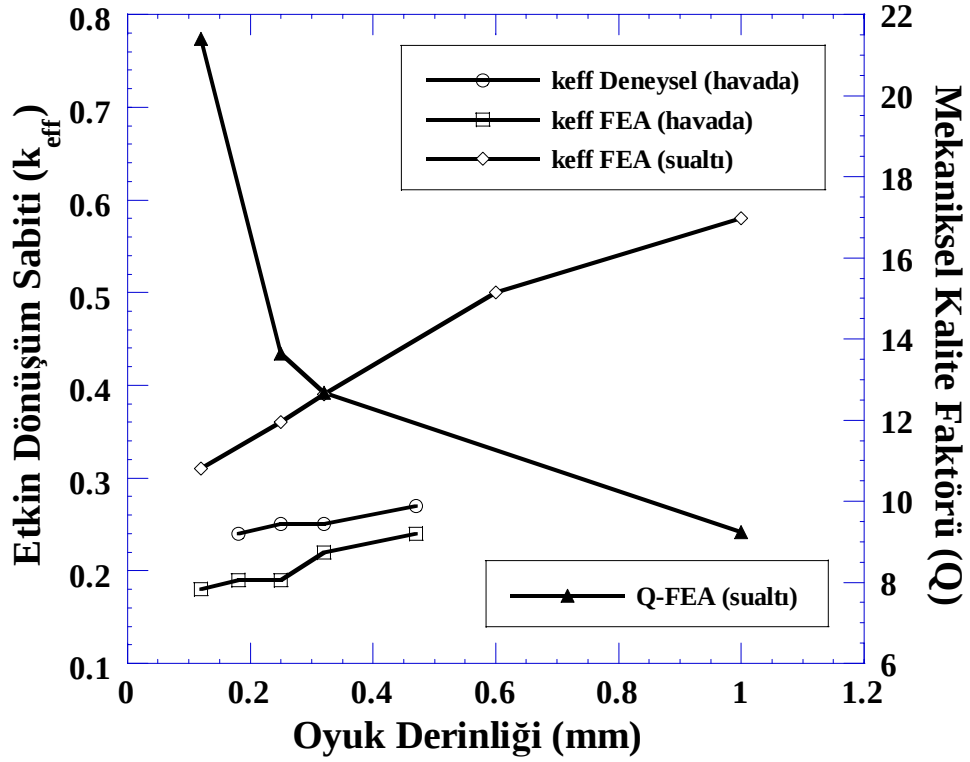
Tüm parametreler gözönüne alındığında TVR ve FFVS şiddetlerindeki en önemli etkiyi kapak oyuk derinliğinin yaptığı bulunmuştur (Şekil 4.7). Referans zil tipi transdüserde eğer oyuk derinliği 0.1 mm'den 1.0 mm'ye çıkarılırsa, TVR şiddeti ilk iki mod arasında 25 dB'lik bir artış göstermektedir. Aynı zamanda temel rezonans frekansı 12 kHz'den 39 kHz değerlerine ulaşmaktadır. Oyuk derinliği artışıyla mekaniksel Q faktöründe hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür (Şekil 4.8). TVR ve FFVS deki bu artışa ise mekaniksel dönüşüm sabitindeki (k_{eff}) yükselme sebep olmaktadır.



Şekil 4.6. FEA ile hesaplanan, PZT kalınlığının transdüserin sualtı akustik özelliklerine etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk).



Şekil 4.7. FEA ile hesaplanan, oyuk derinliğinin transdüserin sualtı akustik özelliklerine etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk)

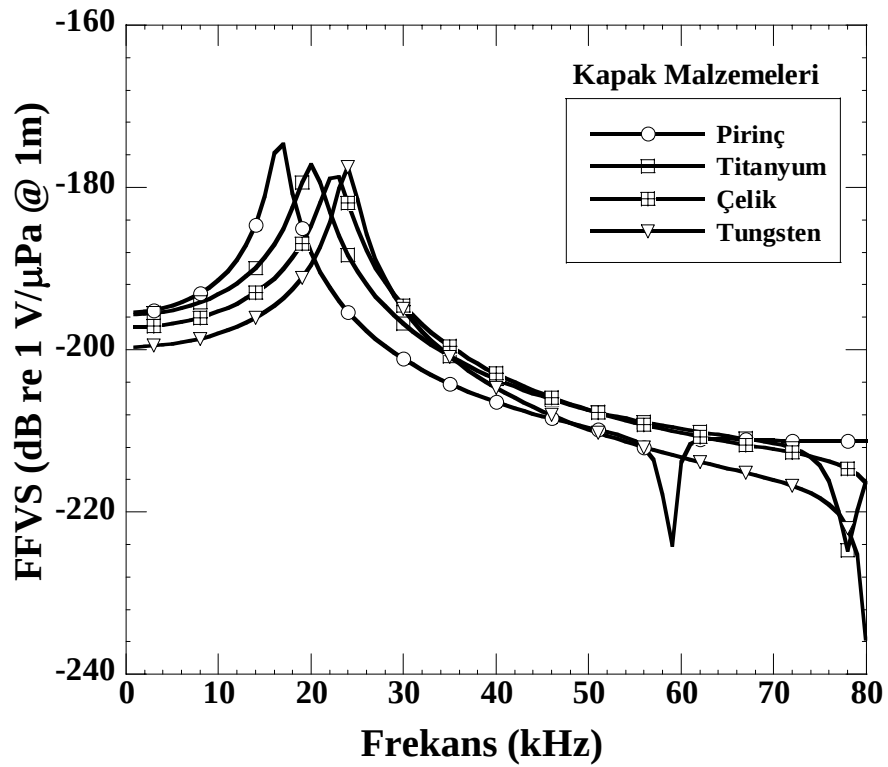
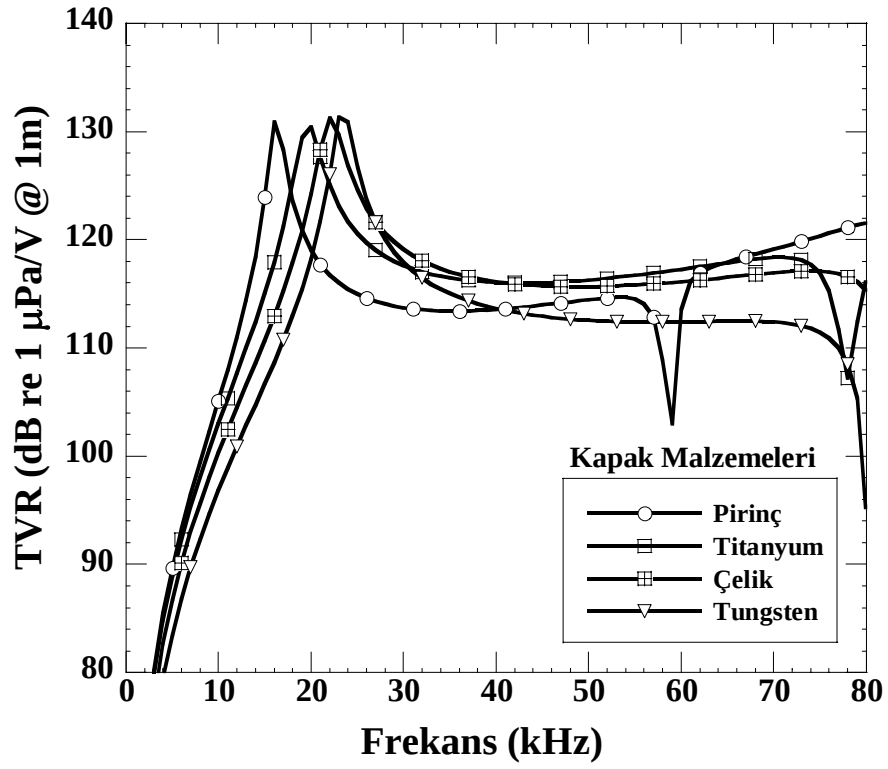


Şekil 4.8. Oyuk derinliğinin elektromekaniksel dönüşüm sabiti ve mekaniksel kalite faktörü üzerindeki etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk).

4.3.3 Kapak Malzemesi ve Kalınlığının Etkisi

Şekil 4.9. farklı kapak malzemelerinden yapılmış cymbal transdüserlerin sualtı projektör ve alıcı performanslarını göstermektedir. Elastik modülünün artmasıyla birlikte hem (0,1) hem de (0,2) modunun frekansları artmakta, aynı zamanda aralarındaki farkta artmaktadır. Cymbal transdüser için bu 2 mod arasındaki fark transdüserin sualtı uygulamaları için kullanılabilir aralığını belirlemektedir. Bundan dolayı daha yüksek elastik modülüne sahip cymbal transdüserler daha fazla kullanılabilir frekans aralığına sahiptirler.

TVR ve FFVS değerleri elastik modülü ile bir miktar değişmektedir. Yüksek elastik modülüne sahip kapaklar yüksek TVR fakat düşük FFVS sağlamaktadır. Kullanılabilir frekans aralıklarının ve basınç toleranslarının fazla olmasından ötürü yüksek modüle sahip malzemeler kapak olarak tercih edilmektedir.

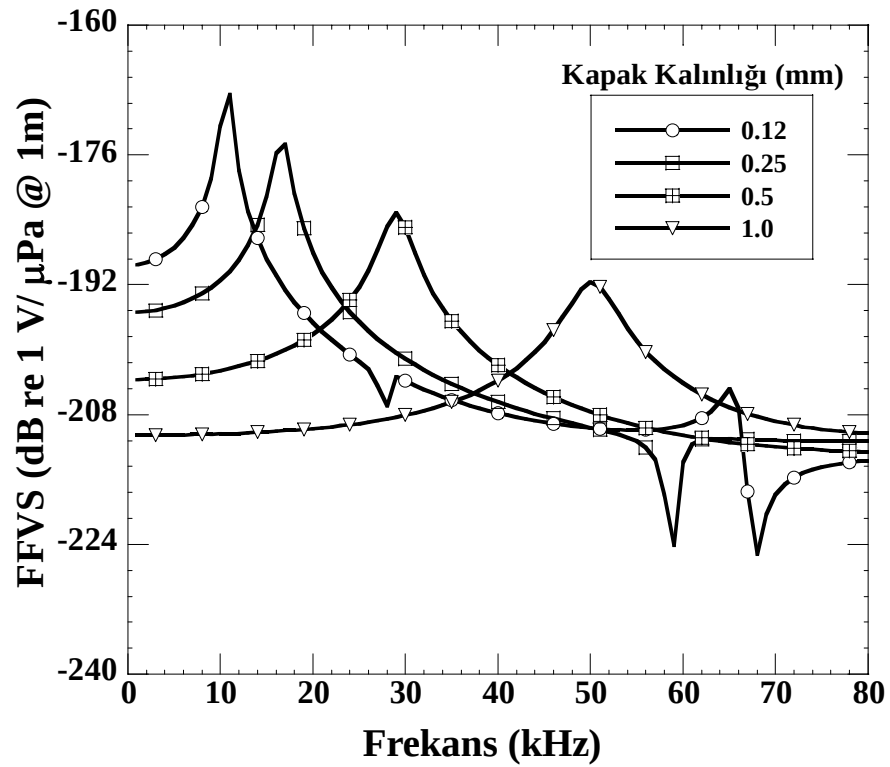
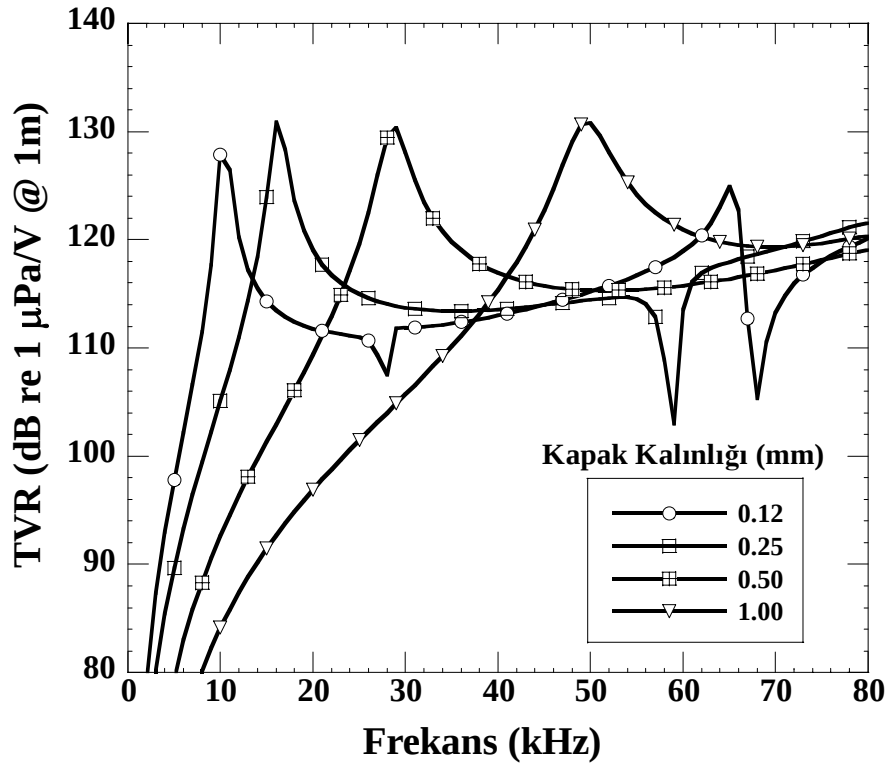


Şekil 4.9. FEA ile hesaplanan, kapak malzemesinin transdüserin sualtı özelliklerine etkisi (Referans boyut, PZT-5H disk)

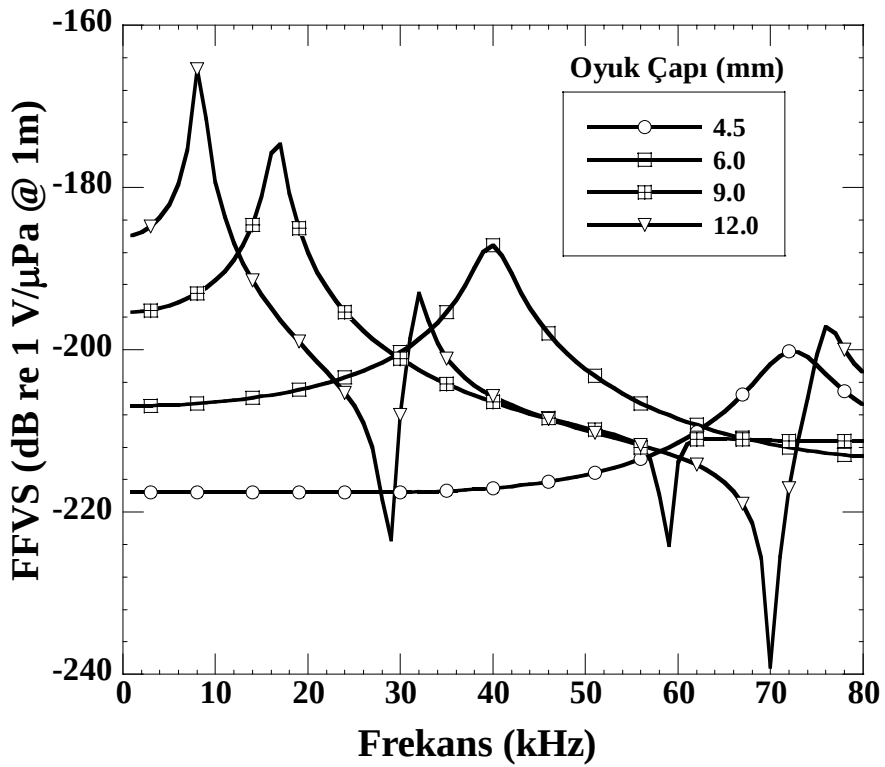
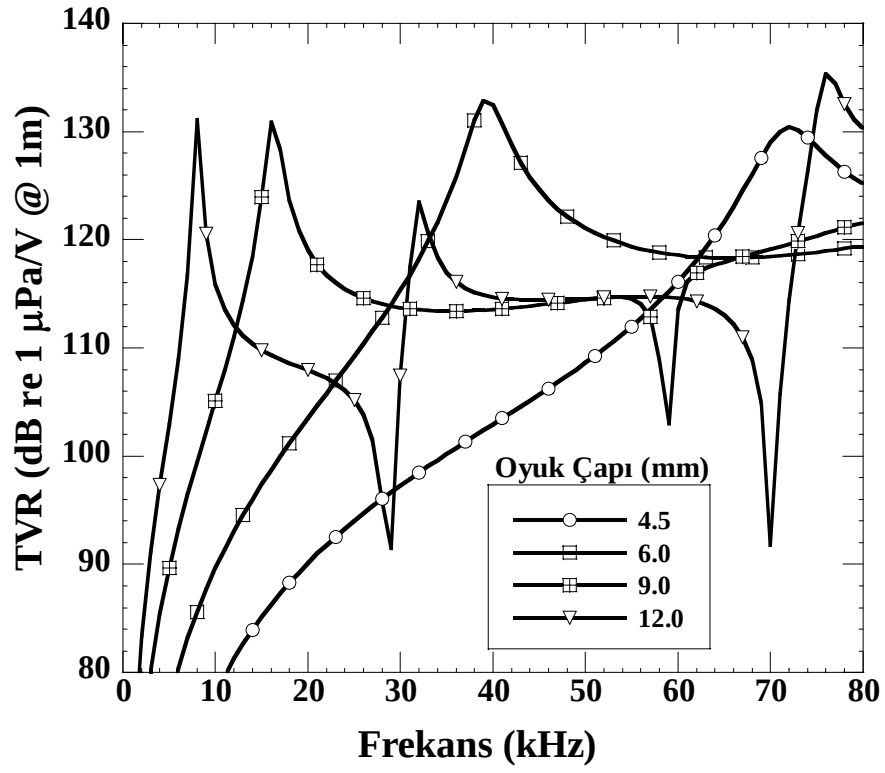
Şekil 4.10 kapak malzemesinin kalınlığının cymbal elektroakustik transdüserin sualtı performansına etkilerini göstermektedir. Beklenildiği üzere kalın kapaklarda rezonans frekansı yükselmektedir. Daha kalın kapak malzemesi daha yüksek katılığa sahip olmakta ve rezonansı yükseltmektedir. Yayınım empedansındaki gelişme daha yüksek TVR eldesine sebep olmaktadır. FFVS değerlerinde ise kalın seramik kapakların üstüne gelen ses basıncını etkin olarak iletememesinden dolayı düşme görülmektedir.

4.3.4 Oyuk Çapının Etkisi

Cymbal transdüserin değişen oyuk derinliğiyle birlikte sualtı performansı Şekil 4.11’de verilmiştir. Oyuk çapının değişmesi ile birlikte kapak kolları ve seramik sürücü arasındaki açı değişmektedir. 12.7 mm cihaz çapına sahip bir cymbal transdüser için maksimum oyuk derinliği 12.0 mm dir. Bu çap yapışma için sadece 0.7 mm’lik bir alan bırakmaktadır. FFVS değerleri oyuk çapıyla birlikte yaklaşık 30 dB’lik bir yükseliş göstermektedir. Diğer yandan TVR değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Düşük açılarda seramik üzerine stres daha etkin bir biçimde iletilmektedir. Oyuk çapındaki değişim ikinci temel rezonans modunda etkilemektedir. Daha uzun kapak kolları ikinci mod ile temel mod arasındaki oranı % 39’a düşürmektedir.



Şekil 4.10. FEA ile hesaplanan, kapak kalınlığının transdüserin sualtı özelliklerine etkisi (Referans boyut, piring kapak, PZT-5H disk)



Şekil 4.11. FEA ile hesaplanan oyuk derinliğinin transdüserin sualtı akustik özelliklerine etkisi (Referans boyut, pirinç kapak, PZT-5H disk)

4.4 Rezonans Frekansı

Rezonans frekansı hesaplamak için kullanılan analitik süreçte sığlık kabuk teorisi [46] temel alınmıştır. Hava içerisindeki temel rezonans frekansı, f_r , ağırlıklı olarak kapak geometrisi ve kapak elastik sabitesi tarafından belirlenir.

$$f_r \propto \sqrt{\frac{E}{\rho_c} \left[\frac{1}{\phi_c^2(1-\sigma^2)} + \frac{1}{R^2} \right]} \quad 4.1$$

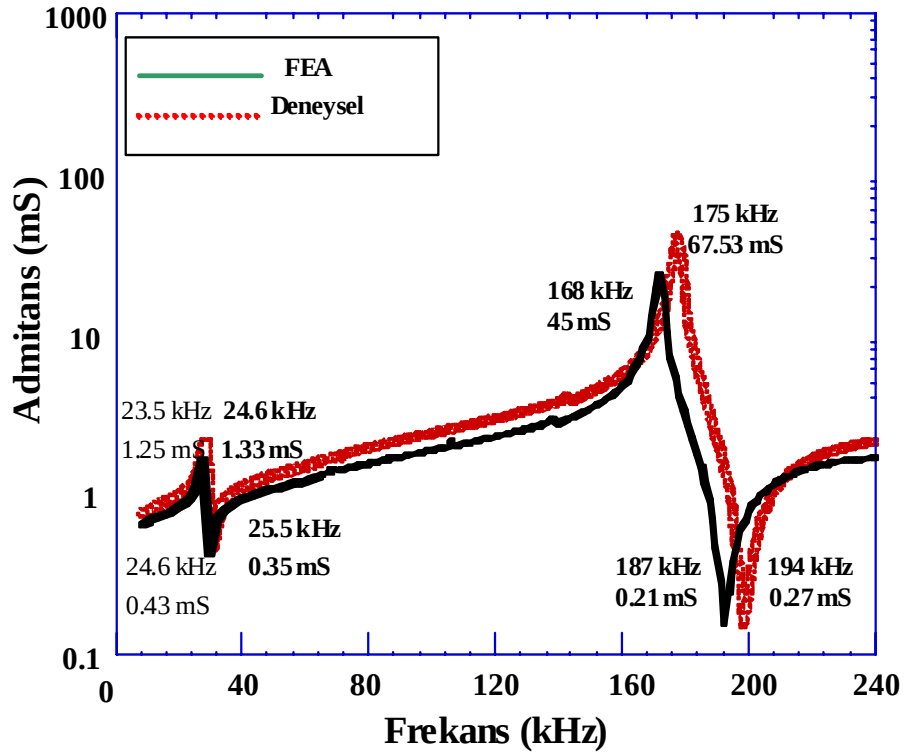
Burada ρ kapak malzeme yoğunluğunu, ϕ_c oyuk çapını, R kapak çapını, E kapağın Young's Modülünü ve σ Poisons oranını göstermektedir. Böylece, farklı kapak malzemelerine sahip transdüserlerde ilk temel rezonans frekansı $[E/\rho (1-\sigma^2)]^{1/2}$ ile orantılı olmak zorundadır.

Transdüserin sualtı ve havadaki temel rezonans modları arasındaki ilişki ise;

$$f_{r,w} \approx \frac{f_{r,a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\phi_c}{3\pi} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_c} \right) \left(\frac{0.7885}{t_c} \right)}} \quad 4.2$$

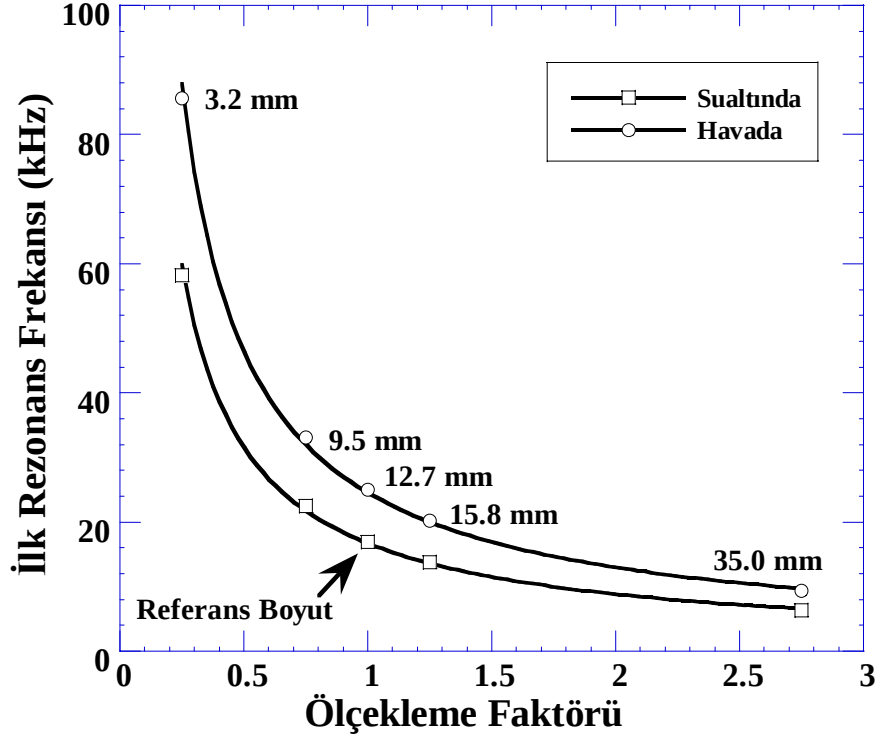
Burada $f_{r,a}$ havadaki rezonans frekansı, r oyuk yarıçapını, ρ_w suyun yoğunluğunu, ρ_c kapak malzeme yoğunluğunu ve t_c kapak kalınlığını belirtir. 0.78885 katsayısı sınır koşulları temel alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.12'de hava içerisinde referans boyutlu pirinç kapaklı zil tipi transdüserin FEA ve deneysel admitans spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir. Aradaki farklılığın % 5'den küçük olması kurulan modelin yeterliliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.12. Referans zil tipi transdüser için FEA ve deneysel admitans spektrumları.

Tüm parametreler ölçek faktörü ile çarpıldığında, hava ve sudaki rezonans frekansları birbirleriyle doğru orantılı olarak değişmektedirler. Ölçek faktörünü 0.25-2.75 arasında değiştirmekle havada 9.4-85.6 kHz ve suda 6.4 ila 58.2 kHz arasında ilk rezonans frekansı elde edilmektedir (Şekil 4.13). Değişik cihaz boyutuna sahip transdüserlerde ise malzeme ve kapak geometrisi değişimi ile daha yüksek veya daha düşük rezonans frekansları elde edilebilir.

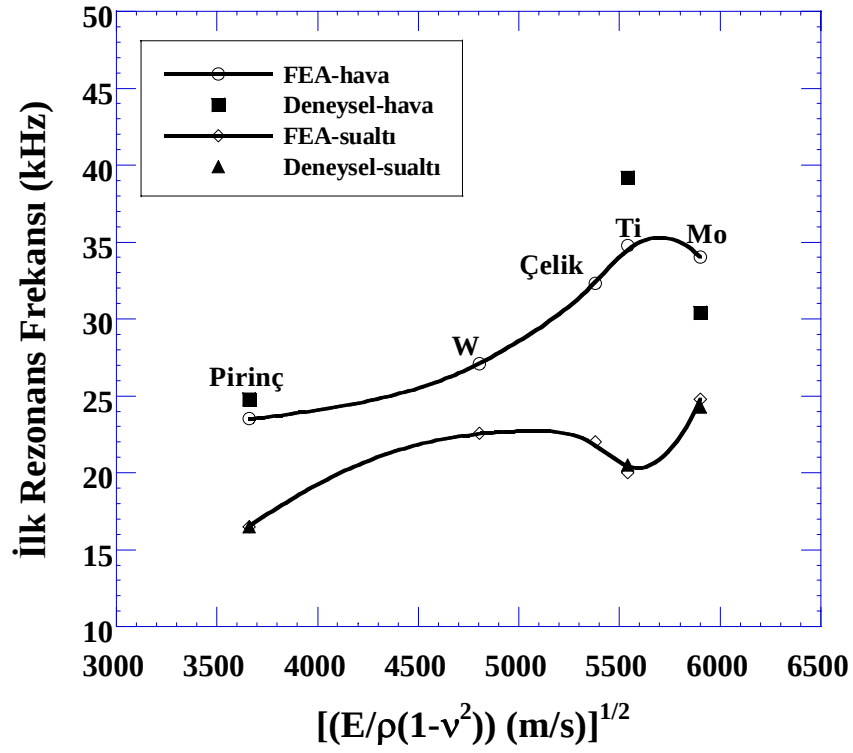


Şekil 4.13. Zil tipi transdüsörlerin FEA ile hesaplanmış havada ve sualtında ilk temel rezonans frekansları. PZT 5H ve pirinç kapak kullanılmıştır. Cihaz çapları data noktalarında gösterilmiştir.

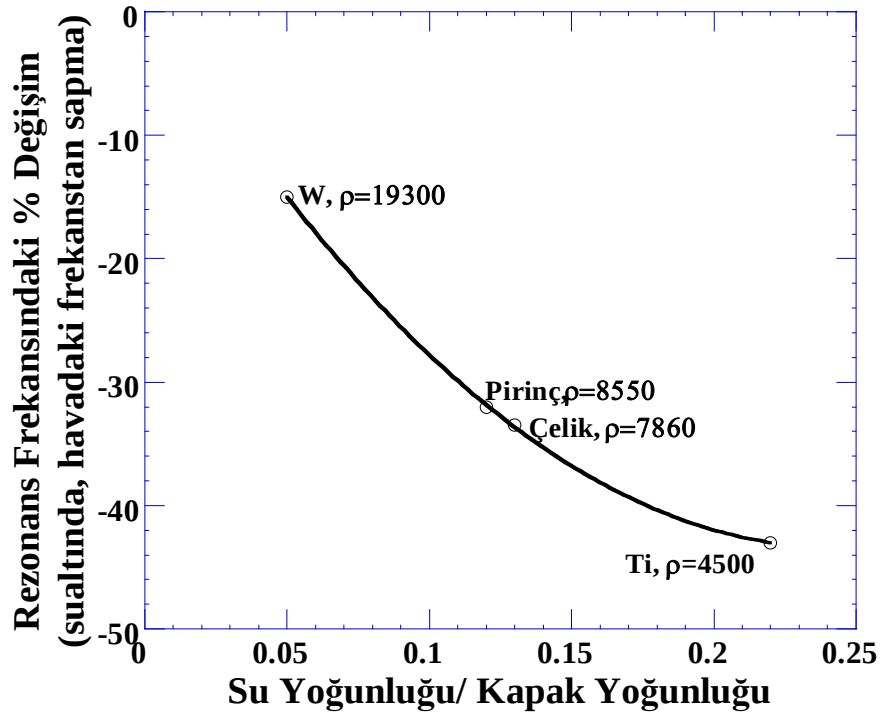
4.4.1 Kapak Malzemesinin ve Kalınlığının Etkisi

Değişik kapak malzemelerine sahip zil tipi transdüsörlerin ilk rezonans frekanslarının ultrasonik hıza bağlı olarak değişimleri Şekil 4.14’de görülmektedir. Admitans değerlerinin metal kapak malzemesine bağımlı olmadığı bilinmektedir. Bu sonuçlar herhangi bir boyuttaki zil tipi transdüsörün ilk rezonans frekansının admitans değerlerini değiştirmeden kapak malzemesiyle kolaylıkla istenilen uygulamaya göre ayarlanabileceğini göstermektedir.

Sualtındaki rezonans frekansı değişimleri çok dikkatli incelenmelidir. Sualtındaki rezonans frekansının havadaki rezonans frekansından sapma yüzdesi metal kapaklara bağlıdır. Metal kapakların elastik modülleri arttıkça hidrostatik basınç altında kararlılıkları artmakta ve havadaki rezonans frekanslarından sapma azalmaktadır. Suyun yoğunluğuna yakın yoğunluğa sahip metal kapaklardan oluşan transdüsörlerde havadaki rezonans frekansından sapma daha fazla olmaktadır (Şekil 4.15).

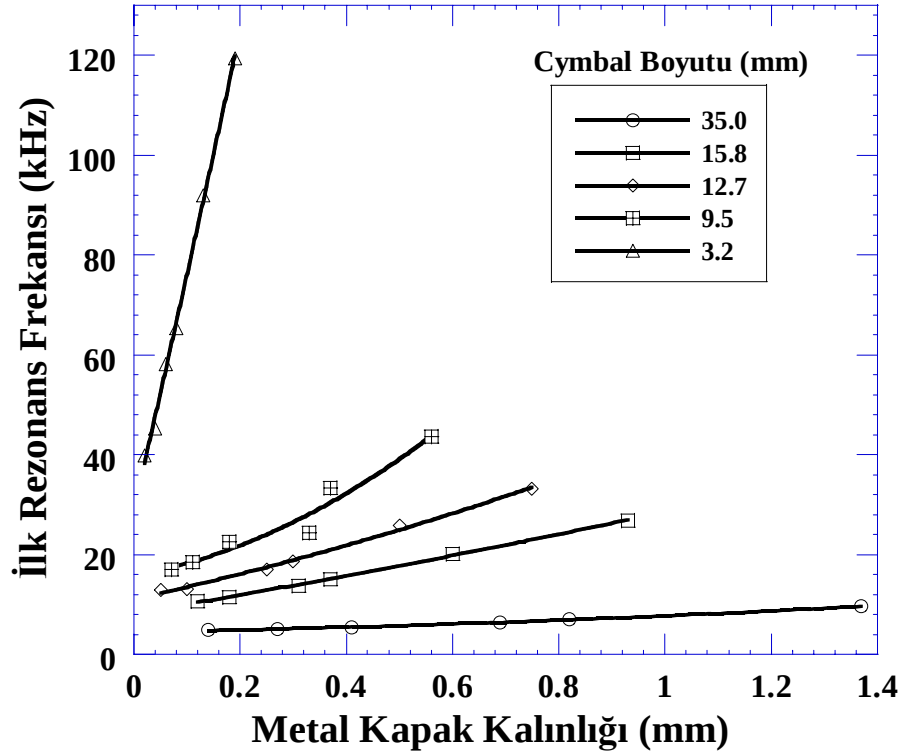


Şekil 4.14. Referans boyutlu transdüserde kapak malzemesinin ultrasonik hızının ilk rezonans frekansı üzerindeki deneysel ve hesaplanan etkisi



Şekil 4.15. Su yoğunluğunun kapak yoğunluk oranına bağlı olarak sualtındaki rezonans frekansının havadaki rezonans frekansından % değişimi

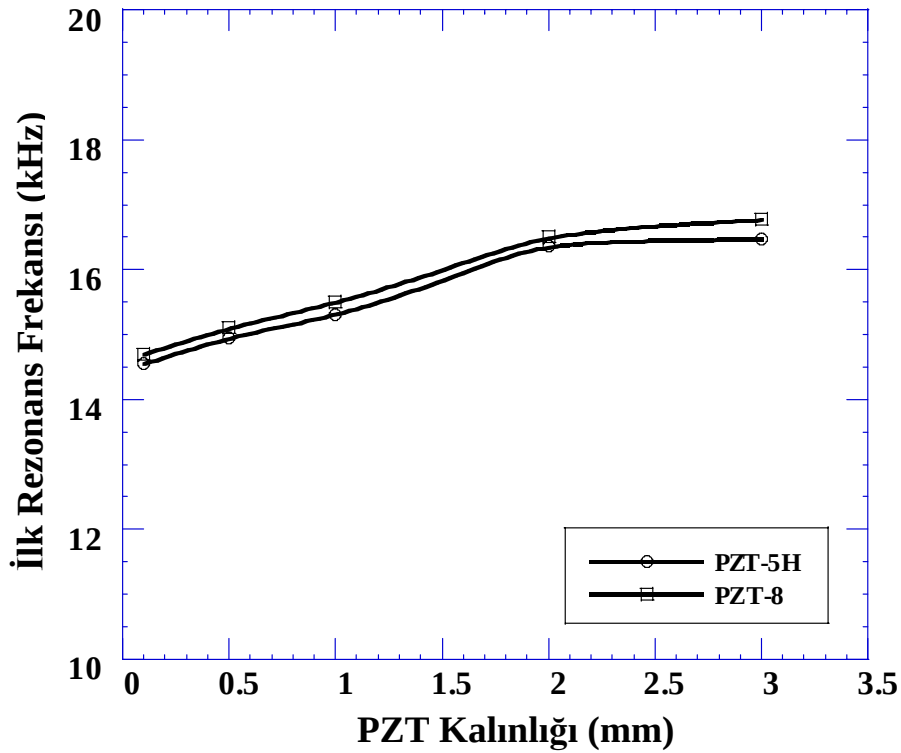
Şekil 4.16 değişik kapak kalınlıklarına sahip cymbal transdüserler için temel rezonans frekansındaki değişimi göstermektedir. Suyun cymbal transdüser üzerinde yükleme etkisi ince kapaklarda daha etkili olmaktadır. Metal kapak kalınlığı ile ilk rezonans frekansı arasında tüm transdüser çapları için yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki vardır.



Şekil 4.16. Referans boyutlu transdüserde metal kapak kalınlığının sualtında ilk rezonans frekansına etkisi (FEA hesaplanan)

4.4.2 PZT Malzemesinin Etkisi

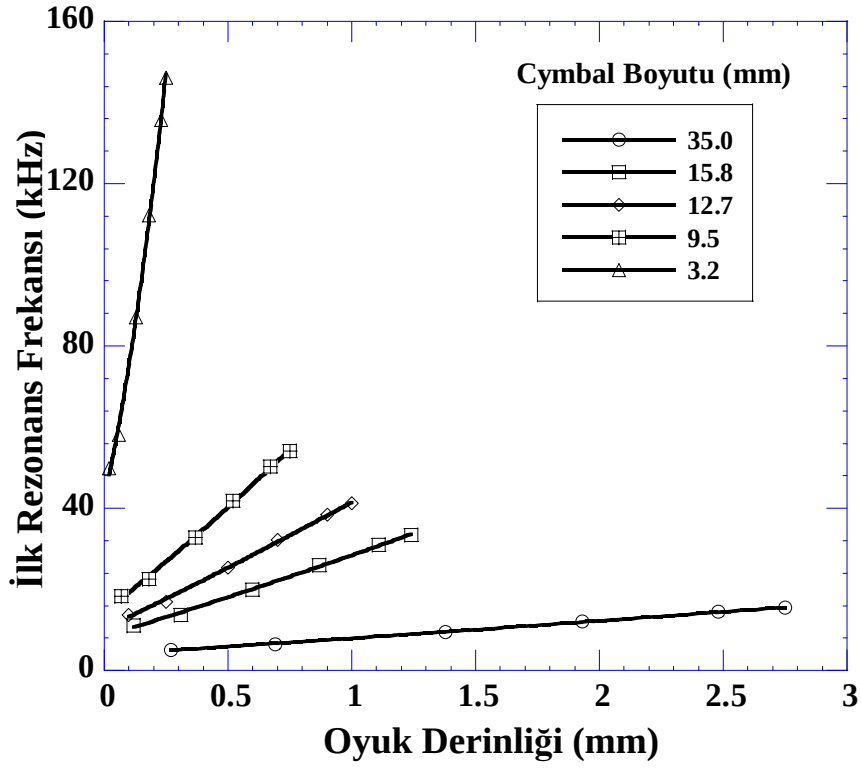
PZT sürücü elemanın kompozisyonlarındaki değişimin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi, metal kapakların etkisiyle karşılaştırıldığında daha küçük değerlerde olmaktadır (Şekil 4.17). Sert PZT seramik kullanılan transdüserlerde (PZT-4 veya PZT-8) ilk rezonans frekansı, yumuşak PZT kullanılan transdüserlere göre (PZT-5A veya PZT-5H) 1 kHz’lik daha yüksek değerlerde olmaktadır. Genelde sert PZT’lerin elastik modülü daha yüksektir. Bu farklılıkta ilk rezonans frekansının hafifçe yükselmesine sebep olmaktadır.



Şekil 4.17. Referans boyutlu transdüserde PZT kalınlık ve malzemesinin sualtında ilk rezonans frekansına etkisi (FEA hesaplanan)

4.4.3 Oyuk Derinliğinin Etkisi

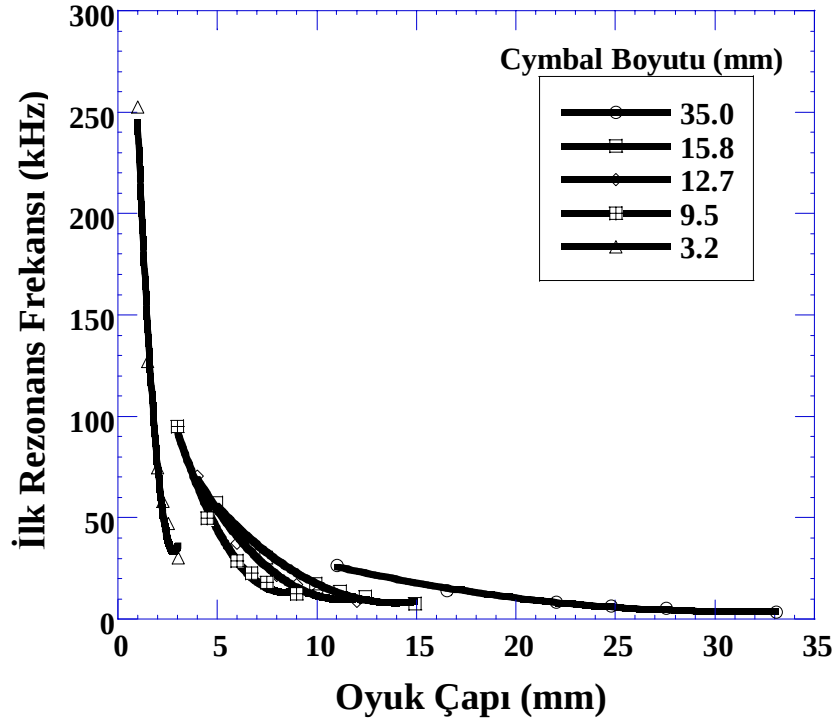
Oyuk derinliğinin cymbal transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Oyuk derinliğinin artması ile birlikte ilk rezonans frekansında çok hızlı bir yükseliş görülmektedir.



Şekil 4.18. Referans boyutlu transdüserde oyuk derinliğinin sualtında ilk rezonans frekansına etkisi (FEA hesaplanan)

4.4.4 Oyuk Çapının Etkisi

Elektro-akustik cymbal transdüserde oyuk çapının artışıyla birlikte ilk rezonans frekansında azalma gözlemlenmektedir (Şekil 4.19). Bu azalış özellikle daha küçük boyutlu cymbal transdüserlerde daha belirgin olmaktadır. Oyuk çapındaki değişimin özellikle yayılan yüzey alanı üzerinde de önemli etkileri olmaktadır.



Şekil 4.19 Referans boyutlu transdüserde oyuk çapının sualtında ilk rezonans frekansına etkisi (FEA hesaplanan)

4.5 Kısım Özeti

Yüksek piezoelektrik katsayılarından faydalanılması ile cymbal transdüserler ve cymbal transdüser serileri sualtı sonar ve maden arama sistemlerinde kullanılabilirler. Cymbal transdüserlerin diğer sualtı transdüserlerine göre avantajları yüksek d_h (hidrostatik elektriksel yük) ve g_h (hidrostatik voltaj) katsayıları, ince ve hafif yapıları ve ucuz üretimleri olmaktadır. Cymbal transdüserler şu ana kadar üretilen tüm kompozit transdüserler içerisindeki en yüksek sualtı yararlılık katsayısına ($d_h \times g_h$) sahiptirler [22]. Ayrıca tek bir cymbaldan üretilen yüksek TVR değerleri, bu transdüserlerin kolayca seri haline getirilmeleri ile çok daha yüksek seviyelere ulaşabilir.

Cymbal transdüserin temel rezonans frekansları kolaylıkla değiştirilebilen boyut parametreleri ile optimize edilebilir buda tasarıma büyük bir esneklik katmaktadır. Tasarım ve malzeme parametrelerinin ayarlanması ile sualtında cymbal transdüser 3.5 kHz-252.4 kHz arasında temel rezonans frekanslarında çalıştırılabilir. Çalışmalar bu aralıkların genişletilebileceğini göstermektedir.

Ölçekleme faktörü, oyuk derinliği, oyuk çapı ve PZT kalınlığı transdüserin sualtı projektör/alıcı performansı üzerinde en etkili parametreler olarak belirlenmiştir.

Daha kalın PZT diskler ile daha yüksek ses düzeylerine ulaşılabilir. Ayrıca daha kalın PZT ile daha fazla oyuk derinliği ve daha ince metal kapak kalınlığının kullanılmasıyla ilk iki rezonans modunun bir araya gelme olasılığı ve bant genişliğini artırma olasılığı ortaya konulmuştur.

Bu kısımda yapılan parametrik çalışma ileride cymbal transdüserin sualtında kullanımı için bir rehber olacaktır. Bu parametrik çalışmanın kullanılmasıyla sualtı elektroakustik uygulamalarında ihtiyaç olan temel rezonans frekansında istenen ses düzeyi ve hassasiyetinde cymbal üretimi mümkün olmaktadır.

5. CYMBAL TRANSDÜSERİN HİDROSTATİK BASINÇ ALTINDA KARARLILIĞI-SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Hidrostatik basınç limiti transdüserin sualtında performansını kaybetmeden sürdürebildiği limit olarak tanımlanabilir [47]. Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde cymbal transdüserin hidrostatik basınç altındaki kararlılığı araştırılmıştır. Oyuk geometrisinin ve malzeme seçiminin hidrostatik basınç limiti üzerindeki etkileri deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda oyuk derinliğinin cymbal transdüserin sualtındaki kararlılığına ve performansına etkisinin güçlü olduğu bulunmuştur. Yumuşak PZT'den üretilen cymbal transdüserlerin sert PZT içeren cymbal transdüserlerden daha yüksek yararlılık katsayısına ve daha iyi basınç toleransına sahip oldukları bulunmuştur. Ayrıca uygulama alanına göre kapak malzemesi ile transdüserin sualtı hassasiyeti ve basınç toleransları değiştirilebilmektedir.

Hidrostatik basınç testleri için, cymbal transdüserde dönüşümü olmayan değişim gözlenene kadar artan hidrostatik basınç altında piezoelektrik yük katsayısı ölçümü yapılmıştır. Örneğin transdüser 100 psi basınca üç kez maruz bırakılmış ve eğer değişiklik gözlemlenmediyse numune 200 psi basınca maruz bırakılmıştır.

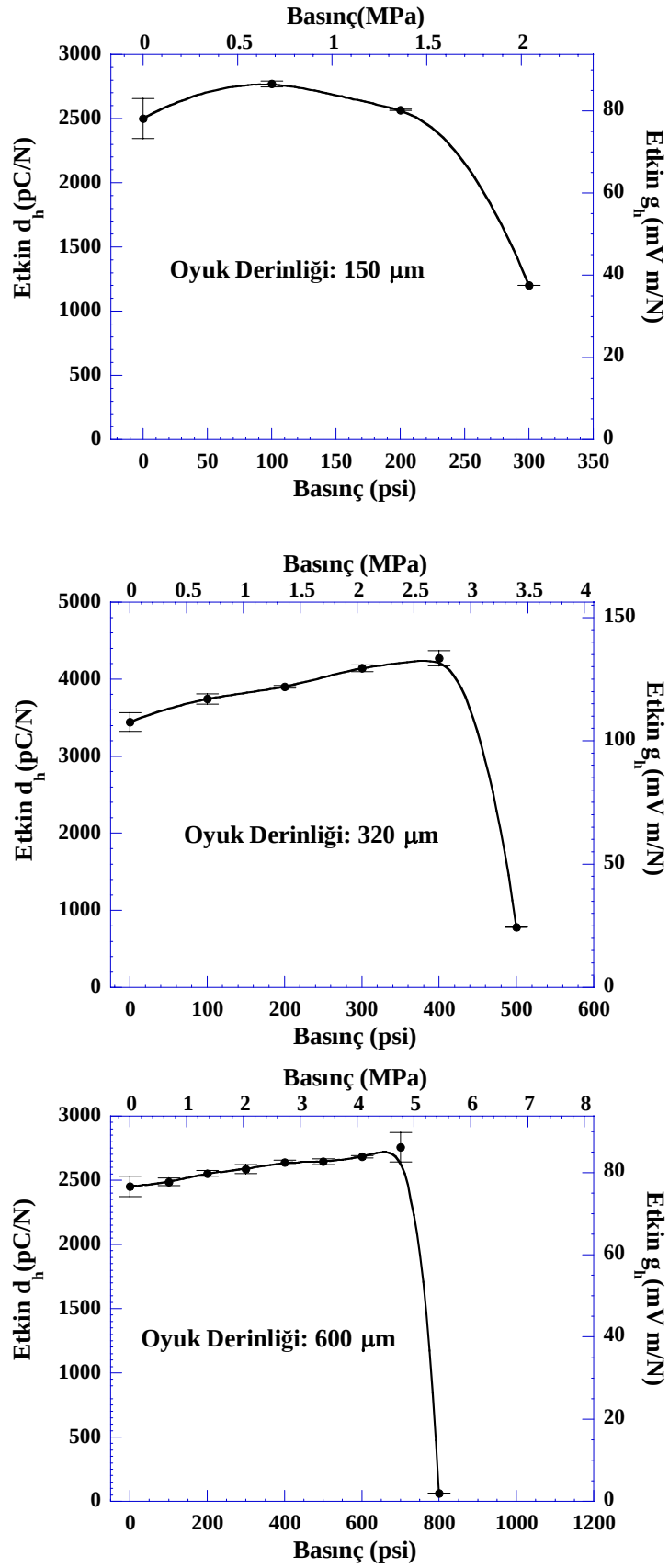
Her oyuk derinliği için beş numune test edilmiştir. Hidrostatik basınç testlerinde bu numuneler arasındaki performans limit farkının % 4'den küçük olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada transdüserin hidrostatik basınç altındaki bozulumu basınç uygulama döngüsü esnasında d_h değerlerinde meydana gelen geri dönülmez değişimler olarak tanımlanmıştır. Bu değer sıg su sualtı transdüserleri için 150 m derinliğe denk gelen 200 psi (1.4 Mpa) olarak bulunmuştur. Öte yandan örneğin jeofiziksel araştırmalar için kullanılan derin su altı transdüserleri 20000 psi (140 Mpa)'lık basınçlara dayanmak zorundadır.

Şekil 5.1 değişik oyuk derinliğine sahip cymbal transdüserlerin artan basınç altındaki piezoelektrik katsayılarındaki değişimlerini göstermektedir. Hata barları basınç döngüleri esnasındaki değişimleri göstermektedir. Ölçüm değerleri, % 50 güvenlik faktörü ile birlikte değerlendirildiğinde cymbal transdüserin kullanımı için tavsiye edilen basınç limit değerleri 150 μ m için 100 psi (0.7 MPa), 320 μ m için 200 psi (1.4 MPa) ve 600 μ m için 400 psi (2.8 MPa) olmaktadır. Büyük oyuk

derinliğine sahip cymbal transdüserler artan basınç altında daha kararlı olmaktadır. Diğer yandan 320 μm 'den daha küçük oyuk derinliğine sahip olan cymbal transdüserlerin basınç limitleri daha düşük gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu transdüserlerin piezoelektrik katsayıları da düşük olduğundan dolayı hidrosatik basınç altında kullanımları tavsiye edilmemektedir.

Şekil 5.1'de gözüken cymbal transdüserin basınç altındaki bozunumu dört değişik mekanizma ile açıklanabilir: Kapakların mekaniksel bozunumu, epoksinin mekaniksel bozunumu, piezoelektrik elementin depolarizasyonu ve piezoelektrik elemanda çatlak başlangıcı ve kırılması. Cymbal transdüserde kapaklara uygulanan gerilme kapaklar tarafından yükseltilir ve seramik elemana transfer edilir. Eğer bu gerilme PZT seramiğinin depolarizasyon gerilme değerine ulaşırsa transdüserin yük katsayılarında azalmaya sebep olur. Eğer kapaklar üzerindeki gerilme kapakların akma mukavemetinden yüksek ise plastik deformasyon olabilir ve kapaklar çökebilir. Diğer bozunum mekanizması ise epoksi katman üzerinde oluşan kesme gerilmesinin epoksi bağlayıcı katmanın kesme mukavemetini aşmasıyla oluşur. Bu çalışmada bozunumun öncelikle hangi mekanizma ile oluştuğu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Oluşan bozunum mekanizmasını açıklamak için sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Basınç ölçümlerinden sonra metal kapakların PZT seramiklerinden ayrılması ve seramiklerin d_{33} ölçümleri polarizasyonda bir sorun olmadığını göstermiştir. Diğer yandan metal kapakların ciddi şekilde deforme oldukları gözlemlenmiştir (Şekil 5.2).

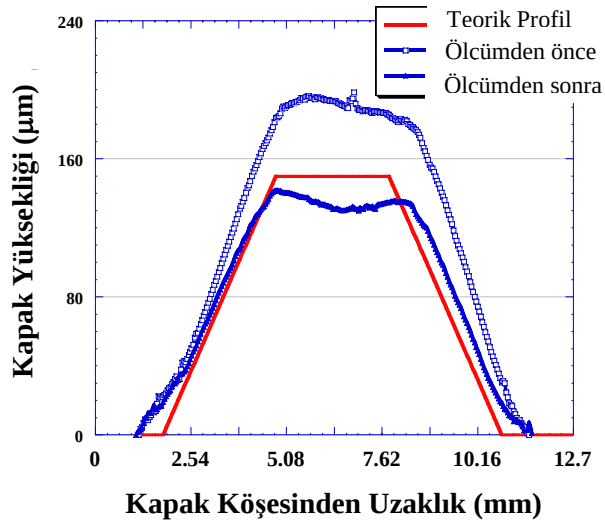
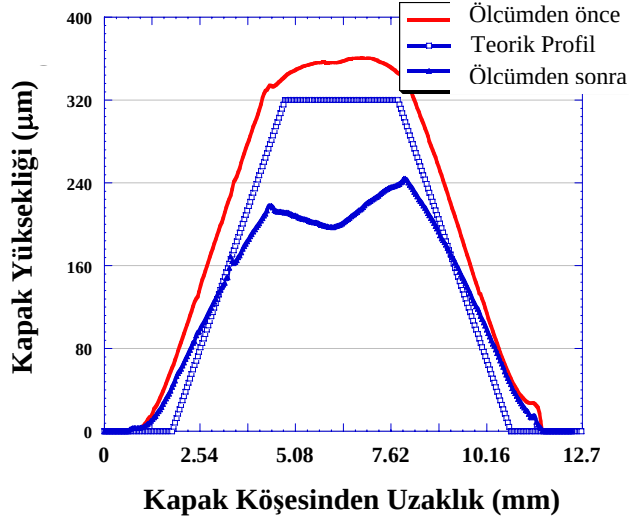
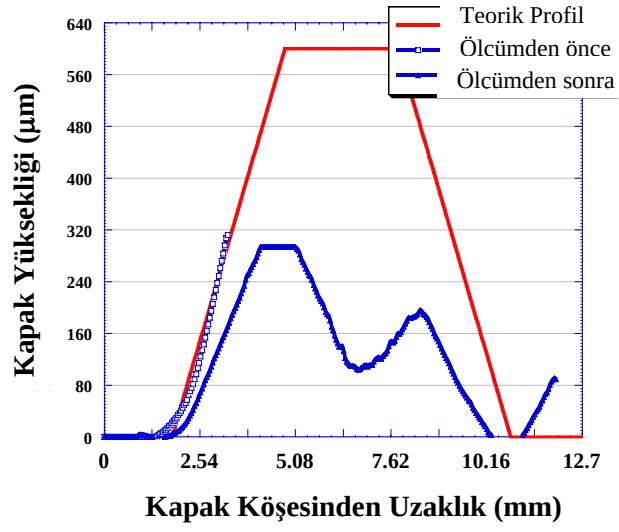


Şekil 5.1. Değişik oyuk derinliğine sahip cymbal transdüsörlerin ölçülen basınç kararlılıkları



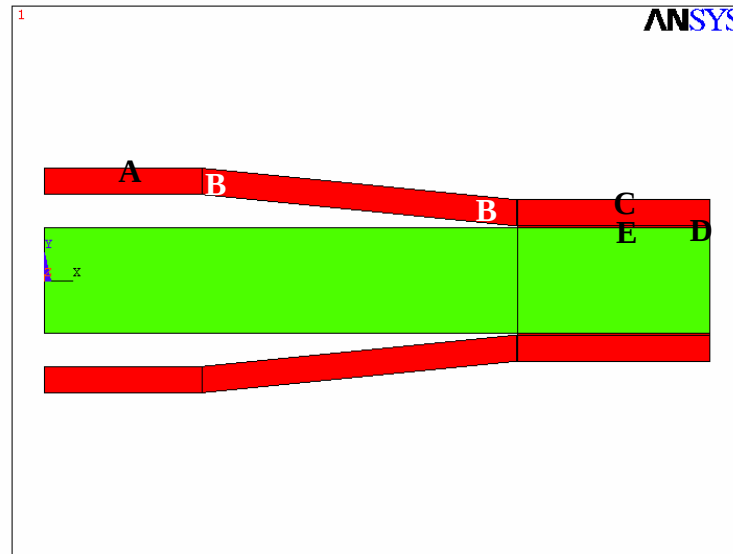
Şekil 5.2. Basınç altında plastik deformasyona uğramış metal kapaklar.

Kapaklardaki çökmenin hangi bölgelerde oluştuğunun tam olarak belirlenebilmesi için basınç testlerinden sonra kapak yüzeyleri Tenor Instruments Alpha-Step 200 profilmetre ile incelenmiştir. (Şekil 5.3). Her üç değişik kapak geometrisine sahip transdüserde de kapaklardaki plastik deformasyon gözlemlenebilmektedir. Yüksek basınç altında kapaklar oyuk içerisine doğru çökmekte ve piezoelektrik katsayılarında ciddi düşüşler gözlemlenmektedir.



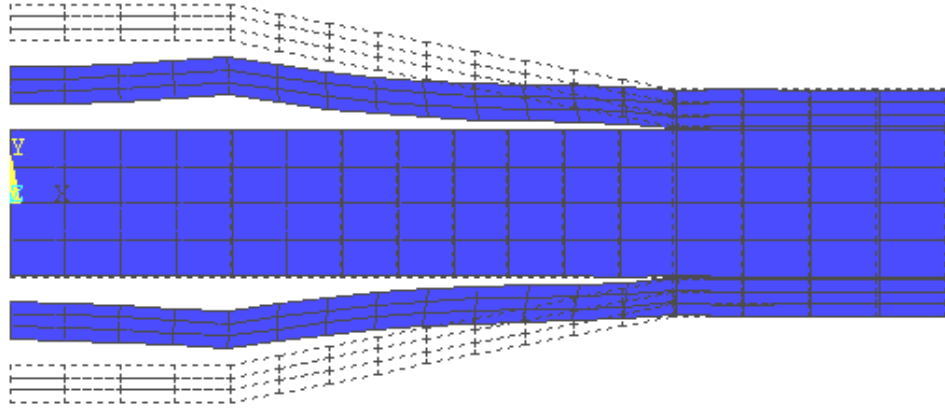
Şekil 5.3. Transdüser kapaklarının basınç testinden önce ve sonraki profil haritaları: a) 150 µm b) 320 µm c) 600 µm oyuk derinliği

FEA gerilme hesaplamaları bu gözlemleri desteklemektedir. Şekil 5.4 cymbal transdüserlerin hidrostatik basınç deneyleri esnasında çökme basınçlarında hesaplanan gerilme konsantrasyonlarını göstermektedir. Bu basınçlar 0.15 mm için 300 psi (2.6 MPa), 0.32 mm için 450 psi (3.1 MPa) ve 0.60 mm oyuk derinliği için 800 psi (5.5 MPa) olarak bulunmuştur. Her bir değişik oyuk derinliğinde bu basınç değerlerinde kapaklar ve PZT üzerindeki gerilme düzeylerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Yanal gerilmeler baskın olup bunlar metal kapakların akma mukavemetinden fazladır. Bu yanıl gerilmeler basma gerilmesidir ve koninin tavanında maksimuma ulaşırlar (330 MPa). Bu basma gerilmeleri simetrik olarak her yönden etkin olmakta ve kapakların çökmesine sebep olmaktadır (Şekil 5.5). Kapak üstündeki eksensel gerilmeler 5-10 MPa arasında olmaktadır. Bu gerilmeler maksimum değere şekilde gösterilen E bölgesinde ulaşmışlardır. Cymbal transdüserde teğetsel gerilmeler yapıdaki simetriden dolayı yanıl gerilmelerle aynı düzeydedirler.



	Alan A Gerilme Konsantrasyonu (MPa)			Alan B Gerilme Konsantrasyonu (MPa)			Alan C Gerilme Konsantrasyonu (MPa)			Alan D Gerilme Konsantrasyonu (MPa)			Alan E Gerilme Konsantrasyonu (MPa)		
	0.15 mm	0.32 mm	0.60 mm	0.15 mm	0.32 mm	0.60 mm	0.15 mm	0.32 mm	0.60 mm	0.15 mm	0.32 mm	0.60 mm	0.15 mm	0.32 mm	0.60 mm
Oyuk Derinliği (mm)															
Yanal	-350	-360	-380	-250	-267	-292	-176	-290	-293	-57	-40	-98	-430	-360	-438
Eksensel	-4	-5	-7	-13	-15	-24	-13	-15	-24	-33	-27	-30	-28	30	-30
Teğetsel	-350	-350	-335	-250	-250	-250	-50	-50	-80	-50	-50	-80	-80	60	-50
Kesme	10	8	13	15	25	30	15	25	30	15	25	30	50	60	100

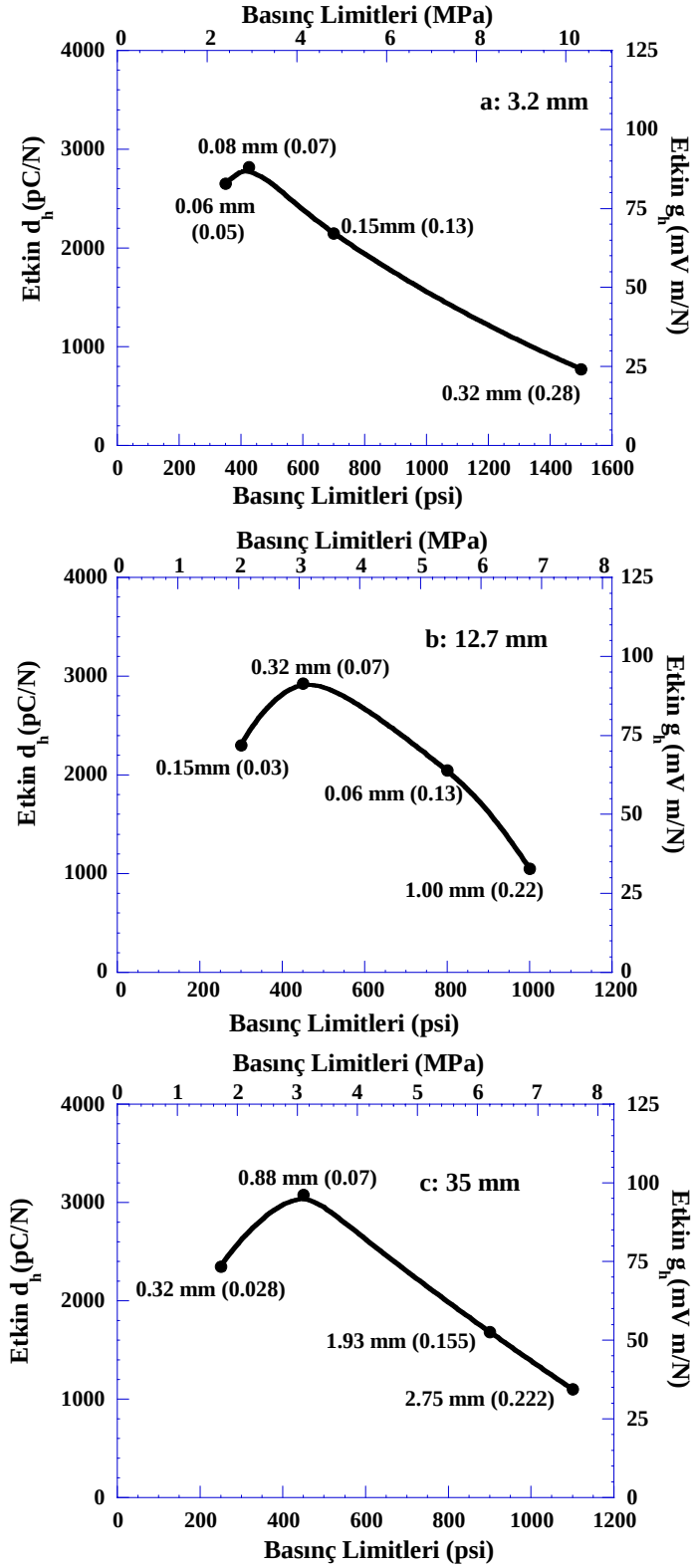
Şekil 5.4. Deneyisel çalışmalar esnasında bozunuma sebep olan basınçlardaki gerilme konsantrasyonları



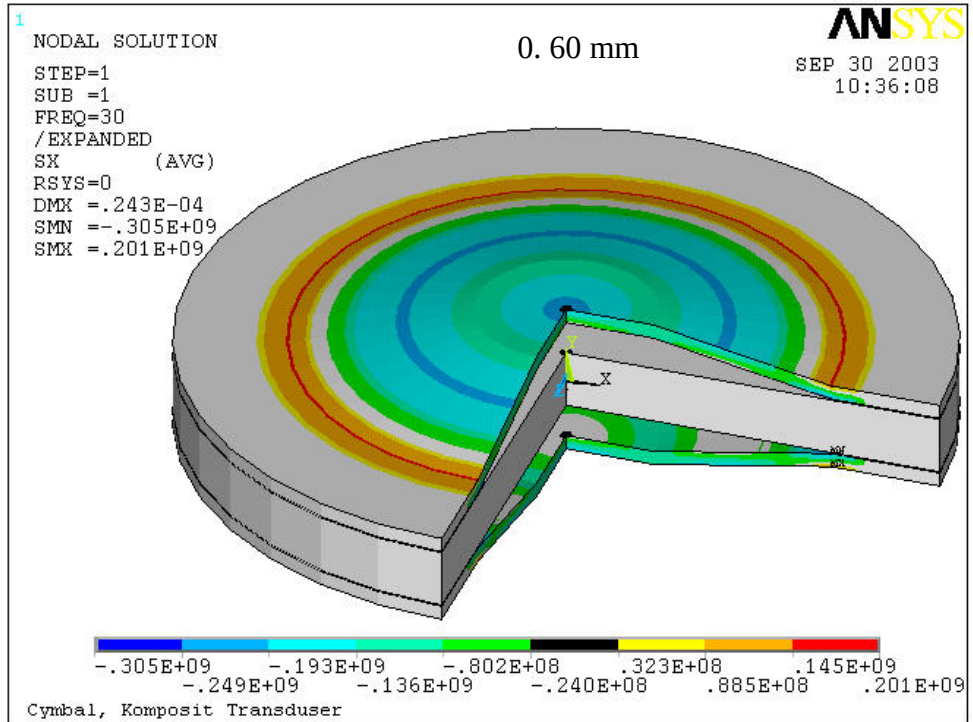
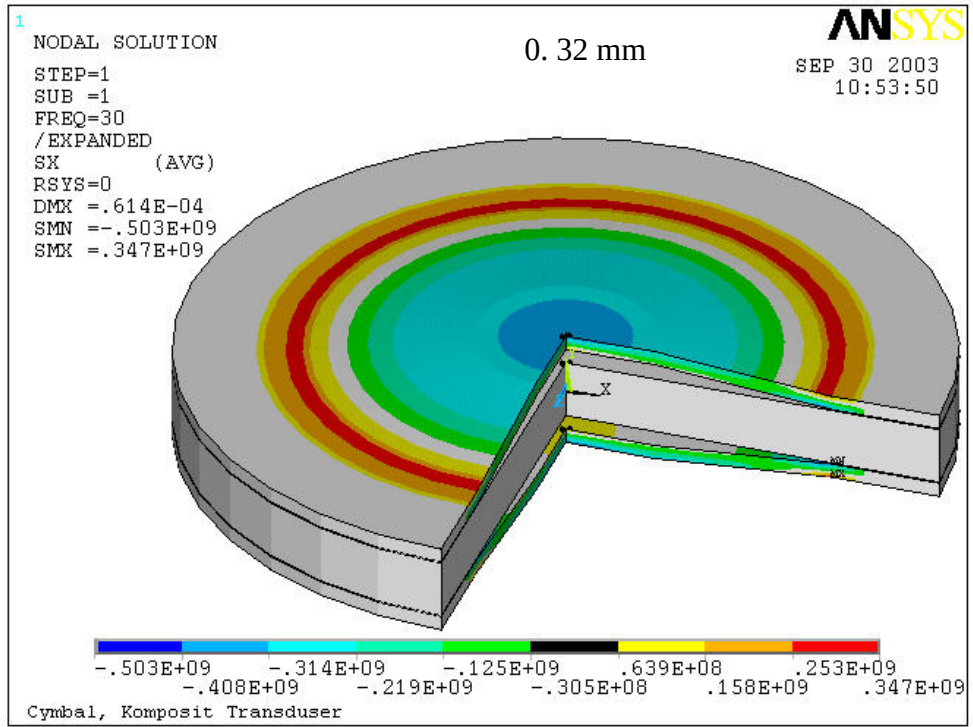
Şekil 5.5. Cymbal transdüser üstündeki basma gerilmeleri transdüserde bükülmeye ve neticesinde kapakların çökmesine sebep olmaktadır.

5. 1 Kapak Boyutlarının Etkisi

Cymbal transdüserdeki tüm ölçümler 12.7 mm cihaz çapı kullanılarak yapılmıştır. Bu çapta hem deneysel hemde FEA ile oyuk derinliği ve malzeme etkileri incelenmiştir. Bunlara ek olarak transdüser boyutları ölçeklendirilerek FEA ile piezoelektrik katsayılarındaki değişimler incelenmiştir. Hesaplanan d_h ölçülenden biraz daha küçüktür (standart için ölçülen 3800 pC/N hesaplanan 3000 pC/N). Bu farklılık deneysel hatalardan veya mesh sınırlamasından kaynaklanabilir. Ayrıca ANSYS'in sadece doğrusal dataları kullanması bu farklılığın sebebi olabilir. Bütün boyutlarda etkin piezoelektrik katsayılar için optimum değer bulunmaktadır. Bu optimum değere oyuk derinliği/oyuk yarıçapı oranı 0.7 olduğunda ulaşılmaktadır (Şekil 5.6). Diğer yandan artan oyuk derinliği ile kapaklar üzerindeki gerilme yoğunluğunun düşmesi, yüksek oyuk derinliklerindeki basınç kararlılığının daha iyi olmasını açıklamaktadır (Şekil 5.7).

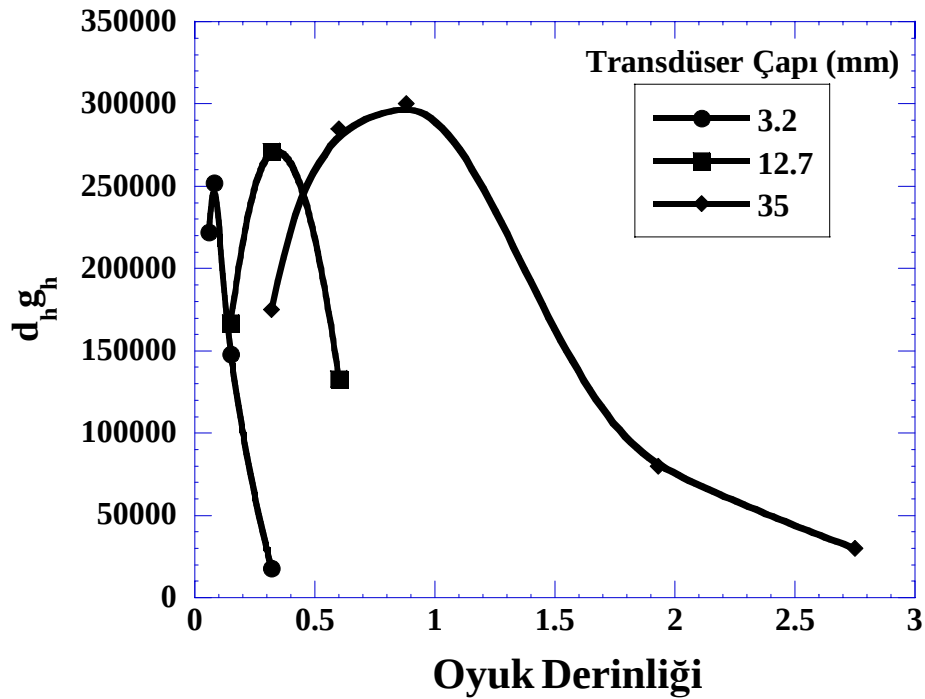


Şekil 5.6. Değişik transdüser boyutlarına sahip cymbal transdüserler için hesaplanan d_h değerleri. Parantez içerisinde oyuk derinliği/oymuk yarıçap oranı verilmektedir.



Şekil 5.7. Değişik oyuk derinliğine sahip referans boyutlardaki cymbal transdüserler için 450 psi basınç altında hesaplanan gerilme konsantrasyonları.

Cymbal transdüserin sualtı d_{hg} yararlılık katsayısı aynı boyutlardaki tek bir PZT diskinden 25,000 kat daha fazladır. Oyuk geometrisinin d_{hg} katsayısı üzerinde de önemli etkileri vardır. Tüm transdüser boyutlarında sualtı yararlılık katsayısı oyuk derinliği/oyuk yarıçapı oranı 0.07'e ulaştığında maksimuma ulaştığı sonlu elemanlar hesaplamalarında görülmüştür (Şekil 5.8). Küçük transdüser boyutlarında yararlılık katsayısı (FOM) oyuk boyutlarındaki değişime daha duyarlı olmaktadır.

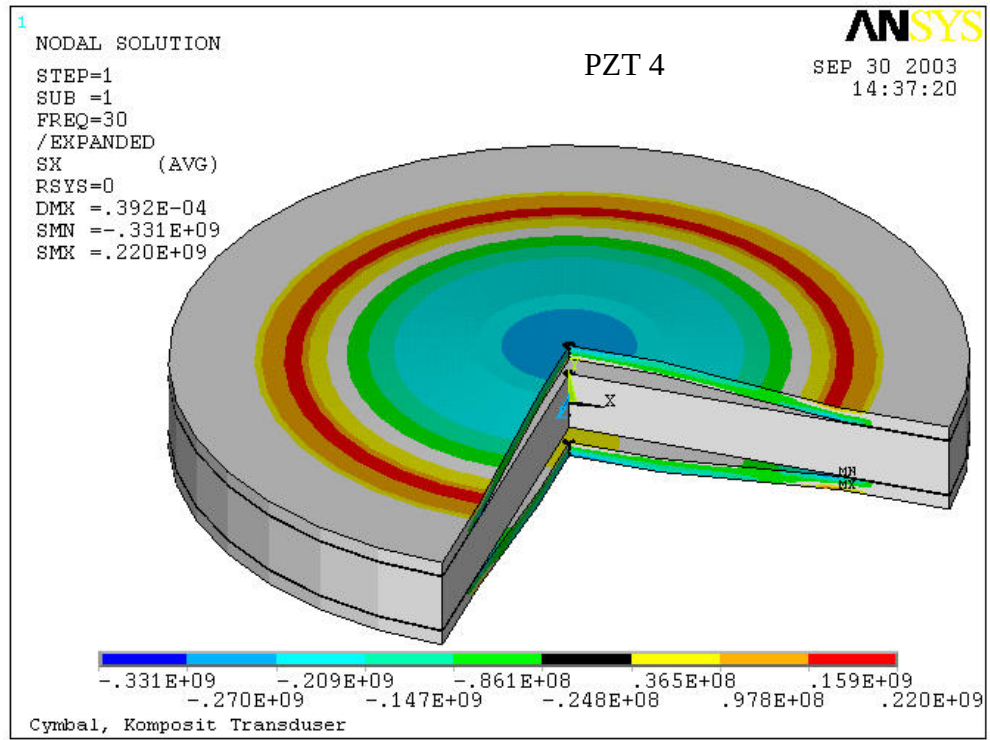
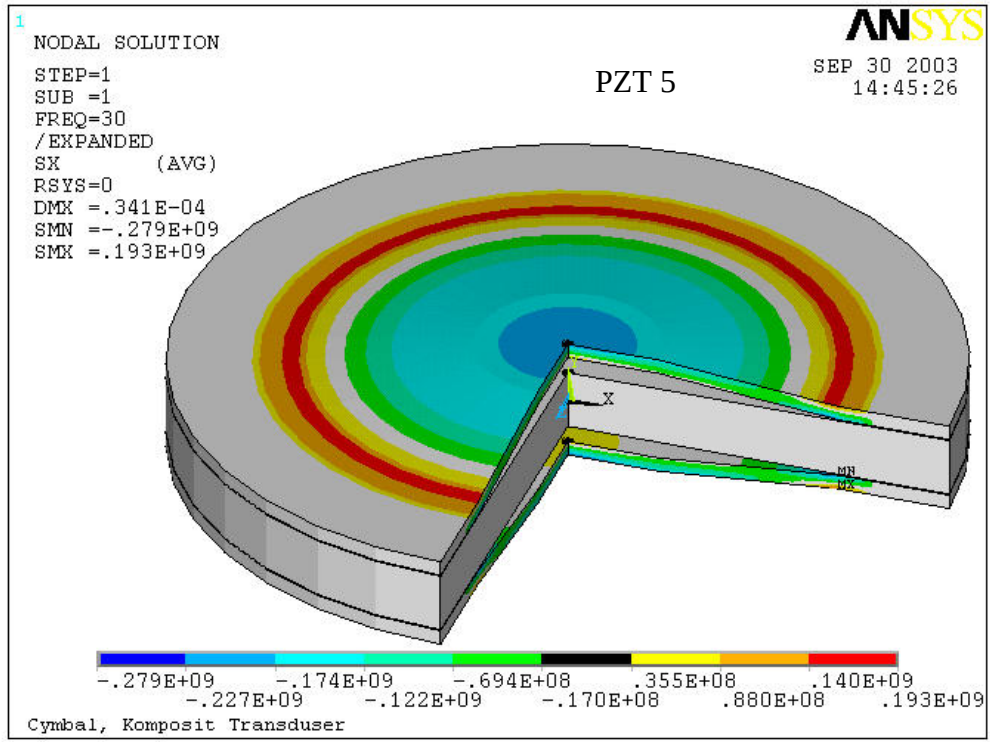


Şekil 5.8. Değişik boyutlardaki cymbal transdüserlerde değişen oyuk derinliğinin yararlılık katsayısı üzerindeki etkisi

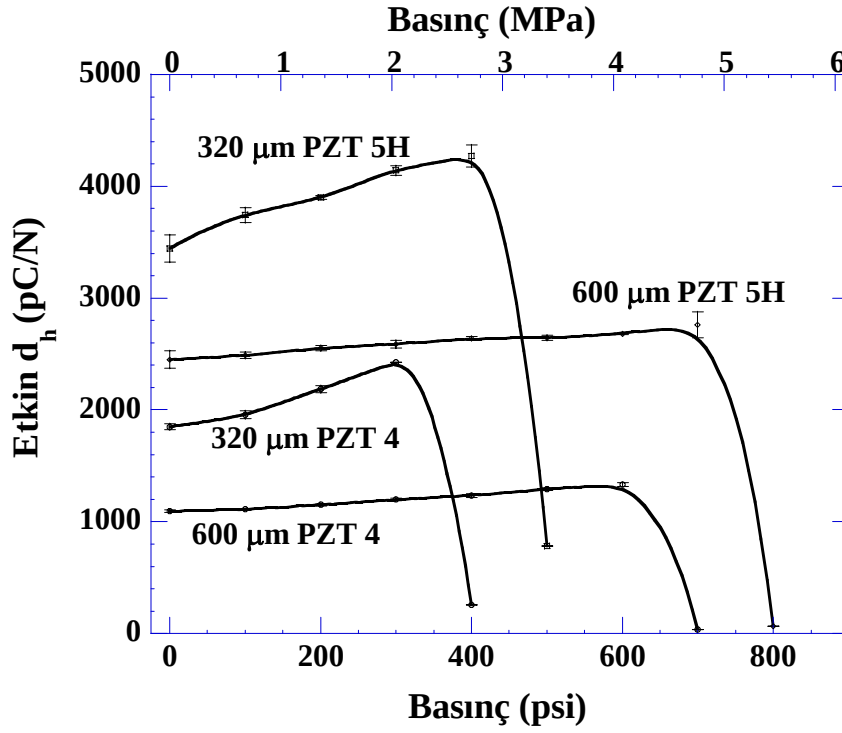
5.2 Malzeme Etkisi

Kısım I'de gösterildiği üzere cymbal transdüser PZT ve kapak malzemelerindeki değişimlerle optimize edilebilirler. PZT-4 (sert) ve PZT-5 (yumuşak) kullanılarak üretilen transdüserlerin hidrostatik basınç altında FEA kullanılarak hesaplanan karşılaştırmaları Şekil 5.9'da verilmiştir. Daha az elastisiteye sahip PZT-4 transdüserlerde kapaklardan seramiğe yük transferinin etkinliği azalmaktadır ve böylece kapaklar üzerindeki gerilme yoğunluğu

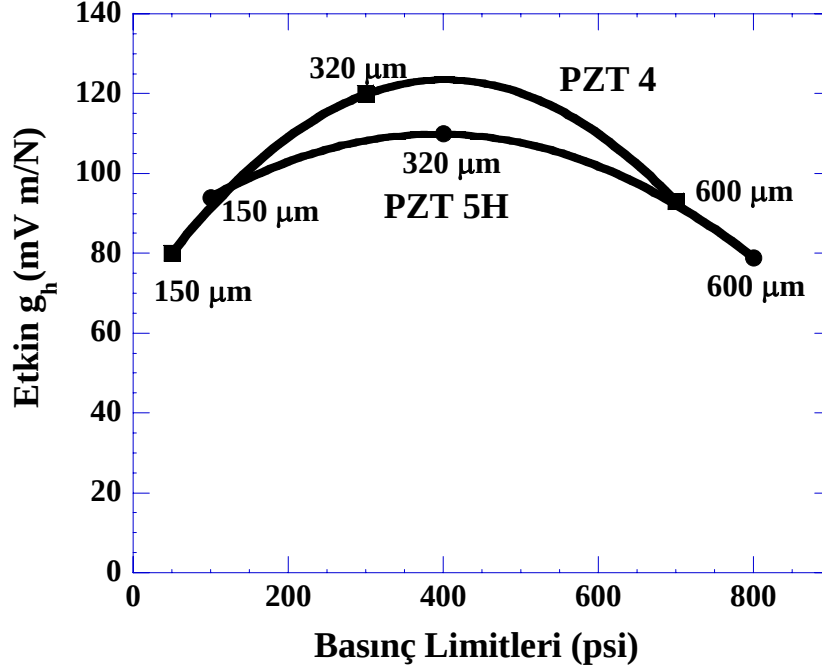
artmaktadır. Böylece yüksek piezoelektrik d_{33} ve d_{31} katsayılarının etkisiyle yumuşak PZT'ye sahip transdüserler hem daha yüksek piezoelektrik hidrostatik katsayıya sahip olmakta ve de aynı anda su altında daha yüksek basınçlar altında dayanabilmektedirler (Şekil 5.10). Diğer yandan PZT 4 daha düşük kapasitans değerine sahip olduğundan dolayı sert PZT içeren transdüserler daha yüksek g_h değerlerine sahip olmaktadır (Şekil 5.11). Buna rağmen yumuşak PZT'li transdüserlerin yararlılık katsayısı olan $d_h g_h$ çarpımı daha yüksek olmaktadır (Şekil 5.12).



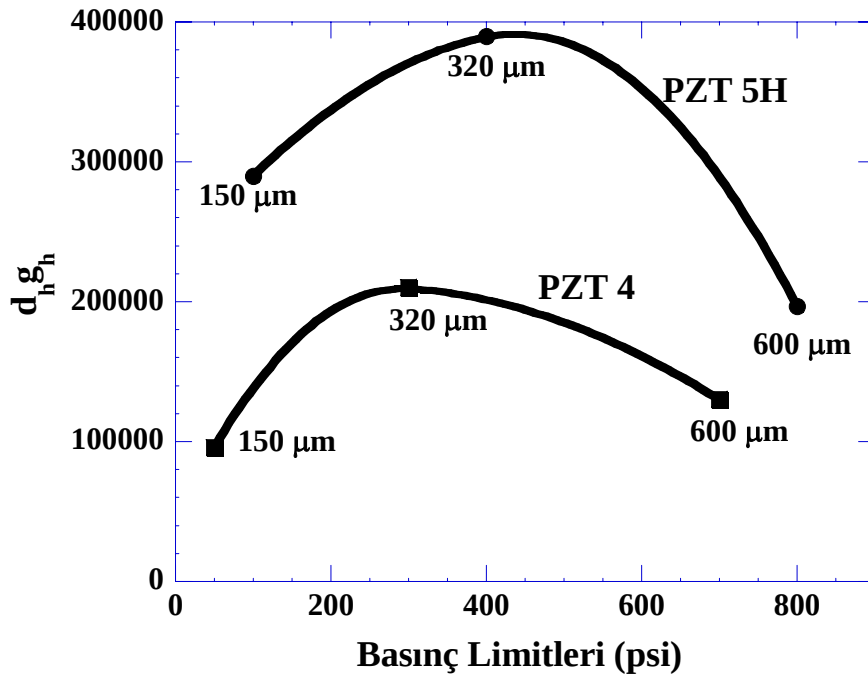
Şekil 5.9. Değişik PZT malzemesine sahip cymbal transdüserler için 450 psi basınç altında hesaplanan gerilme konsantrasyonları



Şekil 5.10. Yumuşak ve sert PZT den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserlerin hidrostatik basınç altındaki davranışları (Deneyssel)



Şekil 5.11. Yumuşak ve sert PZT den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserler için basınç limitleri ve maksimum etkin g_h değerleri (Deneyssel)



Şekil 5.12. Yumuşak ve sert PZT'den yapılmış değişik oyuk derinliğine sahip transdüserler için basınç limitleri ve maksimum etkin d_{hg_h} değerleri

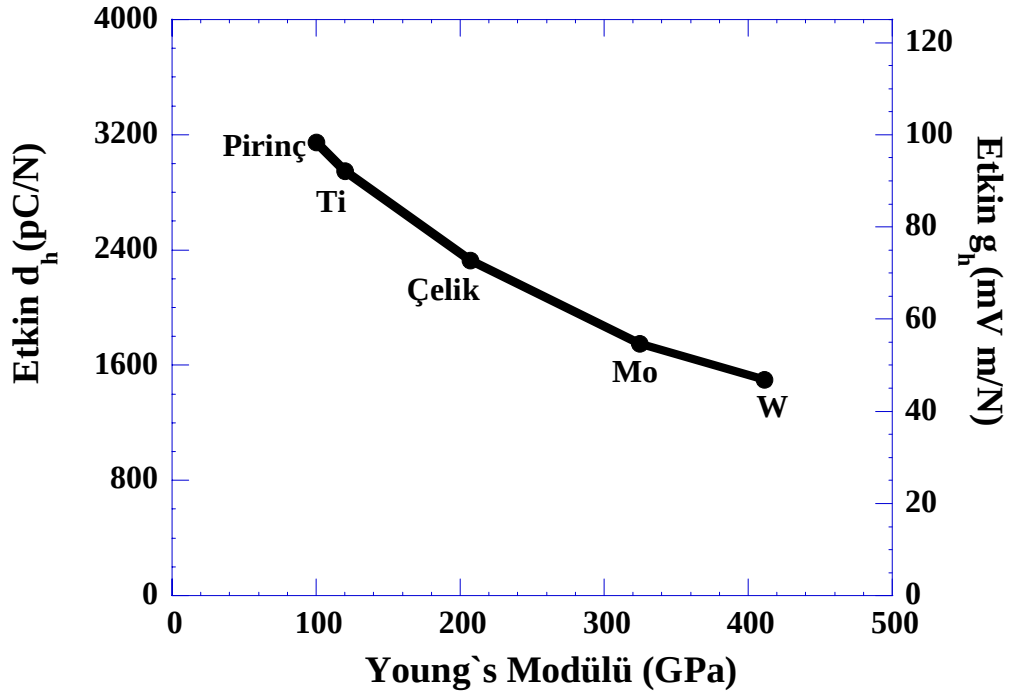
Metal kapaklar için kullanılan malzemelerin elastik modulunun ve akma mukavemetinde transdüserin sualtı performansına ve dayanabileceği hidrostatik basınca önemli etkileri vardır. Bu çalışmada kullanılan metal kapakların özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.12 ve 5.13'de kullanılan malzemenin elastik modülüne bağlı olarak hidrostatik piezoelektrik katsayılarıdaki değişimler verilmiştir. Daha stif kapaklarda uygulanan yükün seramiklere iletilmesi azalmaktadır ve böylece daha düşük yararlılık katsayısına sahip olmaktadır (Şekil 5.14).

Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde hesaplanmış basınç limitleri ve d_h değerleri Şekil 5.15'de verilmiştir. Eğer daha yüksek akma mukavemetine sahip metal kullanılırsa transdüserin kapaklarının plastik deformasyona uğraması için daha yüksek hidrostatik basınç gerekmektedir, böylece transdüser daha yüksek derinliklerde kullanılabilir. Diğer yandan Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere genelde yüksek akma mukavemetine sahip metaller daha stif yapıda olmakta ve stif kapaklarda gerilme ve deformasyon transferinin verimliliği düştüğü için transdüserin sualtı hassasiyeti azaltmaktadır.

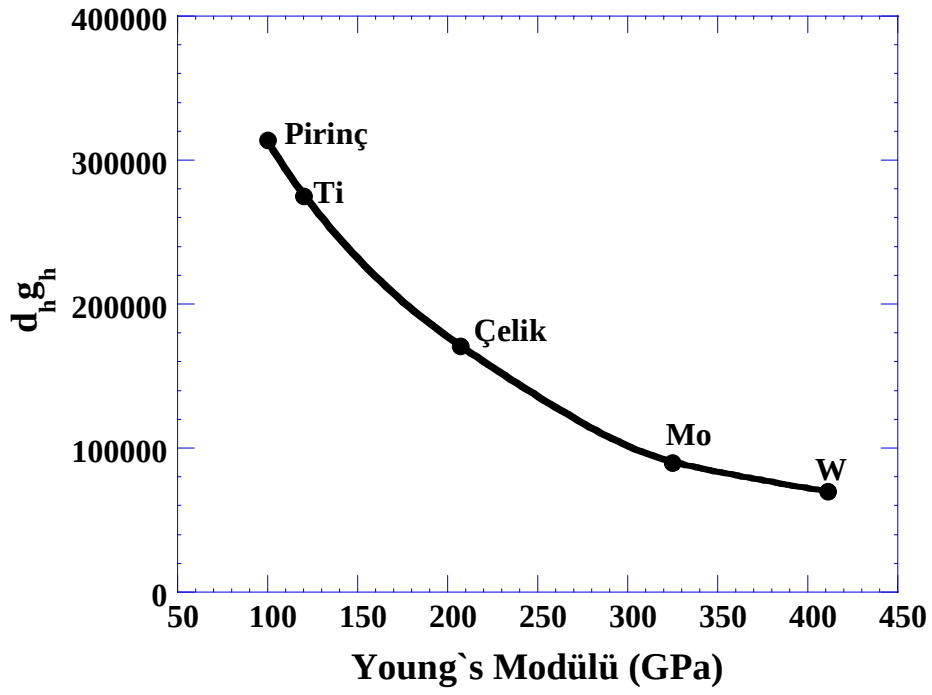
Bazı titanyum ve alüminyum alaşımları yüksek akma mukavemetinin yanında düşük elastisiteye sahiptir. Bu tip metallerle d_h değerlerinde azalma olmadan daha yüksek derinliklere gidilebilir. Diğer yandan bu gibi özel alaşımlar hakkında detaylı maliyet ve performans analizi yapılması gerekmektedir.

Çizelge 5.1 Metal Kapakların Fiziksel Özellikleri

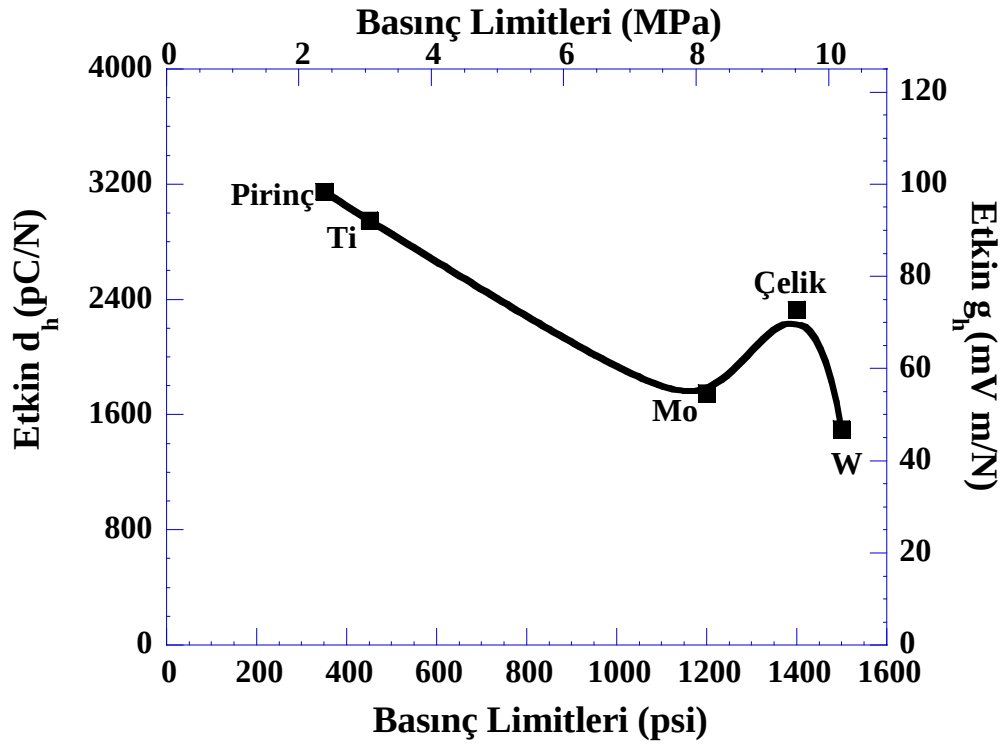
Metal Kapak Malzemesi	Young's Modülü, E (GPa)	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson's Oranı, ν	Akma Mukavemeti (MPa)	Maksimum Mukavemet (MPa)	Ref.
Pirinç	100.6	8550	0.35	115	324	[48]
Titanyum	120.2	4500	0.361	250	350	[48]
Çelik	207	7860	0.3	500	705	[48]
Molibdenyum	324.8	10200	0.293	450	550	[48]
Tungsten	411	19300	0.28	550	620	[48]



Şekil 5.13. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde FEA ile hesaplanan hidrostatik piezoelektrik katsayı değişimi



Şekil 5.14. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde FEA ile hesaplanan yararlılık katsayısı değişimi



Şekil 5.15. Değişik metal kapaklardan yapılmış transdüserlerde hesaplanmış basınç limitleri ve d_h değerleri

5.3 Kısım Özeti

Cymbal transdüserin basınç altındaki kararlılığı ile ilgili çalışmalar şu şekilde özetlenebilir;

1. Transdüserin sualtında etkinliğinin kaybolması metal kapakların plastik deformasyonunun sonucunda oluşmaktadır.
2. Oyuk boyutları ve malzeme seçiminin transdüserin basınç kararlılığında ve sualtı performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Oyuk derinliği/oyuk yarıçapı oranı 0.07 olduğunda sualtı performansı optimize edilmektedir.
3. Yumuşak PZT içeren transdüserler sert PZT'ye sahip transdüserlerden daha iyi performans göstermektedir.
4. Yüksek akma mukavemetine sahip metal kapaklı transdüserler daha yüksek derinliklerde kullanılabilirler. Fakat bu tip metal kapaklar transdüserin sualtı performansının düşmesine sebep olmaktadır. Sualtı performansından fedakarlık etmeden yüksek derinliklere dayanabilecek metal alaşım kapaklar üzerine çalışmalar devam etmektedir.

6. CYMBAL TRANSDÜSERİN GENİŞ BANT ARALIĞI İÇİN TASARIM OPTİMİZASYONU-SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Transdüserlerin sualtında kullanılmaları için birtakım gerekliliklere ihtiyaç vardır. Bu gereklilikler daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere; kullanılabilir frekans-bant aralığı, rezonans frekansı (f_r), mekaniksel kalite faktörü (Q_m), elektromekaniksel dönüşüm katsayısı (k), elektroakustik verimlilik, akustik yönlenme, serbest alan voltaj hassasiyeti (FFVS), iletilen voltaj tepkisi (TVR), kaynak düzeyi ve güç limitleri ile belirlenir.

Diğer transdüserler ile karşılaştırıldıklarında cymbal transdüserlerin avantajları yüksek sualtı yararlılık katsayısı (sualtı transdüserleri arasında en yüksek), yüksek TVR ve FFVS, kolay ve ucuz üretimleridir. Bunun yanında malzeme parametreleri ve boyut parametreleri optimize edilerek cymbal transdüserlerin rezonans frekansı ve hassasiyet gibi özellikleri kolayca modifiye edilebilir. Diğer yandan admitans spektrumunda kullanılan bant aralığının dar olması ve tek taraflı yönelmeye sahip olmayan akustik yönlenme karakteristiği sualtı transdüseri olarak kullanılmalarını sınırlandırmaktadır.

Bu çalışmada diğer üstün özelliklerinin yanında geniş bant genişliğine sahip modifiye edilmiş cymbal transdüser tasarımı, üretimi ve sualtı uygulamalarında kullanımı amaçlanmaktadır. Bu amaçla cymbal transdüser temel alınarak altı yeni transdüser tasarımı ve optimizasyonu sunulmuştur (Şekil 6.1). Bu tez çalışmasında öngörülen tasarımlardan ilk dört tanesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Bant genişliğinin artırılması amacı için mekaniksel kalite faktörü (Q_f) ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısının (k) optimizasyonunun yanında, rezonans modlarının birbirleriyle karşılaştırılması ve daha geniş bant aralığının oluşturulması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonunda sualtında, petrol ve maden arama çalışmalarında, sualtı hedef sistemlerinde ve sualtı topoloji görüntüleme sistemlerinde kullanılacak transdüser üretimi hedeflenmektedir.

6.1 Transdüser Tasarımları

Cymbal transdüserin bant genişliğinin artırılması amacı ile altı adet yeni transdüser tasarımı öngörülmüştür. Bu tasarımlarda cymbal transdüserin en önemli özelliklerinden olan kolay ve ucuz üretimden fedakarlık edilmemeye çalışılmıştır.

Tasarımlarda bant genişliğinin artırılması için iki yöntem izlenmektedir. İlk yöntemde transdüserin mekaniksel kalite faktörü Q_m ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısı k 'nın optimizasyonuna çalışılmaktadır. Sualtı transdüserlerinde $k \cdot Q_m$ çarpımının 1.2 civarı olduğu zaman mümkün olan en geniş bant aralığında en yüksek akustik güç çıktısı elde edilebilmektedir [8]. Cymbal transdüserin sualtındaki elektromekaniksel dönüşüm katsayısı 0.3 civarında olmasına rağmen elektromekaniksel kalite faktörü 15'den yüksektir. Böylece her iki faktörün çarpımı $k \times Q = 15 \times 0.3 = 4.5$ olmaktadır. Mümkün olan en geniş bant aralığı için bu iki faktörün optimize edilmesi gereklidir.

Bant genişliğin artırılması için diğer izlenecek yöntem ise transdüser tasarımında birbirinden farklı iki rezonans modunun üstüste getirilmesidir. Böylece üstüste çakışan rezonans modlarının daha geniş bant aralığı oluşturması beklenmektedir. Cymbal transdüserde sualtında görülen (0,1) ve (0,2) modları birbirlerine yakın frekanslarda görülmektedir. Fakat (0,2) modunda metal kapak kollarında hareket etmeyen nodal bölgeler oluşması, TVR değerinin bu frekansta dip yapmasına yol açmakta ve aynı zamanda (0,1) modunun bant genişliğini daraltmaktadır. Eğer (0,2) modunun hareketi sönmülenebilirse veya hareketsiz nodal bölgelerin elimine edilmesiyle bu modda yüksek TVR değerleri elde edilebilirse iki modun birlikte oluşturacakları bant genişliği artacaktır.

Bant genişliğine ek olarak, akustik yayılma paterninin şekli ve yönelme davranışıda diğer önemli akustik parametrelerdendir. Eğer transdüserin boyutu ortamla karşılaştırıldığında çok küçük ise transdüser dairesel yönelme paterni (omni-directional) gösterir. Fakat bu tip dairesel yönelme ses gürültü seviyesini azaltılması için özellikle doğrusal yönelme istenen projektör uygulamalarında dezavantaj yaratabilir. Bu sebeplerden cymbal transdüserde akustik yönelme karakteristiğinin anlaşılmasına ve doğrusal yönde geliştirilmesinde ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada doğrusal yönlendirme paterni elde edilmesi ilk hedef olarak belirlenmesinde yeni transdüser tasarımlarının yönlendirme paternleride sunulmuştur.

Bant genişliğinin artırılması için öngörülen yeni transdüser tasarımları Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Çalışmalar oyuk içerisinde sıvı ve polimer kullanımı ile başlamıştır (Tasarım 1-2-3). Sıvı ve polimer miktarlarının değiştirilmesi ile Q_m ve k değerlerinin optimizasyonuna çalışılmıştır.

Dördüncü tasarımda ise cymbal transdüser üzerinde ve oyuk tasarımının içerisinde ağırlık kütlesi kullanılarak transdüserin optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Sabitlenmiş çok katmanlı cymbal transdüserde (Tasarım 5) bir taraftaki akustik gücün yok edilmesi ile akustik yönlendirme sağlanması ve çok katmanlı yapıdaki katmanların farklı fazlarda uyarılmaları ile rezonans modlarının birbirleriyle çakışmalarıyla daha geniş bant genişliğine ulaşılması öngörülmüştür.

Son tasarımda cymbal transdüser ve tonpilz transdüserin avantajlarının bir araya getirilmesi amaçlanmaktadır. Tasarımdaki kapaklar ve öngerilme uygulayan metal çubuk rezonans frekansını düşürürken Q_m ve k değerlerinin optimizasyonuna yardım edeceklerdir. Çok katmanlı yapıda farklı fazda uyarılmalarla bant genişliğinin optimizasyonunun yanında akustik paternlerin optimizasyonuna çalışılması ileride düşünülen çalışmalar arasındadır.

Bu tez çalışmasında ilk dört tasarım üzerine araştırmalar yapılmış olup bu tasarımlarla cymbal transdüserin bant genişliğinin artırılmasına çalışılmıştır. Tasarım 5 ve 6 üzerine çalışmalar ise ileride yapılacaktır.

6.2 Oyuk Boşluğunda Sıvı ve Polimer Kullanımı

Bu tasarımlarda oyuk boşluğunda sıvı ve polimer kullanılarak akustik bant aralığının optimizasyonuna çalışılmıştır. Polimer ve sıvı miktarlarındaki değişim ile birlikte aynı zamanda malzemelerdeki değişimin transdüserin sualtı alıcı ve projektör performansına ve rezonans frekanslarına etkileri incelenmiştir.

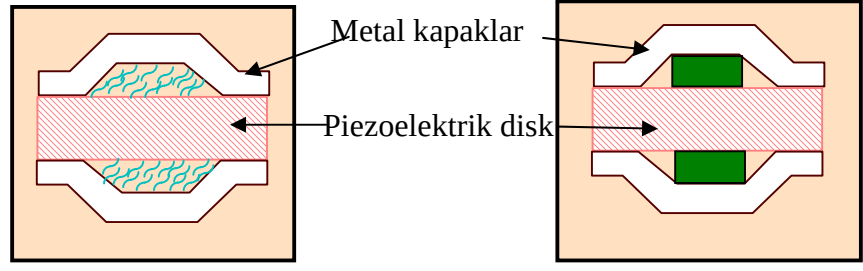
İlk olarak çalışmalar sert polimer olan poliüretan ve su ile başlamıştır. Referans polimer olarak poliüretan seçilmesinin sebebi ise poliüretanın akustik empedansının suyun akustik empedansına çok yakın olmasıdır (1.9×10^5 gm/cm²sn).

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 de yeni tasarımların ATILA ile sualtında örgü model yapısı gözükmemektedir. Metal kapaklar altındaki polimer dolgu metal kapakları PZT disklerle yapıştırmakta ve polimerin özellikleriyle orantılı olarak katı veya elastik bir post olarak davranmaktadır. Bu çalışmada ilk yaklaşım olarak visko-elastik sönümleme için polimer ile birlikte yay etkisi yaratılmaya çalışılmıştır. Suyun ise kapağın her iki yanında akustik uyum sağlayarak bant genişliğini artırması beklenmiştir. Şekil 6.4 oyuk boşluğunda polimer dolgu ve su bulunan transdüserlerin TVR değerleri görülmektedir. Karşılaştırma için referans cymbal transdüserinde TVR değerleri verilmektedir. Oyuk boşluğunda polimer bulunan cymbal transdüserlerde TVR değerlerinde % 5 civarlarında, su bulunan transdüserde ise % 33 değerlerinde bir sönümleme gözükmemektedir. Bu sönümlemeler dB değerleri bazındadır. Eğerki sönümlemeler transdüserlerin gösterdiği deplasmanla doğru orantılı olan ses basıncı değerleri cinsinden karşılaştırılırsa kapak altında polimer içeren transdüserde % 55 ve kapak altında su içeren transdüserde ise % 99 olmaktadır. Yani deplasmanda % 55 ve % 99'luk sönümlemeler olmaktadır Bu sonuçlar göstermektedir ki oyuk boşluğunda su bulunan transdüser cymbal karakteristiğini yitirmektedir. Oyuk boşluğunda bulunan malzemenin yoğunluğu arttıkça yapının ilk rezonans frekansıda artmaktadır.

Çizelge 6.1 kapak altında polimer ve sıvı dolgu bulunan transdüserlerin TVR ve ilk rezonans frekanslarının yanında k_{eff} ve Q_m değerlerinin referans transdüserle karşılaştırmasını vermektedir. Oyuk boşluğunda su içeren transdüserde k_{eff} değerinde değişiklik olmazken Q_m değerinde ise 2 katlık bir yükselme olmaktadır. Bu sonuçtan rezonans frekansındaki bant genişliğinin küçülmesi beklenir. Şekil 6.4'den görüldüğü üzere bu transdüserlerde dar bant genişliği karakteristiği görülmektedir. Oyuk boşluğunda polimer içeren transdüserde ise k_{eff} değeri 0.86 gibi çok yüksek bir değere ulaşmakta ve mekaniksel kalite faktörü Q_m ise kapakların hareketinin sönümlemesi ile birlikte 1.13'e kadar düşmektedir. Bu ilk sonuçlar ışığında $k_{eff} \times Q_m$ değerinin optimize edilmesi için en uygun tasarım kapak altında polimer olarak gözükmemektedir. Oyuk boşluğunda sıvı kullanılan transdüserlerde TVR değerleri 85 dB lere kadar düşmektedir ve bu değer sualtı uygulamaları için yetersiz olmaktadır. Daha önce

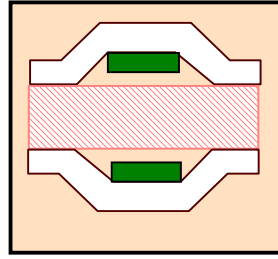
de belirtildiği üzere $k_{eff} \times Q_m$ çarpımının 1.2 olduğu durumlarda elde edilebilecek optimum bant genişliği optimum akustik g ile elde edilebilmektedir. Bu duruma göre optimize edilmeye en uygun transdüser oyuk boşluğunda polimer içeren transdserdir. Çalışmanın devamında polimer dolgunun etkileri araştırılmıştır.

Her iki yönde polimer içeren transdüserler rezonans frekansında dairesel akustik saçılma göstermektedir (şekil 6.5). Diğer yandan oyuk boşluğunda su kullanılan transdüserde dipolar yönlenme paterni gözlemlenmiştir. (şekil 6.6).

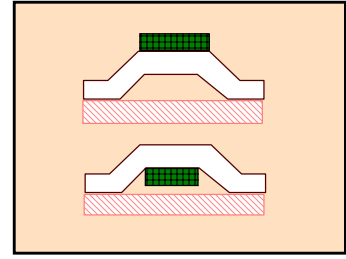


1-) Oyuk boşluğunda sıvı

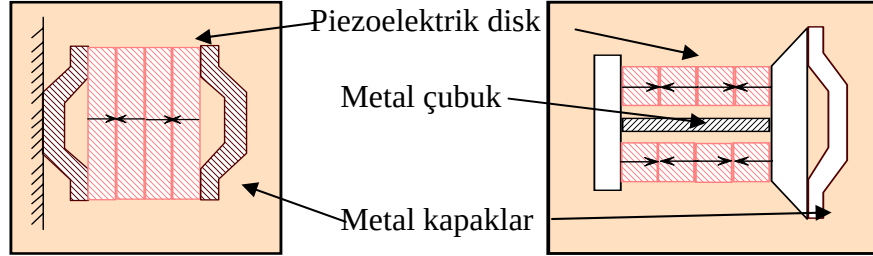
2-) Oyuk boşluğunda polimer



3-) Oyuk boşluğunda yarım polimer



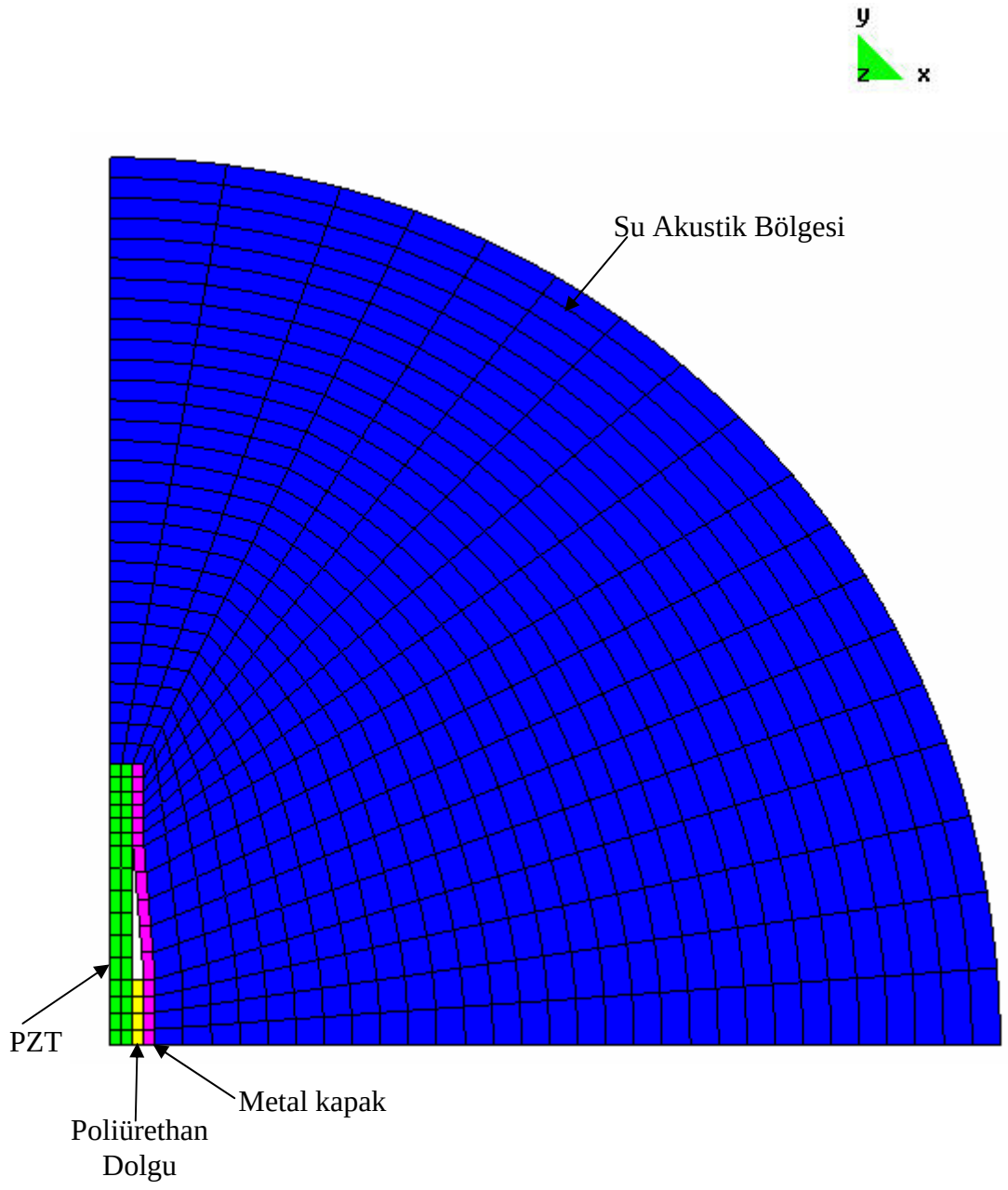
4-) Kapak üzerinde ve oyuk boşluğunda kütle



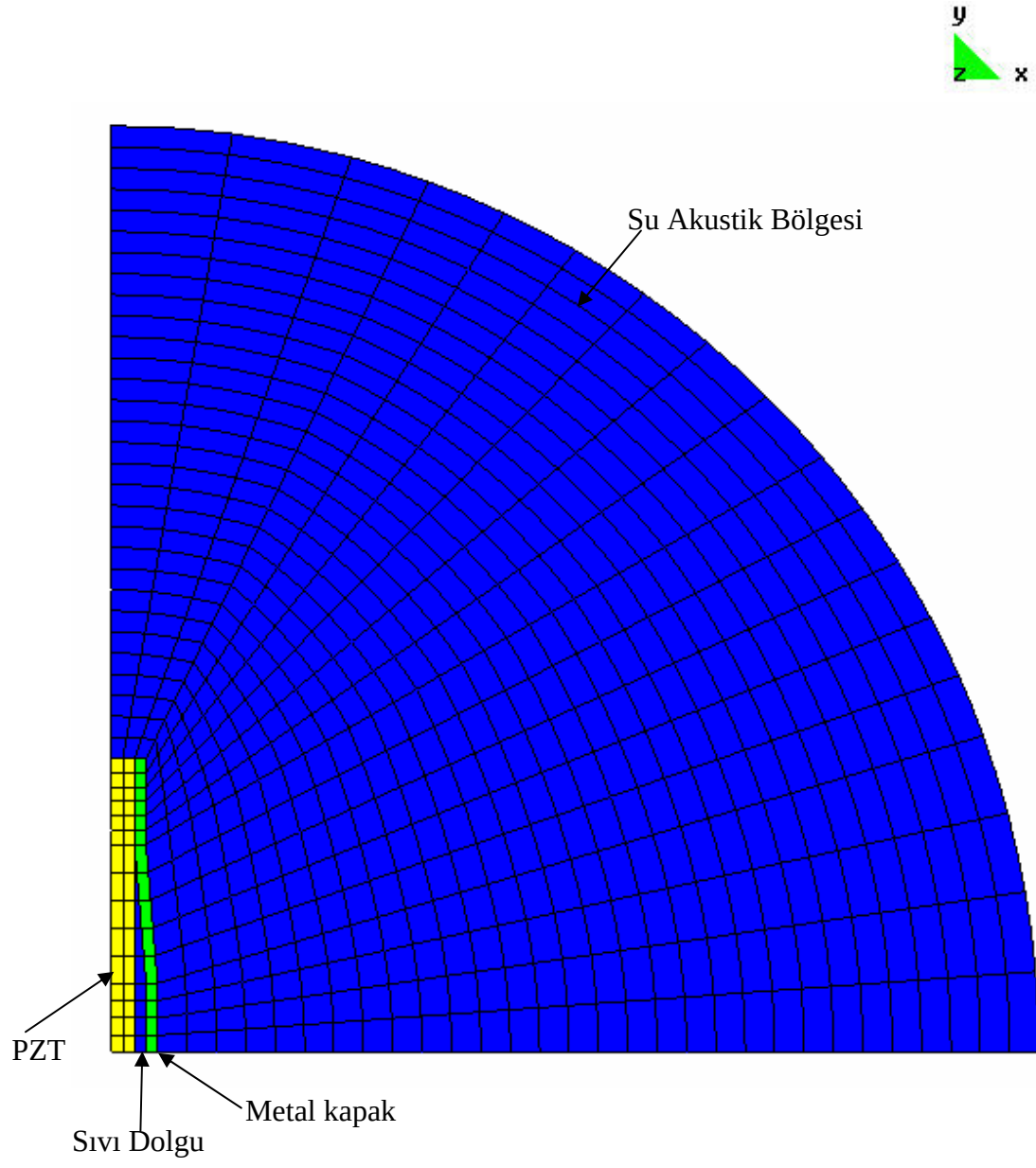
5-) Sabitlenmiş çok katmanlı cymbal
(oklar PZT disklerdeki polarizasyonu göstermektedir)

6-) Tonpılız çok katmanlı cymbal
(oklar PZT disklerdeki polarizasyonu göstermektedir)

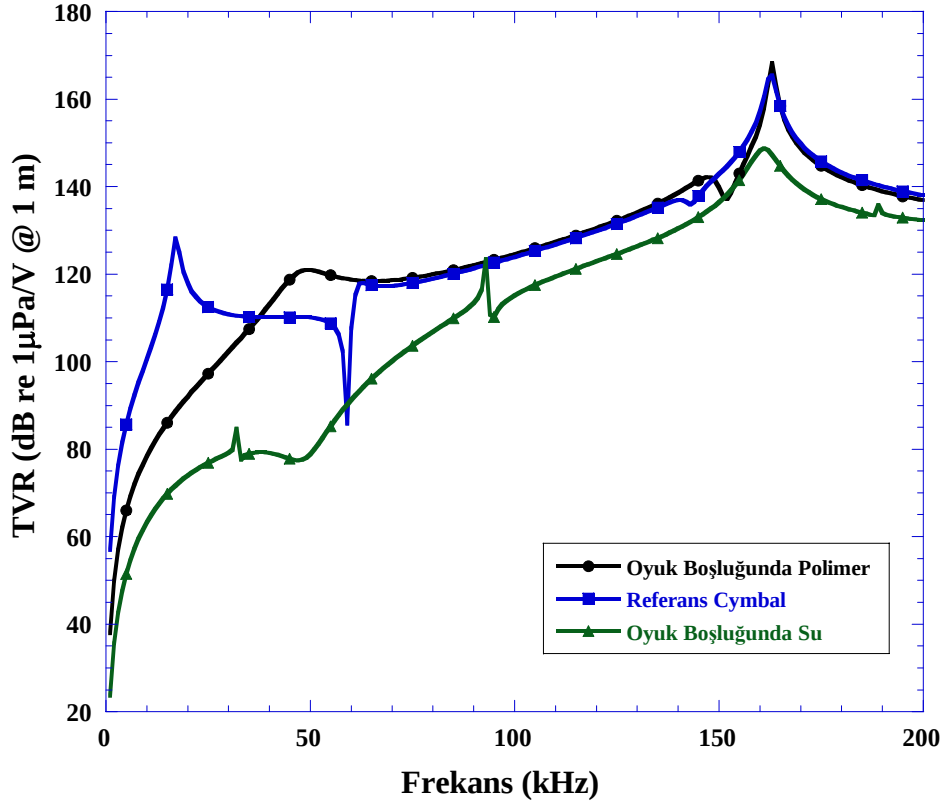
Şekil 6.1. Yeni transdüser tasarımlarının şematik gösterimleri



Şekil 6.2. Oyuk boşluğunda polimer bulunan cymbal transdüserin sualtında ATILA FEA kod kullanılarak modellenmesi



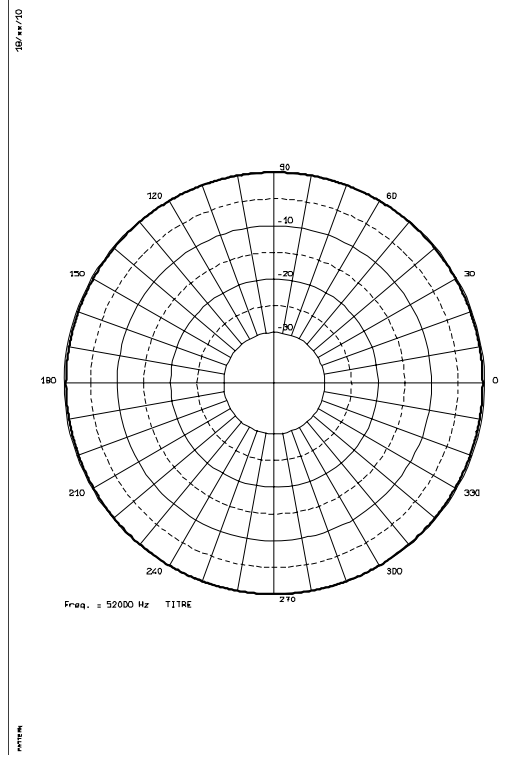
Şekil 6.3. Oyuk boşluğunda sıvı bulunan cymbal transdüserin sualtında ATILA FEA kod kullanılarak modellenmesi



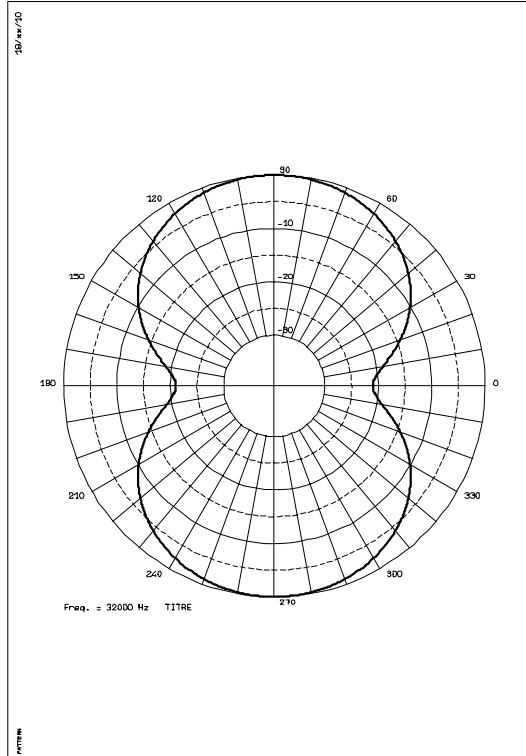
Şekil 6.4. Oyuk boşluğunda sıvı veya poliürethan bulunan cymbal transdüserin sualtı projektör performansının referans cymbal transdüser ile karşılaştırılması

Çizelge 6.1. Oyuk boşluğunda poliürethan ve sıvı içeren cymbal transdüserlerin karşılaştırılması

Transdüser	Rezonans Frekansı (kHz)	TVR (dB re 1 μ Pa.V @ 1 m)	(Ses basınç düzeyi, Pa)	$k_{eff.}$	Q_m	$k_{eff.} * Q_m$
Cymbal	17	128	2.51	0.32	17	5.58
Tasarım 2 (Oyuk boşluğunda polimer)	51	121	1.12	0.65	1.13	0.73
Tasarım 1 (Oyuk boşluğunda su)	32	85	0.017	0.34	33	11.2



Şekil 6.5 Oyuk boşluğunda poliürethan içeren transdüserde yönlenme paterni

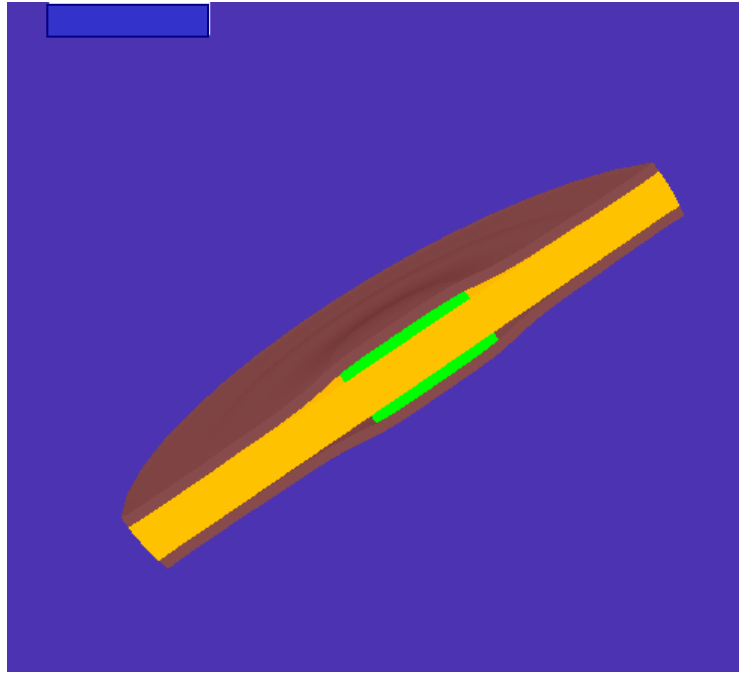


Şekil 6.6 Oyuk boşluğunda su içeren transdüserde yönlenme paterni

6.2.1 Oyuk Boşluğunda Polimer

Çalışmanın bu aşamasında oyuk boşluğunda polimer kullanılarak transdüserin k_{eff} ve Q_m değerlerinin optimizasyonu ve polimer çapındaki ve polimer malzemesindeki değişim ile rezonans modlarındaki değişimler araştırılmıştır. Bu konudaki çalışmalar ilk olarak hava ortamındaki hesaplamalarla başlamıştır [49-50]. Referans polimer olarak poliüretan seçilmiştir. Poliüretanın seçilmesindeki sebep akustik empedansının suyun akustik empedansına yakın olmasıdır. Böylece metal kapakların iç ve dış kısmında akustik empedansın uyuşmasıyla bant genişliğinin artırılmasına çalışılmıştır. Ayrıca poliüretanın elastik modülünün yüksek olması sebebiyle cymbal transdüserdeki metal kapakların hareketini optimum şekilde sönümleyebileceği düşünülmüştür.

Polimer malzeme kullanılarak modellenen transdüserin 3-D olarak yarı simetrisinin gösterimi Şekil 6.7 de verilmektedir. Çalışma esnasında oyuk boşluğunda bulunan poliüretan çapı 0.25 ile 1.5 mm arasında değiştirilmiştir.



Şekil 6.7. Oyuk boşluğunda poliüretan bulunan transdüserin 3-D kesit gösterimi

6.2.1.1 Geometri Etkisi

Oyuk boşluğunda bulunan polimerin çapının değiştirilmesi ile cymbal transdüserin rezonans frekansında, yaratılan ses basıncı düzeyi ve TVR

değerlerinde, mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişimler Çizelge 6.2’de verilmiştir. Transdüserin ilk rezonans frekansı metal kapaklar altındaki polimer dolgunun çapının artmasıyla exponensiyel olarak artmaktadır. Polimer dolgu kapakların hareketini engelleyen katı bir post gibi davranmakta ve polimer dolgunun çapı arttıkça yapının rijiditesi artmaktadır. Böylece ilk rezonans frekansı artmakta ve 51 kHz’lere kadar ulaşmaktadır. Poliürethan çapı ile birlikte değişen transdüserlerin admitans grafikleri Şekil 6.8 de verilmiştir. Polimer yarıçapının artmasıyla birlikte 1. ve 2. modun arası açılırken, 2. mod seramiğin moduna yaklaşmaktadır. Aynı zamanda 1. rezonans modunda poliüretanın cymbal transdüserin hareketini belli miktarlarda sönümlemesi dolayısı ile modun keskinliği azalmaktadır. Böylece oyuk çapında poliürethan kullanılarak bant genişliğinin artırılması için gerekli her iki mekanizmada etkin olmaktadır. Hem k ve Q çarpım değerleri düşürülmekte (Şekil 6.9) hemde 2. ve 3. rezonans modlarının birbirleriyle çakışmasıyla daha geniş bant aralığı elde edilebilmektedir. Her iki mekanizmanın birbiriyle uyumlu ve optimum şekilde olduğu çalıştığı polimer çapının kapağın düz (apeks) çapıyla aynı olduğu (referans transdüser için 1.5 mm) gözükmemektedir.

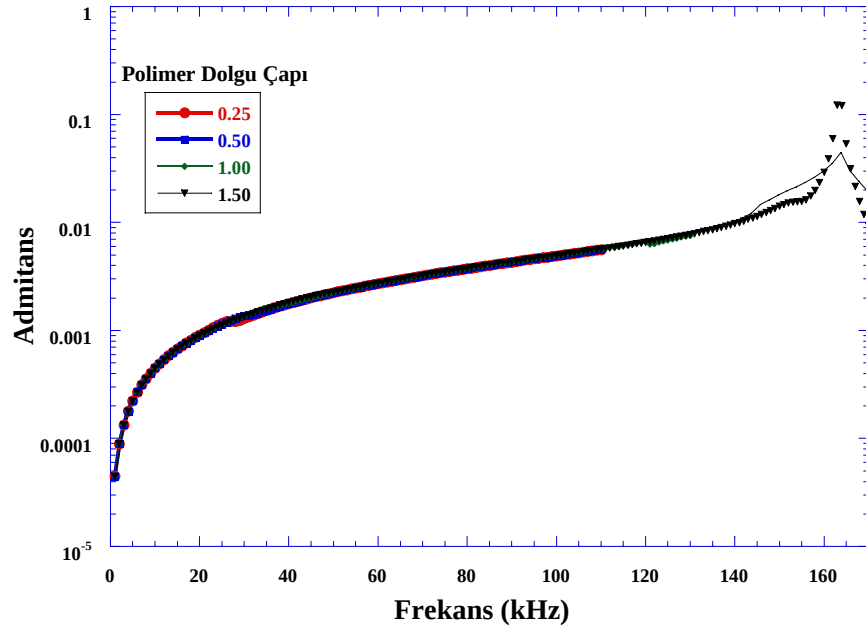
Polimer yarıçapının artmasıyla yaratılan ses basıncı ters orantılı olarak azalmaktadır. Ses basıncı 2.51 Pa’dan 1.12 Pa civarlarına düşmektedir. 0.25 mm yarıçapında polimer kullanıldığı zaman bile transdüserin deplasman ve yarattığı ses basıncında % 35’lik bir sönümlenme olmaktadır. Oyuk boşluğunda polimer kullanıldığında seramikten metal kapaklara transfer edilen hareket sönümlenmekte ve kapağın apeks bölgesindeki deplasman azalmaktadır. Polimer dolgu kapakların apeks bölgesini tutmakta ve kapağın esneme hareketini kısıtlayıp kapaklarda bükülmeye yol açmaktadır (Şekil 6.10).

Transdüserin hareketinin sönümlenmesi ve deplasman değerlerinin düşmesi ses basıncı düzeyinde ve dolayısı ile TVR değerlerinde düşmeye sebep olmaktadır. Poliürethan çapının değişimin transdüserin TVR ve kullanılabinir bant aralığına etkisi Şekil 6.11 de görülebilir. TVR grafiklerinde 2. mod ve seramiğin modunun birbirine yaklaşması daha net görülebilmektedir. Aynı zamanda 1. moddaki sönümlenmede açıkça belli olmaktadır. TVR değerlerindeki azalma 3 dB civarındadır. Poliürethan çapıyla birlikte elektromekanik dönüşümün

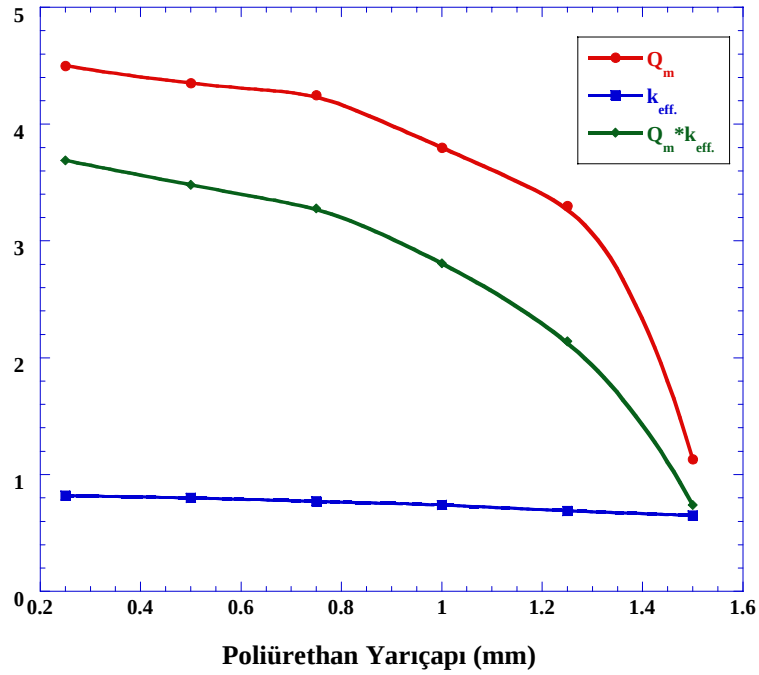
sönümlenmesi ve rezonans modlarının çakışması etkin k ve Q çarpım değerlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu azalmanın etkisiyle cymbal transdüserin 1 ve 2. modları arasındaki bant genişliği artmaktadır (Şekil 6.11). Daha sonraki kısımlarda transdüserlerin seri halde kullanımı ile daha geniş bant aralığının eldesi yanında TVR değerlerindeki azalmanın telafi edilmesine çalışılmıştır. Aynı zamanda boyut ve malzeme parametreleriyle de TVR değerlerinde düşmeden sakınarak bant genişliğinin optimizasyonuna çalışılmıştır.

Çizelge 6.2. Oyuk boşluğundaki poliürethan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim

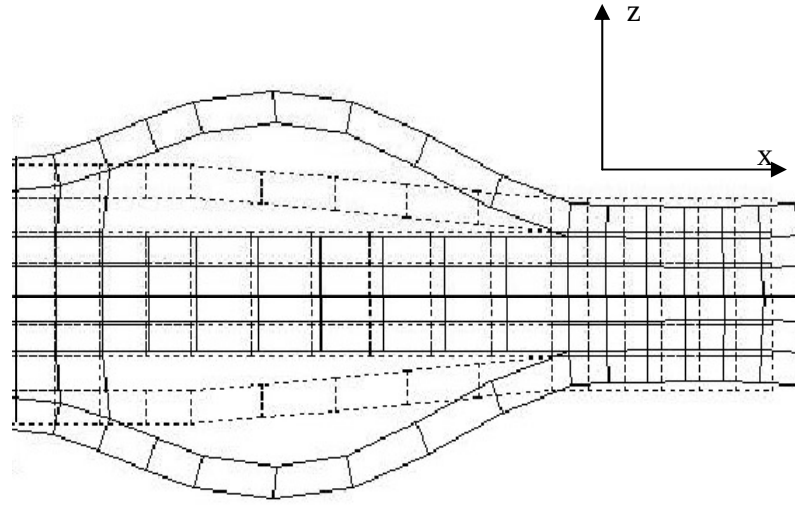
Poliürethan Yarıçapı (mm)	İlk Rezonans Frekansı (kHz)	TVR (dB re 1 μPa.V @ 1 m)	Ses Basıncı Düzeyi	Q_m	$k_{eff.}$	$k_{eff.} * Q_m$
0.25	27	124.92	1.62	4.50	0.82	3.69
0.50	33	122	1.25	4.35	0.80	3.48
0.75	34	123.25	1.45	4.25	0.77	3.28
1.00	38	122.44	1.32	3.8	0.74	2.81
1.25	43	121.58	1.19	3.3	0.69	2.14
1.50	51	121	1.12	1.13	0.65	0.74



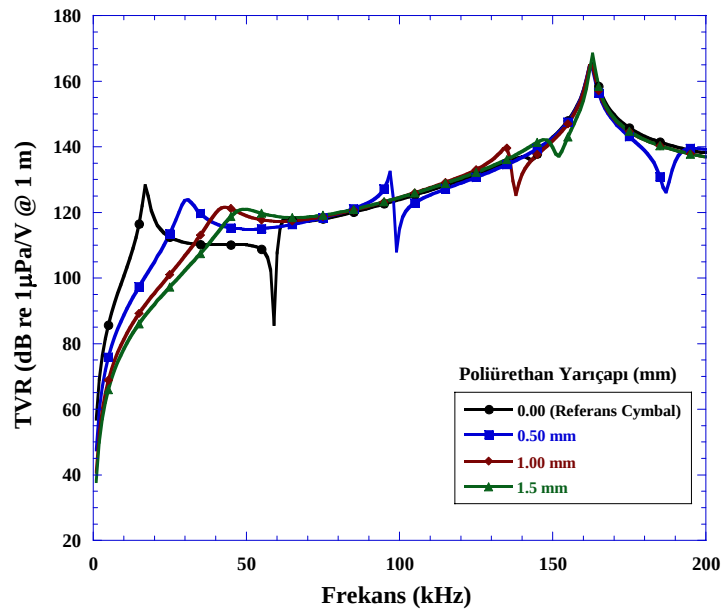
Şekil 6.8 Poliüretan dolgu çapının transdüserin sualtı admitans karakteristiği üzerindeki etkisi



Şekil 6.9 Oyuk boşluğundaki poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim



Şekil 6.10. Oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüsünün deplasman hareketi

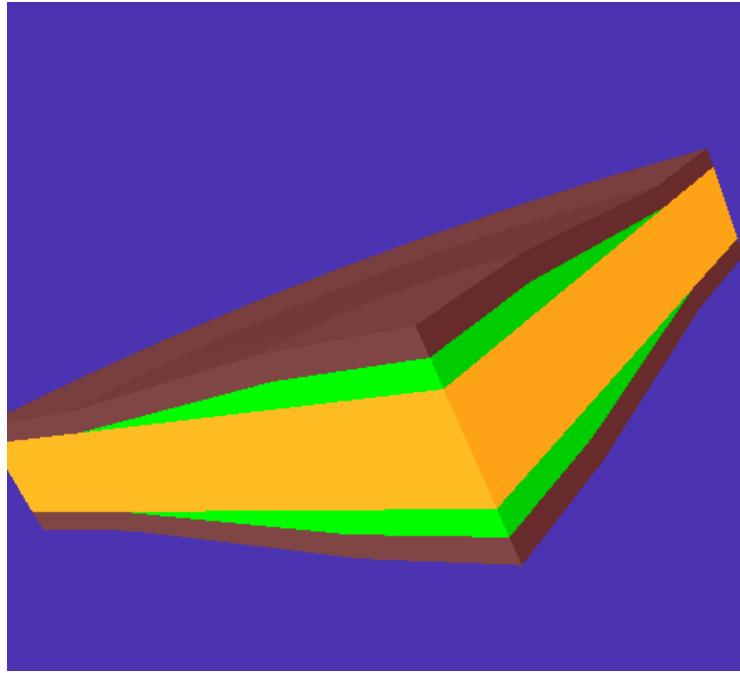


Şekil 6.11. Poliüretan çapının transdüsünün sualtı TVR (projektör) karakteristiği üzerindeki etkisi

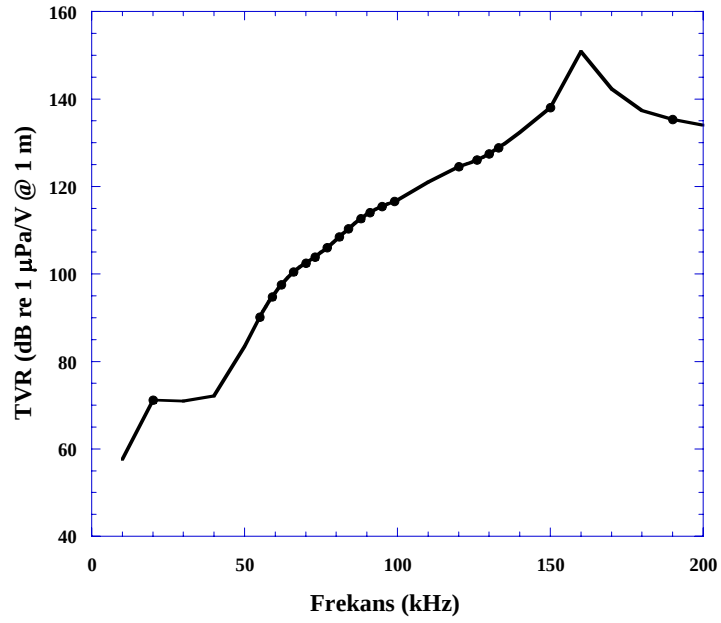
Diğer düşünülen bir tasarımda ise oyuğun tamamı polimer ile doldurulmuştur (Şekil 6.12). Bu tasarımda eğer ki sönümleme optimum miktarda olursa yeterli

bant genişliğine ulaşılacağı düşünölmekteydi. Fakat tüm boşluğun polimer ile doldurulması ikinci rezonans modunu tamamen yok etmekte ve aynı zamanda ilk rezonans modundaki TVR değeriğini çok düşürmektedir (Şekil 6.13). İlk rezonans frekansındaki deplasman hareketine bakıldığında (Şekil 6.14) deplasman hareketinin polimer tarafında tamamen sönümlendiğı ve kapaklarda oluşan esnek hareketin engellenmesiyle kapaklardaki bükölmenin de ortadan kalktığı gözlemlenmektedir. Bu tasarımda polimer tüm kapağı katı bir post gibi tutmakta ve metal kapakların deplasman transformasyonunu engellemektedir.

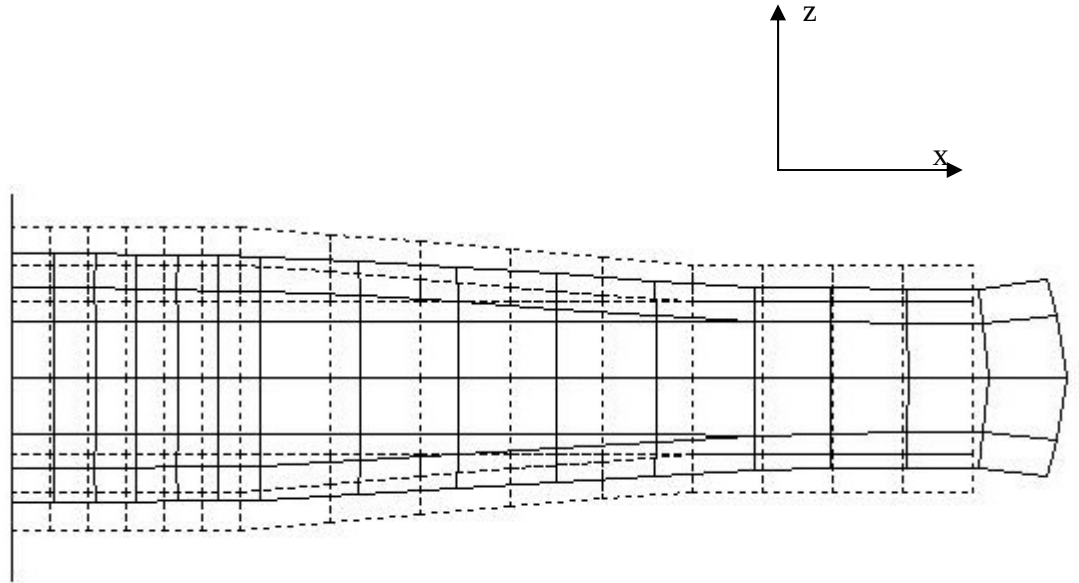
Oyuk boşluğunda polimer bulunan bu iki tasarımdan sadece kapağın apeksi ile aynı çapta polimer bulunduran tasarım k_{eff} ve Q_m değeriğlerinin optimizasyonunda kullanılabilir. Bu sonuçtan dolayı ilerleyen aşamalarda bahsedilen tasarımın optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 6.12. Oyuk boşluğunun tamamının poliüretan ile doldurulması



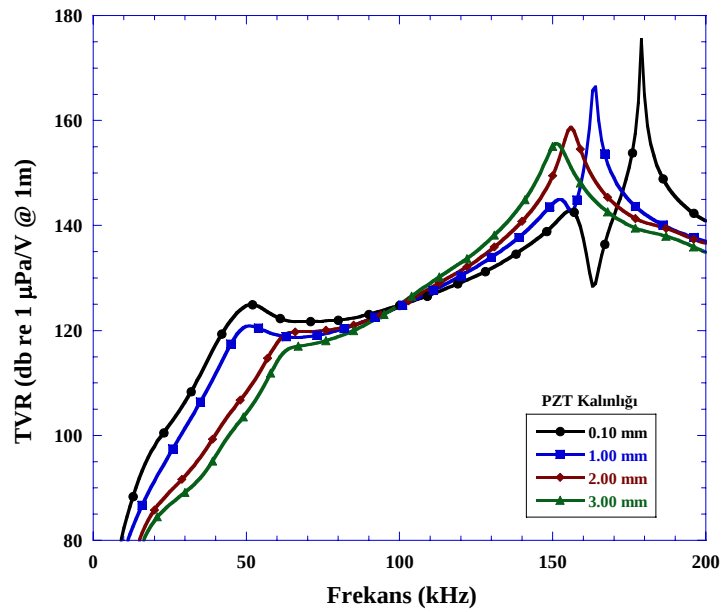
Şekil 6.13. Oyuk boşluğunun tamamı poliürethan ile doldurulduğundaki TVR değerleri



Şekil 6.14 Oyuk boşluğunun tamamı poliürethan ile doldurulduğunda ilk rezonans frekansında cymbal transdüserin deplasman hareketi

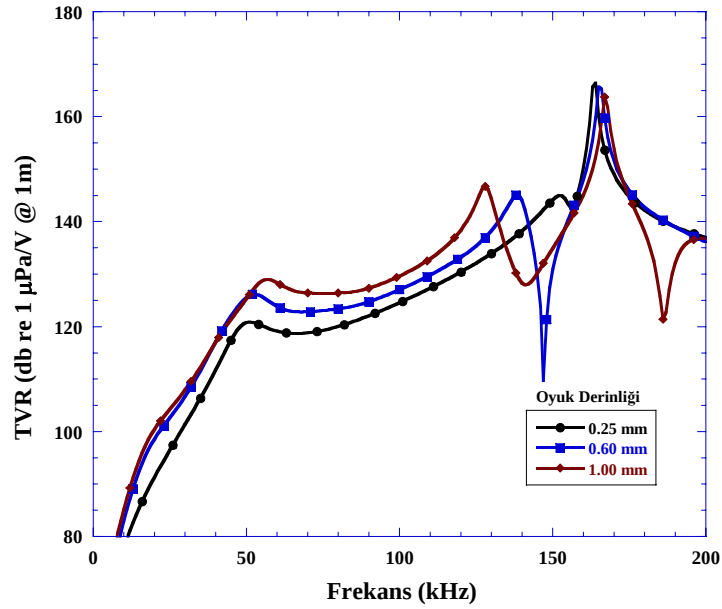
Bu amaçla ilk değiştirilen parametre PZT kalınlığı olmuştur. PZT kalınlığı değiştirilirken apeks ve polimer yarıçapı 1.5 mm olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasının ilk kısmında ve de daha sonra Pennsylvania State Üniversitesinde

yapılan çalışmalarda [51] PZT kalınlığının rezonans modları ve bant genişliğine önemli etkileri olduğu belirtilmiştir. Oyuk boşluğunda polimer kullanılan transdüserde de artan PZT kalınlığı ile birlikte ilk rezonans modunda değişim bant genişliğini önemli ölçüde artırmaktadır. PZT kalınlığının artmasıyla birlikte hem metal kapağın ilk modu hemde seramiğin radyal modu sönümlenmekte ve de ilk rezonans modunun 2. kolu yukarı kalkarak bant genişliğinin artmasına yol açmaktadır. Diğer bir deyişle 1, 2, ve 3. modlar tamamen birbirleriyle birleşmektedirler. Bu da bant genişliğinin büyük miktarda artmasına yol açmaktadır. Referans boyutlara sahip 2 mm kalınlığındaki cymbal transdüser TVR rezonans frekansı ve bant genişliği göz önüne alındığında bu uygulamada optimum transdüser yapısı olarak gözükmektedir (Şekil 6.15). PZT kalınlığı artıkça yapının elastikiyeti azaldığı için de ilk rezonans frekansı hafif biçimde artmaktadır. İlk rezonans frekansları 0.10 , 0.20, 1.00, 2.00 ve 3. 00 mm kalınlıkta PZT içeren transdüserler için sırasıyla 50, 50, 51, 62, 63 kHz’lerde görülmektedir.

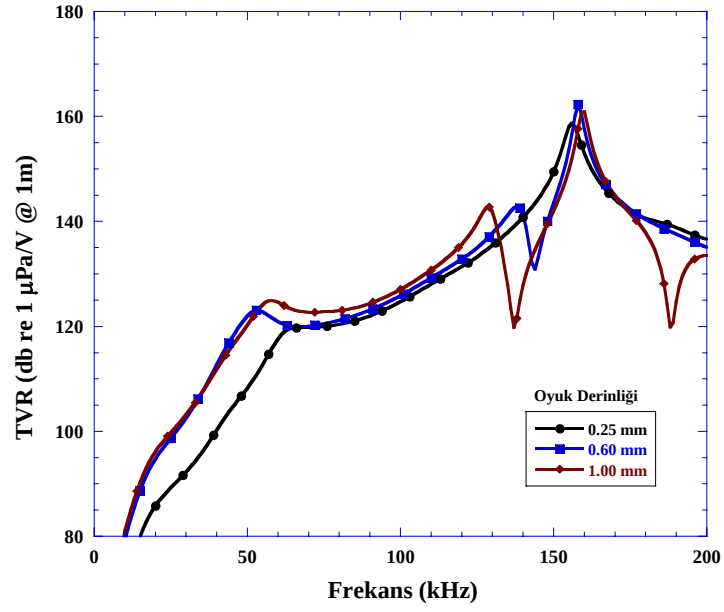


Şekil 6.15. Oyuk boşluğunda 1.5 mm çapında poliürethan içeren transdüserde PZT kalınlığının su altı performansına etkisi

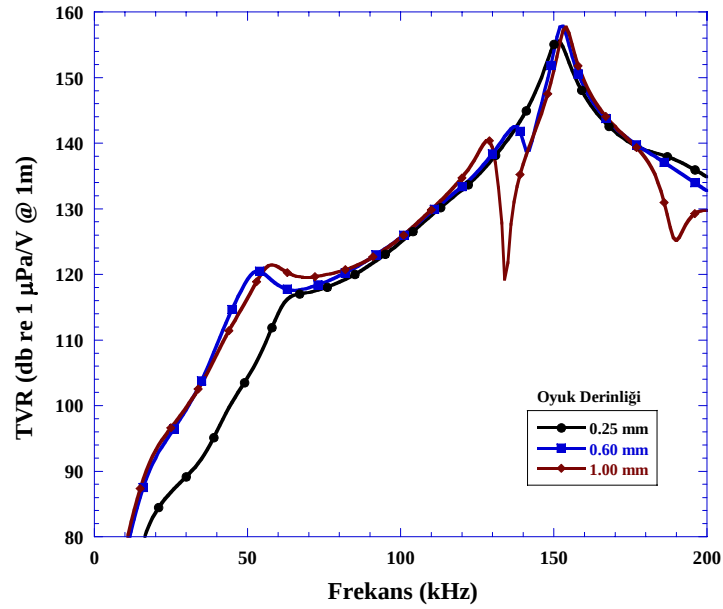
Çalışmanın devamında değişen PZT kalınlıklarında oyuk derinliği dolayısıyla da içerisindeki poliürethan miktarı farklı olan seramiklerin sualtı performans davranışları incelenmiştir. Şekil 6.16'da 1 mm PZT kalınlığına ve çeşitli oyuk derinliğine sahip cymbal transdüserlerin TVR spektrumları verilmiştir. 1 mm PZT cymballarda oyuk derinliği arttıkça 2. ve 3. modlar birbirlerinden ayrılmaktadır. Bununla birlikte TVR değerleri yükselmektedir. Artan oyuk derinliği ve 1. ve 2. modların etkileşimi sonucunda bant genişliğinde ufak bir düzelme görülmektedir. İlk rezonans frekansı ise hafif bir artma göstermektedir. Diğer yandan 2 ve 3 mm lik PZT kalınlığına sahip transdüserlerde TVR değerlerindeki artış olmasına rağmen 2. ve 3. modlardaki ayrılma bant genişliğini olumlu etkilememektedir. İlk rezonans frekansları ise optimum değerler göstermektedir (Şekil 6.17-6.18).



Şekil 6.16. 1 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi



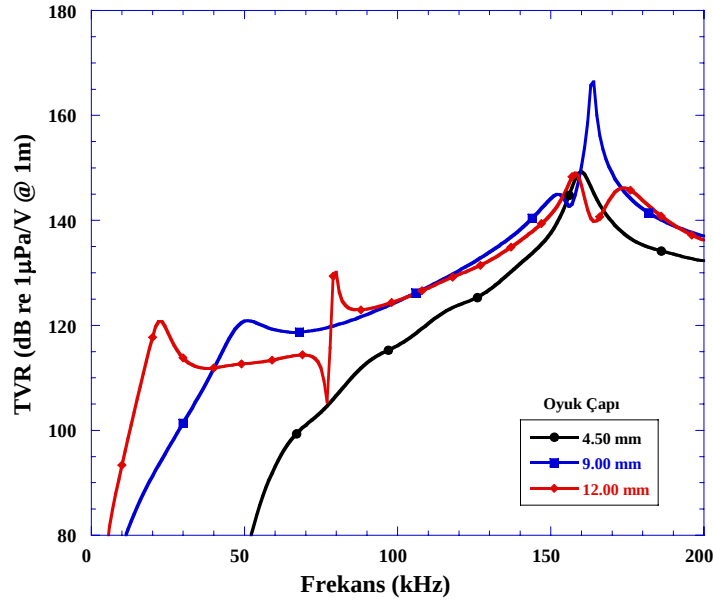
Şekil 6.17. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi



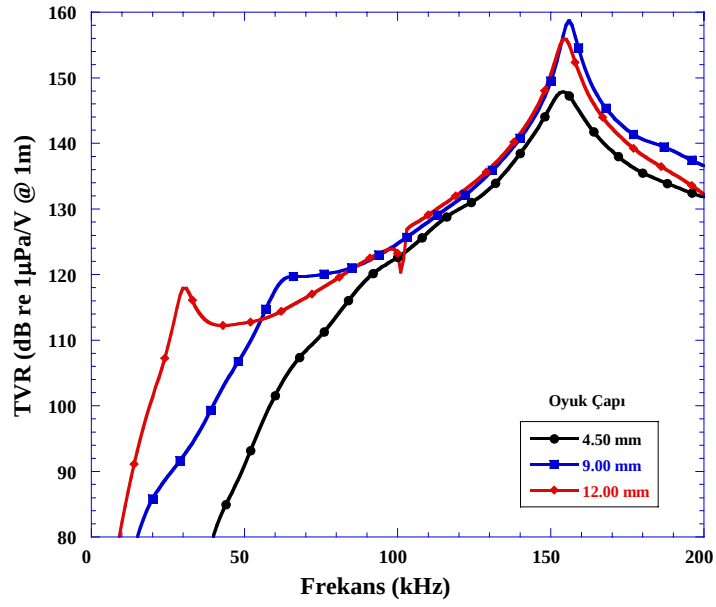
Şekil 6.18. 3 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliğinin TVR ve bant genişliğine etkisi

Bir sonraki aşamada 1, 2, ve 3 mm PZT kalınlığına sahip transdüserlerde oyuk çapının transdüserin bant genişliğine etkileri incelenmiştir. Oyuk çapı arttıkça yapının ilk rezonans frekansı düşmektedir (Şekil 6.19-6.20-6.21) ve de ilk modun sönümlenme düzeyi düşmektedir. Sönümlenmenin azalması sonucunda TVR değerleri yükselmekte bant genişliği ise düşmektedir. (Şekil 6.19-6.20-6.21). Bu sonuç metal kapaklarda oluşan bükülmenin etkisidir. Oyuk çapı arttıkça metal kapağın kolların uzunluğu artmakta ve kapaktaki bükülmenin de artmasıyla birlikte apeksdeki deplasman hareketide artmaktadır (Şekil 6.22). Metal kapaklardaki bükülme apekside etkilemekte ve apeksi yukarıya doğru çekmektedir. Buda sönümlenmenin etkisini azaltmaktadır.

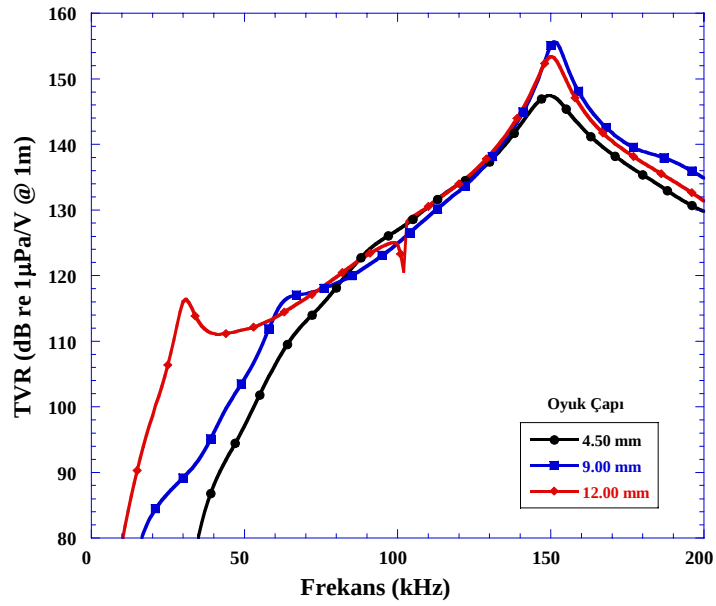
Düşük oyuk çaplarında sönümlenmenin maksimum olması ile birlikte ilk mod tamamen sönümlenmekte ve TVR değerleri transdüserin kullanılması düşünen aralıklarda çok düşmektedir. Standart oyuk derinliğinden yüksek oyuk derinliklerinde ise 2. mod belirgin olmaya başlamaktadır. Böylece yüksek oyuk çaplarında TVR değerleri artmasına rağmen ilk rezonans modunun mekaniksel kalite faktöründe yükselmekte ve kullanılabilir bant genişliği düşmektedir.



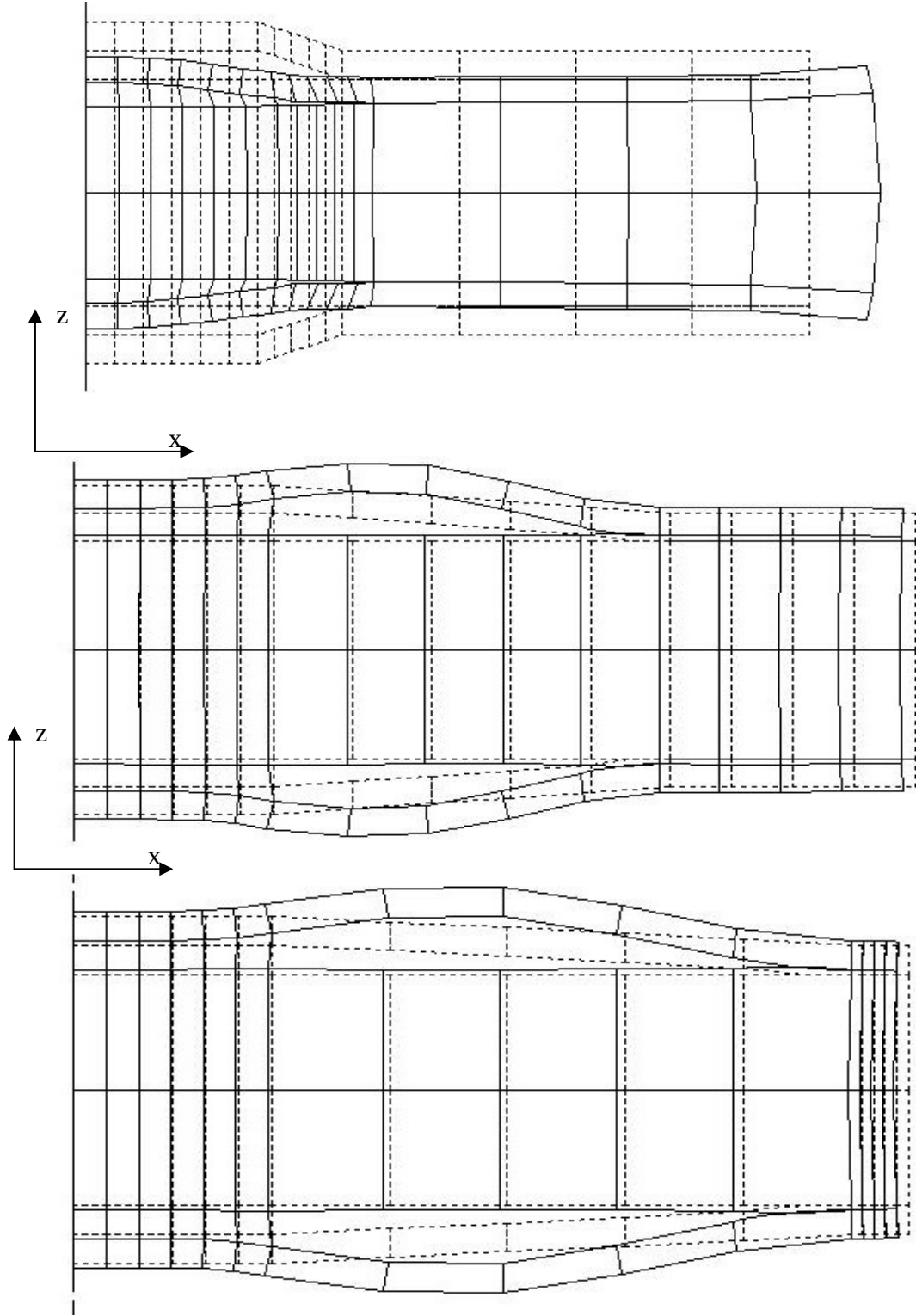
Şekil 6.19. 1 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi



Şekil 6.20. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi



Şekil 6.21. 3 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk çapının TVR ve bant genişliğine etkisi



Şekil 6.22. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde değişen oyuk çaplarında a) 4.5, b) 9, c) 12 mm ve ilk rezonans frekanslarında deplasman hareketi. Kesik çizgiler ilk pozisyonu göstermektedir.

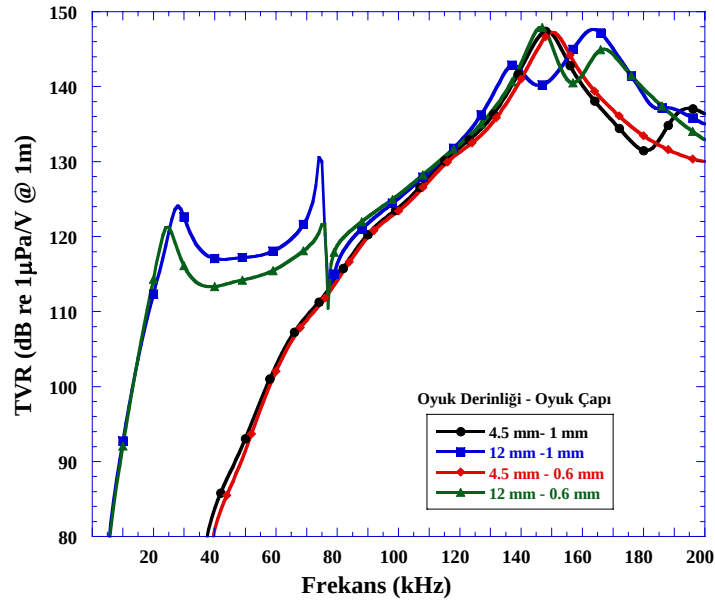
Oyuk derinliği ve oyuk çapının bütün PZT kalınlıklarında sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi neticesinde 1 mm PZT kalınlığının kapak geometrisindeki değişimlere rağmen uygun bant genişliği vermediği görülmektedir. 3 mm PZT içeren cymbal transdüserde ise artan kalınlık ile pratik kullanım için gerekli güç miktarı artmaktadır. Bu sebeplerden sonlu elemanlar analizi ile yapılan optimizasyon çalışmaları, ilerideki çalışmalarda potansiyel kullanımı diğer kalınlıklara göre daha yüksek olan 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserler üstüne yoğunlaşmıştır. Bu amaçla ilk olarak 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk çapı ve oyuk derinliğinin birlikte optimizasyonu ile bant genişliğinin değişimi araştırılmıştır (Şekil 6.23). Sonlu elemanlar analizi ile test edilen kombinasyonlardan 4.5 mm oyuk çapına sahip transdüserlerde sönümlenmenin fazla olması sebebi ile 1. mod tamamen kaybolmakta ve kullanılabilir frekans aralıklarında yeterli ses basıncı değerlerine ulaşamamaktadır. 12 mm oyuk çapına transdüserlerde ise 2. mod güçlü bir biçimde ortaya çıkmakta aynı zamanda sönümlenmede yeterli olmadığından ötürü 1. moddaki bant genişliğide düşmektedir. Diğer yandan elde edilen TVR değeri daha yüksek olmaktadır. 12 mm oyuk çapındaki transdüserlerin dikkat çeken özelliği ise 2. mod esnasında TVR değerlerinin referans transdüserin dip değeri göstermesinden farklı olarak önce tepe değerine ulaşabilmesidir. Eğer bu iki keskin mod bir miktar sönümlenebilirse 2 mod arasında 20-65 kHz arasında uygun bir bant genişliği elde edilebilir. Bu yüzden optimizasyon çalışmalarına 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip transdüserlerde eklenmiştir ve 2 mm PZT kalınlığına 9 mm oyuk çapına ve 0.25 mm oyuk derinliğine sahip transdüser ile birlikte apeks çapının metal kapak kalınlığının ve PZT malzemesinin etkileri araştırılmış ve transdüserin sualtı özelliklerinin geliştirilmesine çalışılmıştır.

Şekil 6.24 ve 6.25’de optimize edilmeye çalışılan transdüserlerde değişen metal kapak kalınlıklarıyla birlikte transdüserlerin sualtı performanslarındaki değişimleri göstermektedir. 9 mm oyuk çapı ve 0.25 mm oyuk derinliğine sahip olan transdüserlerde, referans cymbal transdüserden farklı olarak TVR değeri bir miktar azalmakta diğer yandan Q miktarı hafif artışla birlikte birinci modun kolları kapanmaktadır. Aynı zamanda ikinci modda kendini göstermektedir. Fakat

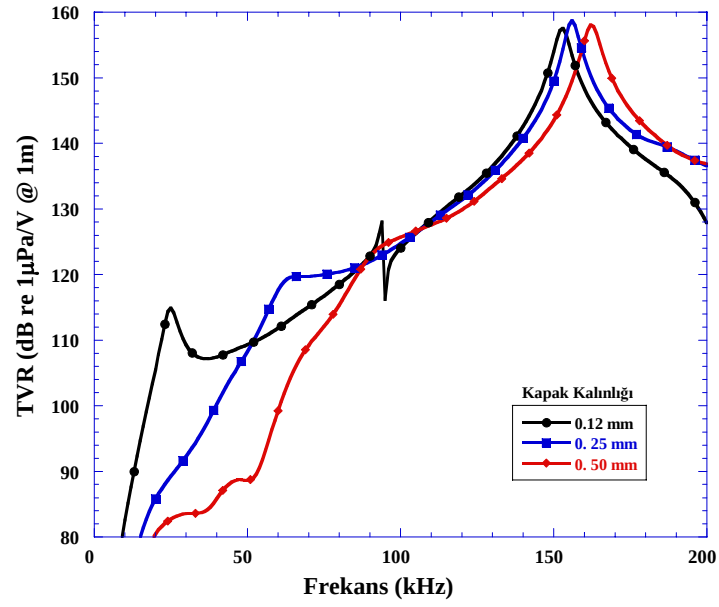
rezonans frekansının düşmesi bu kapak kalınlığı için avantaj teşkil edebilir. 0.50 mm'lik kapak kullanılan cymbal transdüserde ise polimer ile birlikte kapaklarında yapının katılığını artırması sebebiyle hareket sönümlenmekte ve TVR değerleri çok düşmektedir. Bu seri içerisinde yüksek bant genişliği gerektiren sualtı uygulamalarında en uygun transdüser hala 0.25 mm kapak kalınlığına sahip transdüser olarak gözükmemektedir.

Diğer yandan Şekil 6.25'de gösterilen 2 mm PZT kalınlığı-12 mm oyuk çapı - 0.6 mm oyuk derinliği ve değişken metal kapak kalınlığı kombinasyonunda ise 0.25 ve 0.50 mm'lik kapaklar en iyi transdüser opsiyonu olarak gözükmemektedir. Bu noktada ilginç olan ise 0.50 mm kapak kalınlığına sahip transdüserde 1 ve 2. modlar birleşmekte ve bant genişliğini artırmaktadır.

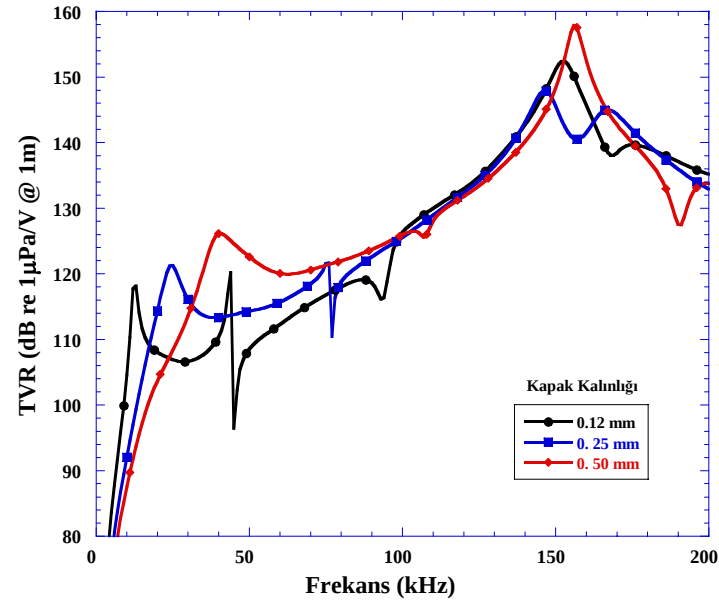
Artan kapak kalınlığı ile transdüserlerde belli bir düzen içinde gelişen TVR performansından bahsetmek mümkün olmamaktadır. Bu sonuçlar cymbal transdüserdeki geometrik parametrelerin düşünülenden daha karmaşık bir dengede olduğunu göstermektedir. 0.25 mm metal kapak kalınlığına sahip transdüser bu seri içerisinde en uygun gözükmemektedir.



Şekil 6.23. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde oyuk derinliği-oyuk çapı kombinasyonlarının TVR ve bant genişliğine etkisi

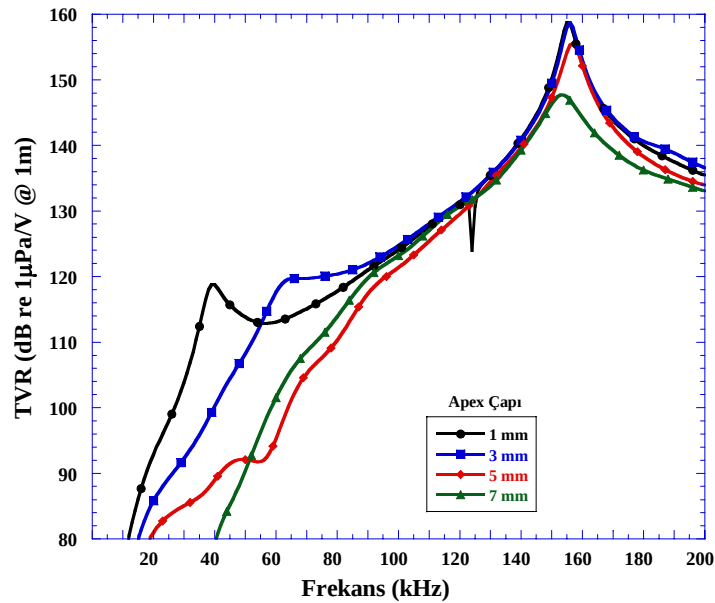


Şekil 6.24. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde kapak kalınlığının TVR ve bant genişliğine etkisi

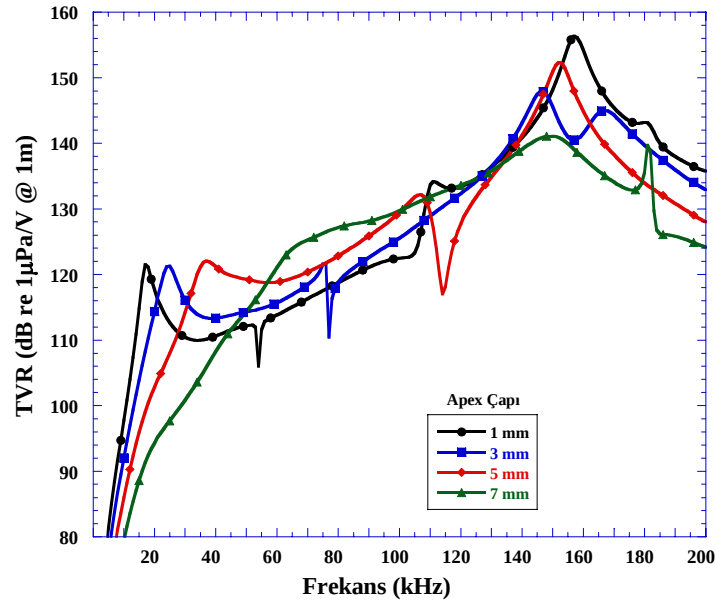


Şekil 6.25. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde kapak kalınlığının TVR ve bant genişliğine etkisi

2 mm PZT kalınlığına 9 mm oyuk çapına ve 0.25 mm oyuk derinliğine sahip transdüser ve 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip transdüserlerde apeks çapının transdüserin üzerindeki etkisi Şekil 6.26 ve 6.27’de görülmektedir. Apeks çapının artmasıyla polimer dolgununda çapı artmaktadır. 0.25 mm’lik transdüserde apeks çapının artmasıyla birlikte 1. mod etkisini yitirmekte ve genel olarak TVR değerleri düşmektedir. Diğer yandan 12 mm oyuk çapına ve 0.60 mm oyuk derinliğine sahip transdüserde 1. mod etkisini kaybetmesine rağmen TVR değerleri yükselmekte ve aynı zamanda da bant genişliği artmaktadır. Özellikle 2 mm PZT kalınlığı, 0. 60 mm oyuk çapı, 12 mm oyuk derinliği ve 7 mm apeks çapına sahip transdüser 60 kHz-180 kHz arasında sürdürebildiği en az 130 dB’lik ses basıncı ve geniş bant özelliğiyle dikkat çekmektedir. Eğer ki rezonans spektrumu bir miktar daha düşük frekanslara çekilebilirse bu boyuttaki transdüserin sualtındaki kullanımı etkin olabilecektir.



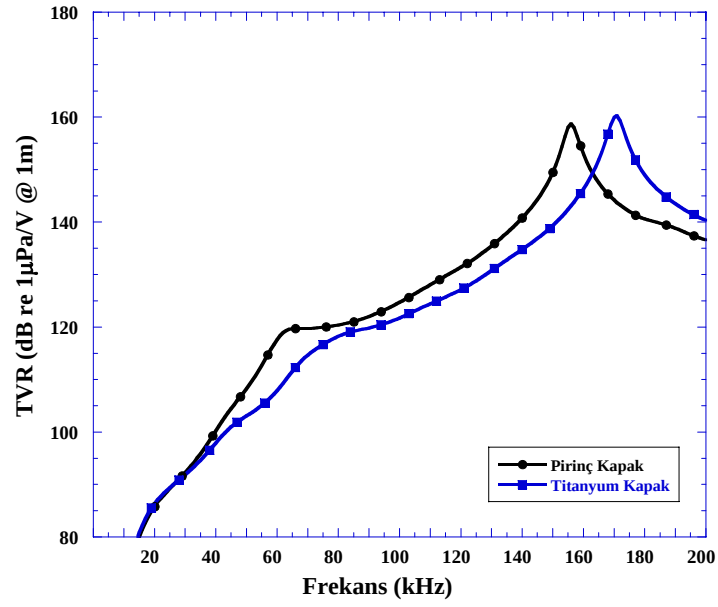
Şekil 6.26. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde apeks çapının TVR ve bant genişliğine etkisi



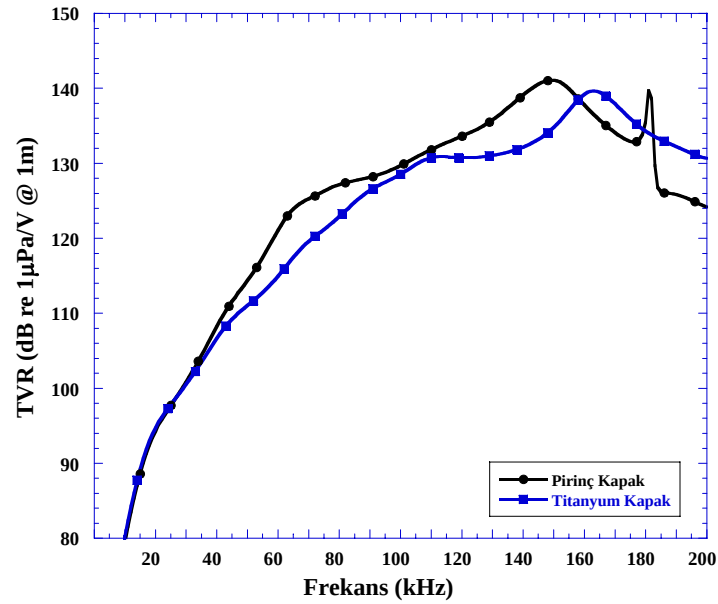
Şekil 6.27. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına ve 0.6 mm oyuk derinliğine sahip ve oyuk boşluğunda poliüretan içeren cymbal transdüserde apeks çapının TVR ve bant genişliğine etkisi

6.2.1.2 Malzeme Etkisi

Tez çalışmasının ilk kısmında referans cymbal transdüserlerde kapak malzemesinin etkileri araştırılırken titanyumun bant genişliğine olumlu etkilerinin olduğu gösterilmişti. Bu sebepten kapak çapında polymer içeren transdüserlerde şu ana kadar en iyi sonuçları veren transdüserlerde titanyum kapağın sualtı özelliklerine etkileri incelenmiştir. Titanyum yüksek elastik modülüne sahip olduğu için 1. ve 2. modlar arasındaki fark daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda titanyum diğer yüksek elastik modülüne sahip metallerle karşılaştırıldığında relatif olarak daha düşük yoğunluğa ve böylece bu metallere oranla su ile daha iyi akustik empedans uyumluluğa sahiptir. En iyi bant genişlikleri ve TVR sonuçlarını veren transdüserlerin titanyum metal kapak ile özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 6.28 ve 6.29'da verilmiştir. Titanyum genel olarak bant genişliğini artırmasına rağmen TVR değerlerini de düşürmektedir. Titanyum kapakların basınç altında stabilitelerinin daha yüksek olduğu düşünüldüğünde titanyum kapaklı transdüserler kullanılabilir fakat TVR değerlerinin düşük olması seri yapımında istenen seviyeye ulaşılması için daha çok element kullanılmasını gerektirmektedir.



Şekil 6.28. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde kapak malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi

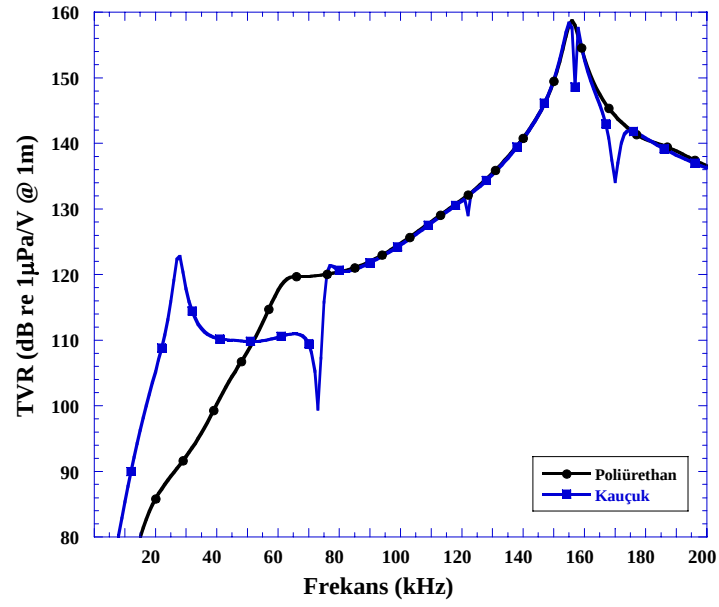


Şekil 6.29. 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına, 0.6 mm oyuk derinliğine ve 7 mm apeks çapına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan içeren cymbal transdüserde kapak malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi

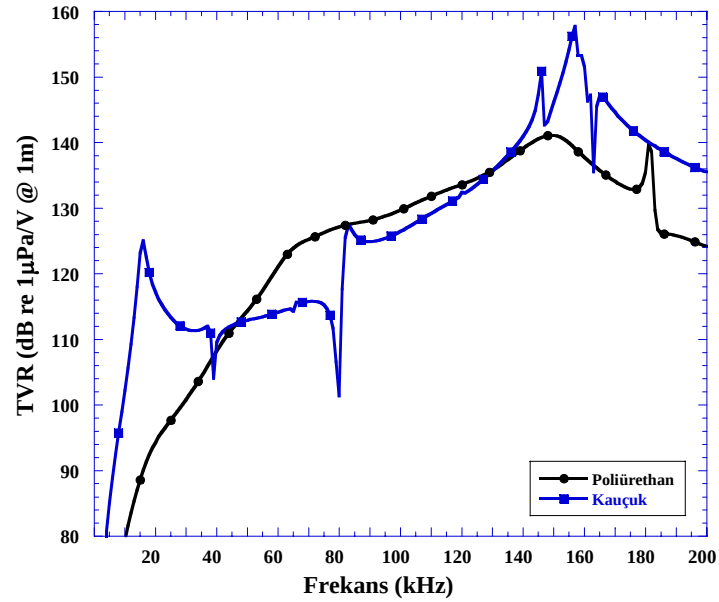
Çizelge 6.3’de kauçuk ve poliürethan polimer malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Her iki malzemede polimer malzemelerin genel özelliği olan düşük yoğunluğa ve yüksek Poisons oranına sahip olmalarına rağmen poliürethanın elastik modülü kauçukun elastik modülünden yaklaşık 30 kat daha yüksektir. En iyi sonuçları veren transdüserlerde oyuk boşluğunda kauçuk ve poliürethan kullanılmasının karşılaştırılmaları Şekil 6.30-6.31’de verilmiştir. Bütün transdüserlerde düşük elastik modülünden dolayı kauçuk malzemesi kapakların hareketini yeteri kadar sönümleyememektedir. Şekil 6.32’den görüldüğü üzere kauçuk metal kapağı yeteri kadar tutamamakta ve kapakların ortasında bükülmede oluşmamaktadır. Bunun sonucunda 1. modda Q değeri (13) standard cymbal transdüserin Q değerine (15) yakın olmaktadır. Bunun yanında 2. modda aynen etkisini sürdürmekte ve kapakların faz dışı çalışmasından ötürü 2. modda TVR değerlerinde dip görülmektedir. Aynı zamanda rezonans spektrumunda ilave modlar ortaya çıkmaktadır. Bu ilave modlar da bant genişliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sonuçların ışığında denilebilir ki: cymbal transdüserde polimer kullanılarak bant genişliği artırılmak isteniyorsa sert polimer kullanımı gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 6.3 Oyuk boşluğunda kullanılan poliürethan ve kauçuk malzemelerinin karşılaştırılması

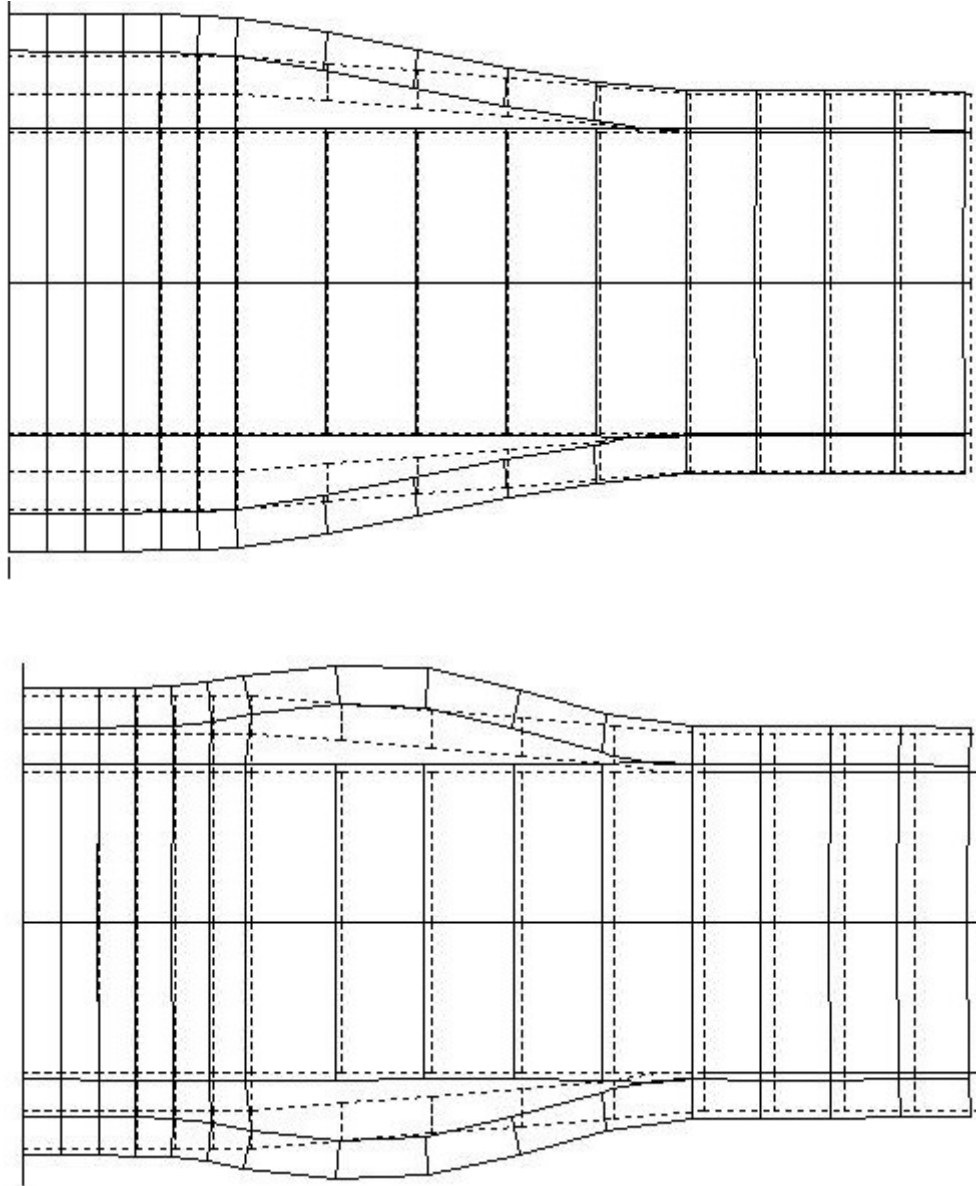
	Kauçuk	Poliürethan
Yoğunluk (kg/m³)	1100	1080
Young Modulu (MPa)	10	3100
Poisons Oranı	0.45	0.4



Şekil 6.30. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde polimer malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi



Şekil 6.31 2 mm PZT kalınlığına, 12 mm oyuk çapına, 0.6 mm oyuk derinliğine ve 7 mm apeks çapına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde polimer malzemesinin TVR ve bant genişliğine etkisi



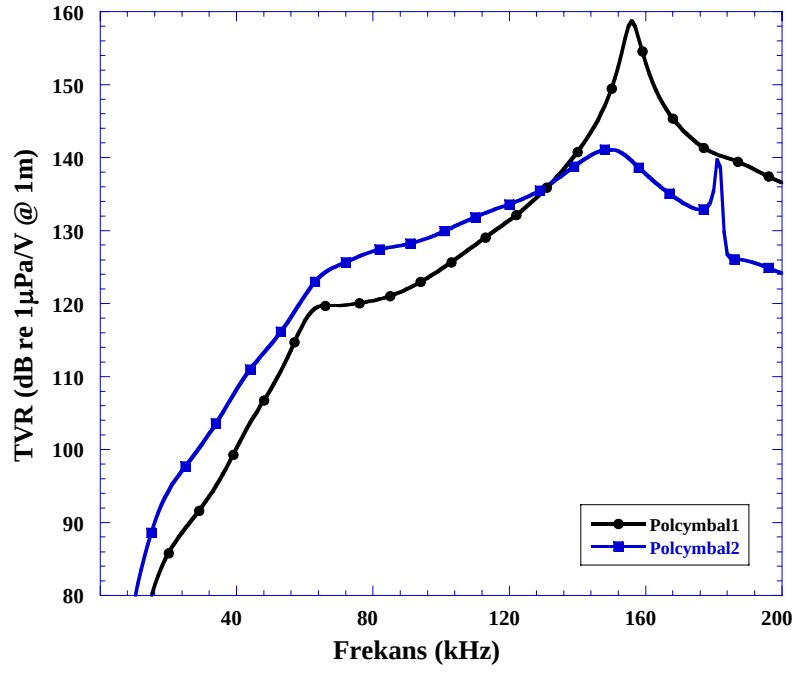
Şekil 6.32. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda değişen polimer dolgu a) kauçuk b) poliürethan, içeren cymbal trandüserlerin ilk rezonans frekanslarında deplasman hareketi. Kesik çizgiler ilk pozisyonu göstermektedir.

Şu ana kadar yapılan çalışmalarla kapak altında polimer dolgu kullanılarak en iyi sonuçları veren transdüserlerin malzemeleri ve parametreleri Çizelge 6.4’de verilmiştir. Bu çizelgede kapak malzemesi olarak pirinç verilmiştir ama sualtında

basınç altında daha iyi stabilite elde edilmek isteniyorsa aynı boyutlarda titanyum kapak kullanılabilir. Fakat titanyum kullanımıyla doğacak TVR düşüşünü engellemek için seri transdüserlerde daha fazla eleman kullanılması ihtiyacı olmaktadır. TVR değerlerinde daha yüksek değerler isteniyorsa ise düşük elastik yoğunluğa fakat aynı zamanda düşük yoğunluğa ve yüksek elastik katsayısına sahip özel alüminyum ve titanyum alaşımlar kullanılabilir fakat bu tip malzemeler maliyeti artıracaktır. Kapak altında ise sönümlenmeyi en iyi şekilde sağlayan sert polimer olmaktadır. Kauçuk gibi yumuşak polimerler metal kapaklarda yeterli sönümlenmeyi sağlayamamakta ve 1 ve 2. modlar etkinliğini sürdürmektedir. En iyi sonuçları veren transdüserlerin TVR değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılması Şekil 6.33’de verilmiştir. Bu transdüserlerde polimer dolgu poliüretandır. Transdüserlerde 1. mod neredeyse tamamen sönümlenmektedir. Diğer yandan 2. mod ve seramiğin radyal modu bir araya gelerek 2. modun negatif etkisini ortadan kaldırmaktadır.

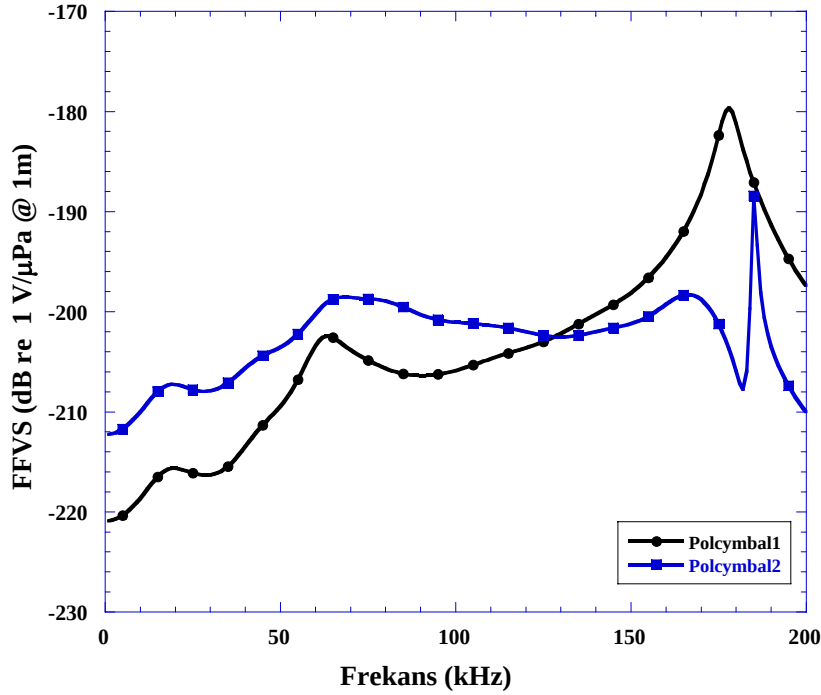
Çizelge 6.4. Kapak altında polimer kullanarak optimum TVR bant genişliğini veren transdüserlerin parametreleri ve transdüser isim kodları

Transdüser Kod	Transdüser Çapı (mm)	Oyuk Çapı (mm)	Oyuk Derinliği (mm)	Apeks Çapı (mm)	Metal Kapak Kalınlığı (mm)	PZT Kalınlığı (mm)
Polcymbal_1	12.70	9.00	0.25	3.00	0.25	2
Polcymbal_2	12.70	12	0.60	7.00	0.25	2



Şekil 6.33. Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin TVR sonuçları

Optimum sonuçları veren transdüserlerin sualtındaki hassasiyet analizleri Şekil 6.34’de verilmiştir. Özellikle Polcymbal_2 50-200 kHz gibi geniş bir aralıkta performansını sürdürebilmektedir. Polcymbal_1’in ise su altı hassasiyet değerleri daha düşük olmaktadır.

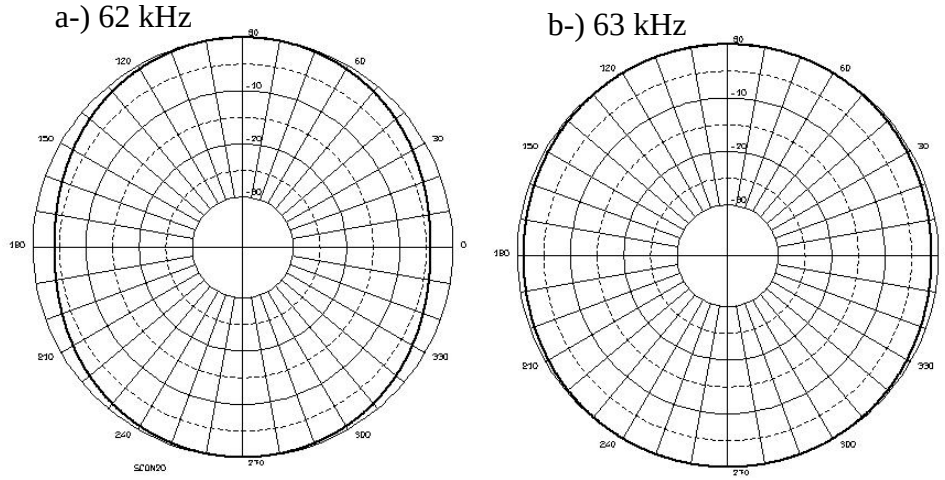


Şekil 6.34. Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin FFVS sonuçları

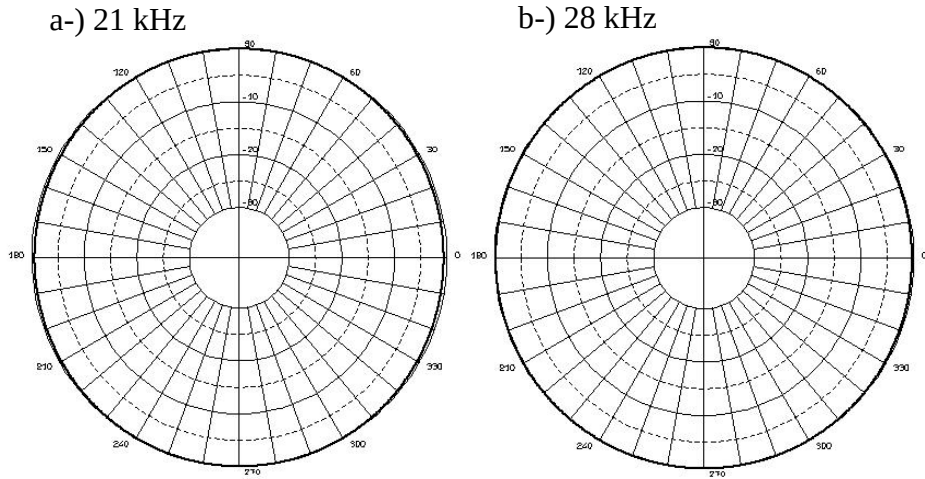
Optimum sonuçları veren transdüserlerde kapak boşluğunda poliürethan ve kauçuk içeren transdüserler için ilk rezonans frekanslarındaki yönelme paternleri Şekil 6.35-6.36’da verilmiştir. Polimer içeren cymbal transdüserin bu modlarında dairesel yönelme (omni-directional) karakteristiğini koruduğu gözlemlenmiştir.

Daha öncede belirtildiği üzere günümüz projektörlerinde daha iyi çözünürlük için paternlerde yönelme tercih edilmeye başlanmıştır. Seriler daha yüksek ses basıncı yaratmalarının yanında transdüserlerde yönelmeye de sağlamaktadırlar. Seri oluşturulup önce kapak boşluğunun altında polimer içeren transdüserlerde yönelme sağlanması için analizleri yapılan diğer tasarımda ise metal kapaklardan bir tanesi apeks çapı boyunca sabitlenmiştir. Bu tasarımda transdüserlerin bir plaka boyunca sabitlendiği düşünülmüştür. Böylece bir taraftaki akustik gücün sönümlenmesiyle tek tarafa yönelme sağlanmaya çalışılmıştır. Bu transdüserlerin TVR, FFVS ve yönelme paternleri Şekil 6.37, Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da verilmiştir. Transdüserlerin TVR ve FFVS değerleri bir tarafın sabitlenmesiyle birlikte artmakta fakat mod piklerinin daha belirgin hale gelmesi ile birlikte bant genişlikleri azalmaktadır. Diğer yandan referans cymbal transdüserlerdeki 2.

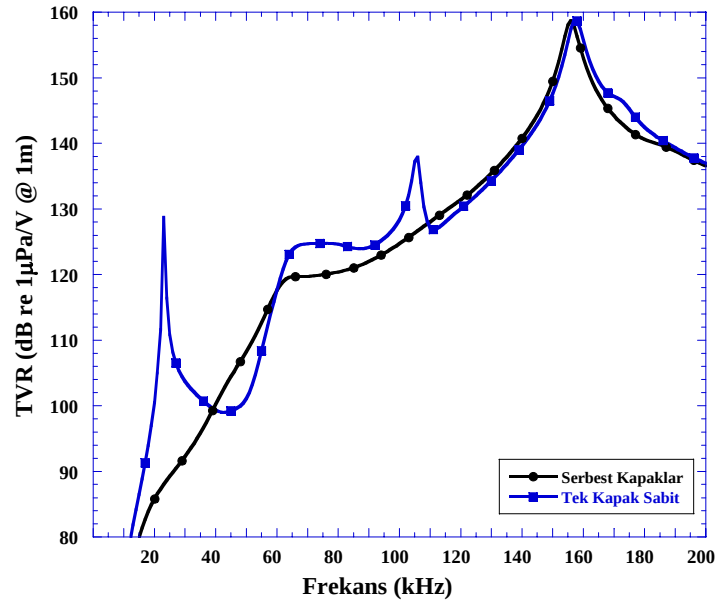
moddaki negatif etki bu transdüserlerde gözükmemektedir. Sabitlenmiş kapağa sahip transdüserlerde bir tarafta akustik güç sönümlenmekte 2 taraflı dipol bir yönlenme elde edilmektedir. Transdüserlerin seri kullanımları ile TVR ve FFVS değerleri daha yüksek değerlere ulaşacağından ötürü uygulamaya göre kullanımları tercih edilebilir.



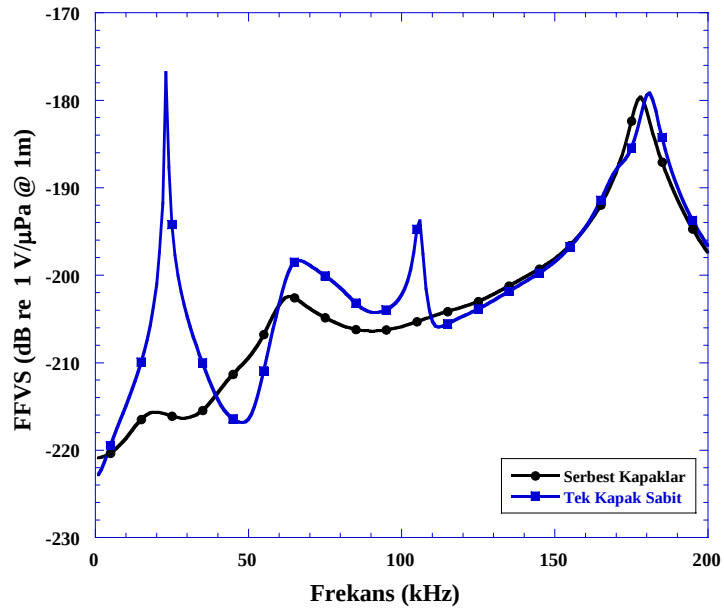
Şekil 6.35 Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin (polimer dolgu ürethan) a) polcymbal_1 b) polcymbal_2, ilk rezonans frekanslarında yönlenme paternleri



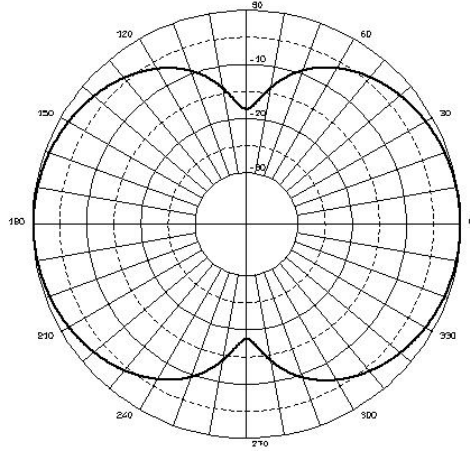
Şekil 6.36. Sonlu Elemanlar Analizlerinde optimum sonuçları veren transdüserlerin oyuk boşluğunda kauçuk kullanıldığında ilk rezonans frekanslarında yönlenme paternleri a) polcymbal_1 boyutları b) a) polcymbal_2 boyutları



Şekil 6.37. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda poliürethan dolgu içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde (hareketsiz bir plakaya sabitlendiği düşünülerek) TVR değerleri

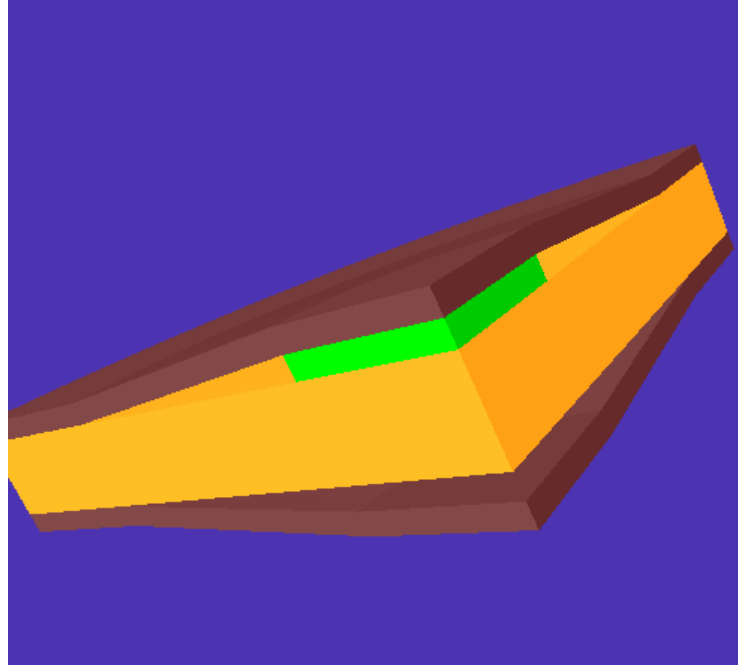


Şekil 6.38. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde (hareketsiz bir plakaya sabitlendiği düşünülerek) FFVS değerleri

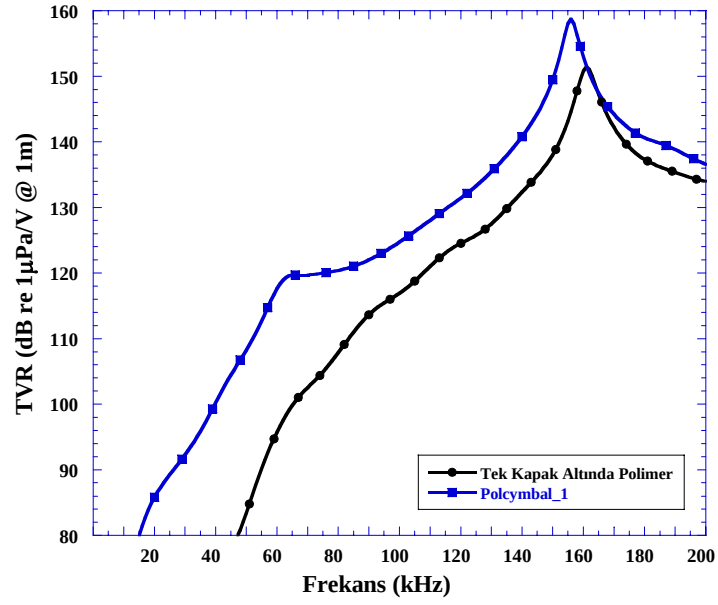


Şekil 6.39. 2 mm PZT kalınlığına sahip ve oyuk boşluğunda polimer içeren cymbal transdüserde kapaklardan bir tanesi sabitlendiğinde ilk rezonans modunda yönlenme paterni

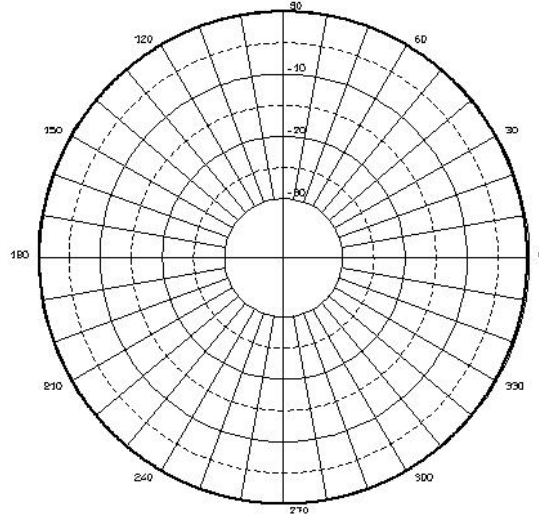
Sonlu elemanlar analizi ile incelenen diğer bir tasarımda ise cymbal transdüser sadece bir tarafında polimer içermektedir (Şekil 6.40). Bu tasarımdaki transdüserlerin TVR değerinin her iki tarafta poliürethan içeren transdüser ile karşılaştırılması ise Şekil 6.41 de verilmiştir. Bu uygulamanın daha yüksek TVR değerleri vermesine rağmen yeteri kadar bant genişliği sağladığı söylenemez. Sualtı yönlenme paternine bakılırsa yapıdaki dairesel yönlenmenin korunduğu görülmektedir (Şekil 6.42).



Şekil 6.40. 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki düz kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulmasının 3-D kesit gösterimi



Şekil 6.41. 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulması ile elde edilen TVR değerlerinin “polcymbal_1” ile karşılaştırılması



Şekil 6.42. 2 mm PZT kalınlığına sahip transdüserde oyuk boşluklarından sadece bir taraftaki kapak yüzeyinin altına polimer ile doldurulması ile elde edilen ilk rezonans modundaki yönlenme paterni

6.3 Kapak Üstünde Metal veya Polimer Kütle Kullanımı

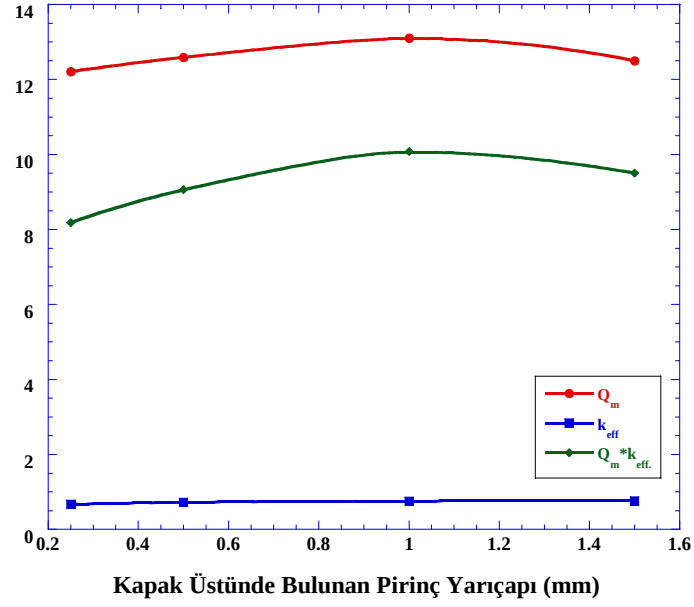
Cymbal transdüserin bant genişliğini artırmak için diğer bir yöntem olarak kapak üstünde değişik malzemelerden kütle kullanılması öngörülmüştür. Böylece kapak hareketinin belli miktarda sönümlenmesi ve bant genişliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla modellenen transdüserin 3-D modeli Şekil 6.43’de verilmiştir. Bu amaçla değişen metal ve polimer çaplarındaki mekaniksel kalite faktörü Q , elektromekaniksel dönüşüm katsayısı k ve bu iki katsayının çarpımları Çizelge 6.5-6.6 ve Şekil 6.44-6.45’de verilmiştir.



Şekil 6.43. Cymbal transdüserin üzerinde metal-polimer kütle kullanımının 3-D kesit gösterimi

Çizelge 6.5. Metal kapak üstünde bulunan piring malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim

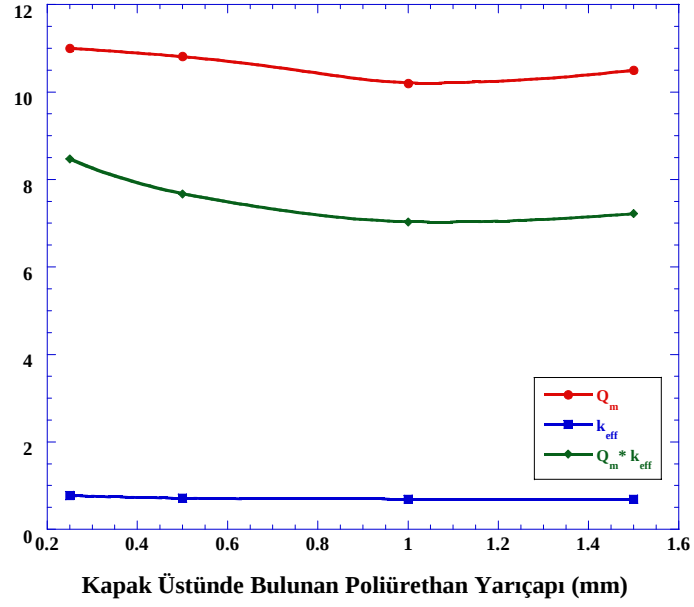
Metal Yarıçapı (mm)	İlk Rezonans Frekansı (kHz)	TVR (dB re 1 μPa.V @ 1 m)	Q_m	k_{eff}	$k_{eff} * Q_m$
0.25	17.1	128.48	12.21	0.67	8.18
0.50	17.0	128.59	12.59	0.72	9.06
1.00	17.1	128.85	13.10	0.75	10.08
1.50	17.5	128.92	12.50	0.76	9.50



Şekil 6.44. Cymbal transdüserde metal kapaklar üzerindeki piring malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim

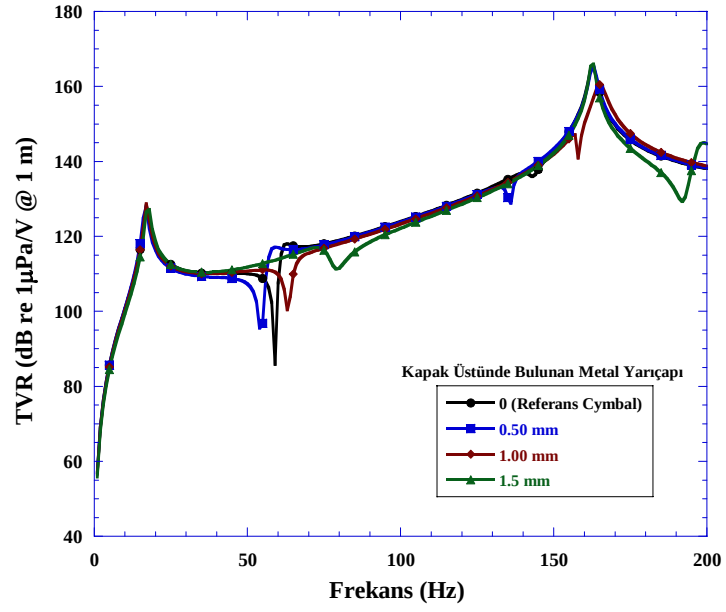
Çizelge 6.6. Metal kapak üstünde bulunan poliüretan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtı özelliklerindeki değişim

Metal Yarıçapı (mm)	İlk Rezonans Frekansı (kHz)	TVR (dB re 1 μ Pa.V @ 1 m)	Q_m	k_{eff}	$k_{eff} * Q_m$
0.25	17.1	128.23	11.00	0.77	8.47
0.75	17.3	127.87	10.81	0.71	7.67
1.00	17.4	127.09	10.20	0.69	7.03
1.50	17.9	128.13	10.50	0.69	7.22

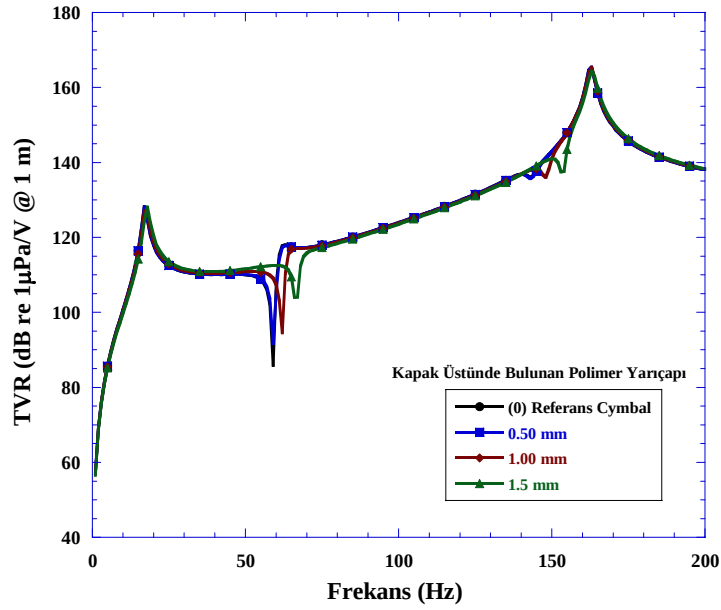


Şekil 6.45. Cymbal transdüserde metal kapaklar üzerindeki poliürethan malzemesinin çapının değişmesiyle transdüserin sualtında mekaniksel kalite faktörü ve elektromekaniksel dönüşüm katsayısındaki değişim

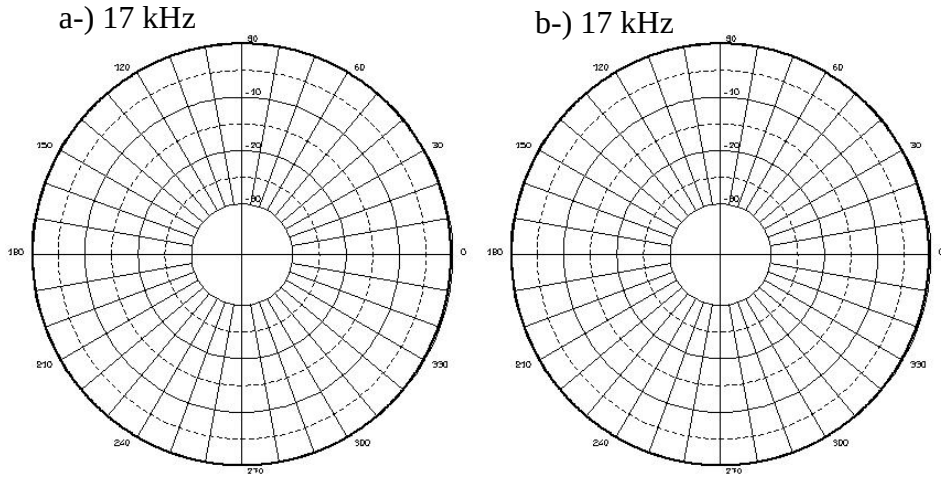
Kapak üstünde polimer veya metal kapak kullanımı ile, kapak üstündeki malzemenin çapı artsada k ve Q değerlerinin çarpımında azalma elde edilememektedir. Bu da yeterli bant genişliğinin elde edilemesi anlamına gelmektedir. Cymbal transdüserde metal kapak üstünde, metal kapak veya polimer içeren transdüserlerin TVR grafikleri Şekil 6.46 ve 6.47’de verilmiştir. Kapak üstünde hem metal hemde polimer kullanımı bant genişliğini etkilememektedir. 2. mod negatif etkisini korumakta ve böylece 1. mod – 2. mod aralığında bant genişliği düşük olmaktadır. İlk rezonansdaki TVR değerleri ise 120 dB’nin üzerinde olmaktadır. Kapak üstünde 1.5 mm polimer ve metal kullanıldığı tasarımda yönlenme grafikleri ise Şekil 6.48’de verilmiştir. Kapak üstünde bulunan yükler akustik yönlenme sağlamamaktadır. Gelecek çalışmalarda kapak üstündeki metal ve polimer miktarının artırılmasıyla kütle etkisinin artırılmasına ve böylece metal kapakların deplasmanının sönmülenererek bant genişliğinin artırılmasına çalışılacaktır.



Şekil 6.46. Metal kapak üstünde bulunan pirinç kütle çapının transdüserin sualtı TVR (projektör) karakteristiği üzerindeki etkisi



Şekil 6.47. Metal kapak üstünde bulunan poliüretan çapının transdüserin sualtı TVR (projektör) karakteristiği üzerindeki etkisi



Şekil 6.48. Metal kapak üstünde a-) metal b-) poliürethan kütle bulunduğunda ilk rezonans modundaki yönlendirme paternleri

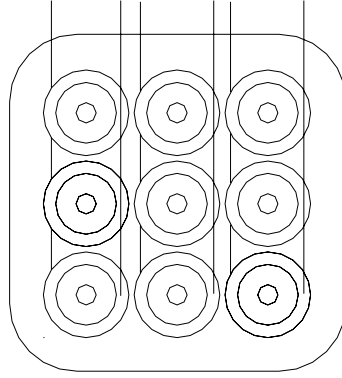
6.4 3x3 Seri Analizleri

Daha önceki kısımlarda tartışıldığı üzere cymbal transdüser yüksek mekaniksel katsayı ve düşük verimliliğe sahip olduğu için sualtı uygulamalarında kullanımı kısıtlanmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünün amacında transdüserin mekaniksel kalite faktörünün düşürülmesi ve böylece bant genişliğinin artırılmasıdır. Bu amaçla sonlu elemanlar analizleri yapılan yeni tasarımlardan bant genişliğinin artırılması için en optimum sonuçları, kapağın düz çapının altında sert polimer içeren cymbal transdüserler vermiştir. Fakat bu yeni tasarımdaki transdüserlerdeki sorun kapak hareketinin sönümlenmesi sebebiyle TVR ve hassasiyet değerlerindeki düşme olmaktadır. Bu yüzden polimer içeren cymbal transdüserlerin 3x3 serileri sonlu elemanlar analizi ile irdelenmiştir. Böylece cymbal transdüserin seri kullanımı ile bant genişliğinin en azından aynı seviyede tutularak TVR değerlerinin artırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın bu aşamasında 3-boyutlu, 3x3 cymbal transdüser serisi sonlu elemanlar analizi kodu olan ATILA ve integral denklem formülasyonu kodu EQI kullanılarak analiz edilmiştir. Yüzey elementlerindeki basınç ve akustik hız dağılımları önce sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmakta daha sonra ise EQI kullanılarak serininin uzak alan özellikleri bulunmaktadır. EQI kullanımı yapı etrafında sıvı alan kullanımını kaldırmakta ve 3 boyutlu transdüserlerin sualtı analizlerini mümkün kılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda seri modellerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ispatlanmıştır [31].

Transdüserlerin yapı içerisindeki dizilimleri diyagram olarak Şekil 6.49'da gösterilmiştir. 9 element kesit alanı 14.5 cm^2 olacak şekilde paketlenmektedirler. Standard seri geometrisinde transdüserler arası merkez-merkez uzaklığı 13.5 mm dir. Ana loblardan saçılmayı önlemek için akustik dalga boyunun yarısından daha az bir uzaklık olan 13.5 mm transdüserler arası mesafe olarak seçilmiştir.

Modellemenin ilk aşamasında katı yapı modellenmiş ve daha sonrada özel yüzey elemanlarıyla örgülenmiştir. EQI bu özel yüzey elemanlarını kullanarak transdüserin uzak alan özelliklerini hesaplamaktadır. 3x3 cymbal transdüser serisinde polimer elementlerinin bulunmasından dolayı nod sayısı yüksek rakamlara ulaşmaktadır ve böylece tek bir frekansa çözüm uzun zaman almaktadır.

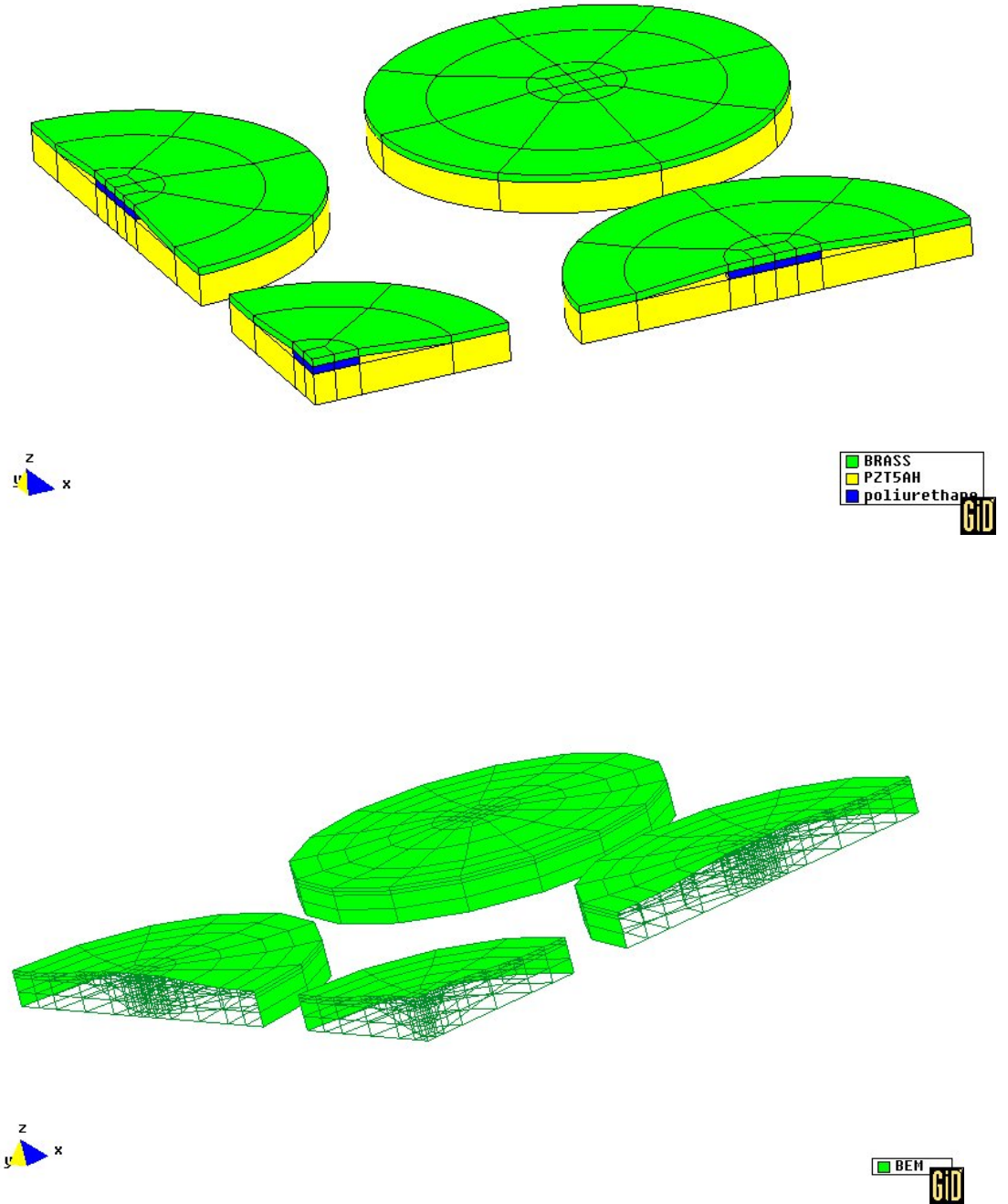


Şekil 6.49. 3x3 Cymbal serisinde transdüserlerin dizilimi

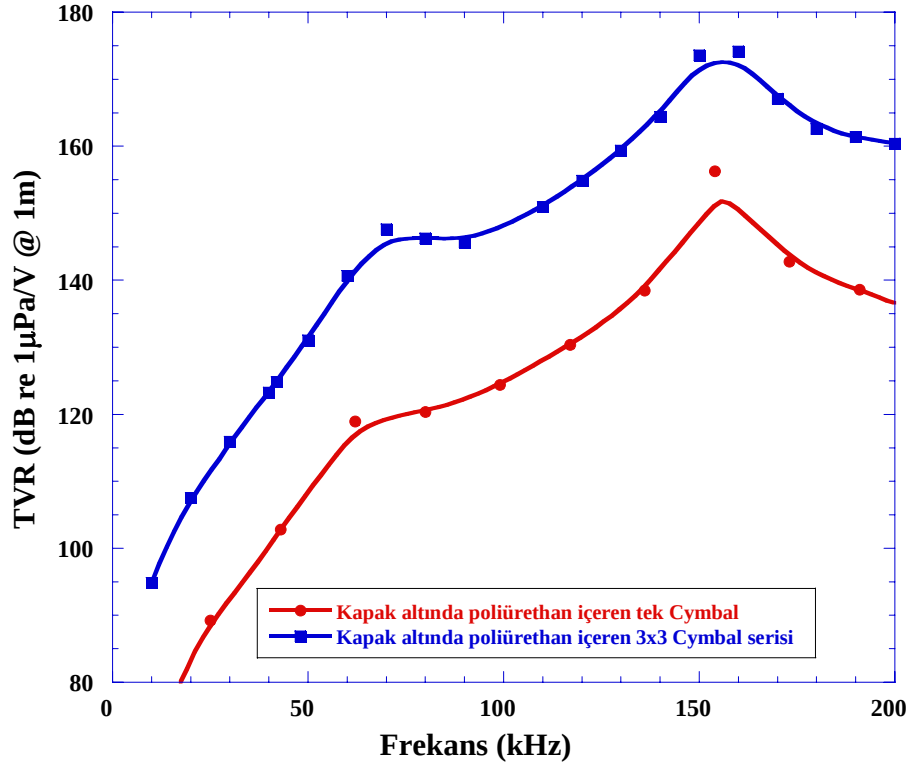
3x3 cymbal serisinde 3 adet simetri ekseni bulunduğundan dolayı yapının 1/8 i modellenmiştir. Şekil 6.50'de 2 mm PZT kalınlığına sahip, 3x3 kapak altında polimer içeren cymbal serisinin ATILA-GID kullanılarak oluşturulan modeli görülmektedir. Tek bir elemanda kullanılan örgü yapısı aynı şekilde seri elemanlarında kullanılmıştır.

Bu seri için hesaplanan TVR değerleri Şekil 6.51'de verilmiştir. Serideki transdüserlerin birbirleriyle etkileşimleri sonucunda TVR değerleri artmakta ve rezonans frekanslarındaki bant genişliğide yükselmektedir. Cymbal transdüser içeren seri transdüser panellerinin sualtında kullanılmaları için koruyucu olarak poliürethan malzeme içine gömülmesi gerekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda poliürethan koruyucu ile bant genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir [31]. 3x3 kapak altında polimer içeren cymbal serilerinde de aynı etkinin

gözlemleneceği düşünülmektedir. Seri transdüserlerde geometrik ve malzeme parametrelerinin değişimlerinin seri transdüserlerin performansına etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 6.50. Oyuk boşluğunda polimer içeren 3x3 cymbal transdüser serisinin a) modellenmesi b) örgü yapısı ve yüzey elemanları



Şekil 6.51. Oyuk boşluğunda polimer içeren 3x3 cymbal transdüser serisinde TVR değerleri

6.5 Kısım Özeti

Cymbal elektromekaniksel transdüserlerin sualtında kullanımlarının yaygınlaştırılması için 20-100 kHz aralığında bant genişliğinin artırılmasına ve akustik yönlendirilmesinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçlar doğrultusunda tez çalışmasının bu kısmında klasik cymbal transdüser yapısının modifikasyonları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bant genişliğinin artırılması amacı için mekaniksel kalite faktörü (Q_m) ve elektromekaniksel bağlantı katsayısının (k) optimizasyonunun yanında, rezonans modlarının birbirleriyle çakıştırılması ve daha geniş bant aralığının oluşturulması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Üzerinde çalışılan modifikasyonlardan oyuk boşluğunda apeksin hemen altında poliürethan içeren tasarımlar olumlu sonuçlar vermişlerdir. PZT kalınlığının bant genişliğinin artırılmasında olumlu etkileri olduğu görülmüştür. PZT kalınlığının artmasıyla ilk rezonans modunda Q_m değerleri düşerken 2. ve 3. mod birbiriyle çakışmakta ve

kullanılabilir bant genişliği önemli ölçüde artmaktadır. Poliürethan dolgu içeren transdüserlerin seri halde kullanımı ile kapaklardaki sönümlenme telafi edilebilmekte ve bant aralığı artırılabilir. Modifiye edilmiş tasarımlarda dairesel (omni-directional) yönlenme karakteri devam etmiştir.

7. HAVA AKUSTİK CYMBAL TRANSDÜSER - SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasının son basamağında sualtı uygulamalarından farklı olarak cymbal transdüserin hava akustik uygulaması için tasarımlar geliştirilmesine çalışılmıştır. Hava akustik transdüseri uygulamaları genel olarak aşağıda belirtilmiştir.

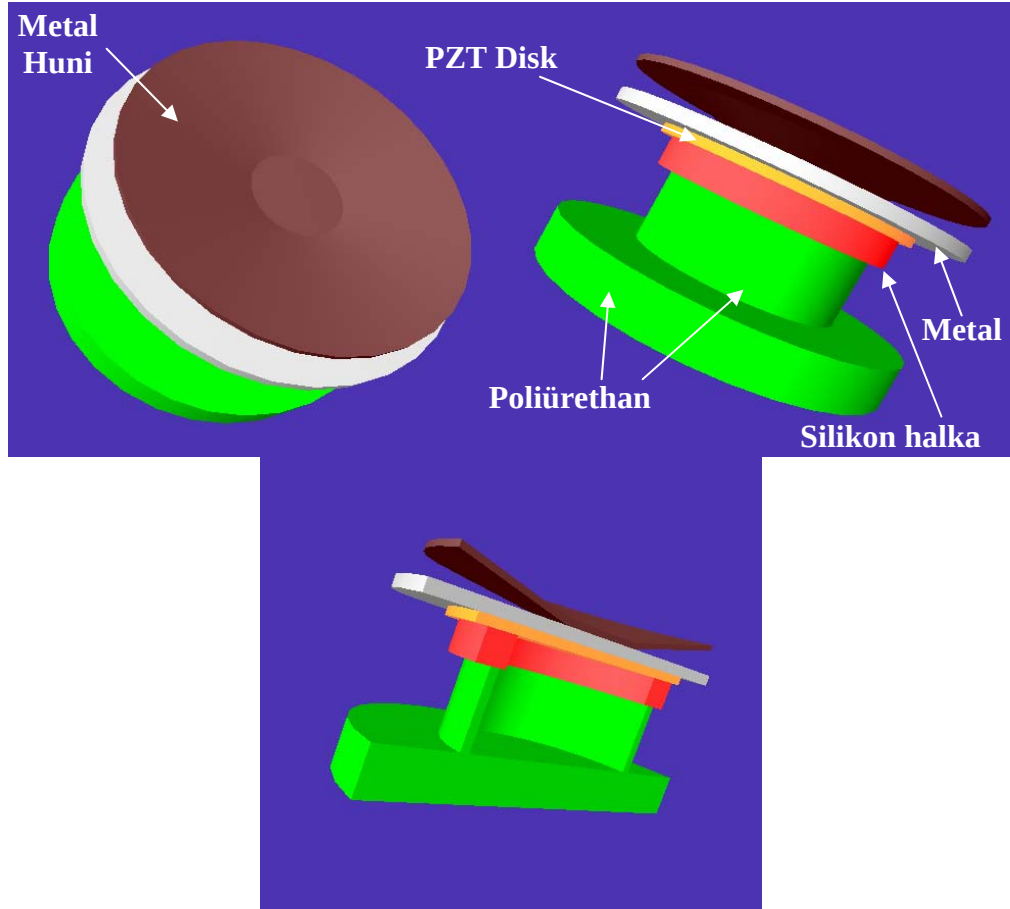
1. Tank-Silo doluluk ölçüm sistemleri
2. Yaklaşma-mesafe ölçme sistemleri
3. Alarm ve buzzerlar
4. Engel öngörü sistemleri
5. Trafik kontrol sistemleri
6. Hayvan kovucu ve eğitme sistemleri

Uygulamalar arasındaki farklılık genelde uygulama rezonans frekansıdır. Örneğin alarm ve buzzer transdüserleri 2-3 kHz civarlarında çalıştırılırken, yaklaşma ve mesafe ölçüm sistemlerinde bu aralık 20 kHz'lerden başlayıp MHz seviyelerine kadar uzanmaktadır. Tüm uygulamalarda bant aralığının geniş olması, uygulamaya göre belirlenen mesafelerde yüksek ses basıncı ve bu mesefelerden gelecek ses basıncına karşı yüksek hassasiyet istenmektedir.

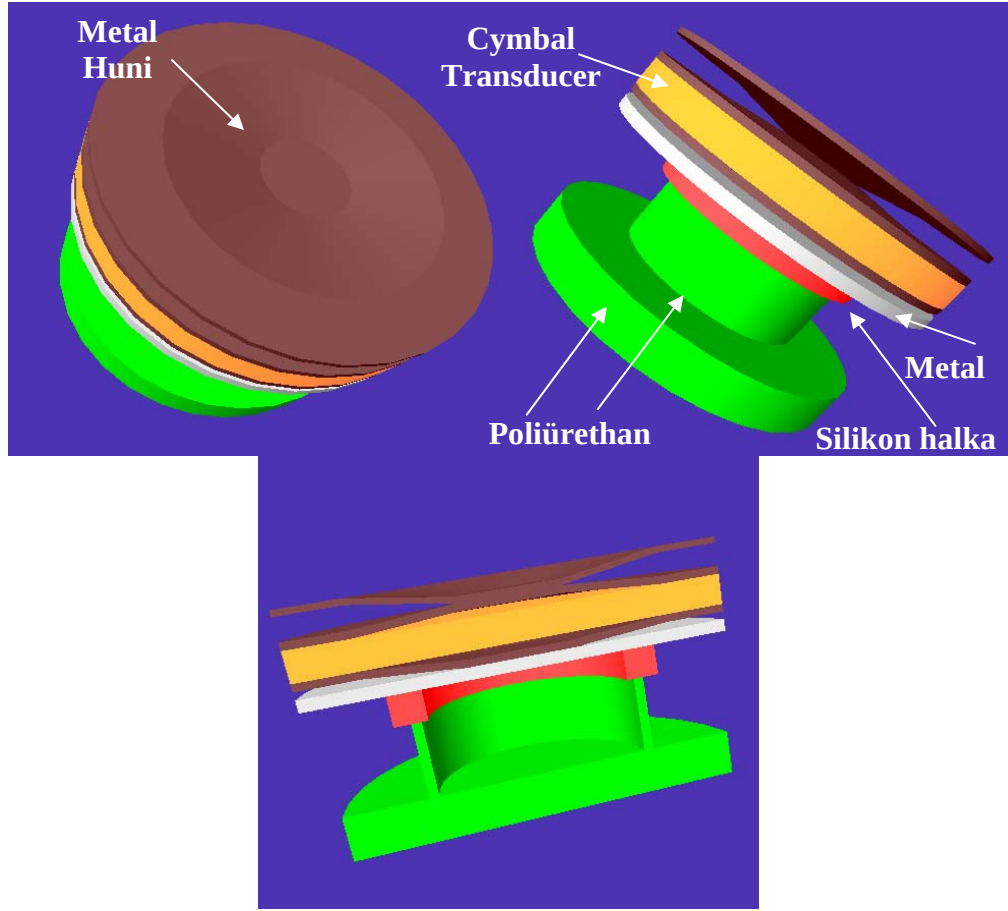
Ticari bir hava akustik transdüser (Şekil 7.1) ve bu transdüser baz alınarak tasarlanan, cymbal transdüser içeren ve hava akustik uygulamaları için geliştirilen transdüser tasarımı Şekil 7.2'de verilmiştir. Bu sistemin avantajı basitçe transdüser boyutlarıyla ve malzemesinin değiştirilmesiyle uygulamaya göre istenen ses düzeyi ve frekans elde edilebilmesidir. Bu çalışmada beklenen aynı boyutlardaki cymbal tasarımıyla diğer ticari hava akustik transdüserlerinden daha yüksek ses düzeyi ve hassasiyet eldesi veya daha küçük boyutlardaki cymbal tasarımıyla en azından ticari transdüserdeki değerlere ulaşılması olarak belirlenmiştir.

İnsan duyma frekansı 20 Hz ile 20 kHz arasındadır. Bu sesin üzerindeki frekansları köpek, kedi ve zararlı böcekler duyabilmektedir. Eğer transdüserden

yayılan ses 20 kHz'den yüksek ve 100 dB'den büyük değerlere ulaşırsa sistem hayvan uzaklaştırıcı olarak kullanılabilir. Bu tasarımın hayvan ve böcek uzaklaştırma sistemlerinin yanında akustik mesafe ölçme ve yaklaşma sensörlerinde kullanılması da amaçlanmaktadır. Akustik mesafe ölçme ve yaklaşma sensörlerinde transdüserin hassasiyeti ve doğrusal yönlenme paterni diğer transdüser özelliklerinden bir adım daha önemli olmaktadır.



Şekil 7.1 Ticari hava akustik transdüserin şematik gösterimi



Şekil 7.2. Cymbal hava akustik transdüserin şematik gösterimi

Her iki tasarımda genel olarak 3 kısımdan oluşmaktadır: Bir yöndeki akustik gücün yok edilmesi, rezonans frekansının düşürülmesi ve sistemde transdüserin sabitlenmesini sağlayan elastik malzemeler: metal, silikon ve poliürethan, akustik gücü oluşturan transdüser (ticari transdüserde PZT disk, yeni tasarımda PZT disk içeren cymbal transdüser) ve akustik gücü artırıcı ve dağılımını sağlayan metal koniksel şekle sahip huni. Poliürethan ve silikon malzemeleri halka şeklinde sistemde bulunmaktadır. Her iki transdüser içinde transdüser boyutları Çizelge 7.1 de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Ticari ve cymbal hava akustik transdüser boyutları

Hava Akustik Transdüser Tipi	Referans Ticari Transdüser (mm)		Referans Cymbal Hava Akustik (mm)	
Alt Poliürethan Çapı	12.70		12.7	
Alt Poliürethan Kalınlığı	1.50		1.5	
Poliürethan Halka Dış Çapı	7.00		3.5	
Poliürethan Halka İç Çapı	6.40		3.2	
Poliürethan Halka Kalınlığı	2.50		2.5	
Silikon Halka Dış Çapı	8.00		4.0	
Silikon Halka İç Çapı	6.00		3.0	
Silikon Kalınlığı	1.00		1.0	
Üst Metal Çapı	10.00		4.4	
Üst Metal Kalınlığı	0.30		0.3	
Cymbal Boyutu	-		Referans Cymbal Transdüser Boyutları (bkz. Şekil 1.12)	
PZT disk kalınlığı	0.40		-	
PZT disk çapı	9.00		-	
Huni Boyutları	Huni Çapı	10.00	Huni Çapı	12.7
	Oyuk Çapı	10.00	Oyuk Çapı	10.00
	Oyuk Derinliği	0.60	Oyuk Derinliği	0.60
	Apeks Çapı	3.00	Apeks Çapı	3.00

Şekil 7.1 ve 7.2 karşılaştırıldığında aktif eleman olarak kullanılan transdüserlerin dışında diğer bir önemli farklılık ise huni yapısında gözlemlenmektedir. Cymbal transdüser içeren hava akustik sistem tasarlanırken

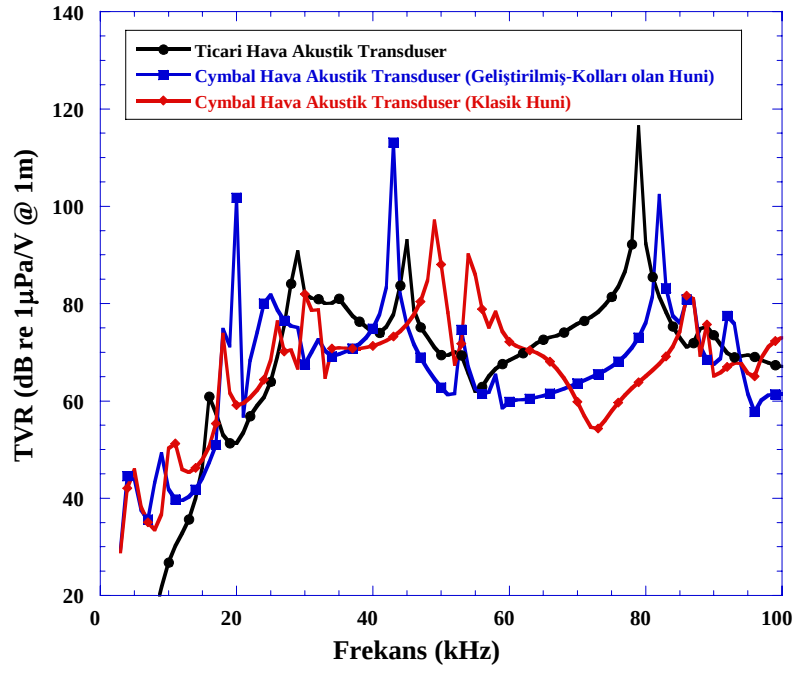
ilk başta aynı ticari hava akustik sistemde kullanılan tipte huni (kolları olmayan) kullanılmış fakat arzu edilen ses düzeyine ulaşlamamıştır. Bunun üzerine cymbal kapak ile aynı tasarıma sahip yani kolları olan huni ile hava akustik transdüser geliştirilmiştir. Her üç değişik tasarımında hesaplanmış TVR ve FFVS değerlerinin karşılaştırılması Şekil 7.3-7.4 de verilmektedir. Ticari hava akustik de olduğu gibi kolları olmayan huni içeren cymbal transdüser düşük TVR değerleri verirken, kolları olan huni içeren cymbal transdüser 20-40 dB daha yüksek ses basıncı yaratmaktadır. Ayrıca kolları olan huni tasarımlı cymbal hava akustik transdüser hassasiyet bakımından da daha yüksek performans vermektedir. Bu yüzden çalışmaların bundan sonraki aşamalarında “cymbal hava akustik” terimi yalnızca kolları olan huni içeren ve cymbal içeren Şekil 7.2’de belirtilen tasarım için kullanılacaktır. Huni optimizasyonu çalışmaları ise bu kısımda ayrıca sunulacaktır.

Cymbal hava akustik transdüser için deneysel ve hesaplanan TVR değerlerinin karşılaştırılması Şekil 7.5’de verilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen değerler birbiriyle örtüşmektedir. Aradaki farklılıklar ölçüm esnasındaki belirsizliklerden ve örgü yapısından kaynaklanabilmektedir.

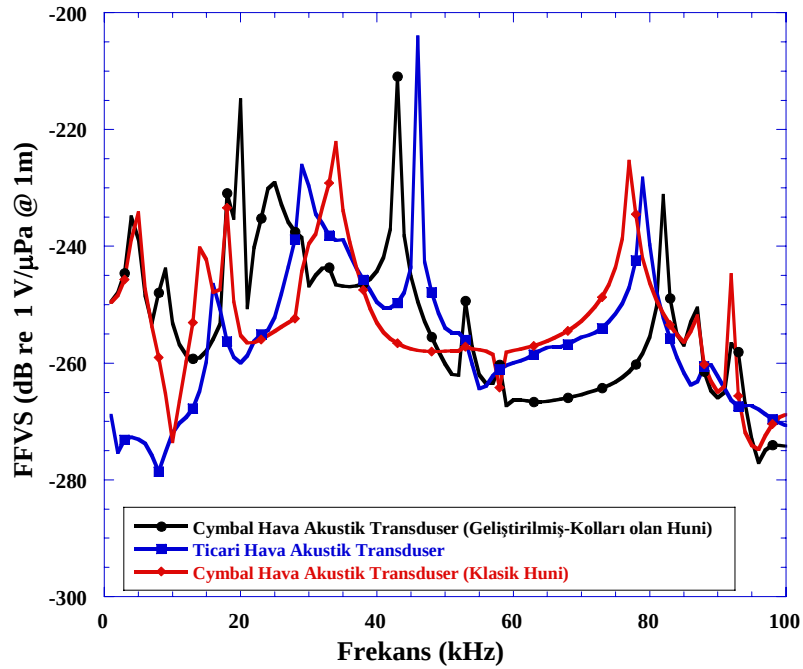
Ticari hava akustik ve cymbal hava akustik transdüserin TVR, FFVS ve admitans karakteristikleri incelendiğinde (Şekil 7.5-7.6), ticari transdüserin 0-100 kHz arasındaki modları sırasıyla 19, 29, 46 ve 79 kHz’de gerçekleştiği görölmektedir. Cymbal transdüserin ise 0-100 kHz aralığında titreşim modları ise 9, 20, 25, 32, 43 ve 82 kHz’de görölmektedir. Bu titreşim modlarından ticari hava akustik için 19, 29 ve 46 kHz deki modların ve cymbal hava akustik transdüser için 9, 20, 25 ve 43 kHz’dekilerin hareketleri Şekil 7.7’de verilmektedir. Her iki transdüserde de modların frekansları ve hareketleri benzerlik göstermektedir. İlk mod metal huninin kollarının bir bütün olarak hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu modun cymbal transdüserin hafif esnemesinden kaynaklandığı görölmektedir. Ticari hava akustik transdüserde huninin kolları olmadığından ötürü bu mod görölmemektedir. Cymbal hava akustik transdüser için en yüksek TVR değerlerine ise cymbal içerisindeki PZT’nin bükölme gösterdiği modlar olan 20 kHz ve 43 kHz modlarında ulaşılmaktadır. Bu modlarda huninin kollarının hareketi dikkat çekmektedir. 20 kHz’deki modda huni bükölme hareketi

göstermektedir. 43 kHz’de ise hem huninin ortasında hemde kollarda birbirlerinin tersi yönde bükülme hareketi yüksek ses basıncı değerlerine sebep olmaktadır. Cymbal hava akustik transdüserde bu mod cymbal transdüserin 0, 2 moduna benzemektedir. Kollar faz dışı hareket etmekte ve bu da metal huni de çiçek şeklinde hareketlenmeye yol açmaktadır. Ticari akustik transdüserde de 19 kHz ve 46 kHz’de benzer modlar bulunmasına rağmen bu modlarda alt kısmında hareketlenmesi, cymbal kapaklarındaki gibi bir ekstra amplifikasyonun olmaması ve huninin kollarının bulunmaması sebebi ile TVR değerleri düşük olmaktadır. Cymbal hava akustik transdüserde oluşan 25 kHz’deki modda piezoelektrik ve kapakların hareketinden dolayı alt kısımdaki poliürethan ve silikon yapı hareketlenmektedir. Cymbal transdüserin pekişik (stif) yapısından dolayı transdüserin üst kısmında hareketlenme olmamaktadır. Böylece hunide hareketlenmemektedir ve oluşan ses basıncı düşmektedir. Ticari hava akustik transdüserde ise bu mod seramiğin oluşturduğu bükülme moduna benzemektedir.

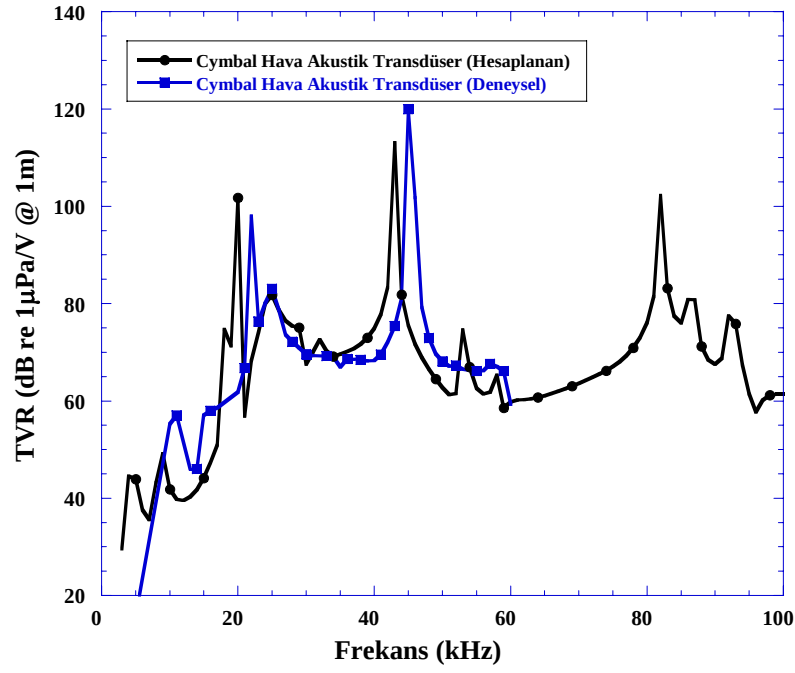
Titreşim modları gözönüne alınarak (Şekil 7.7) TVR ve FFVS değerlerine tekrardan bakıldığında cymbal içeren hava akustik transdüserin 20 ve 43 kHz rezonans modlarında ses basıncının 100 dB’i aştığı görülmektedir. 20 kHz modunda alttaki yapının hareketsiz olmasından dolayı huninin yarattığı modda ses basıncı düşük olmaktadır. Özellikle kullanışlı olan ikinci modda cymbal transdüser ticari transduserden 40 dB daha yüksek ses basıncı vermektedir. 40 kHz civarındaki modda (43 kHz) ise cymbal transdüserin kolları faz dışı çalışmada metal huni yüzünden cymbalın bu hareketi pozitif ses basıncına çevrilmektedir. Transdüser bu modda yaklaşık 113 dB’lik bir değer vermektedir. Ticari cymbal transdüser 46 kHz’deki bu modunda 85 dB’lik ses basıncı yaratmaktadır. Hassasiyet bakımından ise cymbal içeren hava akustik transdüserin özellikle rezonans frekanslarında daha iyi performans verdiği görülmektedir.



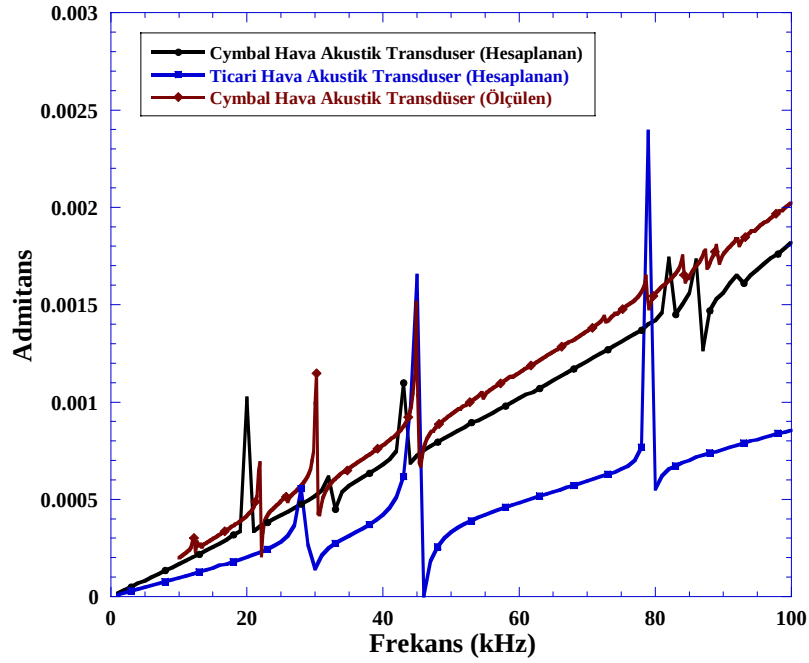
Şekil 7.3 Ticari ve cymbal hava akustik transdüserinin TVR değerlerinin karşılaştırılması (hesaplanan)



Şekil 7.4 Ticari ve cymbal hava akustik transdüserinin FFVS değerlerinin karşılaştırılması (hesaplanan)

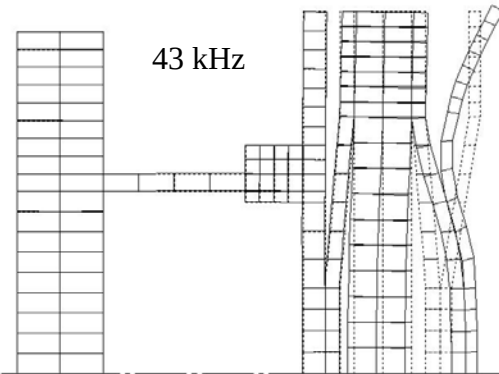
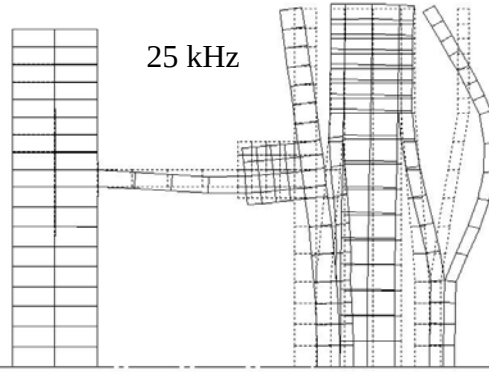
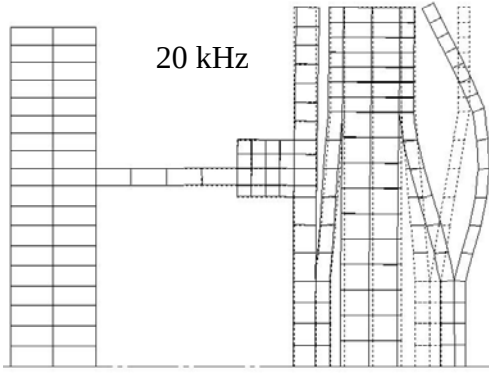
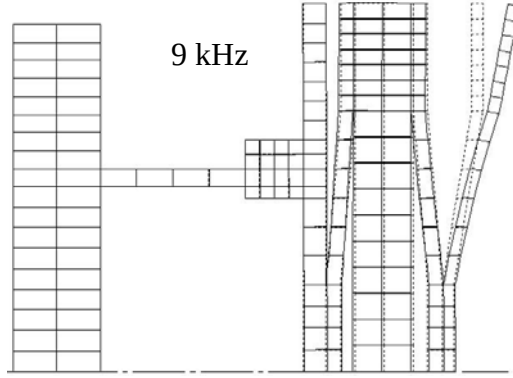


Şekil 7.5 Cymbal hava akustik transduser için hesaplanan ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması

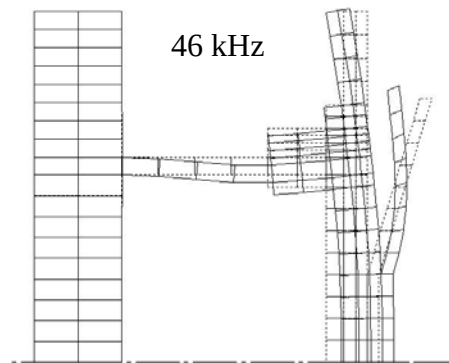
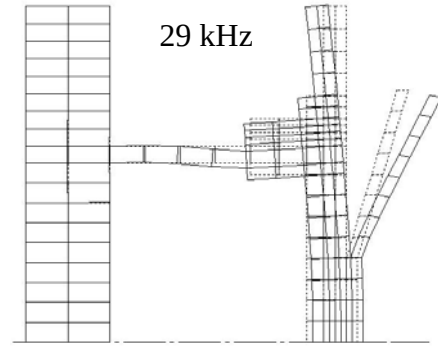
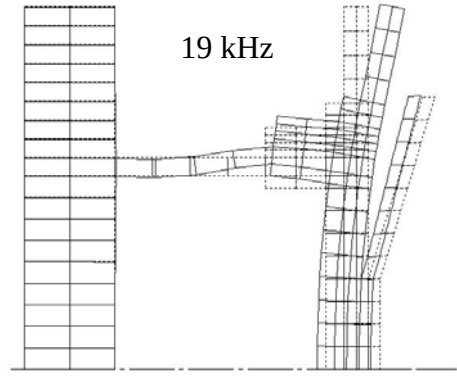


Şekil 7.6 Ticari ve cymbal hava akustik transduserlerinin admittans spektrumları

Cymbal Hava Akustik Transdüser



Ticari Transdüser

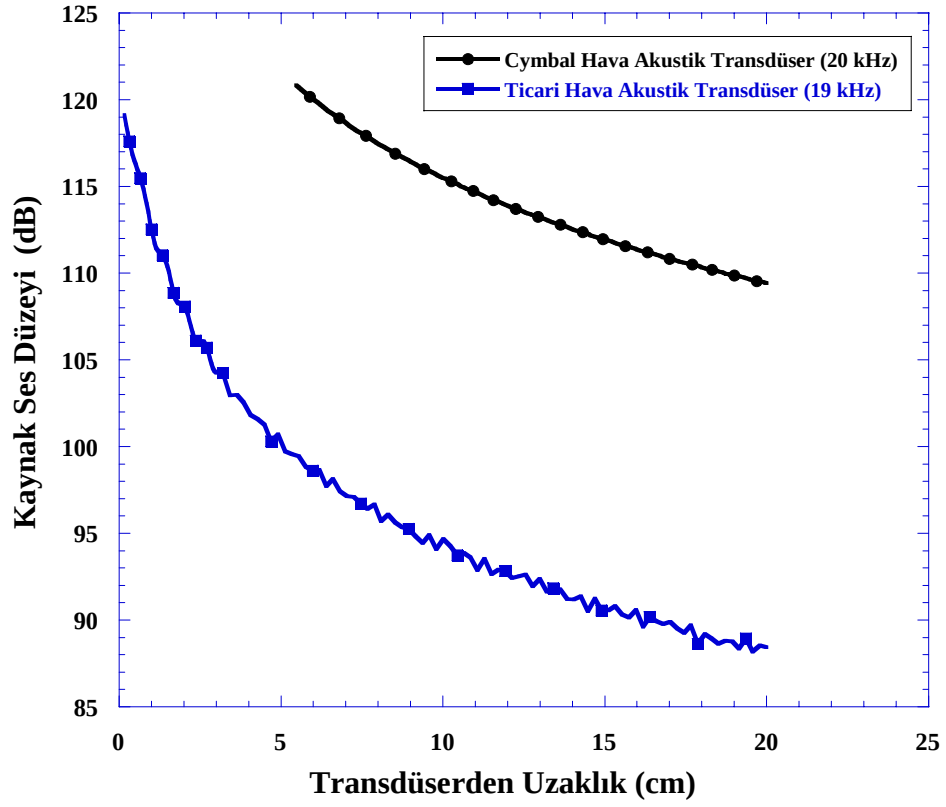


Şekil 7.7 Ticari ve cymbal hava akustik transdüserlerinin 0-50 kHz aralığındaki rezonans modları

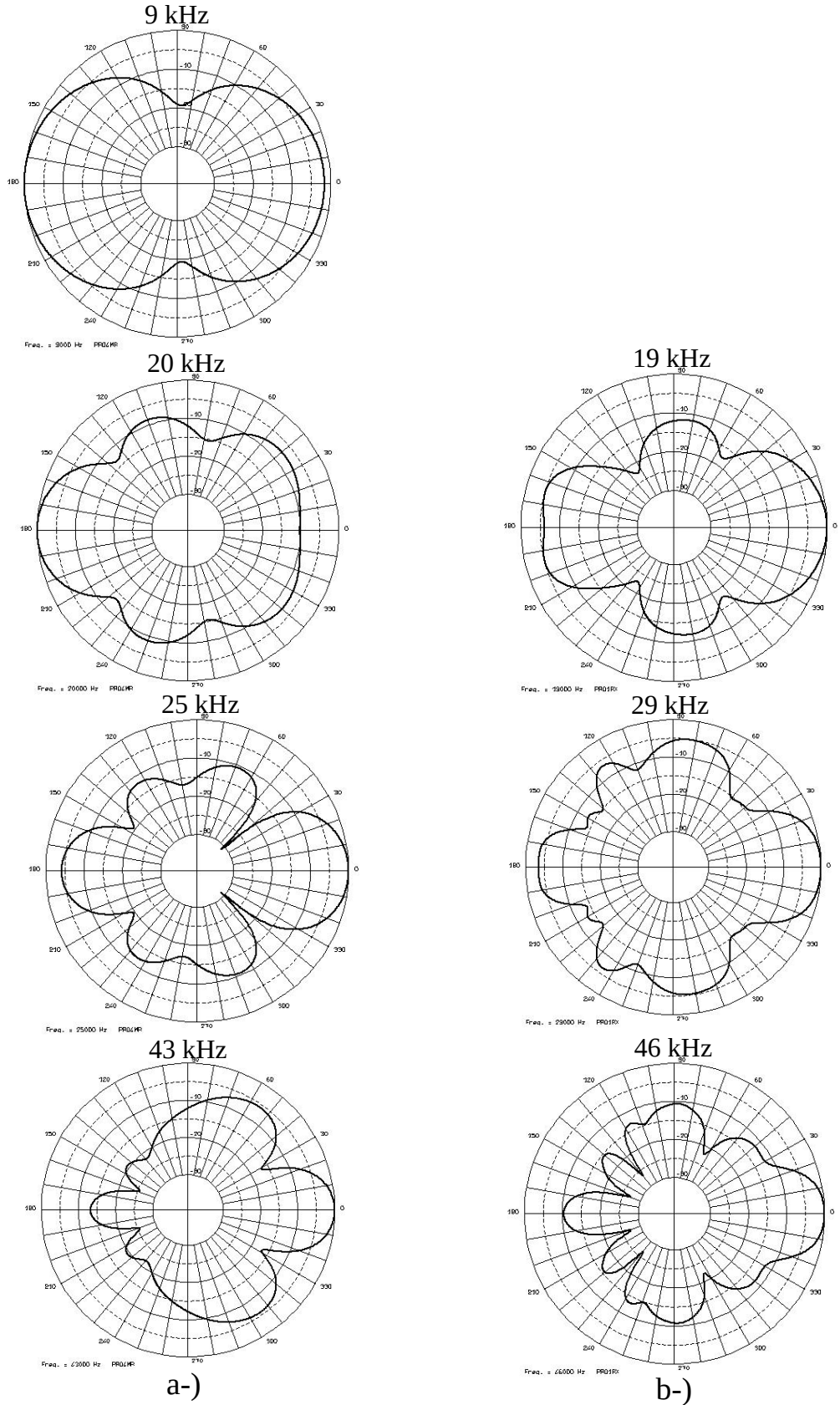
Hava akustik transdüserleri karakterize edilirken diğer bir önemli parametrede düşük frekansa ve yakın alanda (20 cm) verdikleri kaynak düzeyi değerleridir. Sualtı transdüserlerinden farklı olarak genelde hava akustik transdüserleri 10 V altında ve 20 cm mesafe de yarattıkları ses basıncı ile karakterize edilirler.

ATILA sonlu elemanlar analizi programında TVR ve FFVS program altında çalışan modül tarafından hesaplanmaktadır. Böylece TVR ve FFVS hesaplamalarında bu boyutlardaki transdüserler için 20-30'mm lik akışkan (hava veya su) sınırı yeterli olmaktadır. Diğer yandan daha kısa veya uzun mesafelerdeki ses basıncını bulmak için bulunmak istenen mesafe kadar sıvı sınır mesafesi koymak gerekmektedir. Bu sebepten 20 cm'de ve 10 V altındaki ses basıncını bulmak için modeldeki sıvı sınırları 20 cm'ye genişletilmiştir. Diğer bir sorunda ATILA sonuç dosyalarından mesafeye karşılık basınç değerlerinin çıkartılmasıdır. Bu amaçla bir fortran modülü yaratılmıştır. Bu modül kullanılarak akustik merkeze dik x ve y yönlerindeki ses basınçları kolaylıkla grafik programına aktarılabilmektedir. Her iki transdüserin yarattığı ses düzeylerinin 10 V uygulandığında 20 cm'ye kadar yarattıkları ses düzeylerinin karşılaştırılmaları Şekil 7.8'de verilmiştir. Cymbal hava akustik transdüserinin bu mesafede yarattığı ses düzeyi 110 dB olup bu değer kendisinden iki kat daha büyük olan hava akustik transdüserlerinin yarattığı ses basıncına eşittir. 20 cm'de cymbal hava akustik transdüseri ile ticari hava akustik transdüseri arasında rezonans frekanslarında 20 dB'lik bir fark oluşmaktadır ki bu değer 10 katlık ses basıncı farkına eşit olmaktadır.

Transdüserlerin belirli rezonans modlarındaki rezonans frekanslarındaki yönelme paternleri Şekil 7.9'da verilmiştir. Cymbal transdüserli sistemde yönelme ticari transdüserden daha iyi gözükmemektedir. Özellikle 43 kHz'deki modda belirgin bir yönelme bulunmaktadır. Bu yönelme paterni hayvan uzaklaştırma sistemleri için yeterli olsada mesafe ölçme ve yaklaşma sensörleri için geliştirilmesine ihtiyaç olabilir.



Şekil 7.8 Cymbal hava akustik transdüseri ve ticari hava akustik transdüserinin ilk rezonans frekanslarında 10 V uygulama voltajında 20 cm mesafede yarattıkları ses basıncı



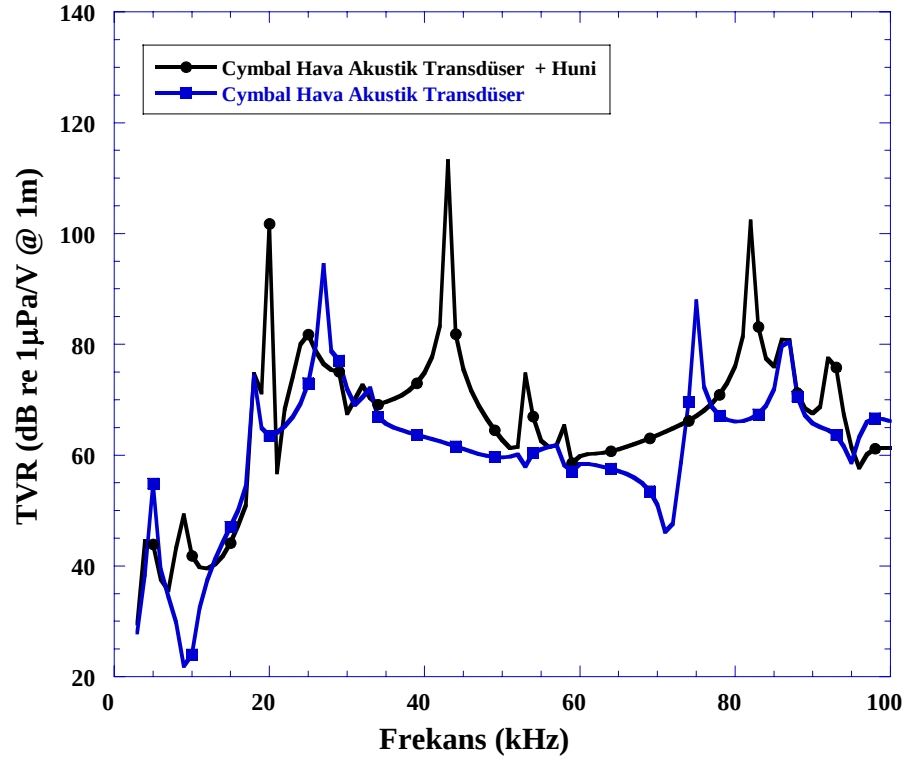
Şekil 7.9. a-) Cymbal hava akustik transdüseri ve b) ticari hava akustik transdüserinin rezonans frekanslarındaki akustik yönlenme paternleri

7.1 Cymbal Hava Akustik Transdüserde Boyut Parametrelerinin Etkileri

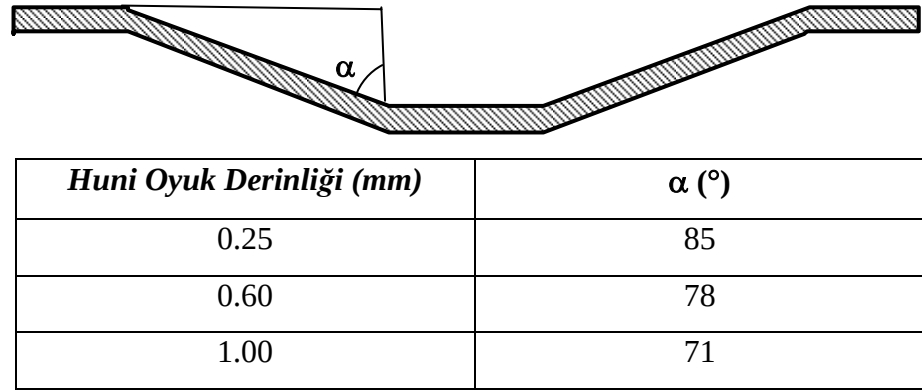
7.1.1 Huni Tasarımının ve Malzemesinin Etkileri

Hava akustik transdüserlerde yaygın olarak huni kullanılmaktadır. Huni aynı cymbal kapaklarda olduğu gibi mekaniksel transformer olarak davranmaktadır. Aynı zamanda yönlennmeyi sağlamakta ve hava ile transdüserin akustik uyumun artırılması amacı ile kullanılmaktadır. Cymbal üzerinde huni bulunduğu ve bulunmadığı zamanki hesaplanan TVR değerleri Şekil 7.10’da verilmiştir. Huni içeren transdüser kullanışlı 20 kHz’deki modda 101 dB verirken, aynı modda huni içermeyen transdüser 74 dB ses basıncı yaratmaktadır. Transdüserin 113 dB’lik ses basıncı yarattığı mod, huni olmayan transdüserde gözükmemektedir. 43 kHz’de ve uygulamalar için çok elverişli olan bu mod daha öncede açıklandığı üzere huninin 2 bükülme içeren hareketinden kaynaklanmaktadır. Huni olmayan transdüserde bu mod görülmemektedir. Bir önceki kısımda gösterildiği üzere huninin kollarının olmayışı da transdüserin yarattığı ses basıncını düşürmektedir. Kollar aşağı ve yukarı hareketleriyle transdüser tarafından itilen hava deplasmanını amplifike etmektedirler. Böylece oluşan ses basıncıda daha yüksek olmaktadır.

Bir sonraki aşamada huni boyutları ve malzemesinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilk değiştirilen huninin oyuk derinliğidir. Oyuk derinliğinin değişmesi aynı zamanda cymbal transdüserin kolları arasında kalan açının (α açısı) değiştirilmesi anlamına gelmektedir. α açısının gösterimi ve değişen oyuk derinliği ile α açısındaki değişim Şekil 7.11’de gösterilmektedir.



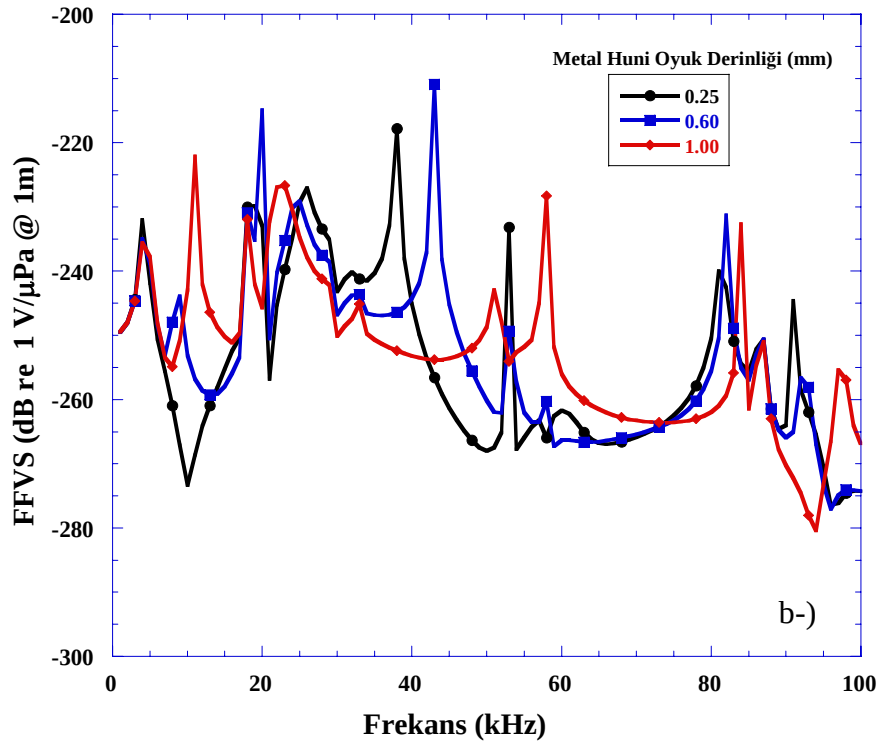
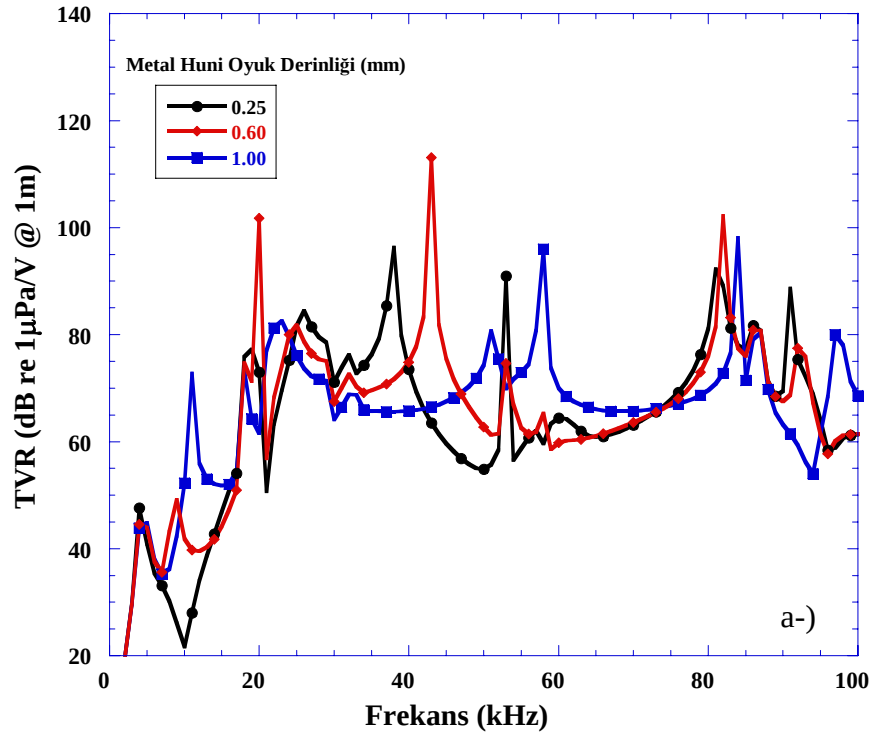
Şekil 7.10 Huni içeren ve içermeyen cymbal hava akustik transdüserlerin TVR değerlerinin karşılaştırılması



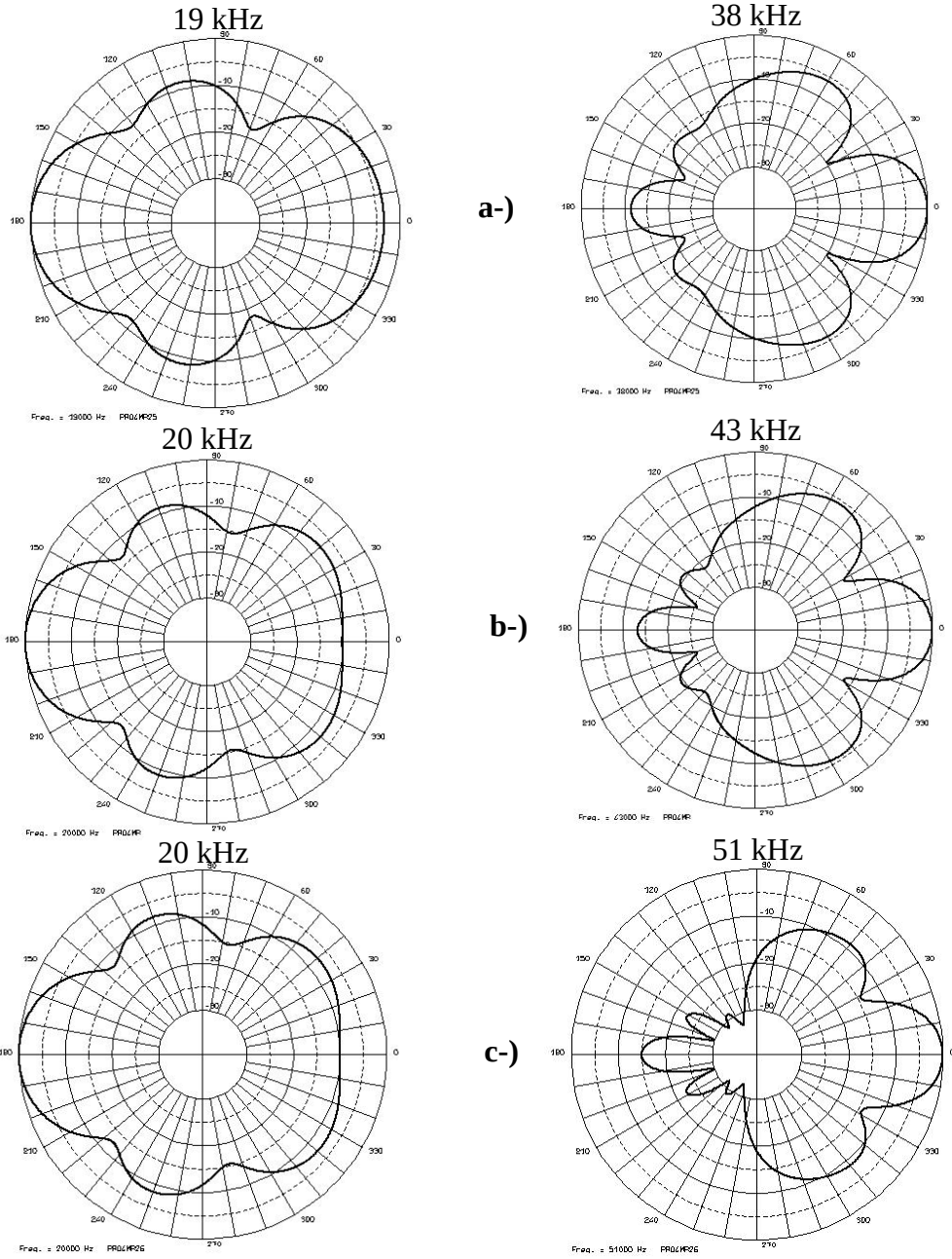
Şekil 7.11 Cymbal hava akustik transdüserde huni optimizasyonu için incelenen oyuk derinlikleri

Değişen oyuk derinliği ve değişen α açısı ile birlikte oluşan ses basınçları (TVR) değerleri ise Şekil 7.12-a'da gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere huni de oyuk derinliği için optimum değerler sözkonusudur. En yüksek ses basıncını veren huninin 45 kHz civarlarındaki modunun frekansı azalmaktadır. Aynı zamanda bu moddaki TVR değerleri 0.6 mm de optimum değer gösterip daha sonra düşmektedir. 20 kHz civarlarında oluşan ve gene huni kollarının hareketinden kaynaklanan modun frekansında bir değişiklik olmamasına rağmen TVR değerleri optimum gösterip daha yüksek oyuk derinliklerinde düşmektedir. Böylece denebilir ki, sık ve derin oyuk derinliklerinde huni de mekanik amplifikasyon düşük olmaktadır. Sık derinliklerde huninin deplasman yaratacağı oyuk içerisinde kalan hava miktarı az olmaktadır. Yüksek derinliklerde ise huninin oyuk boşluğunda kalan hava etkin biçimde huninin kollarına aktarılmamaktadır. Böylece her iki durumdada havanın deplasmanı düşmektedir. 0.6 mm oyuk derinliği ise bu boyutlardaki bir huni için optimum oyuk derinliği olmakta ve maksimum TVR değerlerine ulaşılmaktadır. Şekil 7.12-b'de ise değişen oyuk derinliklerine karşılık hava akustik transdüserin hassasiyeti görülmektedir. Özellikle rezonans frekanslarında en yüksek hassasiyeti gene 0.6 mm oyuk derinliğine sahip huni transdüser vermektedir. Bu da cymbal üzerine maksimum gerilme transferinin bu boyuttaki huniyle mümkün olduğunu göstermektedir.

Bu üç oyuk derinliği için cymbal flextensional mod ve huni modundaki akustik yönelmeler Şekil 7.13'de verilmektedir. 20 kHz'deki modda oyuk derinliğinin akustik yönlende büyük bir etkisi görülmemektedir. Bunun da sebebi mod hareketlerinin frekanslar değişmesine rağmen aynı olmasıdır. Fakat temel olarak huniden kaynaklanan modda oyuk derinliğinin artması ile birlikte yönelmede artmaktadır. Özellikle 1.00 mm oyuk derinliğine sahip olan hava akustik transdüserde 51 kHz'deki huni modunda yönelmenin doğrusal olduğu görülmektedir.

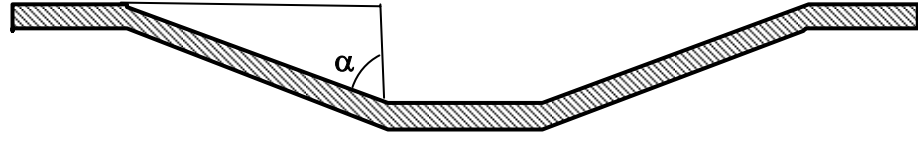


Şekil 7.12 Cymbal hava akustik transdüserde huninin oyuk derinliğinin a-) TVR
b-) FFVS üzerinde etkisi



Şekil 7.13 Değişen oyuk derinliklerinde huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlenme paternleri a) 0.25 mm b-) 0.60 mm c-) 1.00 mm

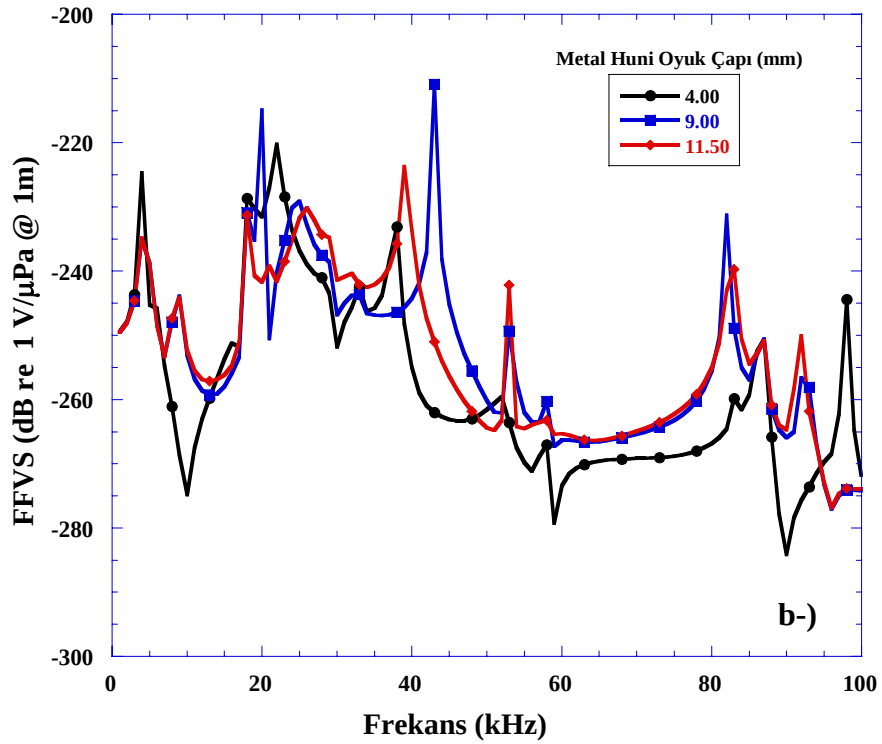
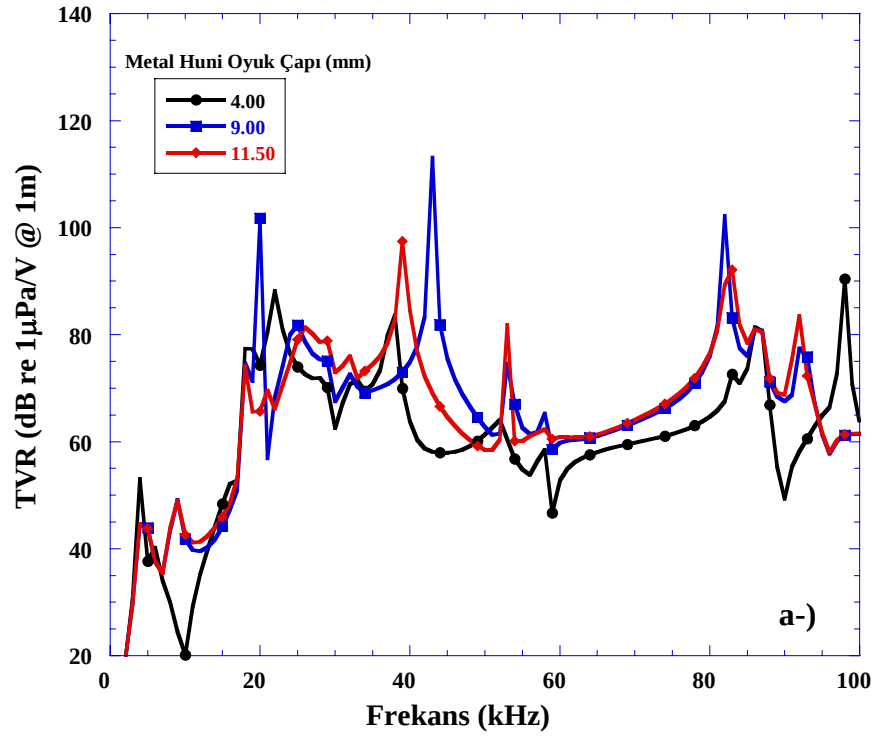
Bu tezde metal huni optimizasyonu için araştırılan diğer parametre oyuk çapıdır. Oyuk çapı ile değişen oyuk açısı “ α ” değişimleri Şekil 7.14’de verilmiştir. Oyuk çapı arttıkça oyuk açısı “ α ” da artmaktadır.



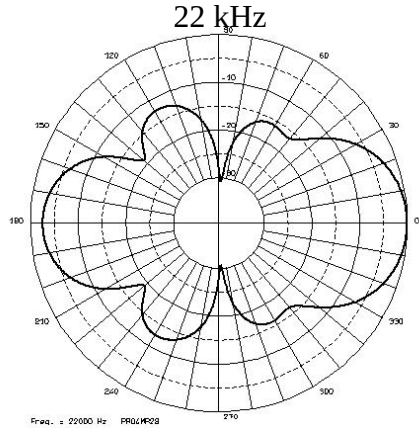
<i>Huni Oyuk Çapı (mm)</i>	α (°)
4.00	40
9.00	78
11.50	82

Şekil 7.14 Cymbal hava akustik transdüserde huni optimizasyonu için incelenen oyuk çapları

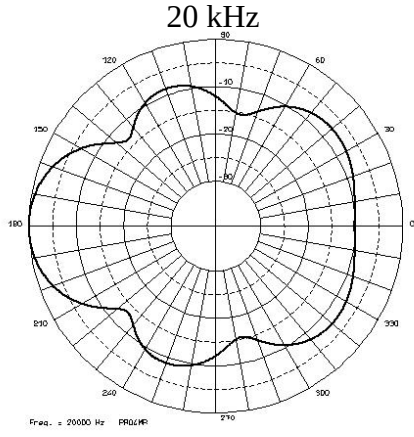
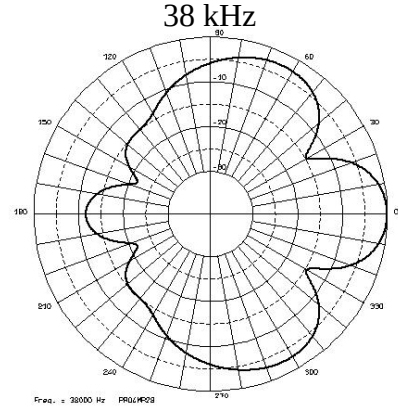
Oyuk çapı ve değişen α açısı ile birlikte oluşan ses basınçları (TVR) değerleri ise Şekil 7.15-a’da gösterilmiştir. Aynı oyuk derinliğinde olduğu gibi, burada TVR değerleri optimum göstermektedir. Optimum değere 9 mm oyuk derinliğinde ulaşılmaktadır. Oyuk çapı düşük olduğunda, oyuk açısı “ α ” yüksek olmakta ve deplasman transferi etkin olmamaktadır. Böylece hava deplasmanı düşmektedir. Oyuk çapı büyüdüğünde ise bu seferde huninin üstteki düz kollarının yüzey alanı azalmakta ve bu düz kollardan oluşan hava deplasmanı azalmaktadır. Böylece oluşan ses basıncı değerleri düşmektedir. Hassasiyet değerlerinde de optimumlar gözükmemektedir. En yüksek hassasiyet gene 9.00 mm’lik huniden elde edilmektedir. 4 mm’lik huniye sahip transdüser 22 kHz’deki modunda hassasiyet değerleri yüksek olmasına rağmen 43 kHz modunda bu değerler yine düşmektedir. 11.5 oyuk çapına sahip hunide 20 kHz’deki modda hassasiyet düşük olmasına rağmen huninin çiçek modunda hassasiyet yükselmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki düşük “ α ” açılarındaki transdüser üzerine gelen basınç huni hareketinin daha az etkili olduğu cymbal hava akustik ikinci modunda PZT disklere transfer edilebilirken, huni kendi modunda transfer için etkili olmamaktadır. Yönlenme paternlerine bakıldığında 4 mm’nin 22 kHz modunda dipolar yönlenmeye yakın bir karakteristik gösterdiği görülmektedir. Bu moddaki yönlenme paterninin diğer oyuk çapları farklı transdüserlerinden bu kadar farklı bir karakteristik göstermesi huni kapağın esnek (flextensional) dönüşümü yapamadığının göstergesi olmaktadır.



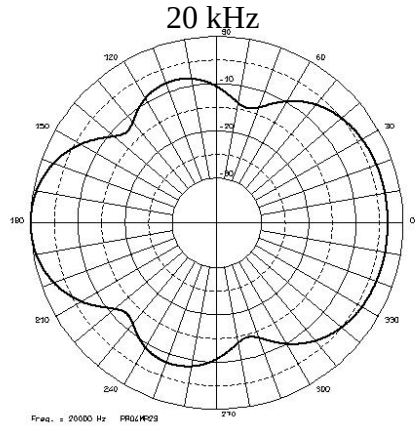
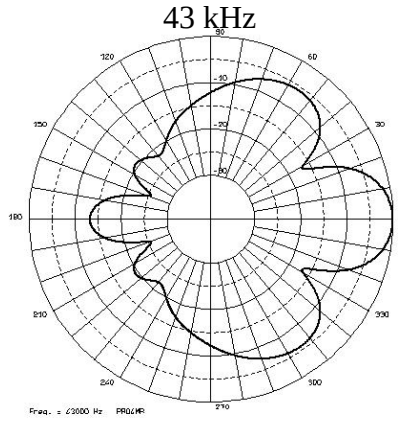
Şekil 7.15 Cymbal hava akustik transdüserde huninin oyuk çapının a-) TVR b-) FFVS üzerinde etkisi



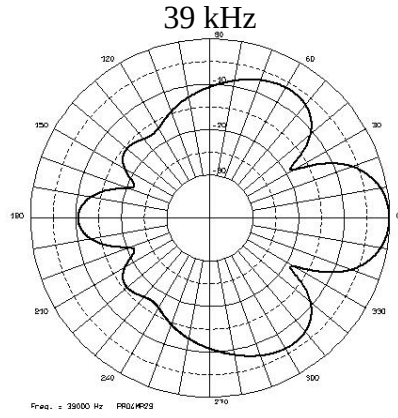
a-)



b-)



c-)



Şekil 7.16 Değişen oyuk çaplarında huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlendirme paternleri a) 4 mm b-) 9 mm c-) 11.5 mm

Bir sonraki aşamada optimum oyuk derinliği (0.6 mm) ve oyuk çapına (9 mm) sahip huni için malzeme etkileri incelenmiştir. Bu amaçla sert polimer olarak poliürethan, yumuşak polimer olarak kauçuk ve pirinç huniden daha değişik bir metal olarak titanyum ve çelik kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Huni için sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

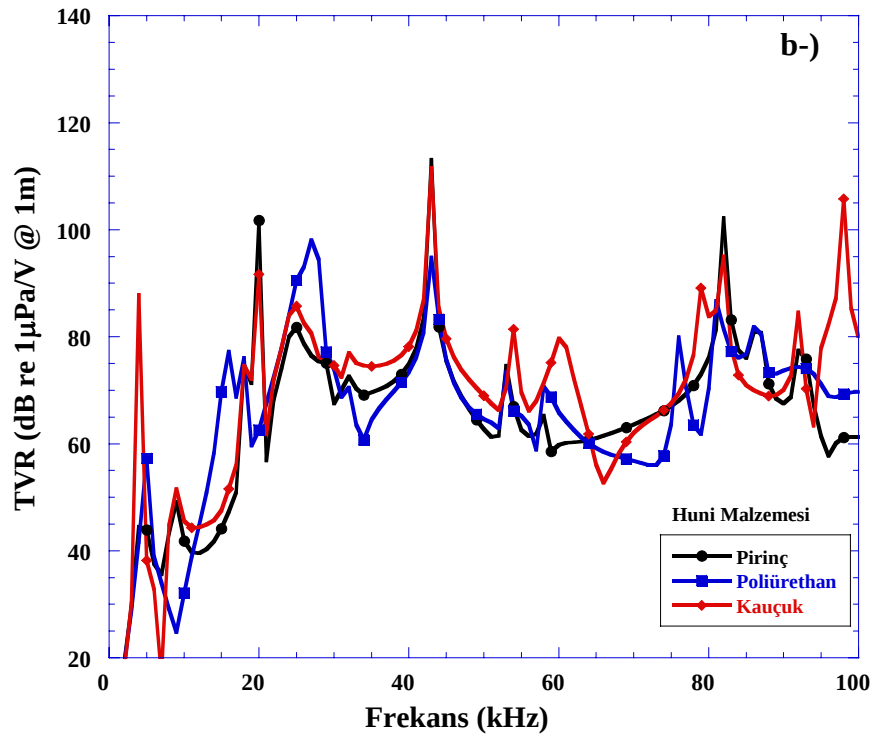
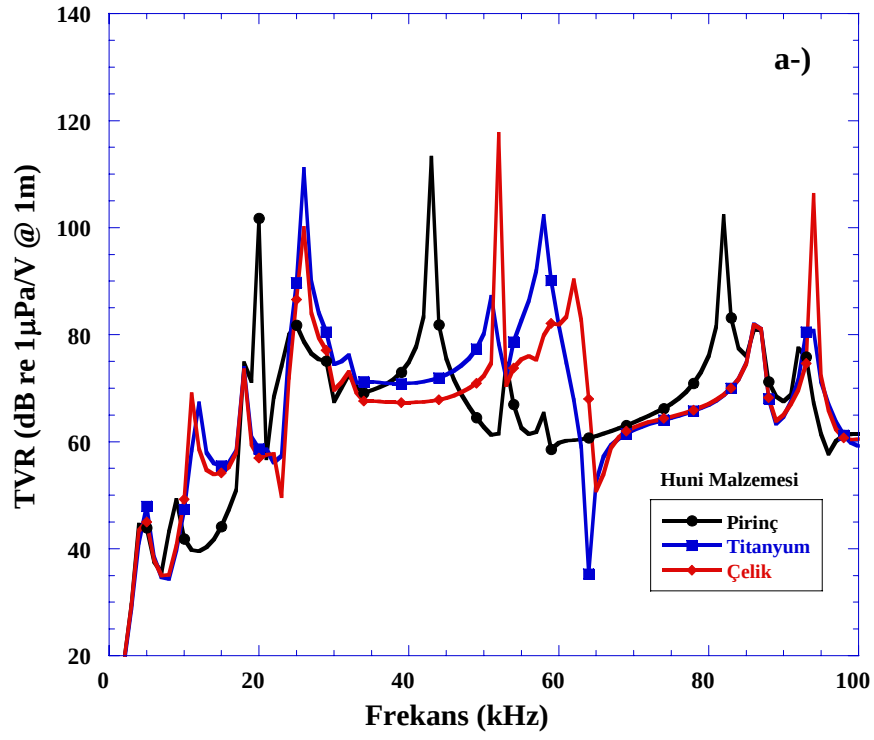
Metal	E (Gpa)	ρ (kg/m³)	ν
Pirinç	100.6	8550	0.35
Titanyum	120.2	4500	0.361
Çelik	207	7860	0.3
Poliürethan	3.1	1080	0.4
Kauçuk	0.01	1100	0.45

Bu metal malzemelerden yapılmış huniye sahip transdüserler için 1 metrede oluşturdıkları ses basıncı Şekil 7.17-a ve polimer malzemelerden yapılmış huniye sahip transdüserlerin pirinç huniye sahip transdüserle karşılaştırması Şekil 7.17-b’de verilmiştir. Daha yüksek stifnesdaki malzeme kullanımı ile cymbal transdüserin üzerindeki kütle etkisinin artması ile 20 kHz’deki mod 25 kHz’deki modla birleşip daha yüksek ses düzeyine sebep olmaktadır. Titanyum huniye sahip cymbal transdüser için 26 kHz’de 111 dB’lik çok yüksek ses basıncı elde edilmektedir. Referans cymbal hava akustik transdüseri için 43 kHz’de oluşan modun frekansı ise dördüncü bölümde açıklanan ultrasonik hıza ($[(E/\rho(1-\nu^2)) (m/s)]^{1/2}$) göre değişim göstermektedir (bakınız Şekil 4.14). Bu modda en yüksek değer 52 kHz’de 117 dB ile en yüksek pekişikliğe sahip çelik için olmaktadır. Polimer malzeme kullanıldığında ise polimerin elastik özellikleri bu durumu tersine çevirmektedir. Polimer huni kullanıldığında elastik özellikler hunideki hareketlenmeleri fazla miktarda artırmaktadır. 45 kHz civarında oluşan modda bu sefer daha pekişik olan poliürethan kauçukdan daha düşük miktarda ses basıncı üretmektedir. Kauçuk ise pirinç ile aynı frekansta aynı ses basıncını üretmektedir.

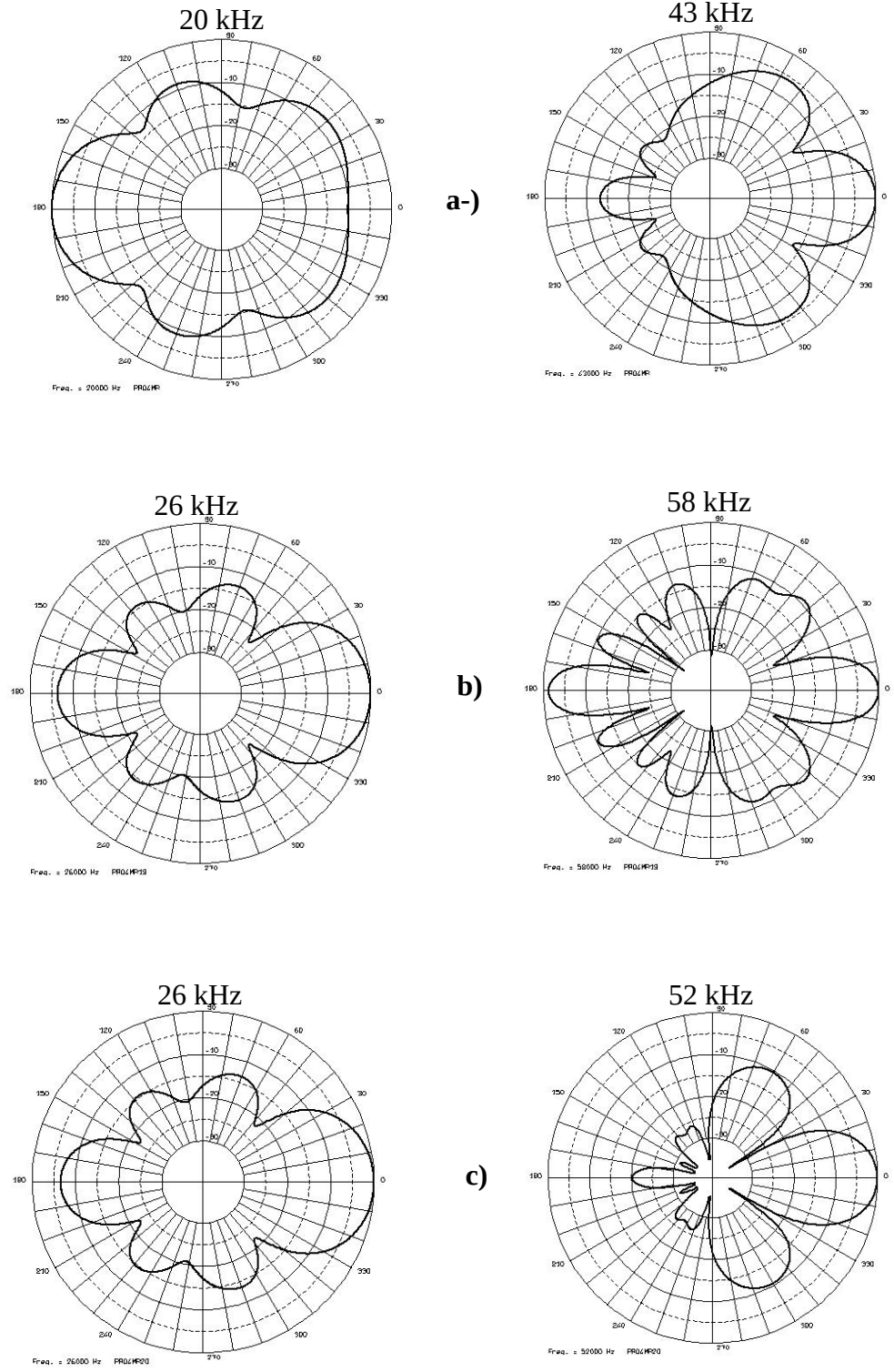
Pirinç kapakda 20 kHz de görülen mod poliürethan hunide daha yüksek bir frekansta görülmektedir (26 kHz). Bu modda düşük yoğunluktaki polimerlerin yeteri kadar kütle etkisi yaratamamasından dolayı ses basınçları yükselmemektedir. Metal malzemeler için en yüksek ses basıncını veren frekanslardaki yönlenmeler Şekil 7.18’de ve polimer malzemeler için en yüksek ses basıncını veren frekanslardaki yönlenmeler Şekil 7.19’da verilmiştir.

26 kHz’deki modlarında yönlenmede herhangi bir iyileşme elde edilmemesine rağmen özellikle çelik huniye sahip cymbal hava akustik transdüserin 52 kHz’deki modunda yönlenmede belirgin bir karakter gözlemlenmektedir. Bu modda çelik huniye sahip transdüserin 117 dB ses basıncı verdiği düşünülürse özellikle yalklaşma sensörleri için bu yönlenme davranışı ile birlikte uygun bir mod ortaya çıkmaktadır. Titanyum içeren transdüserde ise düşük bir ses basıncına yol açan moddaki kararsızlık yönlenme paterninde de gözlemlenmektedir. Transdüser herhangi bir yönde yönlenme karakteristiği gösterememektedir.

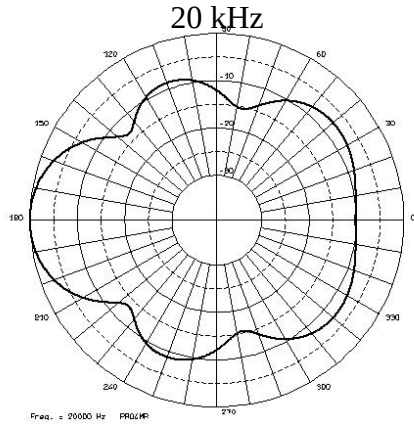
Polimer malzemedan yapılmış transdüserlerde, kauçuk huniye sahip cymbal transdüser pirinç huni ile aynı yönlenme karakteristiği göstermektedir. Poliürethan hunide ise hem 26 kHz’de hemde 43 kHz’deki yönlenme paternlerinin karakteristiği kullanışlı gözükmemektedir. Yönlenme karakteristiğinin kötü olmasına poliürethanın sert bir polimer olmasıyla elastik özelliklerinin devreye girememesi ve aynı zamanda düşük yoğunluğundan dolayıda kütle etkisinin kapak üzerinde etkili olmaması sebep olmaktadır.



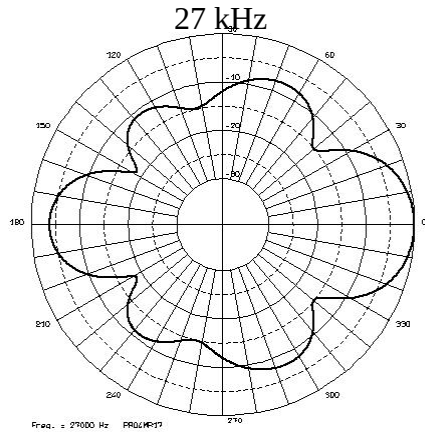
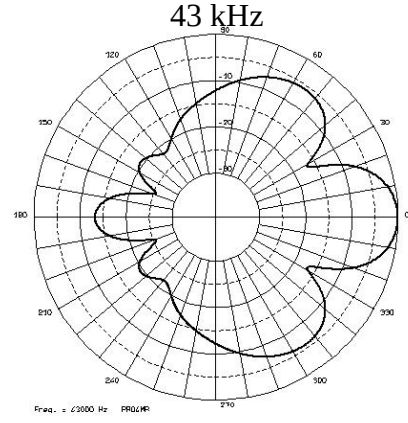
Şekil 7.17 Cymbal hava akustik transdüserde huninin malzemesinin a-) metal b-) polimer olduğu durumlarda TVR üzerine etkisi



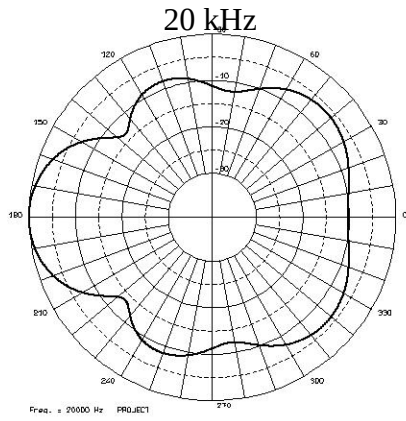
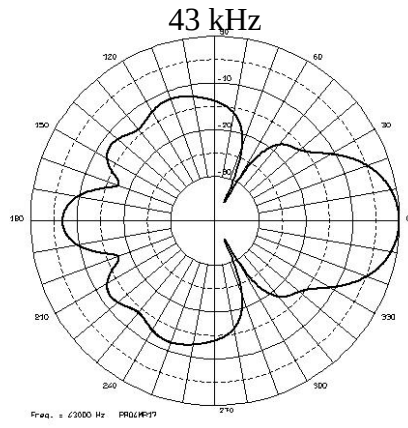
Şekil 7.18 Değişen metal malzemedan hunilere sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlendirme paternleri a) pirinç b-) titanyum c-) çelik



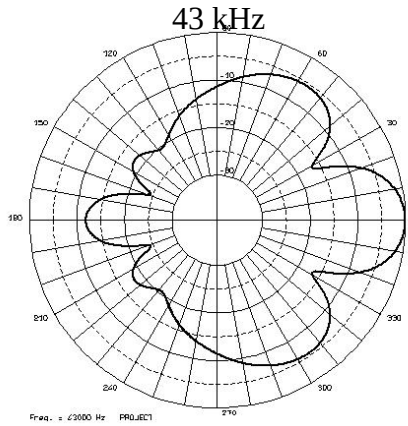
a)



b)



c)



Şekil 7.19 Değişen polimer malzemeden ve referans piring huniye sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlenme paternleri a) piring b-) poliürethan c-) kauçuk

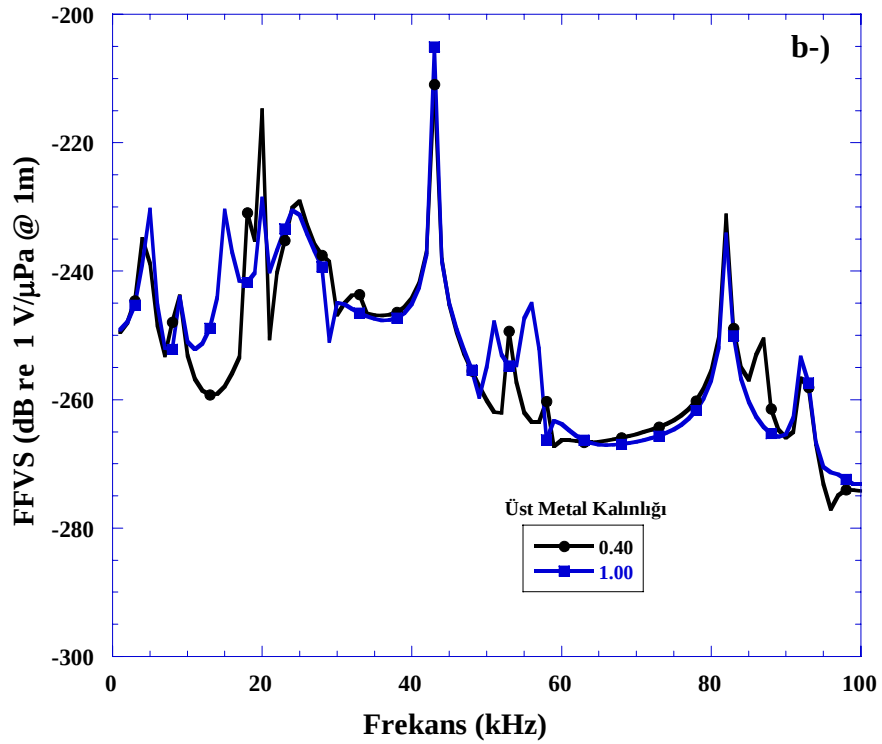
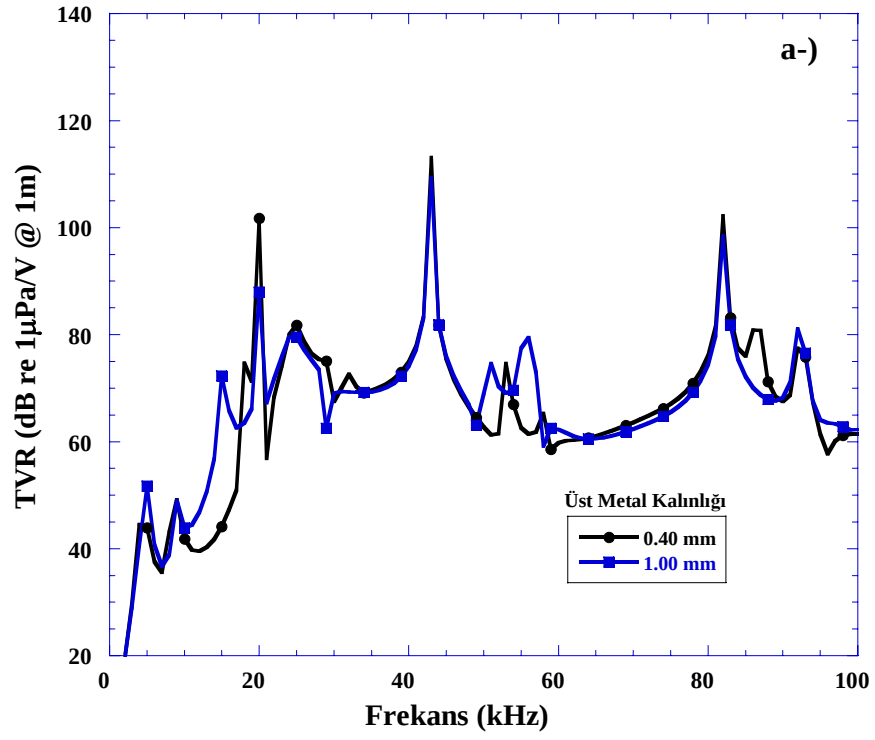
7.1.2 Üst Metal Malzeme Kalınlığının Etkileri

Huni optimizasyonu çalışmaları sonrasında cymbal transdüser haricindeki diğer elemanların optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Cymbal kapağın altındaki metal doğrudan cymbal kapağıyla etkileşim içinde olduğunda cymbal transdüserin rezonans modlarını ve deplasmanı etkileyebilmektedir. Metal kalınlığının artırılmasıyla birlikte oluşan ses basıncı ve hassasiyet düşmektedir (Şekil 7.20). Bu metalin kalınlığının artmasıyla birlikte cymbal metal kapakların hareketi engellenmekte ve deplasman ve gerinim amplifikasyonları düşmektedir. Şekil 7.21 değişen metal kapak kalınlığında ki transdüserin en yüksek ses basıncı verdiği modlardaki akustik yönlenmeyi göstermektedir. Metalin kalınlığının artması ile bu modlarda herhangi bir yöndeki hareketi engelleme veya amplife etme durumu söz konusu olmamaktadır. Böylece akustik yönlenmede herhangi bir değişiklik görülmemektedir.

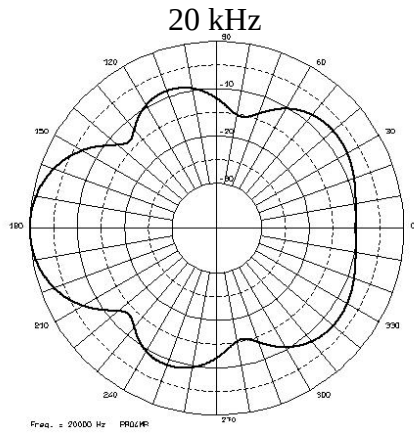
7.2 Kısım Özeti

Tez çalışmasının bu aşamasında cymbal transdüser kullanılarak tasarımılanan hava akustik transdüserin boyut ve malzeme parametreleri belirlenmiş, sonlu elemanlar analizi ile modellemesi ve optimizasyonları gerçekleştirilip optimize edilmiş transdüserin ilk denemeleri yapılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucunda rezonans frekanslarında hava ortamında 1 metrede 100 dB'nin üzerinde ses basıncı elde edilmiştir. En yüksek ses basıncı elde edilen modlar cymbal transdüserdeki seramikte bükülme hareketinin olduğu modlar olarak bulunmuştur. Seramiğin bu hareketinin sağlanması için ise cymbal transdüserin altında çelik silindirik levha kullanılmıştır. En yüksek ses basıncının elde edilmesi amacı ile daha önceki çalışmalarda optimize edilmiş olan cymbal transdüser kullanılmıştır. Cymbal transdüserin hemen üstünde bulunan ve akustik gücün yükseltilmesini sağlayan huni, hava akustik transdüserin cymbal ile birlikte en önemli kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmada ticari hava akustik transdüserde kullanılan huniden farklı olarak cymbal transdüserde kullanılan kapak tasarımında üst kolları olan huni kullanılmıştır. Bu şekildeki huninin kollarının hareketi sayesinde daha etkili olduğu gösterilmiştir. Huninin geometrik ve malzeme parametreleri de yaratılan ses basıncıda etkili olmaktadır. Polimer hunilerde

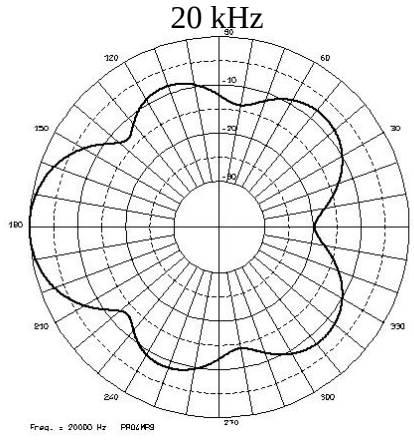
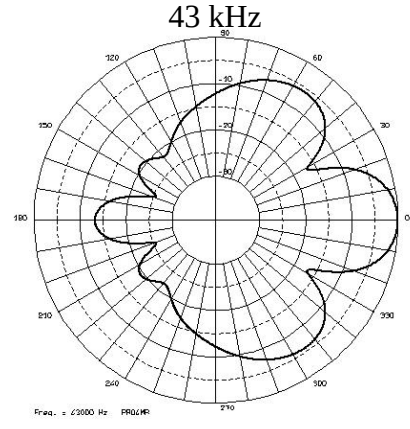
istenen sonuç elde edilememiştir. Metal hunilerde ise en yüksek değere 117 dB ile çelik huni ile ulaşılmaktadır. Oyuk derinliği ve oyuk çapındaki değişimler ise huninin yan kollarındaki deplasman ve hava transferini ve dolayısı ile de yaratılan ses basıncını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu şekilde üretilen hava akustik transdüserlerin yaklaşma sensörü uygulamalarında kullanılmaları için yönlennmelerinin ve hassasiyetlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır ve çalışmalar bu yönde devam edecektir.



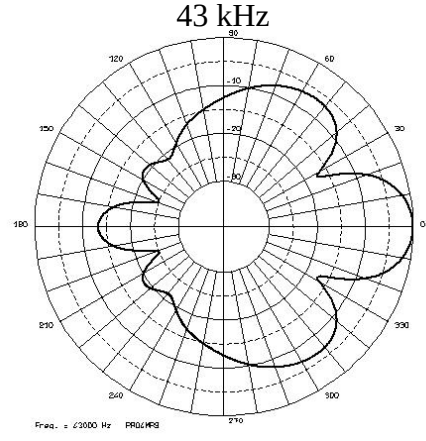
Şekil 7.20 Cymbal hava akustik transdüserde üst metal kalınlığının a-) TVR b-) FFVS üzerinde etkisi



a-)



b-)



Şekil 7.21 Değişen kalınlıkta üst metala sahip cymbal hava akustik transdüseri için akustik yönlendirme paternleri a) 0.40 mm b-) 1.00 mm

8. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

8.1. Cymbal Transdüserin Sualtı Alıcı ve Projektör Performansı

Tez çalışmasının bu bölümünde transdüserin boyut ve malzeme parametrelerinin sualtı performansı üzerindeki etkileri deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmalar esnasında sonlu elemanlar analizi (FEA) ile deneysel çalışmalar iyi uyum göstermiştir.

Cymbal transdüserin temel rezonans frekansları kolaylıkla değiştirilebilen boyut ve malzeme parametreleri ile optimize edilmiştir. Sualtı uygulamaları için tasarım ve malzeme parametrelerinin ayarlanması ile 3.5 kHz-252.4 kHz arasında temel rezonans frekansı elde edilebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları aralıkların genişletilebileceğini göstermektedir.

Ölçekleme faktörü, oyuk derinliği, oyuk çapı ve PZT kalınlığı transdüserin sualtı projektör/alıcı performansı üzerinde en etkili parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin malzeme parametreleriyle birlikte optimizasyonu ile uygulamaya göre istenen seviyelerde TVR ve FFVS değerleri elde edilebilmektedir. Cymbal transdüser dairesel akustik yönlenme göstermektedir. 2. modda kapak kollarında hareketsiz nodal bölgeler olduğundan dolayı TVR/FFVS değerleri düşmekte ve 1. ve 2. modlar arasındaki kullanılabilir bant genişliği düşmektedir. Bu kısımda yapılan parametrik çalışma ileride cymbal transdüseri sualtında kullanacak olan için bir rehber olacaktır. Bu parametrik çalışmanın kullanılmasıyla sualtı elektroakustik uygulamalarında ihtiyaç olan temel rezonans frekansında istenen ses düzeyi ve hassasiyetinde cymbal üretimi mümkün olacaktır.

8.2. Cymbal Transdüserin Hidrostatik Basınç Altında Kararlılığı

Tezin ikinci kısmında cymbal transdüserin sualtı elektroakustik transdüseri olarak kullanımıyla ilgili dayanıklılık testleri yapılmıştır. Cymbal transdüserin hidrostatik basınç altında yük akümülyasyonundaki değişimler deneysel yöntemler ve FEA kullanılarak araştırılmıştır. Aynı zamanda değişik boyutlara sahip cymbal transdüserlerin artan basınç altında kararlılıkları incelenmiştir.

Çalışma sonucunda cymbal transdüserin sualtında etkinliğinin kaybolmasının metal kapakların plastik deformasyonundan kaynakladığı bulunmuştur. Oyuk boyutları ve malzeme seçiminin transdüserin basınç kararlılığında ve sualtı performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Oyuk derinliği/oyuk yarıçapı oranı 0.07 olduğunda sualtı performansı optimize edilmektedir. Yumuşak PZT içeren transdüserler sert PZT'ye sahip transdüserlerden daha iyi performans göstermektedir. Yüksek akma mukavemetine sahip metal kapak kullanılan transdüserler daha yüksek derinliklerde kullanılabilirler. Fakat bu tip metal kapaklar transdüserin sualtı performans TVR/FFVS değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır.

8.3. Cymbal Transdüserin Geniş Bant Aralığı İçin Tasarım Optimizasyonu

Doktora çalışmasının üçüncü aşamasında cymbal transdüser tasarımındaki modifikasyonlarla cymbal transdüserin bant genişliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bant genişliğinin artırılması için iki adet strateji belirlenmiştir: mekaniksel kalite faktörü (Q_f) ve elektromekaniksel bağlantı katsayısının (k) optimizasyonu ve rezonans modlarının birbirleriyle çakıştırılması. Her iki mekanizmanında etkin olması sebebiyle bant genişliği açısından en iyi sonuçları standart cymbal transdüserde oyuk boşluğunda polimer içeren tasarımlar vermişlerdir. Sönümlenmenin yeterli seviyede olması için sert polimer kullanılması gereklidir. PZT kalınlığında bant genişliğinin artırılmasında olumlu etkileri olmaktadır. PZT kalınlığının artmasıyla ilk rezonans modunda Q_m değerleri düşerken 2. ve 3. mod birbiriyle etkileşmekte ve kullanılabilir bant genişliği önemli ölçüde artmaktadır. Poliüretan dolgu içeren transdüserlerin seri halde kullanımı ile kapaklardaki sönümlenme telafi edilebilmekte ve bant aralığı artırılabilir. Modifiye edilmiş tasarımlarda dairesel (omni directional) yönlenme karakteristiği devam etmektedir.

8.4. Hava Akustik Cymbal Transdüser

Tez çalışmasının bu aşamasında cymbal transdüser kullanılarak tasarımılanan hava akustik transdüserin tasarım ve malzeme parametreleri belirlenmiş, sonlu elemanlar analizi ile modellemesi ve optimizasyonları gerçekleştirilip optimize

edilmiş transdüserin ilk denemeleri yapılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmaları ile cymbal hava akustik ve ticari hava akustik sistemleri karşılaştırılmıştır. Rezonans frekanslarında hava ortamında 1 metrede 100 dB'nin üzerinde ses basıncı elde edilmiştir. En yüksek ses basıncı elde edilen modlar cymbal transdüserdeki seramikte bükülme hareketinin oluştuğu modlar olarak bulunmuştur.

Cymbal hava akustik transdüserinde akustik yükseltici huni olarak ters cymbal kapak kullanılmıştır. Ticari transdüserde kullanılan huniden farklı olarak üst kolları olan bu çeşit huni yaratılan ses basıncını önemli ölçüde artırmaktadır. Polimer hunilerde istenen sonuç elde edilememiştir. Metal hunilerde ise en yüksek değere 117 dB ile çelik huni ile ulaşılmaktadır. Huninin oyuk çapının ve oyuk derinliğinin hava akustik performansına önemli etkileri olmaktadır. Cymbal hava akustik transdüser için optimum oyuk derinliği ve oyuk çapları belirlenmiştir.

8.5.Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasında açıklanan sonuçlar cymbal optimizasyonu açısından gelecek çalışmaları belirlemektedir. Örneğin şu zamana kadar 1 mm kalınlıktaki PZT disk kullanımı çalışmalarda standart olarak belirlenmişti. Fakat bu çalışma açıkça göstermektedir ki daha kalın PZT diskler ile daha yüksek ses düzeylerine ulaşılabilir. Ayrıca daha kalın PZT ile daha fazla oyuk derinliği ve daha ince metal kapak kalınlığının kullanılmasıyla ilk iki rezonans modunun etkileşme olasılığı ve bant genişliğini artırma olasılığı ortaya konulmuştur. Böylece ilerideki çalışmalarda PZT kalınlığının diğer boyut parametreleriyle birlikte optimizasyonunun admitans, TVR ve FFVS spektrumu üzerine etkilerinin araştırılmasına devam edilecektir.

Cymbal transdüserin TVR/FFVS özelliklerinden vazgeçmeden hidrosatik basınç altında dayanıklılığını artırmak için akma mukavemeti daha yüksek ama aynı zamanda elastik modülü de yüksek olan metal alaşım kapakların araştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alaşımların maliyet artışına sebep olmaması lazımdır.

Cymbal transdüserde kapak altında daha kalın PZT ve sert polimer kullanılarak bant genişliği önemli ölçüde artırılmış ve transdüserlerin seri halde kullanımı ile polimerin yarattığı sönümlenme etkisi giderilmiştir. Polimer içeren transdüserlerin sualtında kullanım olasılığının artırılması için transdüserin admitans spektrumunun 10-20 kHz kadar düşük spektruma kaydırılması gereklidir. Malzeme ve boyut parametreleri ile bu gerçekleştirilebilir. Kapak altında polimer içeren transdüserlerin hidrostatik basınç altında karalılıklarının incelenmesi gereklidir. Kapak altında bulunan sert polimer kapakların çökmesini engelleyip cymbal transdüserlerin daha yüksek hidrostatik basınçlara dayanmalarını sağlayabilir. Bu tez çalışmasında önerilen diğer tasarımların da sualtı performanslarının incelenmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

İlk defa bu tez çalışmasında tanıtılan cymbal hava akustik transdüseri ile hava ortamında 1 metre uzaklıkta ve 1 V uygulamasıyla 100 dB'nin üzerinde ses basıncı elde edilmektedir. Gelecekte parametrelerin daha ayrıntılı çalışmaları yapılabilir ve yeni huni tasarımları geliştirilebilir. Ayrıca cymbal hava akustik transdüserinin yaklaşma sensörü uygulamalarında kullanılmaları için yönlenmelerinin ve hassasiyetlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır ve çalışmalar bu yönde devam edecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Buchanan, Z.C., *Ceramic Materials for Electronics: Processing, Properties and Applications, Second Edition*, Marcel Deccer Inc., ABD, 1991.
- [2] Randeraat, J. ve Settingington, R.E., *Piezoelectric Ceramics*, N. V. Philips Publishing, ABD, 1974.
- [3] Jaffe, B., Cooke, W.R. ve Jaffe. H., *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, ABD, 1971.
- [4] Damjanovic, D. ve Newnham R.E., "Electrostrictive and piezoelectric materials for actuator applications," *J. Intel. Mater. Struc.*, **3**, 190-201, 1992.
- [5] Cross, L.E., "Ferroelectric materials for electromechanical transducer applications," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 2525-2532, 1995.
- [6] Haertling, G.H., "Ferroelectric ceramics: history and technology," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, 797-818, 1999.
- [7] Berlincourt, D.A., "Piezoelectric ceramics: Characteristics and applications", *J. Acous. Soc. Am.*, **70**, 1586, 1981.
- [8] Stansfield, D., *Underwater Electroacoustic Transducers*, Bath University Press, İngiltere, 1990.
- [9] Cross, L.E., "Ferroelectric materials for electromechanical transducer applications," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 2525-2532, 1995.
- [10] Albers, V.M., *Underwater Acoustics Handbook-II*, University Park: The Pennsylvania State University Press, ABD, 1965.
- [11] Ballato, A., "Historical development of piezoelectric materials and applications," *Ceramic Transactions*, **88**, 1-14, 1998.
- [12] Berlincourt, D.A., Curran, D.R. ve Jaffe, H., "Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers," *Physical Acoustics*, **1**, 169-257, 1964.
- [13] Hunt, F.V., *Electroacoustics*, Wiley & Sons, ABD, 1982.
- [14] Kuntsal, E., "Guidelines for specifying underwater electroacoustic transducers", *UDT Conference Proceedings*, İngiltere, 1992.
- [15] Kuntsal, E., *Application Equations for Underwater Sound Transducers*, ITC Publication, Rev.2/90, ABD, 1990.
- [16] Hughes, W.J., "Transducers, underwater acoustic," *Encyclopedia of Applied Physics*, **22**, 67-84, 1998.

- [17] Wilson, O.B., *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsula Publishing, A.B.D, 1988.
- [18] Buttler, S.C., Butler, A.L. ve Butler, J.L., “Directional flextensional transducer”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **92(5)**, 2977-2979, 1992.
- [19] Rolt, K. D., “History of the flextensional transducer”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **87(3)**, 1340-1348, 1990.
- [20] Royster, L.H., “The flextensional concept: a new approach to design of underwater acoustic transducers”, *Appl. Acoustics*, **3**, 117-126, 1970.
- [21] Meyer Jr., R.J., Dogan, A., Yoon, C., Pilgrim, S.ve Newnham, R.E., “Displacement amplification of electroactive materials using the cymbal flextensional transducer,” *Sensors and Actuators*, **87**, 157-162, 2001.
- [22] Dogan, A., Uchino, K. ve Newnham, R.E., “Flextensional composite transducers: designing fabrication and application”, *Kluwer Academic Publisher NATO Science Series 3*, **76**, 357-374, 1999.
- [23] Newnham, R.E., Skinner D.P. ve Cross L.E., “Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites,” *Mat. Res. Bull.*, **13**, 525-536, 1978.
- [24] Gururaja, T.R., Schulze, W.A., Cross L.E. ve Newnham, R.E., “Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites,” *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **32(4)**, 481-498, 1985.
- [25] Gururaja, T.R., Schulze, W.A., Cross L.E. ve Newnham, R.E., “Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part II: Evaluation of ultrasonic medical applications,” *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, **32(4)**, 499-513, 1985.
- [26] Newnham, R.E., Xu, Q.C. ve Yoshikawa, S., *Transformed stress direction acoustic transducer*, A.B.D Patent No: 4,999,819, 1991.
- [27] Dogan, A., *Flextensional Moonie and Cymbal Actuators*, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University, A.B.D, 1994.
- [28] Dogan, A. ve Newnham, R.E., *Metal-electroactive ceramic composite transducer*, A.B.D Patent No: 5,729,077, 1998.
- [29] Tressler, J.F., *Capped ceramic underwater sound projector the ‘cymbal’*, Doktora Tezi, The Pennsylvania State University, A.B.D, 1997.
- [30] Tressler, J.F., Newnham, R.E. ve Hughes, W.J., “Capped ceramic underwater sound projector the ‘cymbal’ transducer,” *J. Acous. Soc. Am.*, **105**, 591-600, 1999.

- [31] Zhang, J., Hughes, W.J., Meyer, R.J., Uchino, K. ve Newnham, R.E., "Cymbal array: a broad band sound projector," *Ultrasonics*, **37 (8)**, 523-529, 2000.
- [32] Lee, S., Smith, N.B., Markley, D., Snyder, B., Uzgur, A.E., Pishko, M. ve Newnham, R.E., "Composite transducer arrays for the treatment of diabetes", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, **2(4)**, 308-316, 2005
- [33] Tressler, J.F. ve Howarth, T.R., "A comparison of the underwater acoustic performance of cymbal-based projectors to 1-3 piezocomposite materials", *Journal of Electroceramics*, **8**, 175-186, 2002.
- [34] Uzgur, E., *Piezoelektrik kompozit transdüserlerin bilgisayar yardımı ile tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2000.
- [35] Challende, P. "Optimizing ultrasonic transducers based on piezoelectric composites using a finite-element method," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **37**, 135-140, 1990.
- [36] Chin, L.C., Varadan, V.V. ve Varadan, K., "Finite element analysis of flextensional electroacoustic transducer", *IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings*, 481-484, 1991.
- [37] Reissner, E., "On axi-symmetrical vibrations of shallow spherical shells," *Quart. Appl. Math*, **13**, 279, 1950.
- [38] Woollett, R.S., "Theory of the piezoelectric flexural disk transducer with applications to underwater sound," *USL Research Report No. 490, S-F001 03 04-1*, 1960.
- [39] Hladky-Hennion, A.C. ve Decarpigny, J.N., "Finite element modeling of active periodic structures: application to 1-3 piezocomposites," *J. Acous. Soc. Am.*, **94**, 621-635, 1993.
- [40] Decarpigny, J.N., Debus, J.C., Tocquet, B. ve Boucher, D., "In-air analysis of piezoelectric tonpilz transducers in a wide frequency band using a mixed finite element-plane wave method," *J. Acous. Soc. Am.*, **78**, 1499-1507, 1985.
- [41] Abboud, N.N., Wojcik, G.L., Vaughan, D.K., Mould, J., Powell, D.J. ve Nikodym L., "Finite element modeling for ultrasonic transducers," *Proc. SPIE Int. Symp. Medical Imaging*, **3341**, 19-42, 1998.
- [42] Allik, H. ve Hughes, T.J.R., "Finite element method for piezoelectric vibration," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, **2**, 151-157, 1970.

- [43] Hamonic, B., Debus, J.C., Decarpigny, J.N., Boucher, D. ve Tocquet, B. “Analysis of a radiating thin-shell sonar transducer using the finite element method,” *J. Acous. Soc. Am.*, **86**, 1245-1253, 1989.
- [44] Hladky-Hennion, A.C., Bossut, R. ve Billy, M.D., “Time analysis of immersed waveguides using the finite element method,” *J. Acous. Soc. Am.*, **104**, 64-71, 1998
- [45] Stupfel, B., Lavie, B. ve Decapigny, J. N., “Combined integral equation formulation and null-field method for the exterior acoustic problem” *J. Acous. Soc. Am.*, **83**, 927-941, 1988.
- [46] ISEN, EQI Users Manual, France, ISEN, 1999.
- [47] Groves, I.D., “The design of deep-submergence hydrophones,” *Naval Research Laboratory Report*, #7339, NRL Underwater Sound Reference Division, Orlando, FL, ABD, 1971.
- [48] Brandes, E.A., *Smithell’s metals reference book 7th edition*, Butterworth & Co., ABD, 1992.
- [49] Doğan, A., Uzgur, E., Yazıcı, Z.O. ve Hladky-Hennion, A.C., “Optimizing Mechanical Quality Factor of Cymbal Transducer”, *Ferroelectrics*, **331**, 65-71, 2006
- [50] Doğan, A., Uzgur, E., Yazıcı ve Z.O., “Tailoring the Q of Cymbal Transducer” *Key Eng. Mat.*, **264-268**, 1305-1308, 2004.
- [51] Danley, S., *Thickness dependence of the cymbal, ring cymbal, and double dipper transducers*, Yüksek Lisans Tezi, The Pennsylvania State University, 2004.