

**KOMPOZİT ZİL TİPİ TRANSDÜSERDE KAPAK
GEOMETRİSİNE DAYALI OPTİMİZASYON
ÇALIŞMALARI**

Ziya Özgür YAZICI
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mayıs – 2003

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ziya Özgür YAZICI'nın Kompozit Zil Tipi Transdüserde Kapak Geometrisine Dayalı Optimizasyon Çalışmaları başlıklı Seramik Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 16.05.2003 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Doç.Dr. Aydın DOĞAN

Üye : Doç.Dr. Servet TURAN

Üye : Yrd.Doç.Dr.Ender SUVACI

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
18.06.2003... tarih ve ...20/3... sayılı kararıyla onaylanmıştır

Enstitü Yürütme Kurulu
Prof. Dr. Orhan ÖZER
Fen Bilimleri Enstitüsü
M ü d ü r ü

Anadolu Üniversitesi
Merkez Kütüphane

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOMPOZİT ZİL TİPİ TRANSDÜSERDE KAPAK GEOMETRİSİNE DAYALI OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

ZİYA ÖZGÜR YAZICI

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Seramik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aydın Doğan

2003, 89 sayfa

Genellikle düşük kaybı gösteren yüksek Q değeri transdüser uygulamalarında aranan özelliktir. Ancak, aynı zamanda sualtı akustik uygulamaları için geniş bant aralığı da istenilen özelliktir. Bundan dolayı Q değeri geniş bant aralığı elde etmek için düşük olmalıdır. Cymbal transdüser hidrofona olarak en yüksek yaralılığa ve de sualtı projektör uygulamalarında büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak standart cymbal transdüserin Q'su 10'dan büyüktür ve bu transdüser için bir dezavantajdır. Bu incelemede cymbal transdüserin kapaklarının altındaki cavity boşluk visko-elastik bir sönümlenmeye neden olması için polimerik bir malzeme ile kısmen doldurulmuştur. Buna ek olarak, zil tipi transdüserin diğer karakteristikleri de incelenmiştir. Bu karakteristik özellikler deplasman, kuvvet ve rezonans frekansıdır. Transdüserde farklı kapak kalınlığı, oyuk çapı, oyuk derinliği, düz yüzey çapı ve piezoelektrik disk çapı kullanılarak özellikler değiştirilebilmektedir Tüm deneysel çalışmalar ANSYS FEM kodlarıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, geometrik boyutların değiştirilmesiyle karakteristiklerin değiştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Esnek Transdüserler, Tepkileyciler, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DESIGN OPTIMIZATION OF COMPOSITE CYMBAL TYPE PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BASED ON CAP GEOMETRY

ZIYA ÖZGÜR YAZICI

**Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Ceramic Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aydın Doğan
2003, 89 pages**

In general, high Q is a desired property for transducer application, which is the indication of low loss. However, for the underwater acoustic applications wide bandwidth also is a desired property. Therefore, the Q values should be low to achieve wide bandwidth. Cymbal transducer has the highest figure of merit as a hydrophone and as well as huge potential for underwater projector applications. However, Q of the standard cymbal transducer is bigger than 10 and it is a disadvantage of this transducer. In this investigation, cavity beneath the metal endcaps of the cymbal transducer were partially filled with polymeric media to cause visco-elastic damping. In addition, the other characteristics of cymbal transducer were investigated. These characteristics are displacement, generative force and resonance frequency. It is possible that these properties can be changed when using different endcap thickness, cavity diameter, cavity depth, flat surface diameter and piezoelectric disk thickness. All the experiments were performed with ANSYS FEM codes. As a result, it was seen that characteristics were changed with changing geometric size.

Keywords: Flextensional Transducer, Actuators, FEA

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım sırasında gstermiŐ olduğu yardımlarından ve anlayıŐından dolayı danışman hocam Doç.Dr. Aydın DOĞAN'a teşekkür ederim. Bilgisayar konusunda ve diğer konulardaki destek, yardım ve arkadaŐlıĐından dolayı ArŐ.Gör. Erman Üzgür'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalıŐmalarım esnasında destek ve anlayıŐlarından dolayı hocalarım Prof. Dr. Ö. Faruk EMRULLAHOĞLU, Doç.Dr. Servet TURAN, Yrd.Doç.Dr. Ender SUVACI, Yrd.Doc.Dr. Ali KARTAL ve Yrd.Doç.Dr. Atilla EVCİN'e ve ayrıca çalışma arkadaşlarım ArŐ. Grv. Betül EMRULLAHOĞLU ve ArŐ. Grv. Süleyman AKPINAR'a sonsuz teŐekkürler.

Bu çalışmada maddi ve manevi bana büyük destek veren aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | ix |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Elektroseramikler | 1 |
| 1.1.1 Piezoelektrik Özellik | 2 |
| 1.1.2 Polarizasyon | 7 |
| 1.1.2.1. Elektronik Polarizasyon | 7 |
| 1.1.2.2. İyonik Polarizasyon | 7 |
| 1.1.2.3. Moleküler Polarizasyon | 8 |
| 1.1.2.4. Yerel Yük Polarizasyonu | 8 |
| 1.1.3 Piezoelektrik Seramiklerin Uygulama Alanları | 9 |
| 1.1.4.Kompozit Yapılar | 11 |
| 1.1.5. Transdüserler | 13 |
| 1.1.5.1. Bir Sistemin Parçası Olarak Transdüserler | 15 |
| 1.1.5.2. Sualtı ve Hava Transdüserleri | 16 |
| 1.1.5.3. Hilal ve Zil Tipi Transdüserler | 18 |
| 1.2. Sonlu Elemanlar Analizi Teorisi | 23 |
| 1.2.1. Ortak Alan Analizi | 24 |
| 2. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE BULGULAR | 27 |
| 2.1. Amaç | 27 |
| 2.1.1. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme | 28 |
| 2.1.1.1. Kullanılan Program ve Dosyaları | 28 |
| 2.2. Polistrenli Zil Tipi Transdüserde Boyutların Deplasmana Etkileri | 34 |
| 2.2.1. Metal Kapak Kalınlığının Deplasmana Etkisi | 34 |
| 2.2.2. Oyuk Çapı Değişiminin Deplasmana Etkisi | 37 |
| 2.2.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Deplasmana Etkisi | 39 |
| 2.2.4. PZT Kalınlığı Değişiminin Deplasmana Etkisi | 40 |

İÇİNDEKİLER (Devam)

| | |
|--|-----------|
| 2.2.5. Düz Yüzey Çapının Deplasmana Etkisi | 42 |
| 2.3. Boyut Değişimlerinin Oluşan Kuvvete Olan Etkisi. | 44 |
| 2.3.1. Kapak Kalınlığı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi | 44 |
| 2.3.2. Oyuk Çapı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi | 46 |
| 2.3.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi | 47 |
| 2.3.4. Düz Yüzey Çapı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi | 48 |
| 2.3.5. PZT Disk Kalınlığı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi | 50 |
| 2.4. Boyutlardaki Değişiminin Rezonans Frekansına Olan Etkisi | 51 |
| 2.4.1. Kapak Kalınlığı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi | 51 |
| 2.4.2. Oyuk Çapı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi | 53 |
| 2.4.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi | 55 |
| 2.4.4. Düz Yüzey Çapı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi | 57 |
| 2.4.5. PZT Kalınlığı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi..... | 59 |
| 2.5. Zil Tipi Transdüser Polimer Malzeme Yerleştirilmesinin Transdüser Özelliklerine Etkisi..... | 60 |
| 2.5.1. Kapaklar Arasına Yerleştirilen Polimer Malzemenin Transdüserin Özelliklerine Etkisi..... | 63 |
| 2.5.2. Kapakların Düz Yüzeyine Konulan Polimer ve Metalik Bir Malzemenin, Zil Tipi Transdüserin Özelliklerine Olan Etkisi | 67 |
| 2.5.3. Zil Tipi Transdüser Yanal Baskı Kuvveti Uygulandığında Transdüserin Özelliklerinde Meydana Gelen Değişimler.... | 71 |
| 2.5.4. Üst Yüzeyin Boyutu Sabit Tutulurken Polistren Yarıçapının Değiştirilmesiyle Elde Edilen Sonuçlar..... | 74 |
| 3. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 80 |
| 4. KAYNAKLAR DİZİNİ | 82 |
| 5. EKLER | 86 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| 1.1. Simetri merkezli Cisimler..... | 3 |
| 1.2. Piezoelektrik bir malzemedeki polarizasyon doğrultusu..... | 4 |
| 1.3. Kutuplama sonunda, malzemedeki kalıcı polarizasyon..... | 4 |
| 1.4. Kutuplanmamış yapı ve elektrik alan ile yapıdaki yönlenme..... | 5 |
| 1.5. Kalıcı polarizasyon ve kalıcı gerilim..... | 5 |
| 1.6. Çok tabakalı ve bimorf tepkileyciler..... | 15 |
| 1.7. Ölçüm veya bilgi-işlemci sisteminin temel bileşenleri..... | 18 |
| 1.8. Hilal-tipi transdüserin kesit görünümü..... | 19 |
| 1.9. Seramik-metal zil tipi (cymbal) tepkileyici yapısı..... | 20 |
| 1.10. Zil ve Hilal tipli transdüserler için eş devre..... | 22 |
| 1.11. Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı ve nodlar..... | 24 |
| 2.1. Modellenen transdüserin meshing görüntüsü..... | 30 |
| 2.2. Kapakları arasına polimer yerleştirilmiş zil tipi transdüser..... | 31 |
| 2.3. Standart boyutlardaki zil tipi transdüser..... | 31 |
| 2.4. Zil tipi transdüserde deplasman dağılımı..... | 32 |
| 2.5. Polimer ilaveli cihazda deplasman davranışının kapak kalınlığının artışıyla olan ilişkisi..... | 33 |
| 2.6. Standart zil tipi transdüserde kapak kalınlığı-deplasman ilişkisi..... | 35 |
| 2.7. Polimer ilaveli zil tipi transdüserde deplasman – oyuk çapı değişim grafiği..... | 37 |
| 2.8. Standart zil tipi transdüserde oyuk çapı-deplasman ilişkisi..... | 38 |
| 2.9. Deplasman ve artan oyuk derinliği arasındaki ilişki..... | 39 |
| 2.10. Standart zil tipi transdüserde oyuk derinliğine bağlı olarak elde edilen deplasman değerleri..... | 40 |
| 2.11. Polimerli zil tipi transdüserde PZT disk elemanın kalınlığının transdüser deplasmanına olan etkisi..... | 41 |
| 2.12. Standart zil tipi transdüserde PZT kalınlığı-deplasman ilişkisi..... | 42 |
| 2.13. Kapaklar arasında polimer bulunana transdüserde düz yüzey çapının deplasmanla olan ilişkisi..... | 43 |
| 2.14. Standart zil tipi transdüserde düz yüzey çapı-deplasman ilişkisi..... | 44 |
| 2.15. Artan metal kapak kalınlığı ve elde edilen kuvvet arasındaki ilişki..... | 45 |
| 2.16. Artan oyuk çapı ile elde edilen kuvvet ilişkisi grafiği..... | 47 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| | |
|--|----|
| 2.17. Kapak altında kalan boşluğun derinliğine bağlı olarak elde edilen kuvvet grafiği..... | 48 |
| 2.18. Transdüserin düz yüzey çapındaki değişiminin uygulanan kuvvete olan etkisi..... | 49 |
| 2.19. Piezoelektrik seramik diskin (PZT) kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet grafiği..... | 50 |
| 2.20. Kapak kalınlığı – Rezonans frekansı grafiği..... | 51 |
| 2.21. Standart zil tipi transdüser için kapak kalınlığının değişimiyle elde edilen ilk rezonans frekans değişim grafiği..... | 52 |
| 2.22. Polimerli zil tipi transdüserin oyuk çapı ile rezonans frekansı ilişkisi grafiği..... | 54 |
| 2.23. Standart zil tipi transdüserde oyuk çapının artırılmasıyla bulunan ilk rezonans frekansı..... | 54 |
| 2.24. Oyuk derinliği ile ilk rezonans frekansı arasındaki ilişkisi..... | 55 |
| 2.25. Standart zil tipi transdüserde oyuk derinliğinin rezonans frekansına etkisi..... | 56 |
| 2.26. Artan düz yüzey çapı ile hesaplanan ilk rezonans frekanslarındaki değişim..... | 58 |
| 2.27. Standart zil tipi transdüserde artan düz yüzey çapı ile ilk rezonans frekanslarındaki değişim..... | 58 |
| 2.28. PZT kalınlığı – Rezonans frekansı grafiği..... | 59 |
| 2.29. Standart zil tipi transdüserde rezonans frekansının PZT kalınlığı ile olan ilişkisi..... | 60 |
| 2.30. Admitans spektrasından bir görünüm..... | 62 |
| 2.31. Zil tipi transdüserin iki boyutlu aksi-simetrik yarısının basit modeli..... | 63 |
| 2.32. Polimerik iki farklı malzemenin zil tipi transdüserin kapakları arasına konulmasıyla ‘k’ değerlerinde meydana gelen değişim grafiği..... | 64 |
| 2.33. Hesaplanan Q değerlerinin transdüserin kapakları arasına konulan polimerin yarıçapı ile olan ilişkisi..... | 65 |
| 2.34. Yarıçap ile ilk rezonans frekansı (f_r) arasındaki ilişki..... | 66 |
| 2.35. Düz yüzeyine kütle yerleştirilmiş zil tipi transdüserin 2 boyutlu basit modeli..... | 67 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| | |
|---|----|
| 2.36. Düz yüzeye yerleştirilen kütlelerin yarıçapına bağlı olarak hesaplanan k değerlerinin grafiği..... | 68 |
| 2.37. Kütle yarıçapı ile transdüserin Q ilişkisi..... | 69 |
| 2.38. Yarıçap-ilk rezonans frekansı değişim grafiği..... | 70 |
| 2.39. Yanal kuvvetin zil tipi transdüser üzerindeki gösterimi..... | 71 |
| 2.40. Yanal kuvvet uygulandığında, yarıçap ve ilk rezonans frekansı arasındaki ilişki..... | 72 |
| 2.41. İlk rezonans frekansında meydana gelen değişimler..... | 73 |
| 2.42. Polistren yarıçapına bağlı olarak Q değerlerinde meydana gelen düşüşü gösteren ilişki..... | 73 |
| 2.43. Deplasman – Polimer yarıçapı ilişkisi (Düz yüzey boyutu sabit)..... | 74 |
| 2.44. Polimer yarıçapının artışına bağlı olarak elde edilen rezonans frekansında gözlenen artış grafiği | 75 |
| 2.45. Polimer yarıçapının armasıyla birlikte k değerlerinde meydana gelen değişim..... | 76 |
| 2.46. Polimer yarıçapının armasıyla birlikte Q değerlerinde meydana gelen değişim..... | 76 |
| 2.47. Düz yüzey üzerine yerleştirilen kütlelerin transdüserin frekans değerlerindeki etkileri..... | 77 |
| 2.48. Kapakların altında kalan boşluğa yerleştirilen polimerlerin transdüserin frekans değerlerindeki etkileri..... | 78 |
| 2.49. Düz yüzey boyutu sabitken polistren yarıçapının artırılmasıyla elde edilen frekanslardaki değişimler..... | 79 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| 1.1. Piezoelektrik özellik sergileyen kristaller..... | 8 |
| 1.2. Sensör uygulamaları ve avantajları..... | 12 |
| 1.3. Standart hilal ve zil tipi transdüserlerin boyutları..... | 20 |
| 2.1. Modellenen transdüser için temel boyutlar..... | 32 |
| 2.2. Modellenen transdüserde kullanılan malzemeler ve özellikleri..... | 33 |
| 2.3. Kapak kalınlıklarının değiştirilmesiyle transdüserin üst/alt merkez noktasında elde edilen deplasman değerleri..... | 36 |
| 2.4. Kapaklar ve PZT disk arasında bulunan boşluğun çapının değiştirilmesiyle elde edilen deplasman değerleri..... | 38 |
| 2.5. Oyuk derinliğinin artmasıyla transdüserin deplasmanında görülen değişim değerleri..... | 39 |
| 2.6. PZT disk kalınlığının deplasmana olan etkisiyle ortaya çıkan sayısal veriler..... | 41 |
| 2.7. Düz yüzey çapının artışıyla deplasmandaki değişimler..... | 43 |
| 2.8. Kapak kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet değerleri..... | 45 |
| 2.9. Oyuk Çapının değişik boyutlardaki durumunda düz yüzeyde elde edilen kuvvet değerleri..... | 46 |
| 2.10. Oyuk derinliğinin transdüserin Düz yüzeyindeki nod'lara uygulanan kuvvet değerleri..... | 47 |
| 2.11. Düz yüzey çapının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet değerleri..... | 49 |
| 2.12. Piezoelektrik seramik disk kalınlığının değiştirilmesiyle ulaşılan kuvvet değerleri..... | 50 |
| 2.13. Kapak kalınlığının değişimiyle elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri..... | 52 |
| 2.14. Farklı oyuk çaplarındaki rezonans frekansındaki değişim değerleri..... | 53 |
| 2.15. Transdüserin oyuk çapının değiştirilmesiyle elde edilen rezonans frekansı değerleri..... | 56 |
| 2.16. Düz yüzey çapının artırılmasıyla elde edilen rezonans frekansı değerleri..... | 57 |
| 2.17. Farklı kalınlıklarda PZT disk kullanımının getirdiği ilk rezonans frekansı değerleri..... | 59 |
| 2.18. Artan polimer yarıçapına karşılık k sayısal verileri..... | 64 |

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

| | |
|---|----|
| 2.19. Polimer yarıçapının artırılmasıyla hesaplanan Q değerleri..... | 65 |
| 2.20. Polimer yarıçapının artırılmasıyla elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri..... | 66 |
| 2.21. Düz yüzeye yerleştirilen kütlelerin yarıçapına bağlı olarak hesaplanan k değerleri..... | 68 |
| 2.22. Düz yüzeye polistren ve tungsten konulmasıyla elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri..... | 70 |
| 2.23. Yanal kuvvet uygulandığında yarıçapa bağlı olarak hesaplanan değerler..... | 72 |

1. GİRİŞ

Binlerce yıldan beri seramikler insan hayatının çeşitli aşamalarında vazgeçilmez sıfatıyla anılan birkaç malzemeden biridir ve günlük yaşamın bir parçası olmaya devam etmektedir. Buna rağmen seramikler teknoloji dünyası açısından son yüzyılda önem kazanmıştır. Kompleks yapıda olmaları, ideal malzemelere göre teorik araştırmalara daha az elverişli olmalarına rağmen, teknoloji çağında elektronik devreler, sensörler, hoparlörler, ultrasonik temizleyiciler ve tıbbi teşhis cihazlar gibi aygıtlarda ana eleman olarak kullanılmaları seramiklerin göz ardı edilemez önemini ortaya koymaktadır. Günümüzde geleneksel seramiklerin üretimleri ve özellikleri açısından da teknolojik yaklaşımlarla birlikte incelenmeleri ve geliştirilmeleri sayesinde seramikler günlük hayatı destekleyen ve insan sağlığını koruyan malzeme olmaya devam edecektir.

Seramikler çok çeşitli polikristalin maddeler içerebilirler. Bu maddeler özel olarak formülize edilmiş kompozisyonlardan hazırlanır, kontrollü şartlar altında işlenir ve belirli özelliklere, özellikle de istenilen elektriksel özelliklere sahip şekilde kompleks olarak üretilirler. Bunlara örnek olarak; yalıtkanlar, kapasitörler, piroelektrikler, piezoelektrikler ve elektro-optik seramikler verilebilir.

1.1 ELEKTROSERAMİKLER

Metallerin elektriksel iletkenliklerinin iyi olmasının yanında önemli manyetik özellikler de gösterirler. Polimerler genellikle elektriksel açıdan yalıtkanlardır. Bununla birlikte seramikler, elektriksel iletkenlik (yarı iletkenlik), yalıtkanlık, manyetik ve dielektrik özellikler gibi geniş bir çeşitlilikte önemli elektriksel özellikler gösterirler. Bu çeşitlilik kimyasal kompozisyon, kristal yapı, mikroyapı ve sentez metodu çeşitliliklerinden dolayı ortaya çıkabilir.

Katı solüsyon oluşumu ile elektriksel özelliklerin kontrol edilebilme özelliği seramiklerin yegane özelliklerinden birisidir. Temelde, elektriksel özellikler atomlar ve atomların kombinasyonları ile kristal yapı tarafından ortaya çıkarılır. Böylece elektriksel özellikler bu iki faktörle belirlenmektedir. Fakat, katı solüsyon oluşumu adıyla anılan, bir atomu diğerinin yerine

kullanılması ile elektriksel özellikleri tamamen değiştirmek mümkündür. Yerdeğiştirmenin derecesi ayarlanarak elektriksel özelliklerdeki değişim miktarı da kontrol edilebilmektedir. Örnek olarak minor ilavelerinin katılmasıyla latis hatalarının oluşumuna bağlı olarak elektriksel iletkenliklerdeki değişim ve manyetik atom dağılımı kontrolüyle spinel ferritlerin manyetik karakteristiklerindeki değişim verilebilir. Mikroyapının kullanılmasıyla elektriksel özelliklerin kontrol olasılığı diğer bir yegane yönüdür. Sinterlenmiş polikristalin bünye taneler, tane sınırları, porlar ve yüzeyler içeren karmaşık bir mikroyapıdan meydana gelir ve bundan dolayı tek kristalin gösterdiği elektriksel özelliklere göre önemli değişik özellikler gösterir.

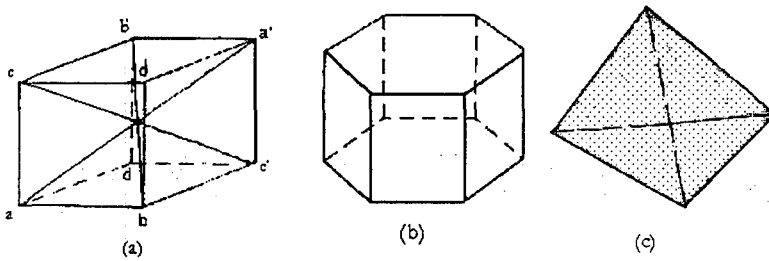
Tüm bunların yanında, seramik malzemelerde tane sınırlarının da önemi büyüktür. Biçimsel olarak, tane sınırları iki boyutlu uzanmış hatalardır ve oksit seramikler gibi polikristalin katılardaki özdeş kristal taneler arasındaki arayüzeyi oluşturur. İyi incelendiğinde ve teknolojik olarak kontrol edildiğinde, tane sınırlarının, malzeme mühendislerine daima ilave bir serbestlik derecesi sunan eşsiz elektriksel özellikleri tanımladığı bilinir. Tane sınırlarının benzersiz özellikleri, örnek olarak; (1) yığınkinden tamamen farklı hal dağılım yoğunluğu sergileyen elektronik arayüzey halleri, (2) dopinglerin segregasyonu ve hetero-bileşenlerle dekorasyon, (3) iyonlar ve/veya elektronik yük taşıyıcılar için yüksek anizotropik taşınım özellikleri ve (4) piezoelektrik ve elektrostriktif malzeme sabitleri yoluyla elektriksel özelliklere bağlanabilen taneler arasındaki elastik gerilimlere bağlıdır. Tane sınırlarının özellikleri elektroseramiklerin pratikteki kullanımı üzerinde hakimdir. Çok tabakalı kapasitör dielektrik seramiklerde, tane sınırları yüksek izolasyon direnci ve uzun servis süresi kararlılığı sağlar. Dielektrik uygulamalar için ferroelektrik seramiklerde, tane sınırları ve domain'ler arasındaki etkileşim tüm permitivite ve sıcaklığa olan bağımlılığın ayarlanmasını sağlar [1].

1.1.1. Piezoelektrik Özellik

Bazı malzemelerin tek kristallerinde mekanik bir gerilim uygulandığında polarizasyon meydana gelir. Kristalin bir yanı net bir pozitif şarj meydana getirirken, diğer tarafı net bir negatif şarj oluşturur. Bu etki piezoelektriklik olarak anlam kazanmıştır. Piezoelektriklik terimi literatürde

basınç elektriği olarak açıklanmıştır. Bir basıncın uygulanışı ölçülebilir elektriksel potansiyelle sonuçlanır. Ters olarak elektriksel bir alanın uygulanması çok küçük bir mekanik deformasyonu getirmektedir. Piezoelektrik davranış piezoelektrik seramiklerin ultrasonik cihazlarda transdüserler, mikrofonlar, pikaplar, hız ölçerler, sonarlar gibi kullanımlarını önemli derecede genişlemesine neden olmaktadır.

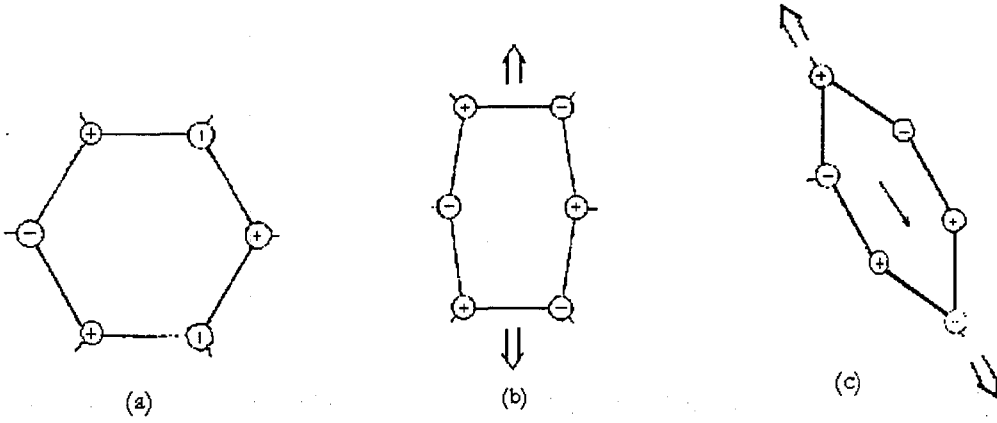
Piezoelektrik etki Pierre ve Jaques Curie tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir. Kuvars, çinko blend (sfalerit) borasit, turmalin, topaz, şeker, ve Rochelle tuzu piezoelektrik özellik gösteren kristallerdir. Tüm bu kristallerin ortak olduğu bir nokta vardır. Hiçbirinin simetri merkezi yoktur. Simetri merkezi kavramı şöyle açıklanır; eğer hayali bir çizgi kristalin herhangi bir yüzeyindeki noktadan merkezine doğru geçiyorsa ve çizgi merkezin ilerisinde eşit mesafeye kadar uzatıldığında benzer bir nokta ile kesişiyorsa, kristalin simetri merkezi vardır. Şekil 1.1.(a)'da bu olay basit bir kübün merkezinde gösterilmektedir. a ve a' arasındaki çizgi bu nokta tarafından iki eşit parçaya ayrılır [2]. Benzer şekilde, b-b', c-c' ve d-d' arasındaki çizgi bu merkezde kesişmektedir. Böylece, basit küpün simetri merkezi olduğu ortaya çıkar. Şekil 1.1.(b)'de basit hegzagonal prizmanın zıt köşelerinden hayali çizgiler çekildiğinde, simetri merkezinde kesiştiği görülür. Tetrahedron için durum farklıdır, aynı şekilde hayali çizgiler çekilemez [Şekil 1.1.(c)]. Bundan dolayı, tetrahedronun simetri merkezi yoktur.



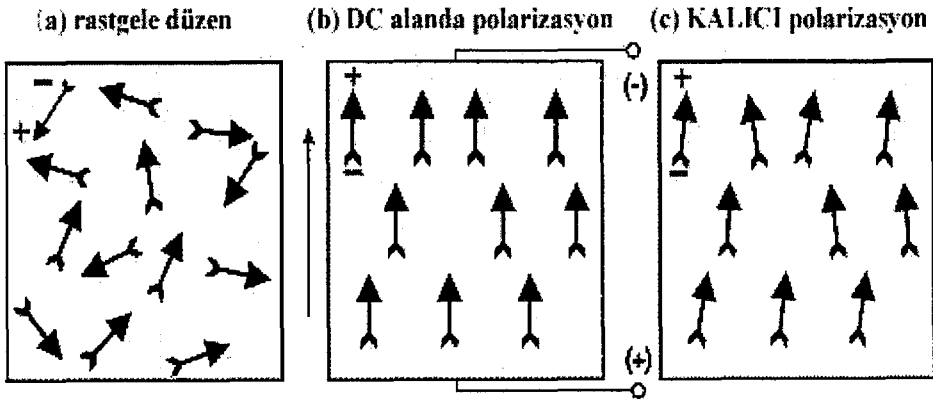
Şekil 1.1 Simetri merkezli cisimler (a) Simetri merkezli basit küp, (b) basit hegzagonal prizma ve (c) simetri merkezi olmayan tetrahedron

Bu nedenle sadece, simetri merkezi olmayan anizotropik kristaller piezoelektriktir. Buna rağmen bile, her doğrultuda piezoelektrik değildirler

(Şekil 1.1)[2]. Gerilim uygulanmamış yapı Şekil 1.2.(a)'da gösterilmektedir [2]. Pozitif ve negatif yükler eşit olarak dağılmıştır, bundan dolayı her doğrultuda birbirleriyle dengededirler ve herhangi bir polarizasyon gözlenmez. Uygulanan bir gerilim altındaki deforme olmuş yapı (b) ve (c)'de gösterilmektedir. (b)'de atomlar yerdeğiştirmesine rağmen pozitif ve negatif yükler eşit şekilde dağılmakta olduğundan polarizasyon meydana gelmez. Ancak, (c)'de uygulanan gerilim polarizasyon oluşturduğu için piezoelektriklik ortaya çıkmaktadır.

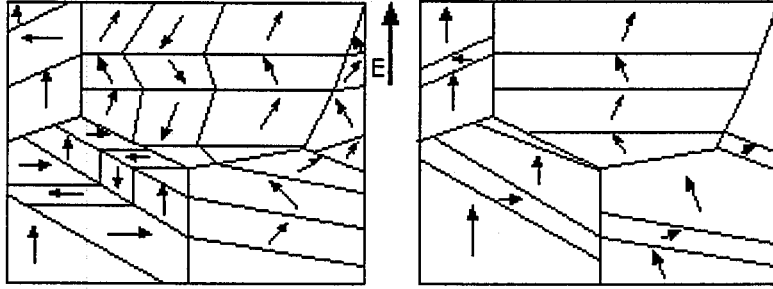


Şekil 1.2 Piezoelektrik bir malzemedeki polarizasyon doğrultusu. (a) gerilim uygulanmamış polarizasyonu olmayan malzeme, (b) gerilim altında deforme olmuş fakat polarizasyon sergilemeyen malzeme, (c) gerilim altında polarizasyon sergileyen malzeme

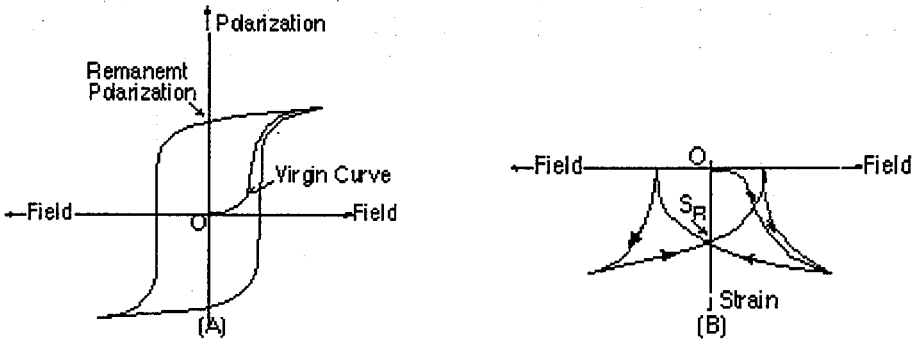


Şekil 1.3 Kutuplama sonunda, malzemedeki kalıcı polarizasyon

Seramik malzemeler rastgele düzende kristaller veya tanelerden meydana gelir, herbirinde bir veya birkaç domain bulunur. Rastgele düzenli dipollerle, malzeme izotropiktir ve piezoelektrik etki sergilemez. Elektrotlar ve kuvvetli DC elektrik alan uygulanmasıyla, dipoller alana paralel olarak sıralanırlar, bundan dolayı malzeme kalıcı bir polarizasyona sahip olacaktır (Şekil.1.3-4). Kutuplama sonunda, malzeme kalıcı polarizasyon ve kalıcı gerilime sahip olur [Şekil 1.5.(a)-(b)]



Şekil 1.4 Kutuplanmamış yapı ve elektrik alan ile yapıdaki yönelme



Şekil 1.5 (a) Kalıcı polarizasyon ve (b) kalıcı gerilim

“Kutuplanmış” seramik bir gerilime maruz kaldığında, kristal latis veya taneler bazı domainlerin sebep olduğu bozulma gösterir. Bu, malzemenin toplam momentini değiştirir. Belirli bir aralıktaki gerilimle, bu dipol momentini değişimi piezoelektrik özelliğe neden olmaktadır.

Gerilim veya gerinim altında polarizasyon dönüşümü sayesinde elektrik voltajı üreten veya polarizasyon gösteren dielektrik seramiklere piezoelektrik seramikler adı verilir ve yaygın olarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmede veya tam tersi şekilde kullanılmaktadır. Gerilim

polarizasyonu, elektrik alan veya bir gerilimin doğrultusuna paralel olarak üretildiği zaman, piezoelektrik eşitlikler aşağıdaki gibi verilebilir;

$$S = s^T T + d_{33} E \quad (1.1)$$

$$D = d_{33} T + \varepsilon^T E \quad (1.2)$$

S^E , ε^T ve d_{33} sırasıyla, sabit elektrik alandaki E elastik komplians (young's modülünün tersi), sabit stresteki T, dielektrik sabiti ve piezoelektrik katsayısıdır (CN^{-1}). d_{33} , gerilim olmadan birim elektrik alandan kaynaklanan gerinimdir. Bir gerilim uygulandığı zaman, elektrik alana neden olur. Bu alanın büyüklüğü;

$$E = -(d_{33} / \varepsilon^T) T \quad (1.3)$$

ile ifade edilir. Diğer yandan, bir elektrik alan uygulandığında, bir gerilime neden olur ve değeri;

$$T = -(d_{33} / S^E) E \quad (1.4)$$

ile belirlenir. S^E ve ε^T 'nin değerleri uygulanan gerilim ve elektrik alan ile değişim gösterir.

Elektromekanik kombinasyon katsayısı; k, elektrik ve mekanik enerjiler arasındaki dönüşümde verimi ifade etmektedir. Uygulanan elektrik enerjisi oranından ($\varepsilon^T E^2 / 2$) ortaya çıkan mekanik enerjiye ($S^E T^2 / 2$) olan ilişki aşağıdaki gibidir:

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 / \varepsilon^T S^E \quad (1.5)$$

Günümüz piezoelektrik seramikleri temelde $PbZrO_3 - PbTiO_3$ arasındaki katı solüsyondan meydana gelmektedir ve PZT adıyla anılmaktadırlar. $PbTiO_3$ yüksek dielektrik zorlayıcı kuvvetli ferroelektrik bir malzemedir ve $PbZrO_3$ antiferroelektrik bir malzemedir. Rombohedral ve tetragonal fazlar arasındaki faz sınırı $Zr / Ti = 53 / 43$ civarında bulunmaktadır. Elektromekanik kombinasyon ve piezoelektrik katsayılar burada yüksek değerdedirler. Bu faz

sınırı sıcaklıktan bağımsız olduğu için, yüksek piezoelektrik sabiti kararlı olarak uygulanabilir.

Bundan başka, piezoelektrik karakteristikleri; elektromekanik kombinasyon katsayısı geliştirmede Nb, Ta ve La ilavesi; dielektrik zorlayıcı kuvvet geliştirmede Cr, Fe ve Mn ilavesi ile kontrol edilebilir [3].

1.1.2. Polarizasyon

Elektrik dipollerin yönlenmesi olayına polarizasyon adı verilir. Bir malzemeye elektrik alan uygulandığında atomik veya moleküler yapı içerisindeki dipoller uyarılır ve elektrik alanla aynı yönde yönlenirler. Bununla birlikte, malzeme içerisinde mevcut olan dipoller de alanla aynı yönde yönlenirler. Böylelikle malzeme polarize olmuş olur. Polarizasyon aşağıdaki ifade ile gösterilebilir:

$$P = z \cdot q \cdot d \quad (1.6)$$

P: polarizasyon (C/m^2)

z : Kübik metre başına yer değiştiren yük merkezlerinin sayısı

q : Elektronik yük

d : dipolün pozitif veya negatif değerliği arasındaki yer değiştirme

1.1.2.1. Elektronik Polarizasyon

Atom içerisindeki çekirdeğin etrafındaki elektronlar elektrik alan uygulandığında (+) elektrot yönünde, çekirdek ise (-) elektrot yönünde çok az yer değiştirirler. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında elektronlar ve çekirdekler buldukları eski hallerine geri dönerler ve polarizasyon ortadan kalkar. Bu durum elektriksel gerilmede gözlenen duruma benzer. Elektronik polarizasyonda yüklerin yer değiştirme miktarı oldukça düşüktür ve bu nedenle diğer polarizasyon mekanizmaları ile karşılaştırıldığında toplam polarizasyon miktarı düşüktür. Bu tip polarizasyon tüm dielektrik malzemelerde oluşur.

1.1.2.2. İyonik Polarizasyon

İyonik polarizasyona atomik polarizasyon da denir. Elektrik alan uygulandığında kristal yapı içerisindeki atomların veya iyonların yer

değiştirmesidir. Örneğin, iyonik bağlı malzemelere elektrik alan uygulandığında iyonlar arasındaki bağlar iyonların yönlmesi sonucu elastik deformasyona uğrar. Bunun sonucunda yapı içerisindeki gözler anlık olarak yeniden dağılırlar. Uygulanan elektrik alan yönüne bağlı olarak katyon ve anyonlar birbirine yaklaşır veya uzaklaşırlar. Bu mekanizma ile kristal yapıya, katı eriyiğin mevcudiyetine ve diğer faktörelere bağlı olarak çok farklı polarizasyon etkileri oluşturabilir. Dielektrik malzemeler konusunda kastedilen polarizasyon mekanizması bu tür polarizasyondur.

1.1.2.3. Moleküler Polarizasyon

Sürekli kutuplu asimetrik moleküllerde kutuplar elektrik alan etkisiyle yönlir. Bazı malzemeler doğal dipoller içermektedir. Bu malzemelere elektrik alan uygulandığında dipoller uygulanan alana uygun olarak yönlirler. Elektrik alan kaldırıldığında dipoller yönlmiş olarak kalırlar ve kalıcı polarizasyon meydana gelir. Sürekli dipoller su ve asimetrik merlere sahip organik polimerlerde mevcuttur. Örneğin, suda hidrojen ve oksijen atomları arasındaki kovalent bağlar yönseldir. Molekülün hidrojen tarafı net (+) yüke, oksijen tarafı da (-) yüke sahiptir. Elektrik alan uygulandığında hidrojen tarafı (-) elektrota, oksijen tarafı da (+) elektrota yönlir.

1.1.2.4. Yerel Yük Polarizasyonu:

İletken parçacıklar içeren yalıtkanlarda serbest elektronların etkisi ile yer değiştirerek kutup oluşturulur. Malzeme içerisinde normalde safsızlıkların mevcudiyeti sonucunda fazlar arasındaki ara yüzeylerde yükler oluşabilir. Bu yükler malzeme elektrik alan etkisinde kaldığında hareket eder. Bu tip polarizasyon çoğu yaygın dielektrik malzemelerde önemli bir faktör değildir.

Çizelge 1.1. Piezoelektrik özellik sergileyen kristaller

Kuvars

BaTiO₃, Pb(Zr,Ti)O₃, K₂NbO₃

Diğer birçok perovskit yapılı titanatlar, niobatlar ve tantalatlar

Çizelge 1.1. (Devam) Piezoelektrik özellik sergileyen kristaller

Rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Guanidin alüminyum sülfat hidrat

$\text{NiSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

ZnS, CdS

ZnO

GaAs

Bi_2WO_6 , BiTiNbO_9

KH_2PO_4

LiNbO_3

SbSI

BaCoF_4

HCl

NaNO_2

Triglisin Sülfat

Lityum Sülfat

Tourmalin

1.1.3. Piezoelektrik Seramiklerin Uygulama Alanları

Piezoelektrik seramiklerin uygulama alanları çok geniş bir konu haline gelmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle piezoseramiklerin uygulama çeşitlilikleri de gün geçtikçe artmaktadır. Tablo.1.1'deki piezoelektrik özellik gösteren malzemelerden sonra, örnek olarak aşağıdaki uygulamalar da verilebilir.

1. Yüksek voltaj jeneratörleri (yanma amaçlı)
 - Gaz cihazları
 - Sigara çakmakları
 - Patlayıcılar için kaynaklar
2. Yüksek güç ultrasonik jeneratörleri
 - Ev ve endüstriyel kullanımlar için ultrasonik temizleme

- Eko ses
 - Plastik ve metallerin ultrasonik kaynaklanması
 - Kırılgan malzemelerin ultrasonik delinmesi ve işlenmesi
 - Ultrasonik lehimleme
3. Ses ve sesüstü transdüserler
- Akış ölçerler
 - Mikrofonlar
 - Hırsız alarmları
 - Uzaktan kumandalar
 - Park asistanları
4. Sensörler
- Hız ölçerler
 - Tıbbi donanımlar
 - Arabalarda hava yastığı sensörleri
 - Viskozite ve seviye ölçerler
5. Actuatörler
- İnkjet yazıcılar
 - Sabit disk sürücüler
 - Tekstil makinaları
 - Piezo motorlar
 - Mikro pompalar ve valflar
6. Düğmeler ve klavyeler
- Tele-yazıcılar
 - Hesap makinaları ve elektronik bilgisayarlar
 - Telefonlar

Transdüserler bir enerjiyi diğer bir enerjiye dönüştüren geniş hassasiyeteki aygıtlardır. Elektro akustik transdüserler elektriksel enerjiyi

akustik enerjiye veya tam tersi şekilde akustik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Elektroakustik transdüserler çok geniş bir kullanım aralığında bulunurlar. Örnek olarak, mikrofonlar, hoparlörler, kontrol sensörleri ve aynı zamanda suda kullanılan transdüserler verilebilir.

Çoğu akustik transdüserin aktif elemanı piezoelektrik seramiklerdir. Bu seramikler elektrik enerjisini ses enerjisine çevirerek veya tam tersi şekilde çalışarak transdüserin kalbi durumundadır. Kuvars ve manyetostriktif malzemelerden yapılan daha önceki piezoelektrik seramikler, piezoelektrik kristaller sualtı transdüserlerinin tasarımında kullanılmıştır. Yüksek piezoelektrik özellikleri ve çeşitli şekil ve boyutlarda üretilme kolaylıklarına bağlı olarak piezoelektrik seramikler transdüserlerin baskın malzemesi olarak yerleşmişlerdir. Genel olarak baryum titanat ($BaTiO_3$) kullanılan ilk piezoelektrik seramiktir. 1960'lardan günümüze şu an en çok işlenen ve üzerinde çalışılan kurşun zirkonat titanat kompozisyonları da kullanılmaktadır.

1.1.4. Kompozit Yapılar

Kompozit malzemeler bir çok yapısal uygulamalarda kullanım alanı bulmuşlardır, fakat elektronik endüstrisinde bağıl olarak kullanımları sınırlı kalmıştır. Kompozitlerin avantajları gibi sensör ve diğer uygulamaların avantajları daha açık hale gelmeye başlamış, bu durumun değişmesi beklenmektedir. Fonksiyonel kompozitler, alan ve kuvvet konsantrasyonlarıyla sonuçlanan birleştirici modeller; kompozit yapının simetrisi ve fiziksel özelliklere bağımlılığı; polikromatik süzme ve bağıl iletim yolları; varistör hareketi ve diğer arayüzey etkileri; porozite ve iç yüzeyin birçok fonksiyonel kompozit malzemesinde oynadığı önemli rolleri içeren temel düşünceleri kullanırlar. Bu düşünceler fonksiyonel sensör ve tepkileycilerin anlaşılmasını sağlamaktadır.

Fonksiyonel kompozitler meydana getirmede önemli bir yaklaşım herbiri ilişkili faz dönüşümlerine sahip olan iki veya daha fazla malzemeleri biraraya getirmektir. Örnek olarak, değişimlere maruz kalan elastik özelliklerindeki faz dönüşümlerine sahip olan polimerik malzemelerin ortak kararsızlığa sahip dielektrik özelliklerinde ferroelektrik bir malzemeye bağlanması verilebilir. İki malzeme iyi özellikler ortaya koyan yapıları meydana

getirmelerine izin veren farklı tiplerde kararsızlığa sahiptir [4]. Piezoelektrik seramikler alanındaki ilerlemeler araştırmacıları, kendi özelliklerini özel uygulamalarda ortaya koymak için belirli davranışlarda beraberce konulan seçilen fazların kombinasyonu ile oluşan kompozit malzemelere doğru yönelmiştir. Kurşun zirkonat titanat (PZT) kuvvetli piezoelektrik özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde çok kullanılan bir fazdır [5]. Piezoelektrik seramik kurşun zirkonat titanat grubu halen çoğu piezoelektrik transduserin temelini meydana getirmektedir. Bunun yanında geniş alan hidrofona uygulamalarında PZT mükemmellikten uzaktadır. Tam konum kontrolünde PZT tipi kompozitler kullanıldığında kutuplanmış halin yaşlanması ve sonuçta boyutların sapması her zaman bir problem haline gelmiştir [6].

Piezoelektrik ve elektrostriktif malzemeler deplasman transducerleri için doğal bir seçimdir. Kolayca kontrol edilebilen bir dış parametre olan elektrik alan tarafından neden olan gerinimi kullanırlar [7].

Tablo 1.2. Sensör uygulamaları ve avantajları

| Proses | Uygulama | Avantajları |
|--|---|--|
| Sensörler : Yapıları ve Malzemeleri | | |
| Yük Hücresi | Endüstriyel: Kuvvet ve Basınç Ölçümü | Yüksek Mukavemet Güvenilirlik ve maliyet etkisi |
| Hız Sensörü ve Hızlandırıcılar | Endüstriyel, otomotiv ve uzay uygulamaları: Hız ve hızlandırıcı ölçümleri Vibrasyon görüntüleme | Dinamik ölçüde yüksek doğruluk Manyetik olmaması Elektriksel olarak uyumlu |
| Tıbbi Gözlem Sistemi | Yapısal: Akustik emisyon belirlenmesi | Kararlılık Potansiyel problemlerin erken teşhisi |

Tablo 1.2. (Devam) Sensör uygulamaları ve avantajları

| Sensörler: Sualtı Uygulamaları | | |
|---------------------------------------|---|--|
| Hidrofonlar | Deniz Biyolojisi: Deniz Hayatı, balıkların, balinaların izlenmesi Tıbbi: Kalp ve çevrim sisteminin incelenmesi | Geniş bant aralığı, Kullanım kolaylığı ve güvenilirliği, Teşhis belirlenmesinde kullanım, Güvenilirlik |
| Diğer Uygulamalar | | |
| Ateşleyiciler | Endüstriyel ve Ticari: Kaynak, barbekü ve çakmaktarda gaz ateşleyicis | Güvenilirlik ve sağlamlık |
| Uzaktan Kumandalar | Ticari: Ticari uzaktan kumandalardaki sensörler | Kullanım kolaylığı ve maliyet etkisi, Kompakt dizayn |
| Mikrofonlar | Ticari: Ses frekanslarının yakalanması | Maliyet etkisi, Manyetik olmaması |

1.1.5. Transdüserler

Piezoelektrik etki, malzemenin mekanik bir gerilime maruz kaldığında kendiliğinden polarizasyon sergileme kabiliyetidir. Malzeme aynı zamanda bir elektrik alan altında mekanik deformasyon göstererek ters bir etki de göstermektedir. Bu özellik Bölüm 1'de açıklanmıştır. Piezoelektrik malzemelerin bu davranışları teknoloji geliştikçe kullanılmaya başlanmıştır. Piezoelektrik özelliğin kullanıldığı cihazlardan birisi de transdüserlerdir. Polikristalin seramik piezoelektrik transdüserler, II.Dünya Savaşı sonrası ilgilenilen ferroelektrik baryum titanat kapasitörlerden ortaya çıkmış ve 1940'larda polarize BaTiO₃ seramik transdüser için R.B.Gray'in patenti önyak olmuştur. Alıcı ve verici iyon katılımının etkisinin detaylı açıklanmasıyla, PZT transdüserlerin modern gruplarının temeli kurulmuştur [6].

Transdüserler kullanıldığı yere bağlı olarak herhangi bir enerji çeşidini belirleyerek kullanır veya belirlediği enerjiyi başka bir enerji türüne dönüştürerek anlaşılabilir hale dönüştürebilen cihazlardır. Transdüserlerin ana

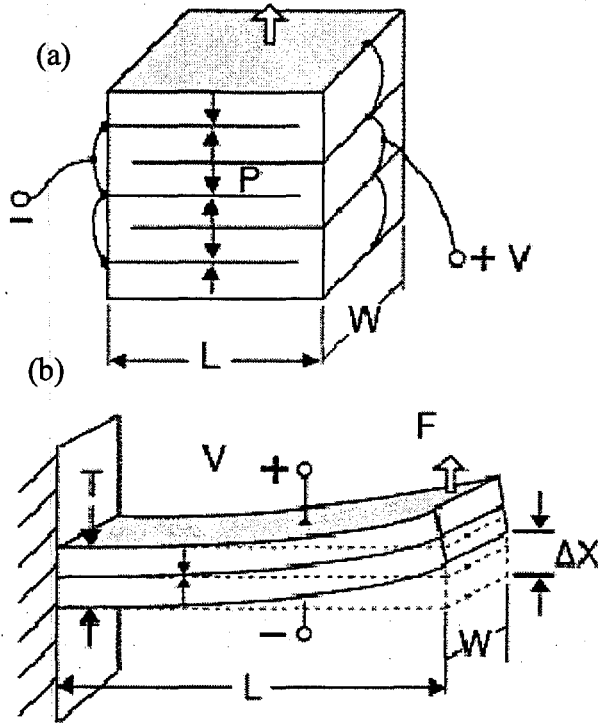
amacı, kontrol veya ölçüm sistemleri için, algıladığı enerjiyi standart birimde bir değere dönüştürmektir. Transdüserler genelde kullandıkları alanlara göre isimlendirilirler: sıcaklık ve ısı akışı ölçümleri için algılayıcı, optik ölçümler için detektör ve kuvvet ölçümleri için yük pilleri isimleri altında kullanılırlar. Birçok sistemde de özel ölçümler için kullanılır ve adlandırılırlar: ivme ölçer, akış ölçer ve ısı ölçer vb. Uygulama alanları çok geniştir ve günlük hayatta hemen hemen her yerde karşılaşılabılır. Robot teknolojisinde, enerji dönüşümlerinde, tarımda, tıbbi alanlarda, askeri ve uzay teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Yüksek teknolojinin en hızlı gelişme sağlayan ürünleridir. Çoğu batı ülkesinde transdüser endüstrisinin gelişimi o ülkenin ekonomik gelişme hızından daha yüksektir. Transdüser teknolojisindeki genel amaç her zaman daha küçük ve daha ucuz transdüser üretimi olmuştur. Son yıllarda ise, doğruluk payı çok yüksek olan, dijital sinyallerle uyumlu transdüserler güncellik kazanmıştır. Ayrıca optik algılayıcılar ve fiber optik sistemler de günümüz teknolojisinde fazlasıyla yer bulmaktadır.

Transdüserler temel olarak iki ana elemandan oluşur. Birinci eleman istenilen enerjiyi algılayan ve dönüştüren elemanlardır. Diğer eleman ise dönüştürülen enerjiyi kullanan, bunu sistemden bir çıktı olarak gösteren veya bu enerjinin miktarına göre davranışta bulunan elemanlardır. Bu iki temel eleman bazen basit bazen ise karmaşık bir transdüser sistemi içinde bir bütünü oluştururlar ve kullanım alanlarına göre değişik malzemelerle ve değişik tasarımlarla üretilirler [8].

Seramik tepkileyici tasarımları, tepkileyicilerin deplasman mekanizmalarına göre üçe ayrılırlar. Doğrusal tip tepkileyiciler boylamasına veya enlemesine deplasman gösterirler. Basit disk ve çok katmanlı diskler veya basit silindir bu kategoride bulunurlar. Bimorf, monomorf (rainbow), unimorf, multimorf tepkileyiciler ise bükümlü deplasman gösterirler (Şekil 1.6.). Diğer tip tepkileyiciler ise esnek tepkileyicilerdir. Bu tip transdüserlerde boyuna deplasman esnek metal yardımıyla radyal deplasmana çevrilir. En yeni tepkileyici tasarımı olan hilal ve zil tipi transdüserler bu kategoridedirler En yaygın kullanılan tepkileyici tasarımları çok tabakalı tepkileyiciler ve bimorf tepkileyicilerdir. Bimorf tepkileyicilerde iki piezoelektrik seramik plaka birbirlerine kutuplama yönleri zıt ve dik olacak şekilde yapıştırılırlar. Böylece

tepkileyici elektrik alanı altında bükümlü deplasman gösterir. Üretim işlemi çok basit olduğundan ve yüksek deplasman değeri (300 μm gibi) kolayca elde edilebildiğinden dolayı bu tepkileyici tasarımının kullanım alanı çok geniştir



Şekil 1.6 (a) Çok tabakalı ve (b) bimorf tepkileyiciler

1.1.5.1. Bir Sistemin Parçası olarak Transdüserler:

Tipik bir transdüser bir enerjiden diğerine çevirim yapmak için kullanıldığından dolayı, kendisi için çalışan tek bir parça olarak kullanımları yoktur. Transdüserleri geniş bir sistemdeki bir bileşen olarak kabul etmek daha doğru olur. Sualtı sistemlerinde tipik olarak elektroakustik transdüser sistemin “ıslak ucu” olarak adlandırılır. Bu anlamda, transdüser su ortamı ile direkt temasta olan sesi toplayan veya ileten parçadır.

Özel sistemindeki istenilen karakteristiklerini belirlemek zorunda olan transdüser, performansı ortaya koyar. Böylece, kullanıcı transdüser parametrelerini belirlemenin yanında, transdüser ve sistemin diğer parçaları arasındaki etkileşimi anlama ihtiyacı duyar. Transdüser mühendisi

tasarımındaki bu ihtiyaçları, tüm sistem üzerindeki sistemin performans hedeflerine ulaşmak için birleştirmelidir.

Transdüserleri geliştirme süreci, elektriksel sistem tasarımlarının alışık olmadığı bir kombinasyondur. Bu kombinasyon disiplinleri demet paterni, empedans, ağırlık, gerilim, çevresel ve korozyon direnci gibi parametreleri açıkça ortaya koymaya gereksinim duyar.

1.1.5.2. Sualtı ve Hava Transdüserleri:

Sudaki akustik enerjinin çok iyi iletimi elektroakustik transdüserlerin sualtı uygulamalarının genişlemesine neden olmuştur. Sonar belirlemedeki sistemler, sualtı iletişimleri ve okyanus derinliği ölçümleri, su ortamında kullanılan elektroakustik transdüserler için tipik uygulamalardandır. Sualtı akustik sinyal üretmek için en genel yol elektronik bir sinyal üretmek sonra onu mekanik enerjiye çevirmektir. Mekanik enerji daha sonra ses dalgası olarak suya iletilir. Ses dalgasının nasıl olduğu canlandırılırken, durgun bir suya bir taşın atılması esnasında oluşan dalgalardan yararlanılabilir. Ses dalgası suda, hava veya daha az yoğun bir ortamdan daha hızlı yol alır. Ses dalgası suda havadakine göre yaklaşık beş kat daha hızlı olan dakikada 1500 metre hızla hareket eder. Kural olarak, ortamın yoğunlaştırılmasıyla, daha hızlı ses hareketi sağlanır.

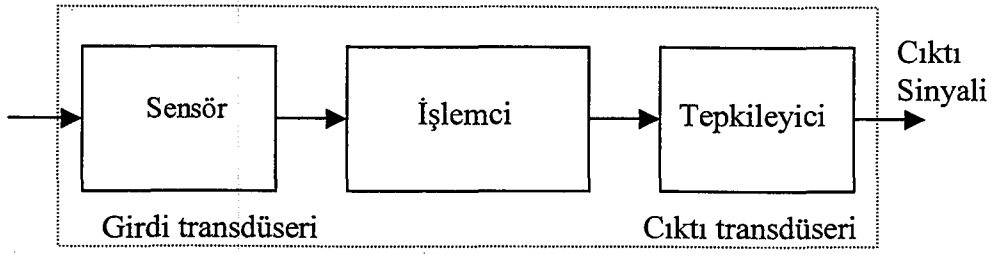
Sualtı kavramında transdüser kelimesi sesi alabilen ve iletebilen anlamına gelir. Projektör, sesi sualtına gönderen aygıttır. Projektörler aktif sistemlerde kullanılır. Aktif sistemlerde, ses üretildikten sonra, ses dalgaları hedefe doğru hareket eder ve belirlenen yankılar olarak geri döner. Projektörler en yüksek akustik çıktıyı sağladığı rezonans frekansı civarında kullanılırlar. Akustik enerjiyi sualtındayken sadece dinleme amacı güdülyorsa, "hidrofon" adı verilen bir cihaz kullanılır. Hidrofonlar akustik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılır ve sadece dinlemek için pasif sualtı sistemlerinde kullanılır. Hidrofonlar genellikle düzenli çıktı seviyeleri sağladıkları çok geniş bir frekans aralığı üzerinde rezonans frekanslarının altında kullanılırlar.

Transdüser (veya projektör veya hidrofon) birden fazla tek kat seramik içeriyorsa, buna transdüser (veya projektör veya hidrofon) sırası adını alır. Bazı durumlarda transdüser sırası tek bir kapalı düzenekte bulunabilir, buna sadece transdüser denilir. Tek eleman istenilen demet paternini elde edemiyorsa,

transdüser elemanları sıra formatında bu paterni oluşturmak için sıralı olarak dizilir. Aşağıda sualtı transdüserlerinin bazı uygulamaları verilmektedir:

- Okyanus/Hidrografik İnceleme ve Ölçümler
 - Eko-Ses Sağlayıcı(Echo-sounders)
 - Okyanus Haritalama Sistemleri
 - Hidrografik Haritalama Sistemleri
- Sismik Keşifler
 - Okyanus Tabanı Sensörleri
 - Hidrofonlar
- Çevresel İzleme
 - Çevresel İzleme Prob'ları
 - Balık Arama / Balık Nesli Çalışmaları
- Deniz Yaşamı Araştırmaları
 - Deniz Memelileri Araştırmaları
 - Deniz Memeli İletişimleri
 - Deniz Memelileri Deneyleri

Genel olarak, transdüserler benzer olarak havada işlemek için tasarlanır ve sualtı transdüserlerine ortak tasarım yaklaşımlarına sahiptirler. Tasarımdaki en önemli fark, su ve hava arasındaki ses hızı ve akustik empedans farklılıkları olarak ortaya çıkmaktadır. Farklılıklar özgül hava akustiği ve ultrasonik uygulamalardaki faktörlerden de meydana gelir. Boyut kısıtlamaları, kimyasal direnç, damping, boşluk mesafesi hava uygulamalarına en genel özgül gereksinimlerdir. Hava transdüserlerine ilk örnek; eko-konum sensörleri verilebilir. Bu aygıtlar ses dalgalarını iletmek ve almak için ultrasonik transdüserleri kullanırlar. Bu akustik sinyaller bir hedefe çarparlar ve sensörden geri alınırlar. Hedefe çarpış ve geri dönüş arasında geçen zaman hedef mesafesini hesaplamada kullanılır. Eko-konum ultrasonik yaklaşım sensörleri ve seviye sensörlerinde kullanılmaktadır. Yaklaşım sensörleri nesnenin varlığı, yokluğu, mesafesi ve pozisyonunu belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 1.7 Ölçüm veya bilgi-işlemci sisteminin temel bileşenleri [9]

Ölçüm sisteminde (şekil.1.7) girdi sinyali deplasman, basınç, gaz konsantrasyonu gibi ölçülecek olan fiziksel veya kimyasal büyüklükleri belirleyen cihazlara girdi transdüseri veya sensor adı verilmektedir. İşlemciden alınan sinyal likit kristal monitor birim gibi bilgi görüntüleyen operatörlerde kullanılmaktadır. Alternatif olarak, sinyaller kağıda, manyetik diske veya bir çipe kaydedilebilir. Elektrik sinyalini fiziksel veya kimyasal büyüklüğe çeviren cihazlara da çıktı transdüseri veya tepkileyici adı verilmektedir [9].

Üretim mühendisliğinde, kontrol amaçlı olarak ölçülen en genel faktörler pozisyon ve hızdır. Bu iki faktör makina araçları kontrolü, robotlar ve otomatik arabalarla ilgili olarak çeşitlilik göstermektedir. Çoğu geleneksel transdüserlerin osiloskop ve voltmeter gibi ticari aletleri kullanarak ölçülebilen analog çıktı voltajı vardır [10].

1.1.5.3. Hilal ve Zil Tipi Transdüserler

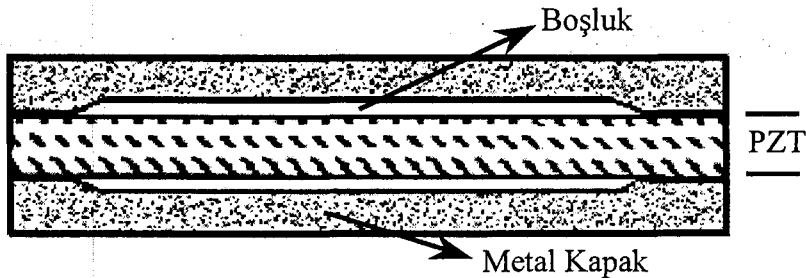
Bimorf ve çok tabakalı tepkileyicilerde deplasman, jeneratif kuvvet ve tepki zamanı özellikleri açısından aralarında büyük farklar olduğu görülmektedir. Çok tabakalı tepkileyicilerde oluşan kuvvet çok büyük iken (>3000 N), deplasman değeri küçük kalmaktadır (~10 μm). Bimorf tepkileyicilerde ise yüksek deplasman değeri elde edilmesine rağmen (~100 μm), oluşan kuvvet değeri çok düşüktür (~ 0,5 N). Esnek hilal tipi transdüserler, yüksek deplasman ve yüksek kuvvet isteyen uygulamalar gibi ihtiyaç doğan uygulamalardaki boşluğu doldurmak için tasarlanmıştır. Bu yeni tasarım seramik halka veya disk ve metal kapakları içermektedir. Disk iki kesik konik metal kapak arasına yerleştirilmiştir [11]. Disk ve kapaklar arasında belirli yarıçap ve derinlikte bir açıklık bulunmaktadır [12]. Metal kapaklar mekaniksel dönüştürücü olarak davranmakta ve seramiğin radyal deplasmanını

kapaklara dik olarak aksel deplasmana çevirmektedir. Bununla birlikte d_{33} ve d_{31} piezoelektrik katsayıları kompozitin deplasmanını destekler hale gelmiştir [13].

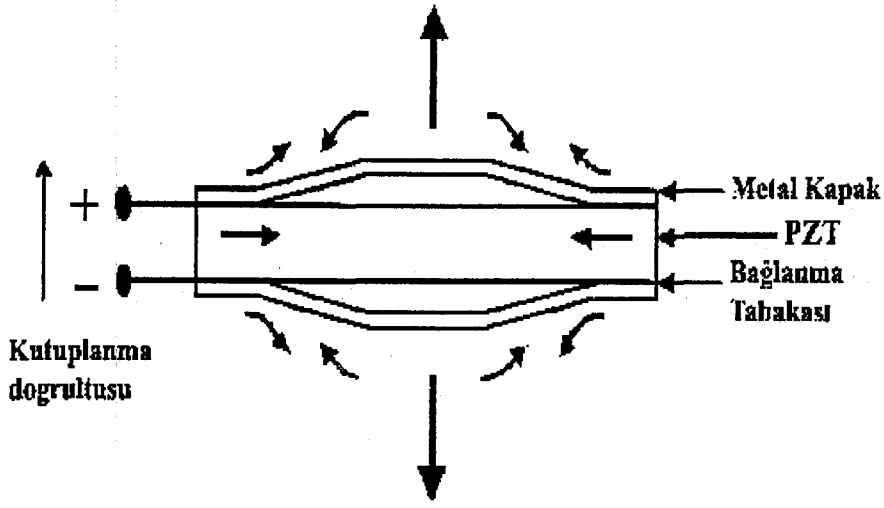
Zil tipi transdüserlerin getirdiği avantajlar dikkati çekmektedir [14];

- Yüksek deplasman
- Makul jeneratif kuvvet
- Kısa karşılık (tepki) verme süresi
- Yüksek güvenilirlik
- Düşük maliyetli üretim
- Üretim kolaylığı
- Geniş çeşitlilikteki konfigürasyonlar

Esnek (flextensional) transdüserler ilk olarak 1920'lerde geliştirilmiş ve 1950'lerden bu yana sualtı transdüserleri olarak kullanılmıştır. Aktif piezoelektrik itici eleman ve mekanik bir kapalı kabuk yapısından ibarettir. Dış kabuk yüksek empedansı, seramiğin küçük genişleme hareketini düşük empedansa, kabuğun büyük esneme hareketine dönüştüren mekanik bir transformator olarak kullanılır. Hilal (Moonie) (Şekil.1.8) ve zil tipi (cymbal) transdüserler (şekil.1.9) iki metal kapak arasına sıkıştırılmış piezoelektrik disk içerirler. Moonie'nin temel konfigürasyonu Şekil.1.8'de gösterilmektedir. Bu tasarım ölçülebilir bir deplasman sağlar. Hidrofonun, iletici ve özellikle rezonansta olmayan , düşük frekanslı sualtı projektör uygulamalarındaki avantajları çekicidir.



Şekil.1.8 Hilal-tipi transdüserin kesit görünümü. Koyu bölgeler kapakları, çizgili bölgeler PZT diski göstermektedir [15].



Şekil 1.9 Seramik-metal kompozit zil tipi (cymbal) tepkileyici yapısı. Koyu renkli oklar seramiğe elektrik alan uygulandığında metal kapağın deplasman doğrultularını göstermektedir [15].

Fabrikasyon kolaylığı ve istenilen uygulama için performansının değiştirilebilirliği zil (cymbal) tipi tasarımının çekiciliğidir. Rezonans frekansı, kuvvet, deplasman ve yapının karşılık verme süresi kapak ve itici eleman malzemesi seçimiyle kontrol edilebilmektedir [16].

Tablo 1.3. Standart hilal ve zil tipi transdüserlerin boyutları

| Hilal Parametreleri | Boyut (mm) |
|--------------------------|-------------------|
| PZT çapı | 12,7 |
| PZT Kalınlığı | 1,0 |
| Kapak Çapı | 12,7 |
| Kapak Kalınlığı | 1,0 |
| Oyuk (açıklık) derinliği | 0,25 |
| Oyuk (açıklık) Çapı | 9,0 |
| Zil Parametreleri | Boyut (mm) |
| PZT Çapı | 12,7 |
| PZT Kalınlığı | 1,0 |
| Kapak Çapı | 12,7 |

Tablo 1.3. (Devam) Standart hilal ve zil tipi transdüserlerin boyutları

| | |
|--------------------------|------|
| Kapak Kalınlığı | 0,25 |
| Oyuk (açıklık) Derinliği | 0,32 |
| Taban Açıklık Çapı | 9,0 |
| Düz Yüzey Çapı | 3,0 |

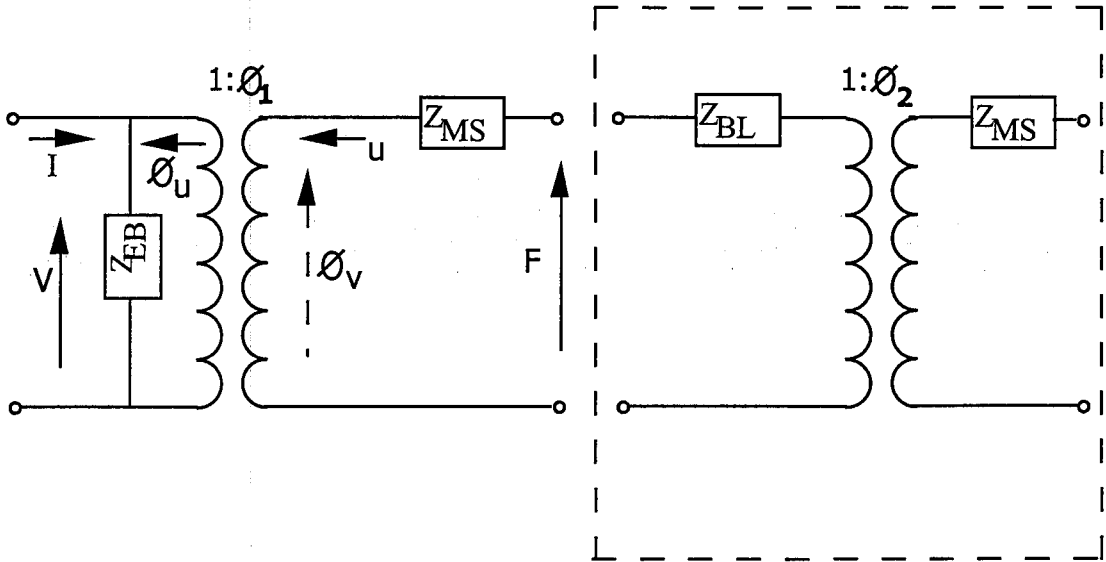
Deplasman, jeneratif kuvvet ve cevap süresi (rezonans frekansı) gibi özellikler zil tipi transdüserlerin karakteristiklerini ortaya koyan parametrelerdir. Kapak kalınlığı, kapak altında kalan boşluğun derinliği ve çapı, PZT seramik diskin boyutları transdüserin özellikleri üzerinde önemli etkiler yapmaktadır [12].

Bu yapıda tek katmanlı olarak veya çok katmanlı seramik eleman kullanılabilir. Hilal transdüser tasarımı bimorf tasarımın üç boyuta çevrilmesi olarak düşünülebilir. Böylece yapıda oluşan kuvvet daha yüksek olmaktadır. Hilal tipli transdüserlerde deplasman değeri kapak üstündeki pozisyona bağlı olarak değişmektedir. Deplasman kapağın merkezinde en yüksek değere ulaşırken, merkezden uzaklaştıkça deplasman değeri düşer. Oluşan kuvvette ise bunun tam tersi gözlemlenir. Oluşan kuvvet kapağın merkezinde minimum iken, kapağın köşelerinde maksimuma ulaşır. Pirinç kapaklı, 12.7 mm çapında, kapak kalınlığı 0.3 mm, oyuk çapı 9 mm ve oyuk derinliği 200 µm olan hilal şekilli transdüserin etkin d_{33} 'ü yaklaşık 9,000 pC/N iken, elde edilen deplasman 22 µm (1 kV/mm alan altında) ve maksimum oluşan kuvvet 3N olarak bulunmuştur

Piezoelektrik transdüser elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür yada tam tersi şekilde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Hilal ve zil tipli transdüserlerde her iki tip dönüşümde gözlenebilir. İlk dönüşümü piezoelektrik seramik gerçekleştirir. Piezoelektrik seramiğe elektrik alanı uygulandığı zaman ya deplasman görülür ya da mekanik enerji açığa çıkar. Dönüştürülen mekaniksel enerji ve giren elektrik enerjisi arasındaki oran elektro mekaniksel dönüşüm faktörü olarak adlandırılır. Bu faktör 1 değerini aşamaz. Piezoelektrik seramikler için ölçülmüş en yüksek elektro mekanik faktör 0.7'dir [17]. İkinci enerji dönüşümünü ise metal kapaklar gerçekleştirir. Bu kapaklar mekanik-mekanik dönüştürücü olarak davranırlar. Piezoelektrik seramiğin elektromekaniksel dönüşüm faktörü malzeme sabitidir,

boyuta ve pozisyona bağılı değildir. Fakat hilal ve zil tipli transdüser tasarımları pozisyona bağımlılık gösterirler. Bu transdüserlerin deplasman ve oluşan kuvvetleri pozisyona bağımlıdır, bu yüzden dönüşüm faktörleri de pozisyon bağımlıdır. Dolayısıyla metal kapaklı kompozit transdüserlerde, malzeme özelliği olan dönüşüm faktörüyle karışmaması için etkin dönüşüm faktörü terimi kullanılır. Etkin dönüşüm faktörü doğrudan metal kapakların geometrisine bağımlıdır. Oyuk çapı, derinliği, kapak kalınlığı ve kapak malzemesi zil ve hilal tipli transdüserlerin etkin dönüşüm faktörünü belirlemede ana parametrelerdir. Eğer bağlayıcı katmandaki ve kapaklardaki kayıp ihmal edilirse, maksimum etkin dönüşüm faktörü PZT' nin dönüşüm faktörüne eşit olabilir.

Zil ve hilal tipi transdüserler için eş devre Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Zil ve Hilal Tipli Transdüserler için Eş Devre [18]

Burada;

V = Transdüser'e doğru elektrik girdi boyunca voltajı,

I = Akım girdisini,

F = Yayınım yüzeyi boyunca olan kuvveti,

u = Yayınım kuvvetinin hızını,

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

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

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

Φ_1 = PZT için dönüşüm faktörünü,

Φ_2 = Komposit yapı için dönüşüm faktörünü gösterir.

Diğer yandan zil tipi transdüserdeki ilk rezonans frekansı aşağıdaki eşitlikle açıklanmıştır [18].

$$f, \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[\frac{1}{Q_c^2 (1 - \nu^2)} + \frac{1}{R^2} \right]} \quad (1.7)$$

Burada; E, malzemenin stiffnesini; ρ , yoğunluğunu; Q_c , oyuk çapını

1.2. Sonlu Elemanlar Analizi Teorisi

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

Sonlu elemanlar analizinde yük altındaki yapı ayrı ayrı elementlerden oluşan ağ yapısıyla modellenir (Şekil 1-11). Ağ yapısı içindeki her element diğer elementle köşelerde birleşir ve birleşme noktalarına nodal noktalar denir. Sonlu elemanlar çözümü basit denklemleri kullanarak ve sistem kuvvetlerinin nodal noktalardan komşu elementlere transferiyle birlikte, her elementteki değişimler hesaplanır. Diğer yandan, her nodal noktadaki kuvvet sistem içindeki diğer nodal noktalara bağlı olduğundan dolayı problem ilk görüldüğünden daha zordur. Elemanlar yay sistemleri gibi davranırlar ve tüm kuvvetler dengeye gelene kadar sapmaya uğrarlar. Böylece benzer denklemlerin oluşturduğu karmaşık bir sistem varolur. Bu denklemler sistemini çözmek içinde matris cebirine ihtiyaç vardır. Çözüm için anahtar bilgi her elemanın katılık ve kütle matrisidir. Her eleman için hem kütle hemde elastik matrisleri ayrı ayrı hesaplanır. Yapısal bir katı için sonlu elemanlar analizinde aşağıdaki denklem geçerlidir (43);

$$([K_e] + [K_e^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e]\{u\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \quad (1.8)$$

Burada;

K_e = element katılık matriksini,

K_e^f = elemanın temel katılık matriksini,

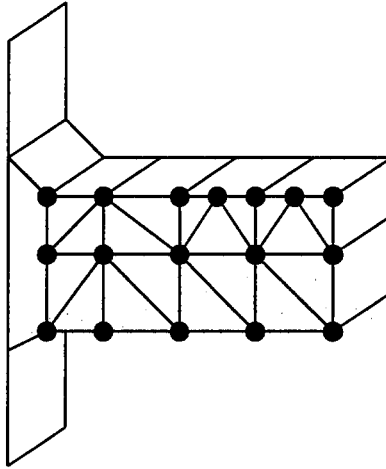
M_e = elemanın kütle matriksini,

F_e^{th} = elemanın termal yük vektörünü,

F_e^{pr} = elemanın basınç vektörünü,

F_e^{nd} = elemana uygulanan nodal yükleri,

u = deplasman vektörünü gösterir.



Şekil 1.11 Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı ve nodlar

1.2.1. Ortak Alan Analizi:

Eğer fiziksel özellikler arasında ortak bir ilişki varsa, sonlu elemanlar çözümünde ortak alan analizine gerek vardır. Piezoelektrik özelliklerde elektromanyetik bağdaşma etkisidir. Piezoelektriklik açısından, matris denklemi aşağıdaki gibidir :

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} [X_1] \\ [X_2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

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

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^z]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u) \\ (v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (F) \\ (L) \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Burada;

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

$$L = L^{nd},$$

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

M = yapısal kütle matriksini,

C = yapısal sönümlenme matriksini

K = yapısal katılık matriksini,

K^z = piezoelektrik katılık matriksini,

K^d = dielektrik katsayısı matriksini,

u = deplasman vektörünü,

V = elektriksel potansiyel vektörünü

F^{nd} = uygulanan nodal yük vektörünü,

F^{th} = termal uzama kuvveti vektörünü,

F^{ac} = ivme etkilerinden oluşan vektörü,

F^{pr} = basınç yük vektörünü gösterir.

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

$$(T) = [c](S) - [e](E) \quad (1.11)$$

$$(D) = [e]^t(S) + [\epsilon](E)$$

ya da matris formunda;

$$\begin{pmatrix} (T) \\ (D) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & [e] \\ [e]^t & -[\epsilon] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (S) \\ -(E) \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

Burada;

T = gerilme vektörünü,

D = Elektrik akısı yoğunluğu vektörünü,

S = uzama vektörünü,

c = elastiklik matriksini,

E = elektrik alanı vektörünü,

e = piezoelektrik gerilmeyi,

ε = dielektrik matriksini gösterir.

2. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE BULGULAR

2.1. Amaç

Sualtı uygulamalarında ses üretmek için kullanılan transdüserler projektör adıyla, tersi şekilde sesi toplamak veya algılamak için kullanılan transdüserler ise hidrofon adını almaktadırlar. Zil tipi transdüserler, mekaniksel olarak iki metal kapağa bağlanmış her iki yüzeyi elektrotlanmış elektro aktif seramik içermektedir. Kapaklar bir bağlanma tabakasıyla bu aktif seramiğe bağlanmış durumdadır. Kapaklar bu cihaz üzerinde mekaniksel olarak amplifiye edici ve çevirici olarak görev yapmaktadır. Zil tipi transdüserlerin belirgin özelliklerinden birisi düşük maliyetinin ve kolay üretilebilirliğinin yanında cihaz malzemeleri ve boyutlarının değiştirilmesi ile rezonans frekansının ayarlanabilmesidir. Transdüser çapı, düz yüzey çapı, boşluk çapı ve derinliği, piezoelektrik disk kalınlığı ve kapak kalınlığı transdüserin karakteristiklerini ortaya koyan parametrelerdir. Zil tipi transdüser hidrofon ve de projektör gibi sualtı uygulamalarındaki bir potansiyel olarak göze çarpmaktadır. Genellikle transdüser uygulamalarında yüksek Q değerleri istenilen bir özelliktir. Ancak, sualtı uygulamalarında istenilen özellik geniş bant aralığıdır. Bundan dolayı Q değerleri geniş bant genişliği elde etmek için yeteri kadar düşük olmalıdır. Bu çalışmadaki cymbal transdüserin kapakları altındaki boşluk visko-elastik bir damping elde etmek için polimerik bir malzeme ile kısmen doldurulmuştur. Genellikle, maksimum Q'ya sahip bir sistem, verimini de maksimum yapma isteğindedir. Transdüserlerin sualtı uygulamalarında iletilen ve alınan sinyaller kullanılır. Eğer çıktı sinyalleri kısa vuruşlar halinde iletebilirse, alınan sinyaller bozulmayacak, ve alınan sinyaller kesin ve doğru bir şekilde kullanılacaktır. Böylelikle Q değerlerinde amaçlanan düşüş elde edilebilecektir.

Tüm deneyler ANSYS FEM kodları ile gerçekleştirilmiştir. Kısa zamanda işlem yapılabilmesi, karmaşık matematiksel eşitliklerin hızlı bir şekilde çözülebilmesi, tasarım sürecinin başlangıç aşamasında gerekli olan malzeme seçimi, uygulama aralığı, en yüksek ve en düşük parametrelerde tasarlanan ürünün performansı gibi özelliklerin bulunmasında hızlı ve minimum hatalı bir şekilde hesap ve ölçümlerin elde edilmesi gibi avantajlarından dolayı sonlu elemanlar analizi metodu bu çalışmada kullanılmıştır. Sonuç olarak, hem zaman kayıpları önlenecek hem de çalışmalar maliyet artışlarından uzakta ilerleyecektir.

2.1.1 Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme

2.1.1.1. Kullanılan Program ve Dosyaları

Modelleme yapılırken kullanılan program ANSYS sonlu elemanlar analizi programıdır. Bu programın kullanımını esnasında yapılacak işlemler hem interaktif olarak hem de yardımcı dosyalar oluşturularak modelle sürecinde ilerlenebilir. İnteraktif kullanım bazı uygulamalarda kullanım kolaylığı ve zaman kaybını önleme gibi faydalar getirirse de bazı noktalarda yetersiz kalarak dezavantaj haline gelmektedir. Bu nedenle zaman kaybını önleyici ‘mac’ dosyası adı verilen dosyaların hazırlanması ile çözüm yolunda ilerlenmiştir. ANSYS programında modelleme yapılırken kullanılan ‘mac’ dosyaları bazı özellikler göstermektedir ve çözüme ulaşmada bazı hazırlanış komutları kullanılmaktadır.

‘mac’ dosyası not defteri formatındadır (Ek.1). Bu komut dosyası hazırlanırken komutlar yazılış sırasına göre açıklanırsa;

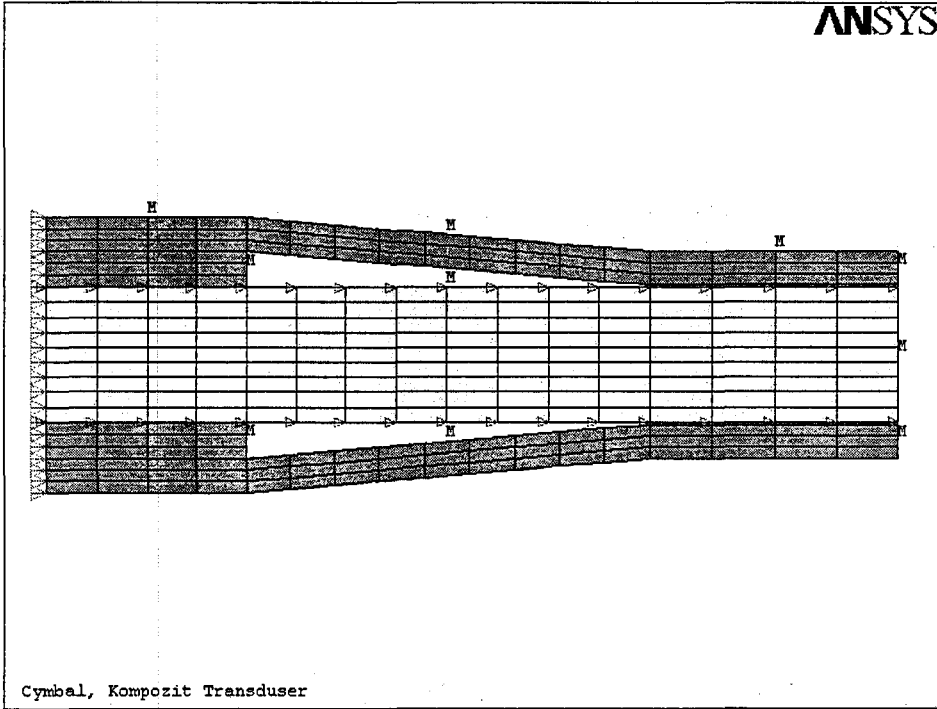
‘mac’ dosyalarında başlangıç komutu olarak ‘/PREP7’ komutu kullanılmaktadır ve girdi işlemcisini aktif hale getirmektedir. Kullanılan malzemelerin özellikleri ‘ET’ komutu kullanılarak tanımlanır. ‘UIMP’ komutu kullanılmasıyla doğrusal malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Komuttan sonra gelecek sayı malzeme tipini belli eder. ‘EX’ komutu malzemenin elastik sabitini, ‘DENS’ yoğunluğunu ve ‘NUXY’ ise Poisson oranını ifade etmektedir. PERX ve PERY piezoelektrik malzemelerin x ve y eksenindeki geçirgenlik değerlerini ortaya koyar. TB, ANEL anizotropik elastik matriksi, TB, PIEZ komutları kullanılarak da piezoelektrik matriks ifade edilir. Modellemede kullanılan malzemelerin programın anlayacağı şekilde tanımlamaları böylece bitmektedir.

Tüm bu komutlar dizisinden sonra tasarımı yapılacak ürünün şekli ve geometrisi ortaya konmalıdır. Çalışma alanı içerisinde koordinatlar tanımlanır ve ‘k’ komutuyla anahtar noktalar belirlenir. A komutuyla alanlar oluşturulur ve noktalarla birbirine bağlanır. Örgü, alanları meydana getiren çizgilerin uygun sayılara bölünmesiyle kontrol edilir. Daha sonra son işlem olarak alanların hangi malzemelere ait olduğu ifade edilir.

‘/SOLUTION’ komutu çözüm işlemlerini aktif hale getiren komuttur. ‘antype’ analiz tiplerini ortaya koyar ve n komutuyla yönetilir. ‘n=0’ olduğunda analiz tipi yapısal, n=1 ise modal analiz, n=2 olduğunda harmonik analiz anlamına gelmektedir. Aksisimetriyi ifade etmek için simetri şartları X ekseninde uygulanmıştır. Yatay orta düzlem dikey geçişleri önlemek için sabitlemiştir. Rezonans frekansının elde edilmesinde ise piezoelektrik malzemenin kısa devre yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı piezoelektrik elemanın üstünde ve altındaki nodlardaki elektriksel potansiyel sıfır olarak belirtilmiştir. ‘/POST1’ programda hesaplanmış sonuçların grafik olarak elde edilebilmesini sağlamaktadır. Zil tipi transdüserlerin değişik yükler altındaki deplasman değerleri için harmonik analiz kullanılmıştır. Harmonik analiz için hazırlanan mac dosyasındaki komutlar örgü sisteminin kuruluşunun sonuna kadar aynıdır. Fakat harmonik analiz için yapıda bir potansiyel fark meydana getirilmiştir. Uygulanan voltaj 1 kV/mm’dir.

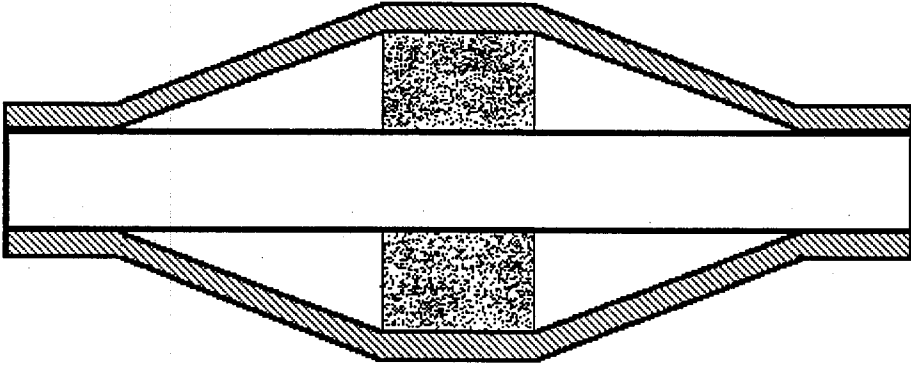
Ürün geliştirme ve üretim sürecindeki başlangıç aşaması olan tasarımda amaç üretime geçilmeden önce ve ürünü ortaya koymadan önce bazı deneysel çalışmaların yapılması ve gereksiz zaman kayıplarının önüne geçilmesidir. Deneysel çalışmaların yapılması esnasında birçok özellik ve parametrelerin ürünü nasıl ve ne derece etkilediği ve etkileyeceği incelenmektedir. Bu deneysel çalışmalar yapılırken ürün karşısına daha önceden tahmin edilemeyen bazı etkileyici parametreler de çıkabilmektedir. Özellikle çalışılan malzemeler kompozit yapıyı oluşturacağı düşünülürse; birden fazla farklı malzemenin birleşerek kendine has özellikler gösteren yapılar oluşturmasında malzemelerin özelliklerindeki uyum/uyumsuzluklar önem arz etmektedir. Bu özellikler ve özellikleri etkileyen faktörler araştırılırken deneysel çalışmalar deneme ve yanılma metodlarıyla çalışmalara başlanılmakta ve bunların sonucunda elde edilen datalar ile planlı deneysel çalışmaların yönü belirlenmektedir. Bu sürecin tüm aşamalarında bazen yanlış yönlere doğru sapmalar ve zaman kayıpları meydana gelebilmektedir. Bu deneysel çalışmaların doğru ve istenilen doğrultuda ilerlemesi için kullanılan tasarım programları, bilgisayarların daha az hatasız ve hızlı olan işlem kabiliyetlerinden yararlanır. Bunun sonucunda hem zaman kaybı önlenmiş olmakta hem de çalışmalar maliyet artışından kaçınılmış durumlarda ilerlenmiş olmaktadır. Modelleme işlemi esnasında hesaplanan değerler ve gözlenen durumları

etkileyen ilk göze çarpan faktörler modellenen yapının boyutları ve modellemede kullanılan yapıyı oluşturan malzemelerin özellikleridir. Yapıdaki elemanların boyutlarındaki küçülme ile hesaplanan değerler teorik değerlere daha yakın değerler haline gelmektedir. Ayrıca, modellemede kullanılan nod sayısının artışı bunu desteklemekte ve kullanılan programın daha çok işlem yapma gereksiniminden dolayı çözüm süresinde artış gözlenmektedir. Bu yüzden zaman kaybına neden olmayacak yeterlikte ve modellemeden en iyi değerlerin elde edilebileceği nod sayısı ile çalışılmalıdır (Şekil.2.1). Bu çalışmanın ilk aşamalarında nod sayısı ile ilgili olarak, minimum sürede çözüm yapabilecek nod sayısı belirlenmiştir. Gözlenen durumlar ve hesaplanan sonuçlar değerlendirilirken modellenen transdüserin deplasman, kuvvet ve rezonans frekansı özellikleri gözönünde bulundurulmuştur.

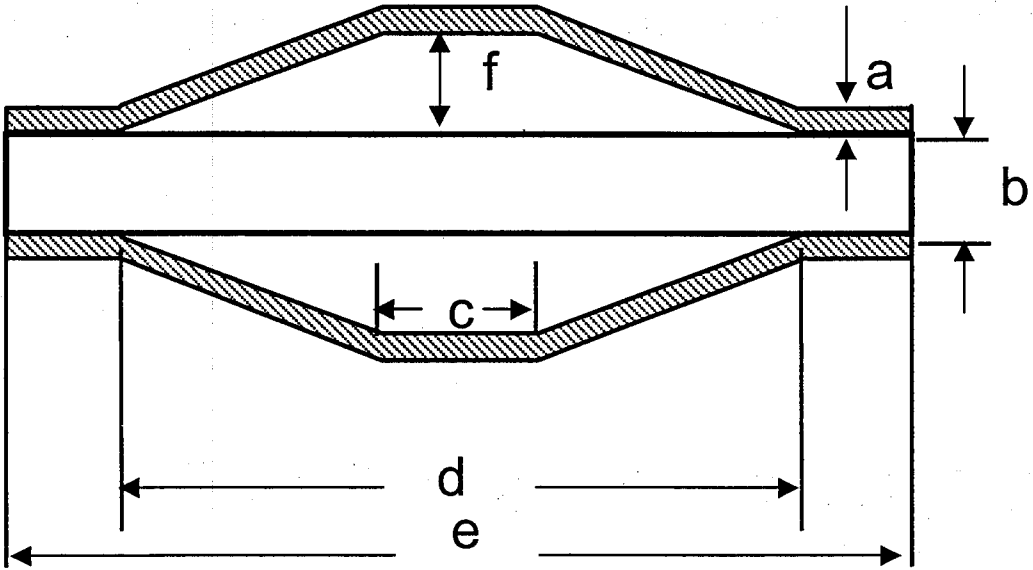


Şekil 2.1 Modellenen transdüserin meshing görüntüsü.

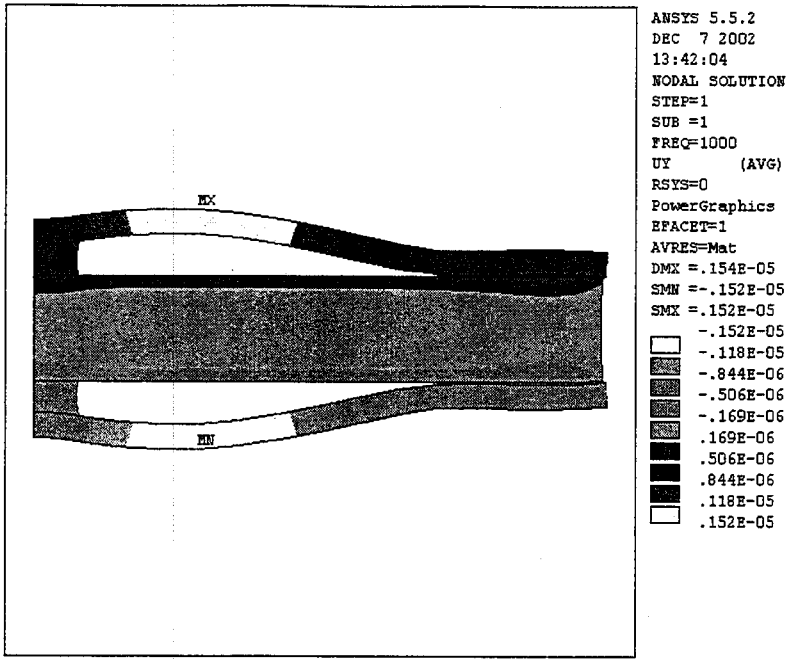
Şekil.2.2, Şekil.2.3 ve Çizelge 2.1 çalışmalarda modellenecek transdüser yapısını göstermektedir. Tasarım sisteminde transdüserin dikey yöndeki hareketini (deplasman) hesaplamak ve gözlemlemek için FEM ile oluşturulan sistemde harmonik analiz uygulanmıştır (Şekil.2.4). Böylece transdüserin merkezi tepe noktasındaki deplasman hareketleri ve değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.2 Kapakları altındaki boşluğa polimer yerleştirilmiş zil tipi transdüser



Şekil 2.3 Standart boyutlardaki zil tipi transdüser a: Kapak kalınlığı, 0.25 mm, b: PZT kalınlığı, 1 mm; c: Düz yüzey çapı, 3 mm; d: Oyuğun çapı, 9 mm; e: Transdüser çapı, 12.7 mm; f: Oyuğun derinliği, 0.25 mm



Şekil 2.4 Zil tipi transdüserde deplasman dağılımı (Transdüser çapı=12.7mm, oyuk çapı = 9 mm, düz yüzey = 3 mm, PZT kalınlığı = 1 mm, kapak kalınlığı = 0.3 mm, oyuk derinliği = 0.5 mm)

Çizelge 2.1 Modellenen transdüser için temel boyutlar

| Transdüser Çapı (mm) | Düz Yüzey Çapı (mm) | Oyuk Çapı (mm) | Oyuk Derinliği (mm) | Kapak Kalınlığı (mm) | Seramik Kalınlığı (mm) |
|----------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 12,7 mm | 3 mm | 9 mm | 0,25 mm | 0,25 mm | 1 mm |

Çizelge 2.2'de modellenmesi yapılacak olan cymbal transdüserde kullanılan malzemeler ve özellikleri verilemektedir.

Çizelge 2.2 Modellenen transdüserde kullanılan malzemeler ve özellikleri

| | E (Gpa) | ρ (kg/m³) | σ |
|--------------------------------|----------------|---|----------------------------|
| Metal Kapaklar | 100,6 | 8550 | 0,35 |
| Tungsten | 411 | 19300 | 0,28 |
| Polistren | 3,3 | 1040 | 0,354 |
| Poliamid | 1,01 | 1400 | 0,4 |
| Epoksi Bağlayıcı Tabaka | 2,5 | 1430 | 0,36 |

Anahtar: E=Elastik Modülü, ρ =Yoğunluk, σ =Poisson Oranı

2.2. Polistrenli Zil Tipi Transdüserde Boyutların Deplasmana Etkileri

Zil tipi transdüser uygulamalarında önem verilen parametreler transdüserin göstermiş olduğu deplasman, rezonans frekansı ve oluşan kuvvet karakteristikleridir. Bu çalışmada transdüserin metal kapak kalınlığı, oyuk çapı ve derinliği, arada bulunan piezoelektrik diskin kalınlığı ve düz yüzey çapının değiştirilmesiyle deplasman, ilk rezonans frekansı ve oluşan kuvvet açısından araştırılması yapılmıştır. Böylece transdüser malzemelerinin değişik boyutlandırılmalarıyla transdüser özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

2.2.1. Metal Kapak Kalınlığının Deplasmana Etkisi

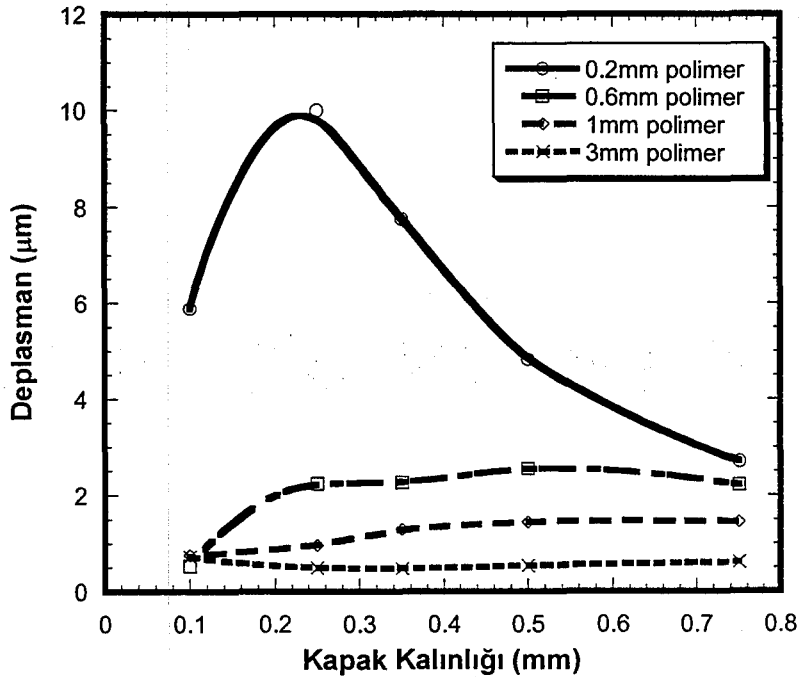
Piezoelektrik disk elektriksel olarak uyarıldığında, disk bünyesinde büzülme ve uzama hareketi gözlenir. Oluşan büzülme ve uzama hareketi metal kapak ve PZT disk arasındaki bağlayıcı tabaka tarafından alt ve üst kapağa eksensel bir değişimle iletilir. Dolayısıyla yatay düzlemde meydana gelecek bir hareket iletilmiş biçimiyle dikey bir harekete dönüştürülür. Böylece transdüserin deplasman hareketi meydana gelir.

Zil tipi transdüserlerin özelliklerini etkileyen faktörlerden birisi kapak kalınlığıdır. Zil tipi transdüserin göstermiş olduğu dikey hareket (deplasman) özelliklerini incelemek için harmonik analiz kullanılmıştır. FEM sisteminde modellenen transdüserin deplasmanı üst/alt merkez noktası baz alınarak incelenmiştir. Kapak malzemesi olarak pirinç, piezoelektrik seramik olarak PZT552 disk kullanılmıştır. Kapak kalınlığının, transdüserin göstermiş olduğu deplasmana olan etkisi Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Metal kapağın kalınlaşmasıyla bir tepe noktası belirlemektedir. Metal kapağın ince durumlu hallerinde metal kapağın deformasyon özelliği arttığından dolayı deplasman değerlerinde yükselme görülmektedir. Metal kapak kalınlaştıkça deplasman değerinde belirli bir değere kadar artış görülür. Bu da metalin esneme kabiliyetinin artması ve yatay eksenden iletilen büzülme hareketinin daha iyi iletilmesiyle meydana gelmektedir. Metal kapağın kalınlığının artması deformasyon kabiliyetini azaltır. Metal kalınlığının ileri seviyelerdeki artışı esneme kabiliyetinin azalışı ve PZT diskten gelen harekete daha az cevap vermesinden kaynaklanmaktadır.

Daha önce yapılmış çalışmalarda standart zil tipi transdüserin kapak kalınlığının artırılmasıyla da deplasman değerlerinde azalış tespit edilmiştir. Metal kalınlaştıkça kapakların göstermiş olduğu deplasmanda düşüş belirir. Bunun sebebi olarak; metalin incilmesiyle birlikte deformasyon özelliğinin artmasıdır. Metal kalınlaştıkça ise metal yaylanma özelliği gösterememektedir. Kalınlıktaki artış ilk başlarda deplasmanda hızlı bir düşüğe sebep olmakta, metal kalınlaştıkça ise artık metal çok az yay özelliği gösterdiğinden değişim olmamaktadır [18].

Kapak kalınlığının değiştirilmesiyle polimerli zil tipi transdüserin göstermiş olduğu etki Çizelge 2.3’de sayısal değerler şeklinde verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde daha önce çalışılmış olan standart zil tipi transdüserin polimerli transdüserine göre daha yüksek değerler ortaya koyduğu görülür. Bunun sebebi ise, zil tipi transdüserin kapak ve PZT disk arasındaki boşluğa yerleştirilen polistren polimer malzemedir. Bu polimer malzeme deplasman meydana geldiği esnada kapakları tutarak esneme olayında engelleyici rol oynayabilmektedir. Ayrıca polistren malzemenin elastik modülünün fazla olması da deplasman değerlerinin daha aşağılarda seyretmesine neden olmaktadır. Deplasman değerlerinin hesaplanmasında diğer boyutlar sabit tutulmuştur.

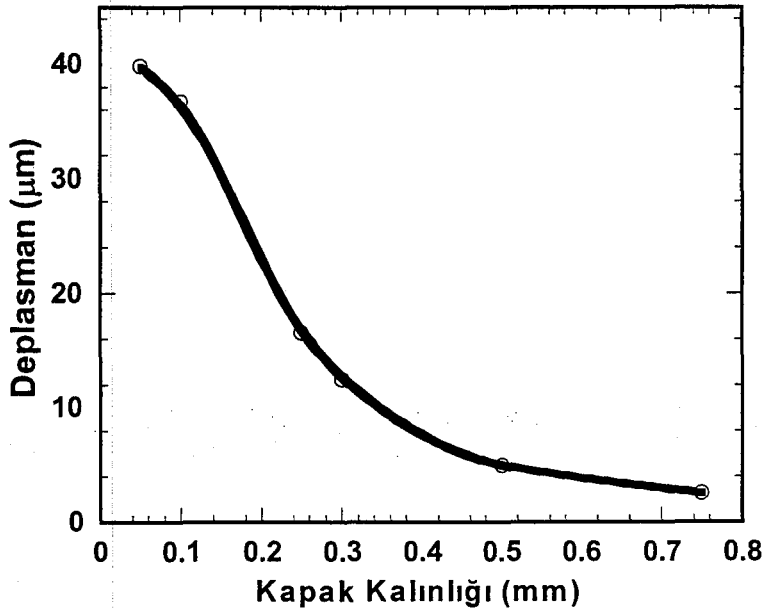


Şekil 2.5 Polimer ilaveli cihazda deplasman davranışının kapak kalınlığının artışıyla olan ilişkisi.

Çizelge2.3 Kapak kalınlıklarının değiştirilmesiyle polimerli transdüserin üst/alt merkez noktasında elde edilen deplasman değerleri

| Kapak Kalınlığı (mm) | Deplasman (μm) | | | |
|----------------------|-----------------------------|--------|-------|-------|
| | 0.2 mm | 0.6 mm | 1 mm | 3 mm |
| 0.10 | 5.890 | 0.530 | 0.752 | 0.724 |
| 0.25 | 10.015 | 2.238 | 0.966 | 0.496 |
| 0.35 | 7.759 | 2.270 | 1.291 | 0.476 |
| 0.50 | 4.819 | 2.552 | 1.444 | 0.536 |
| 0.75 | 2.709 | 2.204 | 1.442 | 0.606 |

Deplasman hesaplamaları yapılırken polimer kalınlığı 0,2mm, 0,6 mm, 1 mm ve 3 mm alınmıştır ve polimer kalınlığının da etkisi görülmeye çalışılmıştır. Şekil 2.6'da standart cymbal transdüserin deplasman davranışı verilmektedir.

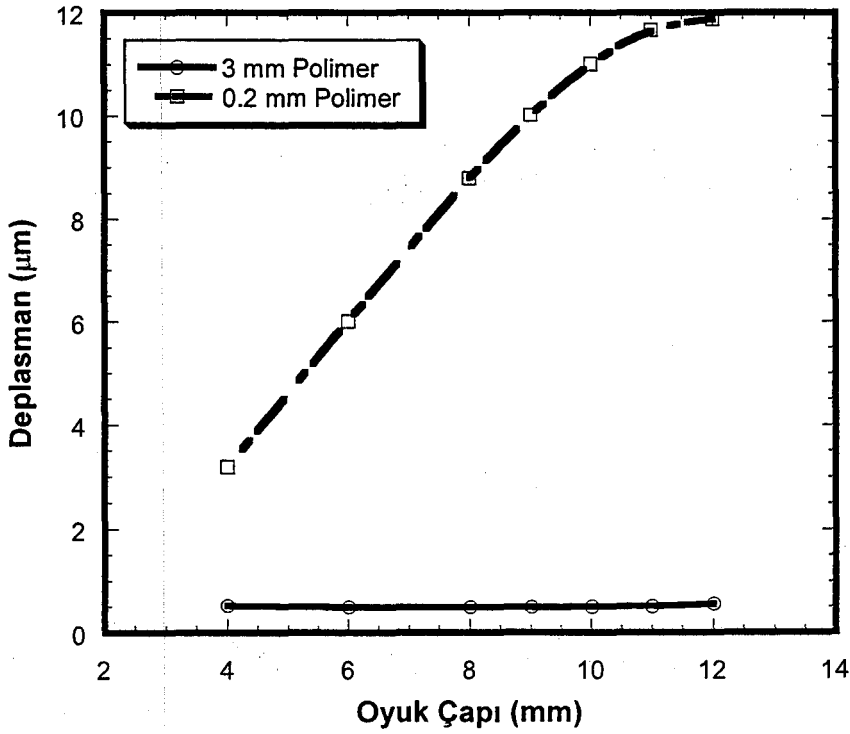


Şekil 2.6 Standart zil tipi transdüserde kapak kalınlığı-deplasman ilişkisi [18]

2.2.2. Oyuk Çapı Değişiminin Deplasmana Etkisi

Transdüserin göstermiş olduğu deplasman hareketini etkileyen bir diğer faktör ise, oyuk çapıdır. Şekil 2.7’de deplasman ve oyuk çapı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Oyuk çapının artışıyla transdüserin göstermiş olduğu deplasman Çizelge 2.4’te verilmektedir. Değerler incelendiğinde oyuk çapının arttırıldığında deplasman değerlerinde polimer yarıçapına bağlı olarak farklı davranışlar sergilenmektedir.. 0,2 mm çaplı polimer kullanılması deplasman değerlerinde artışa neden olurken, 0,6 mm çaplı polimer kullanıldığı durumda deplasman değerinde çok fazla bir değişim görülmemektedir. .

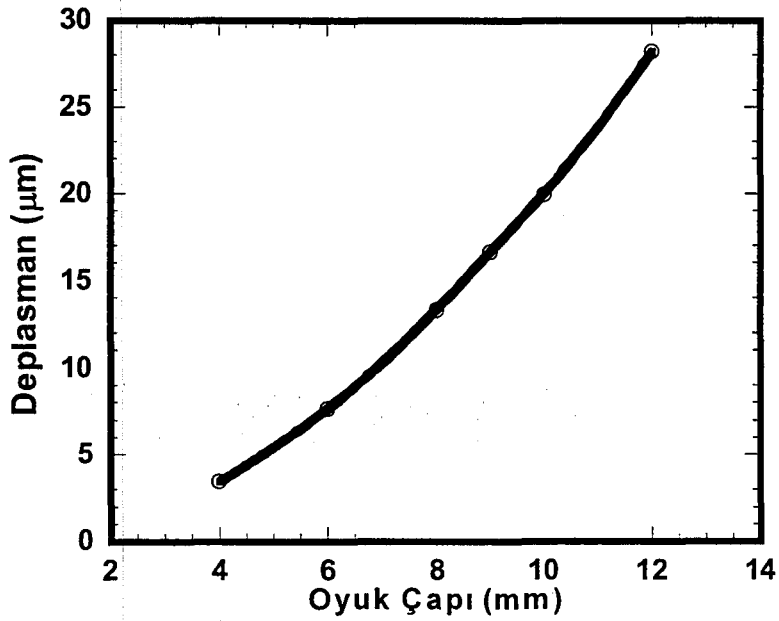
Standart zil tipi transdüserde oyuk çapının deplasman üzerindeki etkisi aşağıda verilen Şekil.2.8’de görülmektedir. Oyuk çapı arttıkça, oluşan toplam deplasmanda artar. Çalışma esnasında 0,2 ve 3 mm’lik polimer kullanılmıştır.



Şekil 2.7 Polimer ilaveli zil tipi transdüserde deplasman – oyuk çapı değişim grafiği

Çizelge 2.4 Kapaklar ve PZT disk arasında bulunan boşluğun çapının değiştirilmesiyle elde edilen deplasman değerleri

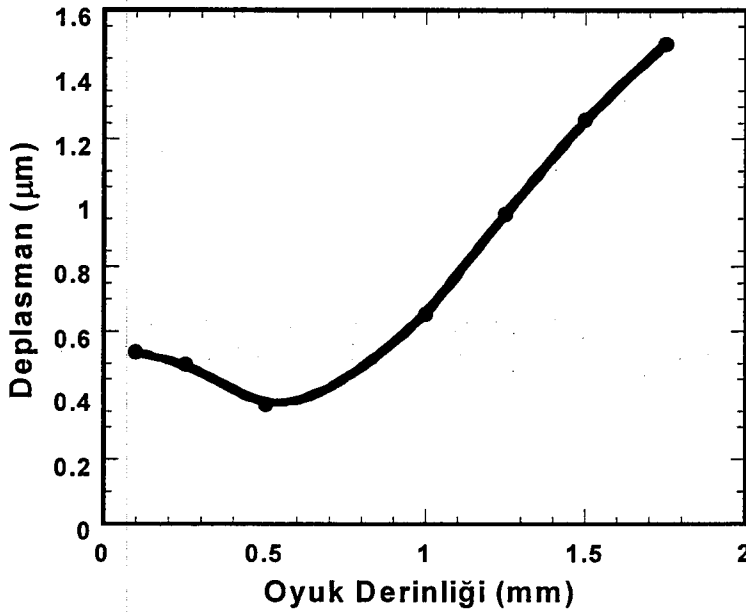
| Oyuk Çapı (mm) | Deplasman (μm) | |
|----------------|-----------------------------|-------------------|
| | 0.2 mm Polimer Çapı | 3 mm Polimer Çapı |
| 4.00 | 3.196 | 0.524 |
| 6.00 | 6,012 | 0.496 |
| 8.00 | 8,799 | 0.494 |
| 9.00 | 10,015 | 0.496 |
| 10.0 | 11,007 | 0.502 |
| 11.0 | 11,663 | 0.516 |
| 12.0 | 11,875 | 0.552 |



Şekil 2.8 Standart zil tipi transdüserde oyuk çapı-deplasman ilişkisi [18]

2.2.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Deplasmana Etkisi

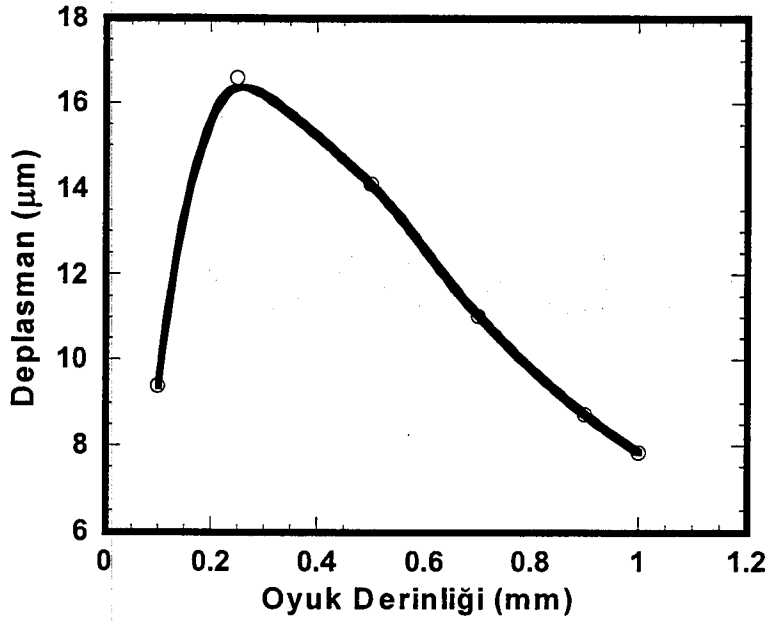
Oyuk derinliği de deplasman miktarını etkileyen bir faktördür. Şekil.2.9'da bu durumla ilgili olarak deplasman ve oyuk derinliği ilişkisi gösterilmektedir. Deplasman miktarlarının ilk aşamalarda düştüğü daha sonra hızlı ve doğrusala yakın bir artış gösterdiği görülmüştür. Fakat görünüşte oyuk içerisine polistren polimer malzeme yerleştirilmiş zil tipi transdüserin deplasman miktarının oyuk derinliği ile olan ilişkisi genel olarak artış yönünde olmuştur. Oyuk derinliğinin artması ile deplasman değerlerinin artışı Çizelge 2.5'te verilmektedir. Kullanılan polimerin yarıçapı 0,3mm'dir.



Şekil 2.9 Deplasman ve artan oyuk derinliği arasındaki ilişki

Çizelge 2.5 Oyuk derinliğinin artmasıyla transdüserin deplasmanında görülen değişim değerleri

| Oyuk Derinliği (mm) | Deplasman (µm) |
|---------------------|----------------|
| 0.10 | 0.534 |
| 0.25 | 0.496 |
| 0.50 | 0.370 |
| 1.00 | 0.652 |
| 1.25 | 0.966 |
| 1.50 | 1.260 |
| 1.75 | 1.496 |



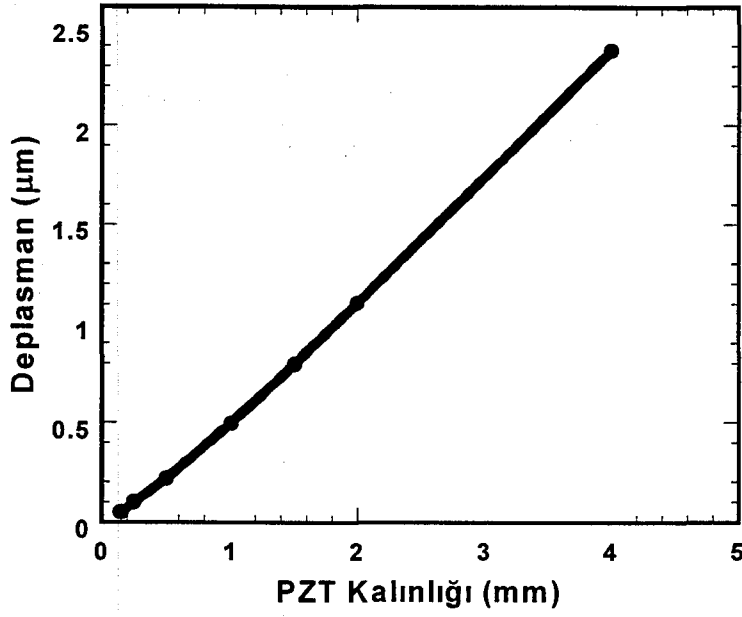
Şekil 2.10 Standart zil tipi transdüserde oyuk derinliğine bağlı olarak elde edilen deplasman değerleri [18]

Şekil.2.10'da standart zil tipi transdüser üzerinde oyuk derinliğine bağlı olarak çalışmalar yapılmış ve deplasman önce maksimum bir değere ulaşmakta ve daha sonra hızlı bir düşüş göstermektedir. İlk önce görülen deplasman artışı, yapıdaki iç enerji artışıyla açıklanabilir. Fakat daha sonra, oyuk derinliği arttıkça yapı hilal tipi transdüserine benzemekte ve sadece esnek hareket göstermektedir. Dönme hareketinin yavaş yavaş sönümlenmesiyle birlikte deplasmanda düşüş görülmektedir [18].

2.2.4. PZT Kalınlığı Değişiminin Deplasmana Etkisi

PZT seramik diskin kalınlığının artmasının polistrenli zil tipi transdüserin deplasman miktarına olan etkisi artış yönündedir. Bu durum Şekil.2.11'de gösterilmektedir. PZT kalınlığı-deplasman grafiğinde, piezoelektrik diskin kalınlığının artmasıyla, deplasmanın da hızlı bir şekilde doğrusal olarak arttığı gözlenmektedir (Şekil 2.11-Çizelge 2.6). 0.15 mm kalınlığındaki PZT diskin göstermiş olduğu deplasman miktarı 0,0522 μm olmasına rağmen, 4 mm'lik PZT disk kullanıldığında deplasman miktarı 2,380 μm'a yükselmiştir. Bu doğrusal artışın sebebi, PZT diskin kalınlığının

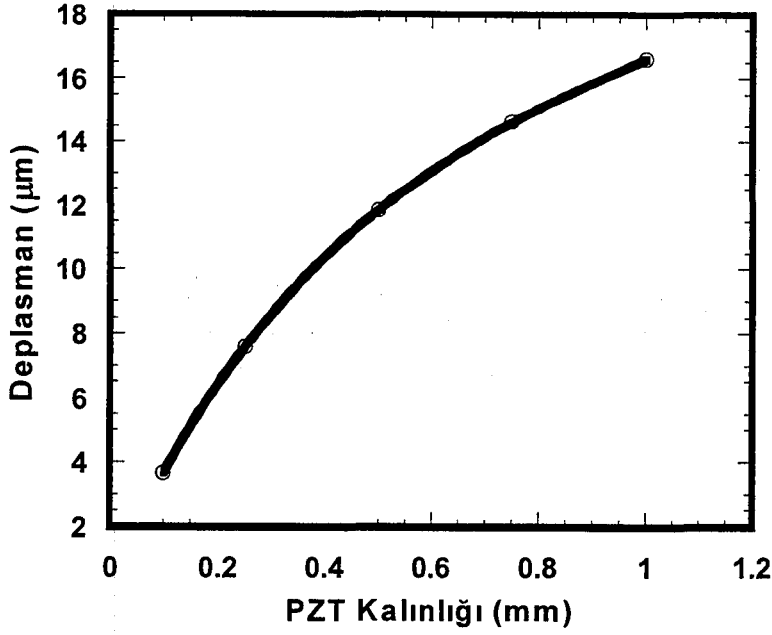
artmasıyla birlikte seramiğin alan etkisiyle büzüşmesi esnasında boyuna atılımın artması gösterilebilir. Kullanılan polimerin yarıçapı 1 mm'dir.



Şekil 2.11 Polimerli zil tipi transdüserde PZT disk elemanın kalınlığının transdüser deplasmanına olan etkisi

Çizelge 2.6 PZT disk kalınlığının deplasmana olan etkisiyle ortaya çıkan sayısal veriler

| PZT Kalınlığı (mm) | Deplasman (μm) |
|--------------------|----------------|
| 0.15 | 0.0522 |
| 0.25 | 0.0996 |
| 0.50 | 0.220 |
| 1.00 | 0.496 |
| 1.50 | 0.796 |
| 2.00 | 1.108 |
| 4.00 | 2.380 |

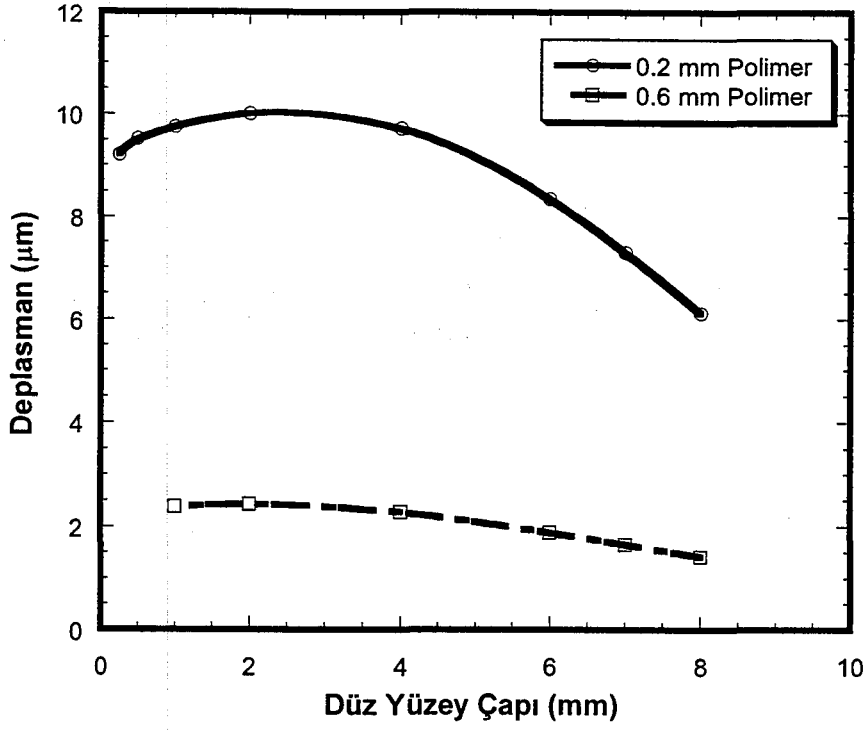


Şekil 2.12 Standart zil tipi transdüserde PZT kalınlığı-deplasman ilişkisi [18]

Pirinç kapaklı standart boyutlardaki transdüserde PZT kalınlığının artmasıyla birlikte transdüserin gösterdiği deplasmanda artmaktadır. PZT kalınlığı 0.1 mm'den 1 mm'ye çıkarıldığında deplasmanda 3.6 μm 'dan 16.60 μm 'a kadar çıkmaktadır (Şekil.2.12).

2.2.5. Düz Yüzey Çapı Değişiminin Deplasmana Etkisi

Düz yüzey çapının değiştirilmesiyle elde edilen deplasman davranışları Şekil 2.13 ve Çizelge 2.7'de verilmektedir. Düz yüzey çapının artırılmasıyla gözlenen ilk davranış deplasman miktarlarında gözlenen ani düşüştür. 0,25 mm'lik düz yüzey çapı ile elde edilen deplasman değeri 7,50 μm olmasına rağmen, hızlı bir düşüşle 2 mm'lik düz yüzey çapına ulaşıldığında deplasman değeri 0,448 μm 'a inmektedir. Bu durumdan sonra deplasman yaklaşık sabit bir davranış göstermektedir. Bunun sebebi olarak düz yüzey çapının artmasıyla birlikte polistren polimer malzeme çapının da artırılması söylenebilir. Kullanılan polimerlerin çapları 0,2 ve 0,6 mm'dir.



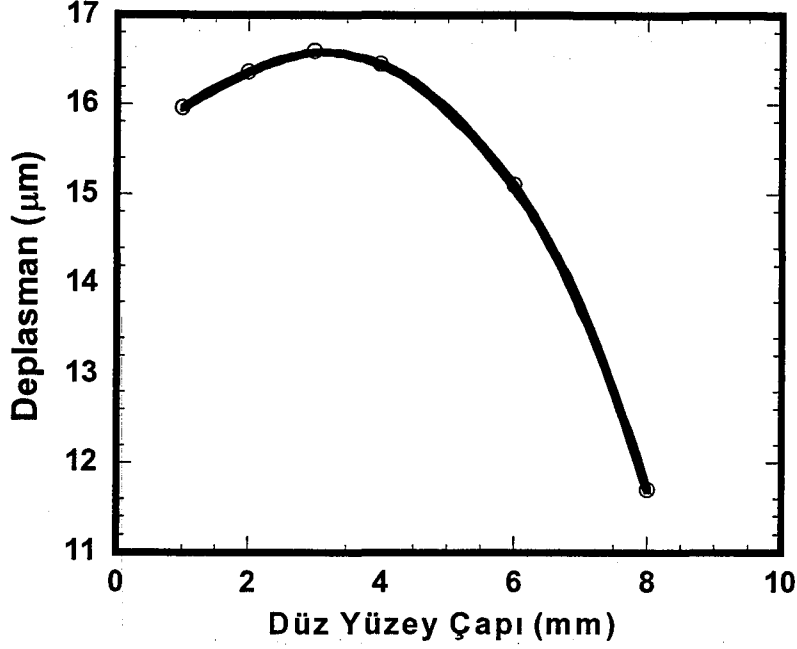
Şekil 2.13 Kapaklar arasında polimer bulunana transdüserde düz yüzey çapının deplasmanla olan ilişkisi

Çizelge 2.7 Düz yüzey çapının artışıyla deplasmandaki değişimler

| Düz Yüzey Çapı (mm) | Deplasman (µm) | |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0.2 mm Polimer Çapı | 0.6 mm Polimer Çapı |
| 0.25 | 9,210 | - |
| 0.50 | 9,525 | - |
| 1.00 | 9,753 | 2,374 |
| 2.00 | 10,022 | 2,423 |
| 4.00 | 9,727 | 2,266 |
| 6.00 | 8,362 | 1,886 |
| 7.00 | 7,308 | 1,655 |
| 8.00 | 6,121 | 1,421 |

Kapaklar arasına polimerik malzeme konulan zil tip transdüserde FEM ile hesaplanan deplasman değerleri, standart zil tipi transdüserle kıyaslanacak olunursa; polimerli transdüserde normal olarak beklenildiği gibi daha düşük

deplasman değerleri görülmüştür. Bunun yanında iki tasarımda da düz yüzey çapının artırımasıyla deplasman değerleri ani dler göstermiştir. Standart zil tipi transdüserin deplasman davranışı Şekil 2.14'te verilmiştir [18].



Şekil 2.14 Standart zil tipi transdüserde düz yüzey çapı-deplasman ilişkisi [18]

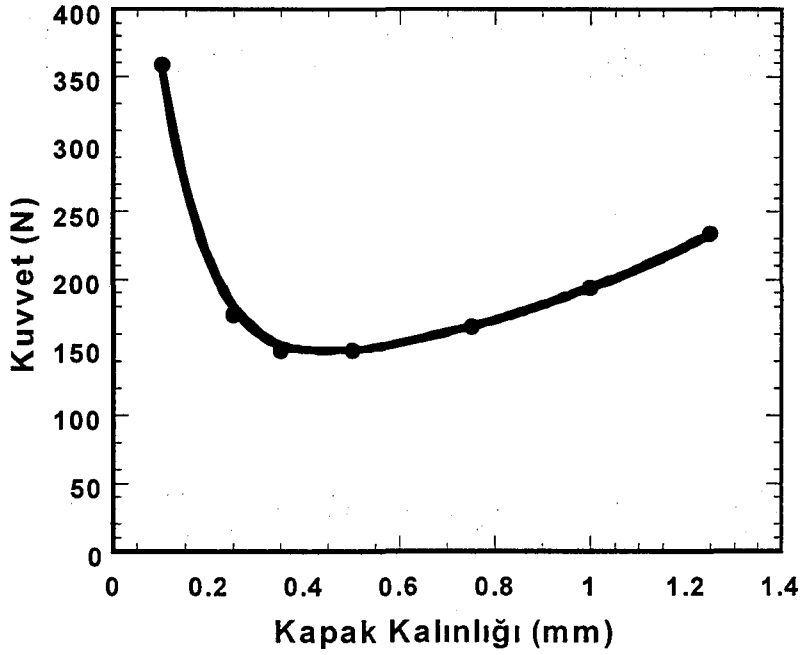
2.3. Boyut Değişimlerinin Oluşan Kuvvete Olan Etkisi

2.3.1. Kapak Kalınlığı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi

Boyut değişimlerinde kapak kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet değişimleri Şekil 2.15'da polimer ilaveli transdüser için gösterilmektedir. Transdüserin düz yüzeyindeki nodlara uygulanan kuvvetlerin bilekesiyle elde edilen bu kuvvet değerleri, üst ve alt merkezi noktanın deplasmanını sıfırlayacak niteliktedir. Böylece transdüserin belirli boyutlara sahip olduğunda ortaya çıkardığı kuvvet değerleri bulunmuş olunur.

Çizelge 2.8 Kapak kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet değerleri

| Kapak Kalınlığı (mm) | Kuvvet (N) |
|----------------------|------------|
| 0.10 | 358.3 |
| 0.25 | 174.3 |
| 0.35 | 148.3 |
| 0.50 | 147.9 |
| 0.75 | 165.9 |
| 1.00 | 194.1 |
| 1.25 | 234.0 |



Şekil 2.15 Artan metal kapak kalınlığı ve elde edilen kuvvet arasındaki ilişki

Kuvvetlerin hesaplanması çalışmalarının hepsinde polimer çapı 0,6 mm olarak alınmıştır.

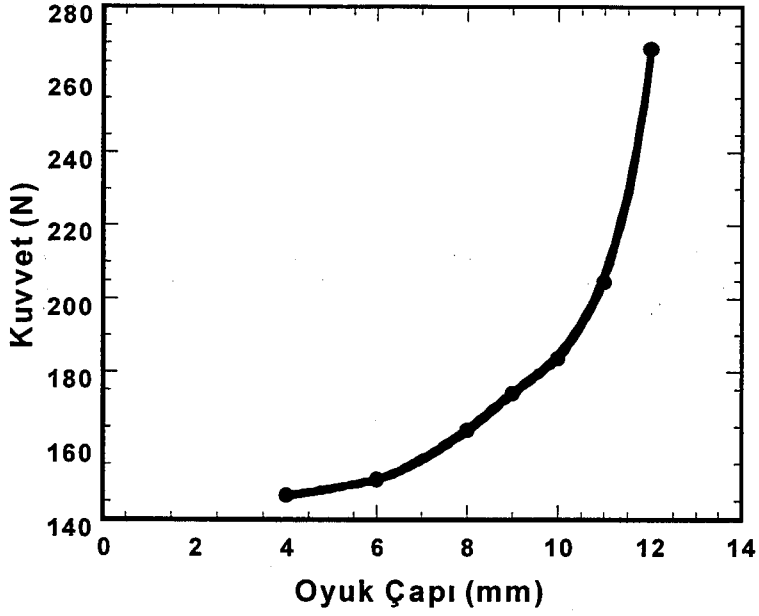
Kapak kalınlığının artırılmasıyla elde edilen kuvvet değerlerinde azalış ve artış davranışı gözlenmiştir. Dolayısıyla bir dönüm noktası elde edilmiş olur. Burada 0,1 mm'lik kapak kalınlığı kullanıldığında ortaya çıkan kuvvet değeri 358,3 N iken, 0,5 mm'lik kapak kalınlığında bu değer 147,9 N'a düşmektedir. Burada kapak kalınlığının artışı kapağın esneme kabiliyetinin düşüyle açıklanabilmektedir. Burada deplasman da düşüş göstermektedir. Daha sonraki kalınlık artışı PZT hareketinin kapağa daha iyi iletilmesi ve kalınlık artışıyla daha fazla kuvveti üzerine alabilmesiyle kuvvet değerlerinde tekrar bir artış görülmektedir. Elde edilen kuvvetlerin sayısal değerleri Çizelge 2.8'de kapak kalınlığı artışı sırasıyla verilmektedir.

2.3.2. Oyuk Çapı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi

Oyuk çapının değişimiyle de oluşan kuvvet değerlerinde de bir değişim gözlenmiştir. Oyuk çapının artmasıyla zil tipi transdüserin geometrisi de değişmiş olmaktadır. Kapak ve PZT disk arasındaki boşluğun miktarında da değişim olmuştur. Aynı zamanda metal kapağın tutunma yüzeylerinde bir azalış fakat bunun yanında ise metal kapağın daha esnek davranma kabiliyeti ortaya çıkmıştır. Çünkü boşluk üzerinde kalan metal kapak kısmı artmıştır. Bu artışın sonucunda elde edilen kuvvet değerlerinde de artış gözlenmiştir. Çizelge 2.9'da da oyuk çapının değerlerine karşılık ortaya çıkan kuvvetin sayısal verileri verilmektedir. Bu artış davranışı Şekil 2.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 2.9 Oyuk Çapının değişik boyutlardaki durumunda düz yüzeyde elde edilen kuvvet değerleri

| Oyuk Çapı (mm) | Kuvvet (N) |
|----------------|------------|
| 4.00 | 146.5 |
| 6.00 | 150.7 |
| 8.00 | 164.1 |
| 9.00 | 174.3 |
| 10.0 | 183.5 |
| 11.0 | 204.4 |
| 12.0 | 268.6 |



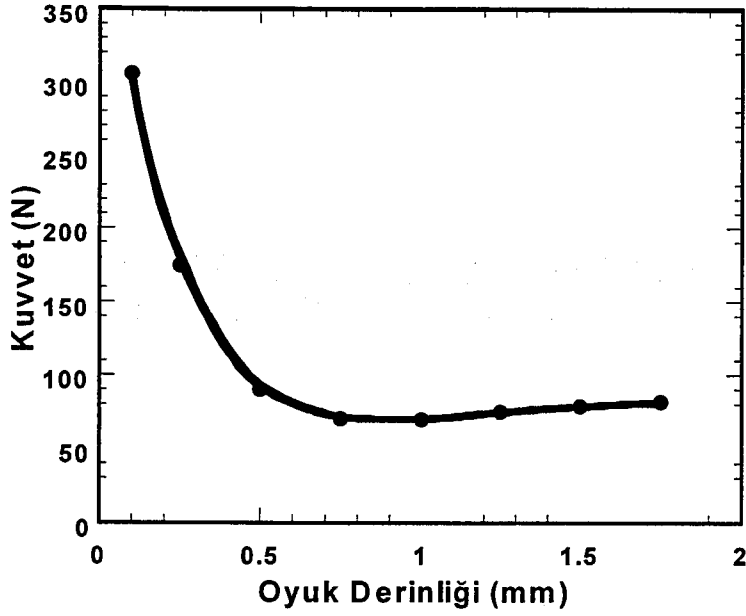
Şekil 2.16 Artan oyuk çapı ile elde edilen kuvvet ilişkisi grafiği

2.3.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi

Oyuk derinliğinin transdüser özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu gözlenmiştir. Oyuk derinliğinin artışı, kapak geometrisindeki bir değişimle elde edilebilir. Kapağın eğimli kısımlarının eğimi artırılmıştır. Böylece kapak deplasman hareketinde daha rahat hareket edebilmesine rağmen, oluşan kuvvet açısından azalan bir eğilim göstermektedir.

Çizelge 2.10 Oyuk derinliğinin transdüserin düz yüzeyindeki nod'lara uygulanan kuvvet değerleri

| Oyuk Derinliği (mm) | Kuvvet (N) |
|---------------------|------------|
| 0.10 | 305.30 |
| 0.25 | 174.30 |
| 0.50 | 90.00 |
| 0.75 | 70.60 |
| 1.00 | 69.50 |
| 1.25 | 74.80 |
| 1.50 | 78.70 |
| 1.75 | 81.50 |



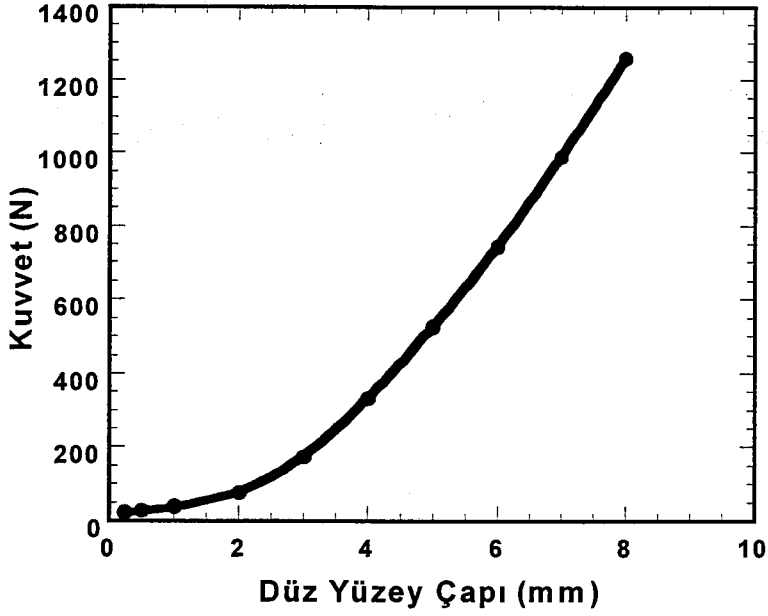
Şekil 2.17 Kapak altında kalan boşluğun derinliğine bağlı olarak elde edilen kuvvet grafiği

Çizelge 2.10'da oyuk derinliğinin değişmesiyle elde edilen kuvvet değerleri görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.17'de oyuk derinliği ve kuvvet arasındaki değişim grafiği ele alınmıştır. Böylece oyuk değişimi ile zil tipi transdüser geometrisinin elde edilen kuvvet açısından azalış davranışı sergilemesi daha iyi bir şekilde görülmektedir.

2.3.4. Düz Yüzey Çapı Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi

Zil tipi transdüserlerde düz yüzey çapının değiştirilmesiyle uygulanan kuvvette görülen değişim Şekil 2.18'te görülmektedir. Oyuk çapının 0,25 mm çapıyla göstermiş olduğu kuvvet değeri 21,50 N'dur. Oyuk çapının artırılmasıyla kuvvette ani yükselen bir davranış göstermektedir. Oyuk çapının 8mm'ye ulaşmasıyla kuvvet değerinde 1257 N'a kadar bir yükselme meydana gelmektedir. Kuvvetteki böylesine hızlı artışın sebebi olarak; düz yüzey çapındaki artışla beraber cymbal transdüserin boşluk kısmına yerleştirilen polistren malzemenin çapının da artması verilebilir. Böylelikle hem düz yüzey hem de polistren polimerin çaplarının artması elde edilen kuvvet değerlerini

parabolik bir şekilde artırmıştır. Çizelge 2.11’de oyuk çapı ve kuvvet değerleri sayısal veriler halinde görülmektedir.



Şekil 2.18 Transdüserin düz yüzey çapındaki değişiminin uygulanan kuvvete olan etkisi

Çizelge 2.11 Düz yüzey çapının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet değerleri

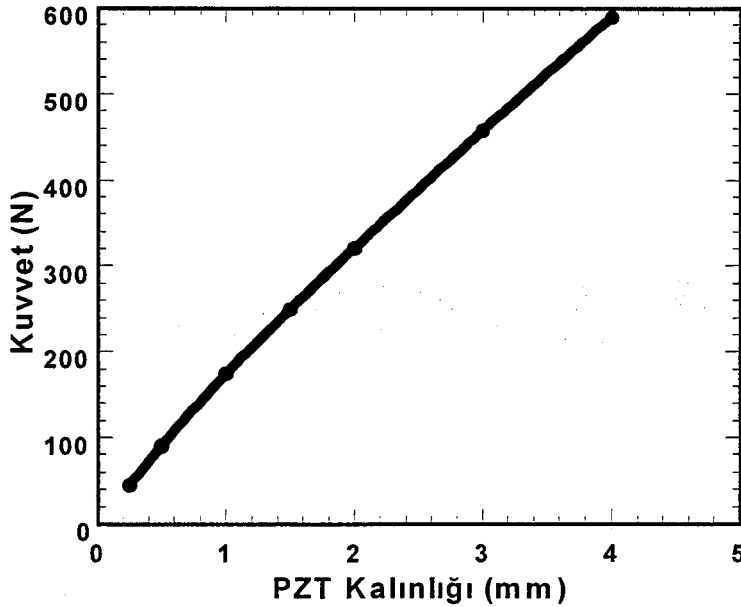
| Düz Yüzey Çapı (mm) | Kuvvet (N) |
|---------------------|------------|
| 0.25 | 21.50 |
| 0.50 | 25.70 |
| 1.00 | 36.80 |
| 2.00 | 74.57 |
| 3.00 | 171.3 |
| 4.00 | 331.5 |
| 5.00 | 525.1 |
| 6.00 | 742.1 |
| 7.00 | 988.9 |
| 8.00 | 1257 |

2.3.5. PZT Disk Kalınlığının Değişiminin Oluşan Kuvvete Etkisi

Modellemede kullanılan PZT seramik diskin kalınlığının değişimiyle transdüserin üst/alt merkez noktasında meydana gelen kuvvetin miktarı da değişim göstermektedir. Bu davranış, PZT kalınlığının artması ile kuvvet değerlerinde de artış meydana getirdiğini göstermiştir. Şekil 2.19'da ve izelge 2.12'de de görüldüğü gibi yaklaşık olarak doğrusal bir ilişkiye benzemektedir.

Çizelge 2.12 Piezoelektrik seramik disk kalınlığının değiştirilmesiyle ulaşılan kuvvet değerleri

| PZT Kalınlığı (mm) | Kuvvet (N) |
|--------------------|------------|
| 0.25 | 44.500 |
| 0.50 | 90.100 |
| 1.00 | 174.30 |
| 1.50 | 249.90 |
| 2.00 | 320.60 |
| 3.00 | 457.20 |
| 4.00 | 589.20 |

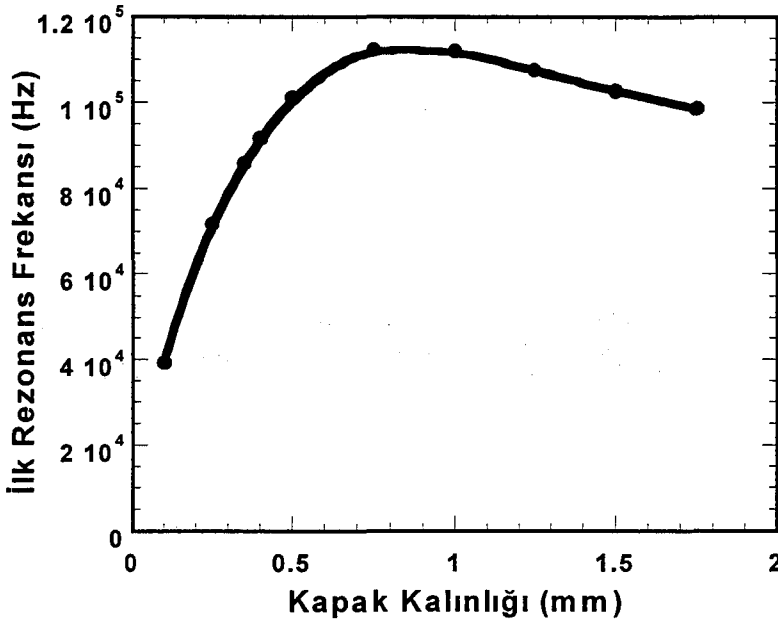


Şekil.2.19 Piezoelektrik seramik diskin (PZT) kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen kuvvet grafiği

2.4. Boyutlardaki Değişimlerin Rezonans Frekansına Olan Etkisi

2.4.1. Kapak Kalınlığı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi

Sonlu elemanlar analizi ile modellenen transdüserin ilk rezonans frekansının geometrik boyutların değişimi ile değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bunun için ilk olarak kapak kalınlığının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki; kapak kalınlığının artışıyla ilk rezonans frekansı değerlerinde de artış meydana gelmektedir (Şekil 2.20).



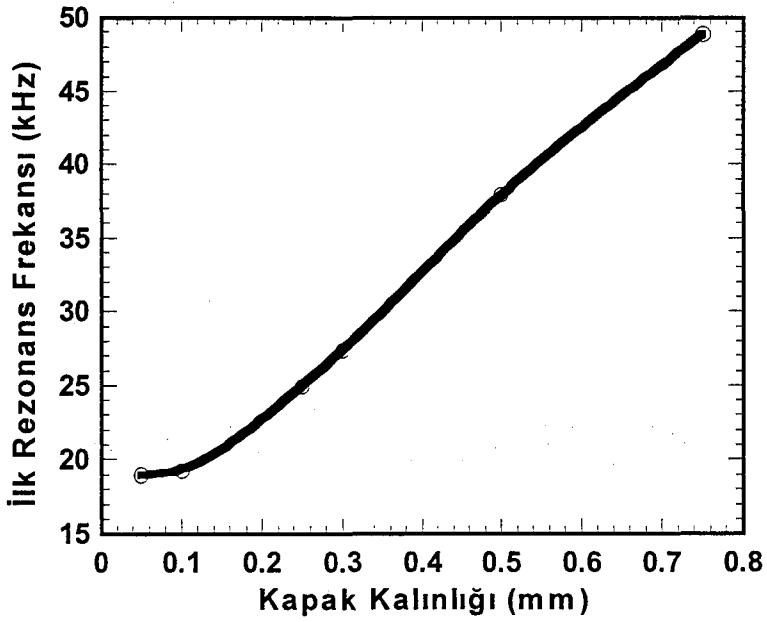
Şekil 2.20 Kapak kalınlığı – Rezonans frekansı grafiği

Çizelge 2.13'de ise kapak kalınlığının artan değerlerine karşılık ilk rezonans frekansı değerleri verilmektedir. Kapak kalınlığı 0,1 mm iken rezonans frekansı 39,29 kHz'dir ve kapak kalınlığı 0,75 mm'de iken rezonans frekansı 112,30 kHz'ye yükselmiştir.

Önceki çalışmalardan alınan sonuçlara göre Şekil 2.21'de standart zil tipi transdüserin kapak kalınlığı değişimi ilk rezonans frekansı grafiği verilmiştir [18].

Çizelge 2.13 Kapak kalınlığının değişimiyle elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri

| Kapak Kalınlığı (mm) | Rezonans Frekansı (Hz) |
|----------------------|------------------------|
| 0.10 | 39290 |
| 0.25 | 71604 |
| 0.35 | 85900 |
| 0.40 | 91645 |
| 0.50 | 100920 |
| 0.75 | 112302 |
| 1.00 | 111895 |
| 1.25 | 107462 |
| 1.50 | 102691 |
| 1.75 | 98682 |



Şekil 2.21 Standart zil tipi transdüser için kapak kalınlığının değişimiyle elde edilen ilk rezonans frekans değişim grafiği [18]

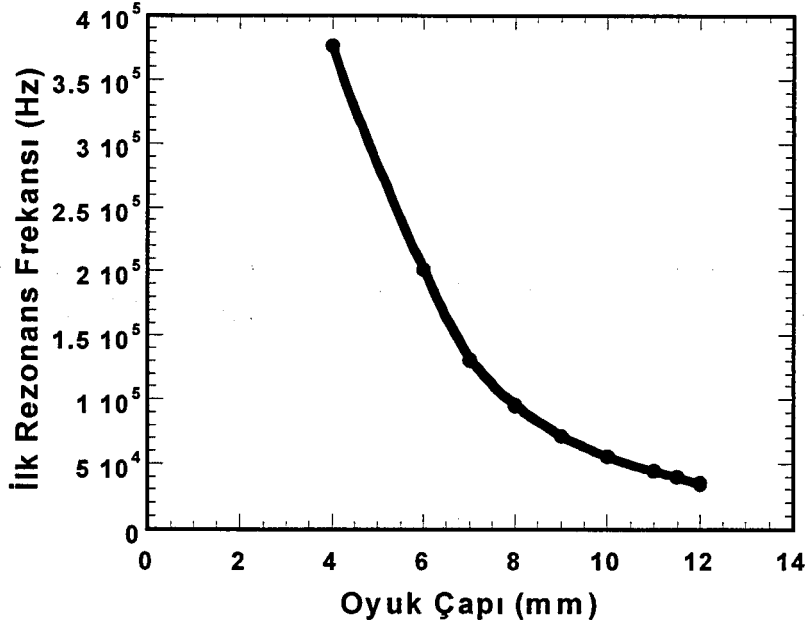
Standart cymbal'da metal kapak kalınlığı arttıkça transdüserin ilk rezonans frekansı da artmaktadır [18].

2.4.2. Oyuk Çapı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi

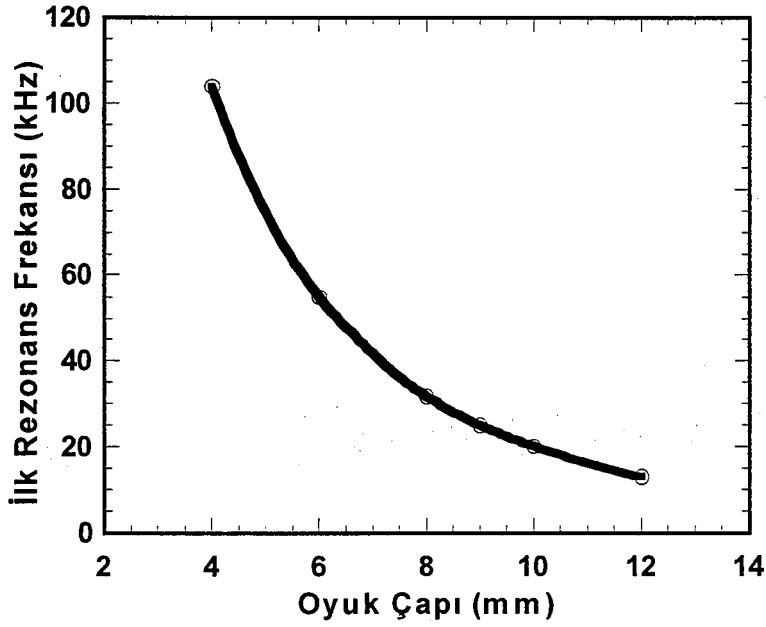
Sonlu elemanlar analizi kullanılarak hesaplanmış, oyuk çapının, zil tipi transdüserin ilk rezonans frekansı üzerindeki etkisi Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Oyuk çapının armasıyla zil tipi transdüserin efektif çapı artmaktadır. Oyuk çapının değişimi rezonans frekansında etkili olan çok önemli bir parametredir. Değişimin nedeni olarak bağlayıcı tabakada bulunan epoksi tabakasının genişlemesine ve daralması gösterilebilir. Oyuk çapı genişledikçe epoksi tabakasının da daralacağı düşünülmelidir. Böylece transdüserin efektif çapı arttıkça rezonans frekansında azalış gözlenmiştir. Çizelge 2.14'te sayısal veriler şeklinde oyuk çapının artan değerlerine karşı elde edilen ilk rezonans frekansının değerleri verilmektedir.

Çizelge 2.14 Farklı oyuk çaplarındaki rezonans frekansındaki değişim değerleri

| Oyuk Çapı (mm) | Rezonans Frekansı (Hz) |
|----------------|------------------------|
| 4.00 | 376066 |
| 6.00 | 201755 |
| 7.00 | 130596 |
| 8.00 | 95259 |
| 9.00 | 71604 |
| 10.00 | 55569 |
| 11.00 | 44262 |
| 11.50 | 39693 |
| 12.00 | 34722 |



Şekil 2.22 Polimerli zil tipi transdüserin oyuk çapı ile rezonans frekansı ilişki grafiği

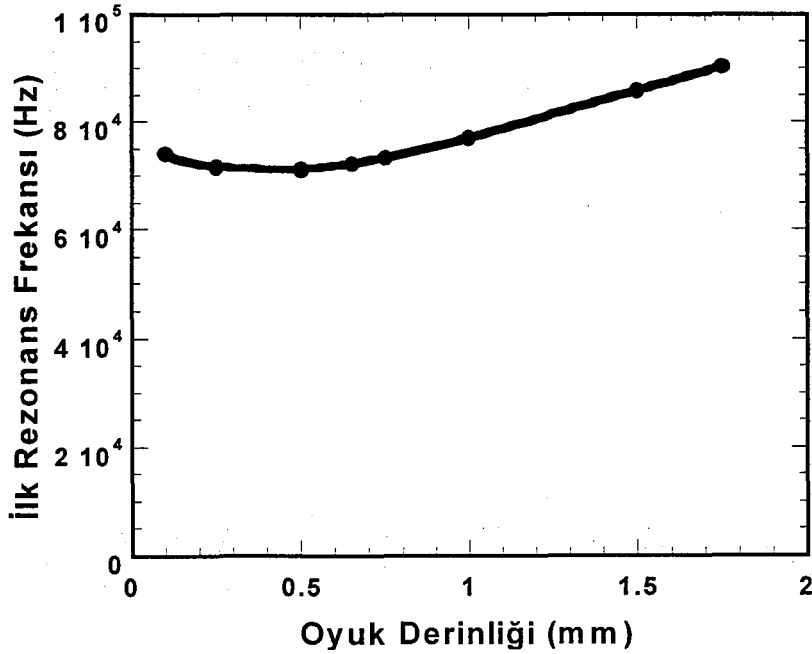


Şekil.2.23 Standart zil tipi transdüserde oyuk çapının artırılmasıyla bulunan ilk rezonans frekansı [18]

Şekil 2.22’da oyuk çapındaki değişimine karşı rezonans frekansı davranışı çizilen grafik görülmektedir. Şekil 2.23’te ise daha önce yapılmış bir çalışmadan alınan standart zil tipi transdüserdeki ilk rezonans frekansı değişim grafiği verilmektedir.

2.4.3. Oyuk Derinliği Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi

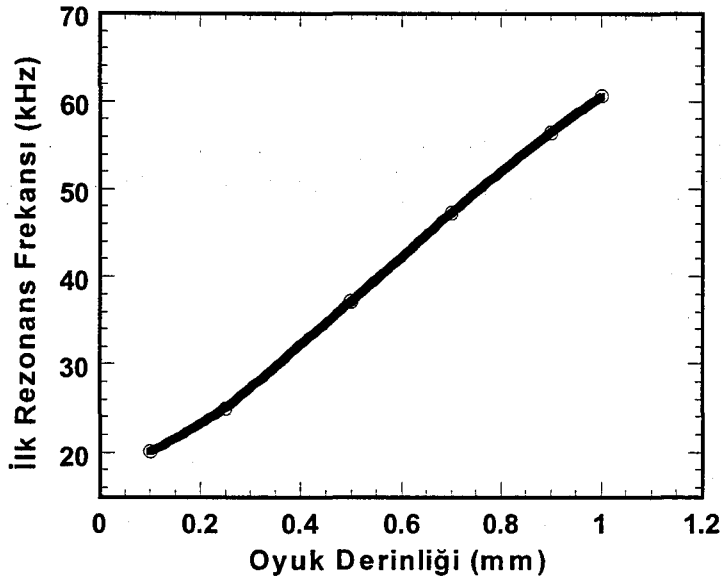
Zil tipi transdüserde oyuk derinliğinin artışıyla ilk rezonans frekansının değişimi sonlu elemanlar analizi kullanılarak bulunmuştur. Bu incelemede oyuk derinliğinin artmasıyla birlikte boşluk kısma yerleştirilen polistren malzemenin de kalınlığının arttığı kabul edilmiştir. Polistren malzemenin kalınlığının artırılmasının sebebi, istenilen geometrinin korunmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.24’te rezonans frekansı değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 2.24 Oyuk derinliği ile ilk rezonans frekansı arasındaki ilişkisi

Çizelge 2.15 Transdüserin oyuk derinliği değiştirilmesiyle elde edilen rezonans frekansı değerleri

| Oyuk Derinliği (mm) | Rezonans Frekansı (Hz) |
|---------------------|------------------------|
| 0.10 | 74127 |
| 0.25 | 71604 |
| 0.50 | 71173 |
| 0.65 | 72250 |
| 0.75 | 73347 |
| 1.00 | 76969 |
| 1.50 | 85844 |
| 1.75 | 90299 |



Şekil 2.25 Standart zil tipi transdüserde oyuk derinliğinin rezonans frekansına etkisi [18]

Polimer yerleştirilmiş zil tipi transdüserin ilk rezonans frekansındaki değişimin oyuk derinliğine olan bağımlılığı Şekil 2.24'te açık olarak görülmektedir. Oyuk derinliğinin artmasıyla elde edilen davranış oyuk çapının artışıyla olan etkileşimin aksi olan bir değişim gözlenmiştir. Oyuk çapının ilerleyen artışıyla FEM ile hesaplanan ilk rezonans frekansı değerlerinin de arttığı açık olarak görülmektedir. Çizelge 2.15'te ise oyuk derinliği ve rezonans frekanslarının karşılıklı sayısal veriler halinde artışı verilmektedir. Bu artış

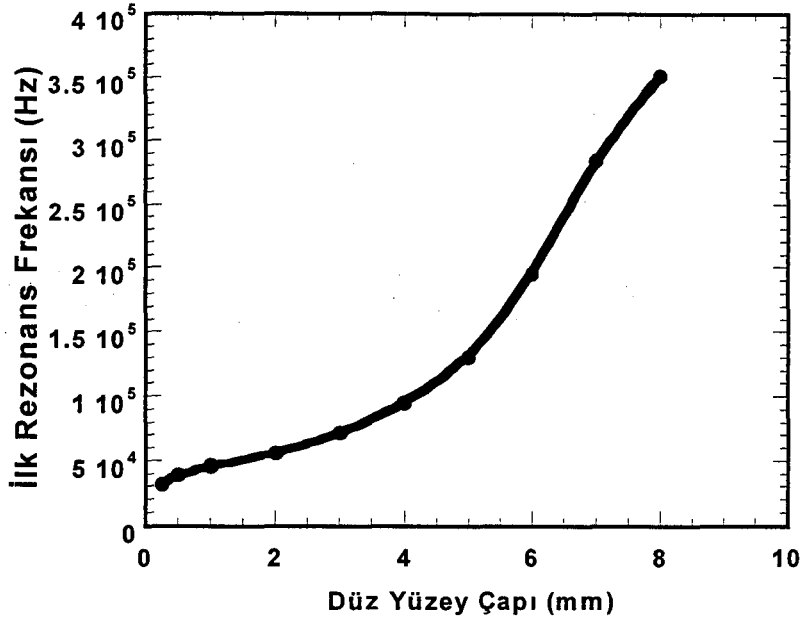
0,1 mm'lik oyuk derinliğinde 74,1 kHz'den 1,75 mm'lik oyuk derinliğindeki 90,2 kHz'ye kadar sürmüştür. Şekil 2.25'te ise standart zil tipi transdüserin oyuk derinliğiyle rezonans frekansında göstermiş olduğu değişimi gösteren grafik verilmektedir.

2.4.4. Düz Yüzey Çapı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi

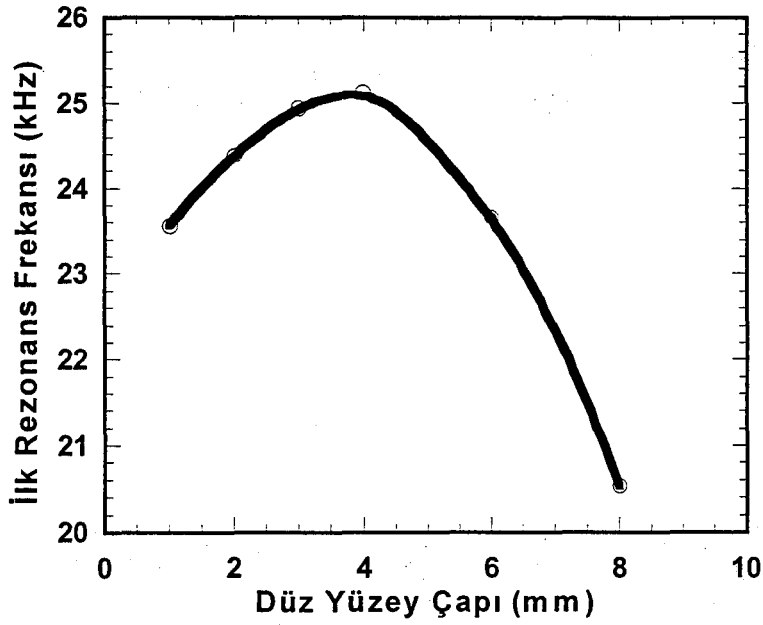
Düz yüzey çapı da transdüserin ilk rezonans frekansını etkilemektedir. Bu durum Şekil 2.26'da grafiksel şekilde gözlenmektedir. Düz yüzey çapı arttıkça öncelikli olarak, efektif çap azalmaktadır. Düz yüzeyin artmasıyla polistren malzeme çapı da artmaktadır. Efektif çapın azalmasıyla transdüserin yeni boyutuyla birlikte ilk rezonans frekansları sonlu elemanlar metodu ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak Şekil 2.26'dan da görüldüğü üzere, düz yüzey çapının artışıyla rezonans frekansının da artış davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Çizelge 2.16'da da hesaplanan sonuçlar artan düz yüzey çapına karşılık artan ilk rezonans değerleri şeklinde izlenmektedir. Rezonans frekansı değerleri, 0,25 mm'lik düz yüzey çapında 31,2 kHz, 8 mm'lik çapa ulaşıldığında ise 351 kHz'lik değere çıkmıştır. Düz yüzey çapındaki bu değişim diğer boyut değişimlerinde de olduğu gibi rezonans frekansında da farklılıklara yol açmıştır. Böylece düz yüzey çapının değiştirilmesiyle istenilen rezonans frekansı düzeylerine ulaşılması olasıdır.

Çizelge 2.16 Düz yüzey çapının artırılmasıyla elde edilen rezonans frekansı değerleri

| Düz Yüzey Çapı (mm) | Rezonans Frekansı (Hz) |
|------------------------|---------------------------|
| 0.25 | 31290 |
| 0.50 | 39276 |
| 1.00 | 45899 |
| 2.00 | 55926 |
| 3.00 | 71604 |
| 4.00 | 94910 |
| 5.00 | 130037 |
| 6.00 | 194683 |
| 7.00 | 284537 |
| 8.00 | 351144 |



Şekil 2.26 Artan düz yüzey çapı ile hesaplanan ilk rezonans frekanslarındaki değişim

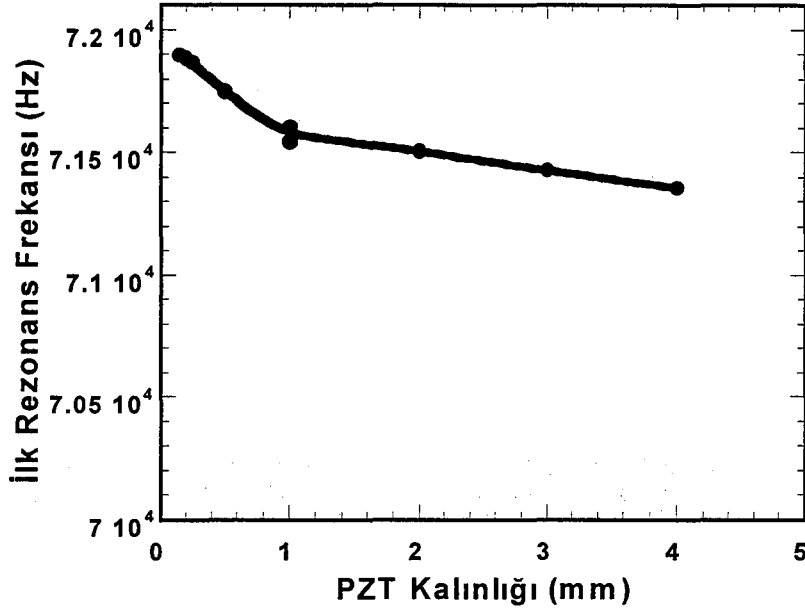


Şekil 2.27 Standart zil tipi transdüserde artan düz yüzey çapı ile ilk rezonans frekanslarındaki değişim [18]

Şekil 2.26'da polimer ilaveli, Şekil 2.27'de ise standart zil tipi transdüser için düz yüzey ile rezonans frekansı arasındaki ilişkiler sergilenmektedir.

2.4.5. PZT Kalınlığı Değişiminin Rezonans Frekansına Etkisi

PZT kalınlığının artışıyla birlikte ilk rezonans frekans değişim davranışı Şekil 2.28’de gösterilmektedir. Piezoelektrik diskin kalınlığının değiştirilmesi ile hesaplanan rezonans değerlerinde de bir değişim meydana gelmektedir. Disk kalınlığının artması hesaplanan ilk rezonans değerlerini düşürdüğü gözlenmektedir. Fakat bu değişim diğer boyutlardaki değişimler ile karşılaştırıldığında çok fazla etkili değildir .

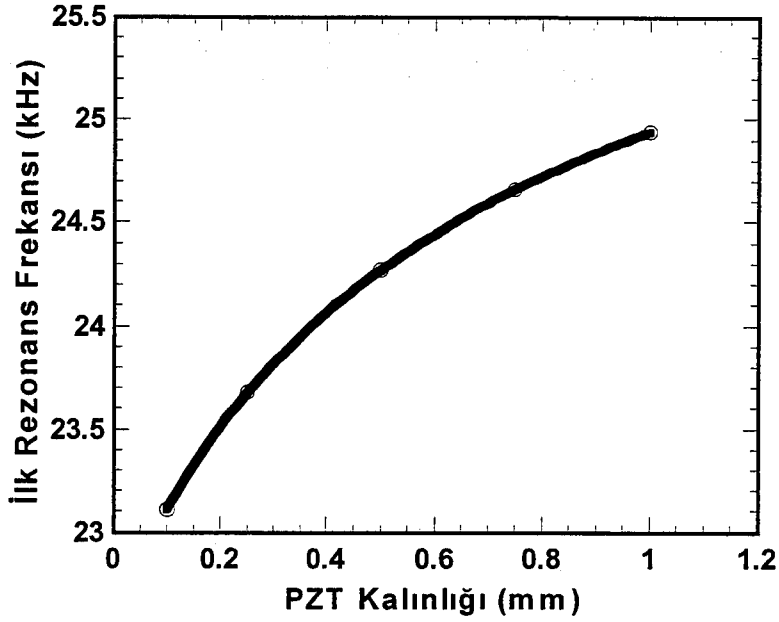


Şekil 2.28 PZT kalınlığı – Rezonans frekansı grafiği

Çizelge 2.17 Farklı kalınlıklarda PZT disk kullanımının getirdiği ilk rezonans frekansı değerleri

| PZT Kalınlığı (mm) | Rezonans Frekansı (Hz) |
|--------------------|------------------------|
| 0.15 | 71895 |
| 0.20 | 71884 |
| 0.25 | 71867 |
| 0.50 | 71748 |
| 1.00 | 71604 |
| 1.00 | 71543 |
| 2.00 | 71504 |
| 3.00 | 71428 |
| 4.00 | 71356 |

Çizelge 2.17’de PZT kalınlığının artmasıyla beraber hesaplanan rezonans frekanslarının sayısal karşılaştırılması verilmektedir. 0,15 mm’lik PZT kalınlığında 71,8 kHz’lik rezonans frekansı ile 4 mm’lik kalınlıktaki hesaplanan rezonans frekansı 71,3 kHz arasındaki azalış çok fazla etkili değildir.



Şekil 2.29 Standart zil tipi transdüserde rezonans frekansının PZT kalınlığı ile olan ilişkisi

Genelde PZT kalınlığının etkisi diğer boyut değişimlerinin rezonans frekansı üzerindeki etkilerine göre çok daha düşüktür. Bu etkinin az olduğunu Şekil 2.28’de polimer ilaveli ve Şekil 2.29’da standart için verilen değişim grafikleri de ortaya koymaktadır [18].

2.5. Zil Tipi Transdüser Polimer Malzeme Yerleştirilmesinin Transdüser Özelliklerine Etkileri

Elektromekanik kavrama (coupling) faktörü ve verim terimleri çok yakın anlamlara sahiptirler. İkisi de elektriksel enerji ve mekanik enerji arasındaki dönüşümle ilgili olmakla birlikte, tanımları farklıdır. Elektromekanik coupling faktörü; k ;

$$k^2 = (\text{Depolanan mekanik enerji} / \text{girdi elektrik enerjisi}) \quad (2.1)$$

veya;

$$k^2 = (\text{Depolanan elektrik enerji} / \text{girdi mekanik enerjisi}) \quad (2.2)$$

Admitans spektrasından, efektif elektromekanik coupling faktörü elde edilebilir. Elektromekanik coupling katsayısı genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir [19];

$$k^2 = \frac{\text{dönüsen enerji}}{\text{toplam girdi enerji}} = \frac{E_{trans}}{E_{maksimum}} \quad (2.3)$$

V genlikli bir AC voltajı uygulandığında, transdüserde depolanan maksimum enerji;

$$E_{maksimum} = \frac{(C_0 + C_m)V^2}{2} \quad (2.4)$$

Eşitlikteki C_0 kavrama (clamped) kapasitansı, C_m ise hareket kapasitansıdır. Bundan dolayı, dönüştürülen maksimum enerji;

$$E_{trans} = \frac{C_m V^2}{2} \quad (2.5)$$

Böylece, elektromekanik coupling katsayısı aşağıdaki gibi verilir:

$$k^2 = \frac{C_m}{C_m + C_0} \quad (2.6)$$

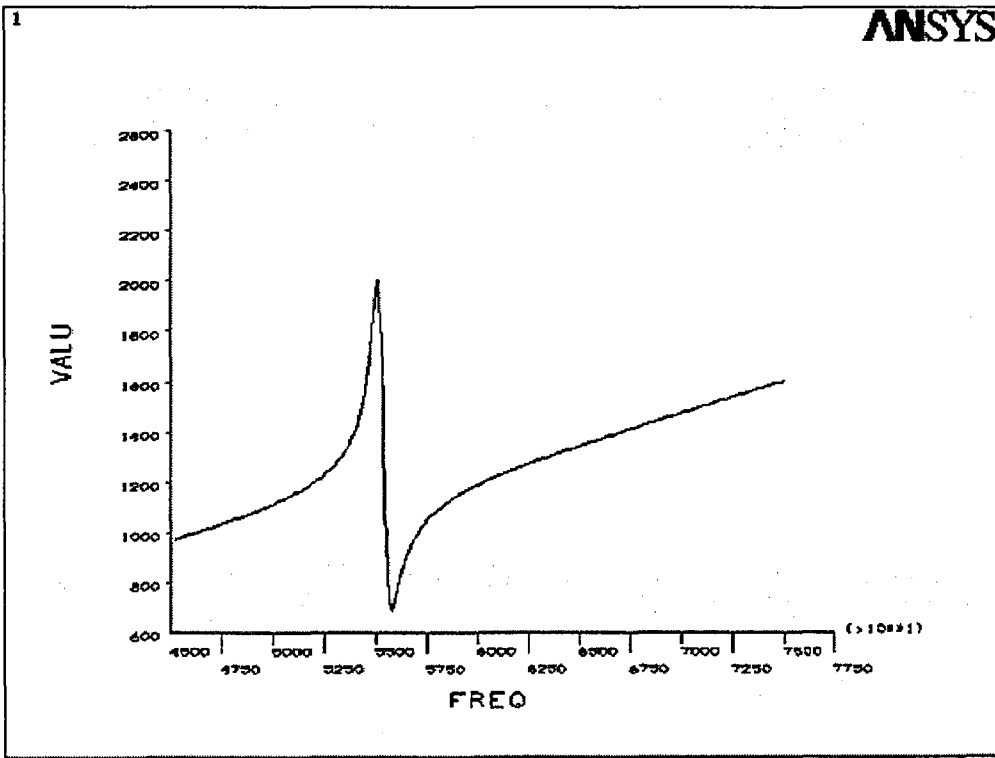
Elektromekanik coupling katsayısı ölçülen rezonans; f_r , ve antirezons; f_a , frekanslarından daha kolay bir şekilde hesaplanabilir [19].

$$k^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad (2.7)$$

Admitansın gerçek (kondüktans, G) ve sanal (suseptans, B) kısımları çizdirildiğinde, mekanik kalite faktörü, Q_m için aşağıda verilen eşitlikteki gibi bir anlam sağlayabilmektedir;

$$Q_m = \frac{f(G_{maksimum})}{f(B_{maksimum}) - f(B_{minimum})} \quad (2.8)$$

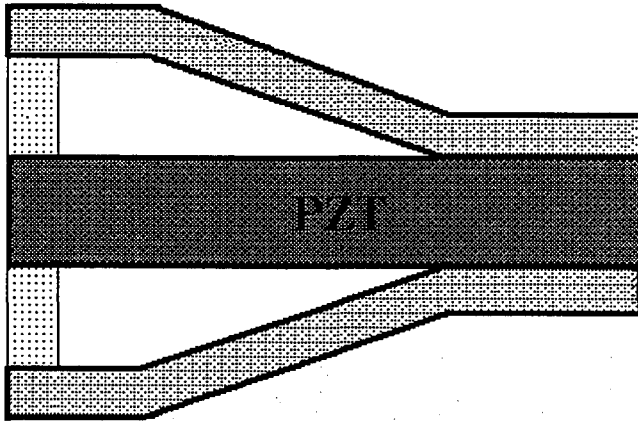
Şekil 2.30'da kapaklar altındaki polimer konulmuş transdüserin admitans grafiklerinden bir örnek verilmektedir.



Şekil 2.30 Admitans spektrasından bir görünüm. (Rezonans ve antirezonans frekansları)

2.5.1 Kapaklar Arasına Yerleştirilen Polimer Malzemenin Transdüserin Özelliklerine Etkisi

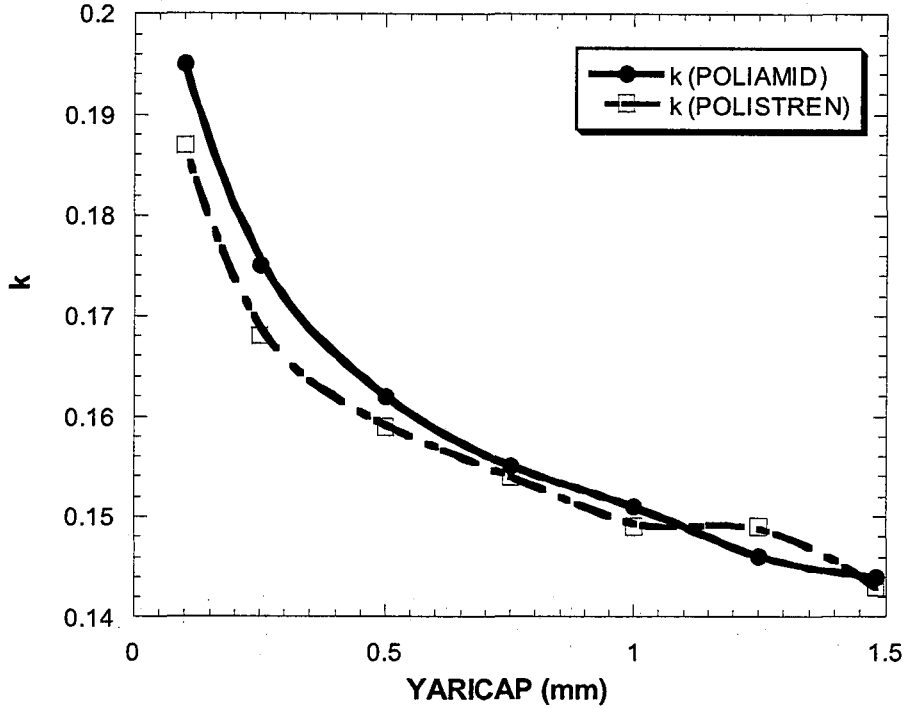
Kapaklar arasına polimer konulmuş şekliyle zil tipi transdüserin 2 boyuttaki aksi-simetrik modeli şekil 2.31’de görülmektedir. Zil tipi transdüser’de kapaklar arasındaki boşluğa, PZT diske temas edecek şekilde polimerik bir malzeme (polistren ve poliamid) yerleştirildiğinde polimerik malzemenin yarıçapının değişimine bağlı olarak zil tipi transdüserin ‘k’ değerindeki değişim grafiği Şekil 2.32’de verilmektedir.



Şekil 2.31 Zil tipi transdüserin iki boyutlu aksi-simetrik yarısının basit modeli

Özellikler incelenirken iki çeşit polimer malzeme kullanılmıştır. Polistren ve poliamid-12 elastik modüllerinin farklı olmasından dolayı seçilmiş iki malzemedir. Elastik modüllerinin farklı olmasının yanında poisson oranı ve yoğunluklarında da farklılık olan bu iki polimer transdüser kapaklarının arasındaki boşlukta PZT disk malzemeye temas edecek şekilde kapak ve disk arasında sıkıştırılmıştır. Bu malzemelerin etkisini Şekil.2.32’de verilen grafikte görmek mümkündür. Polistren malzeme de disk şeklinde olup yarıçap artışına göre inceleme ve analizler yapılmıştır. Polimer yarıçapının artırılması transdüserin ‘k’ değerlerinde belirgin bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. Bu durumun lineer veya değişik davranışlarla düşüş gösterdiğini bulabilmek için daha hassas analizlerle yakalanabilme ihtimali bulunmaktadır. Rezonans frekanslarını bulurken belirli frekans aralıkları belirli aralıklara bölünmesi ile

analiz yapılarak bu aralıklardaki frekans noktalarının gerçekte hangi noktalara düştüğü bulunabilir. Bunun için daha hassas aralıklar belirlenerek çalışmalar sürdürülmüştür. Bunun için yapılan analizler sonucunda, ANSYS programı tarafından çizdirilen admitans grafiklerinden bir tanesi örnek olarak verilmiştir (şekil.2.30). Polimerin etkisi sayısal olarak çizelge.2.18’de verilmektedir.



Şekil 2.32 Polimerik iki farklı malzemenin zil tipi transdüserin kapakları arasında konulmasıyla 'k' değerlerinde meydana gelen değişim grafiği

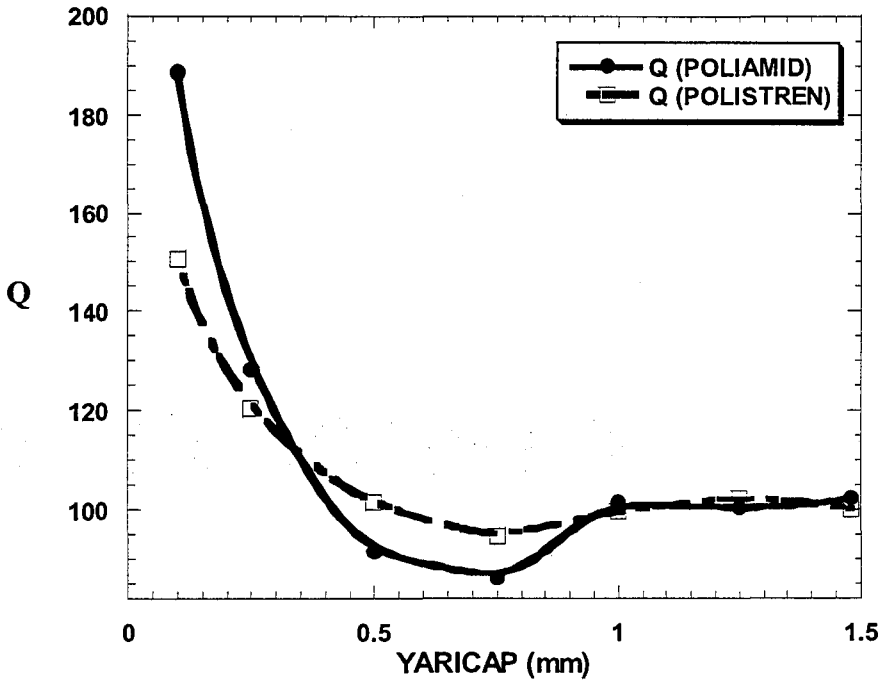
Çizelge 2.18 Artan polimer yarıçapına karşılık k sayısal verileri

| Polimer Yarıçapı (mm) | k | |
|--------------------------|----------|-----------|
| | Poliamid | Polistren |
| 0.10 | 0.195 | 0.187 |
| 0.25 | 0.175 | 0.168 |
| 0.50 | 0.162 | 0.159 |
| 0.75 | 0.155 | 0.154 |
| 1.00 | 0.151 | 0.149 |
| 1.25 | 0.146 | 0.149 |
| 1.48 | 0.144 | 0.143 |

Çizelge.2.19’da verilen sayısal verilerin hesaplanması daha önce bahsedilen rezonans ve antirezons frekanslarından yararlanılarak Eşitlik 2.7 ile hesaplanılmıştır. Diğer hesaplamalarda da aynı eşitlikler kullanılmıştır. Ayrıca Eşitlik 2.8 kullanılarak hesaplanan ‘Q’ değerleri Çizelge 2.19’da verilmektedir. Bu verilerin grafiksel davranışları Şekil 3.4’te gösterilmektedir.

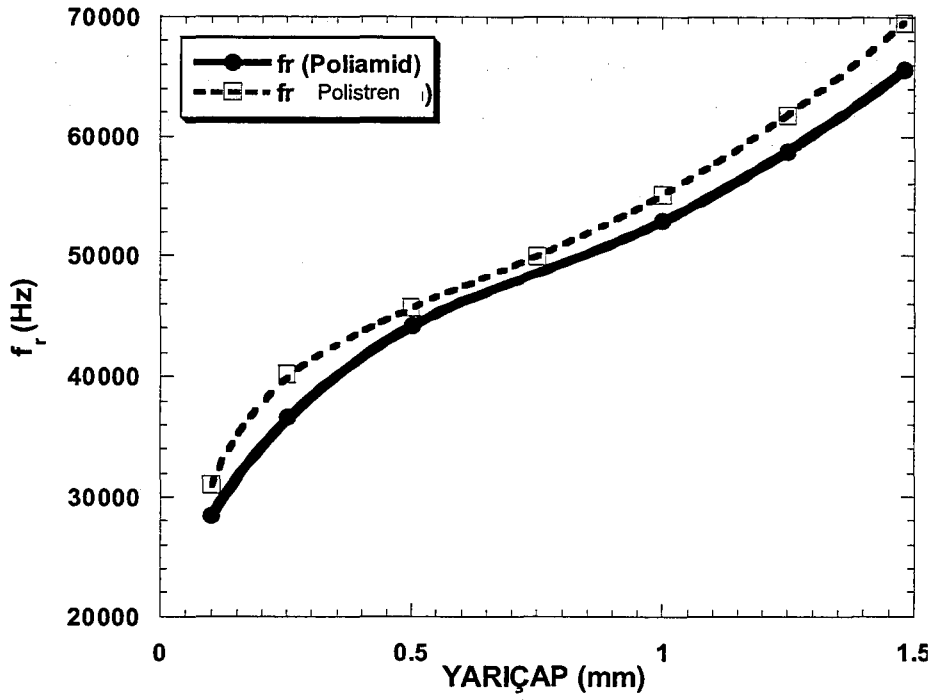
Çizelge 2.19 Polimer yarıçapının artırılmasıyla hesaplanan Q değerleri

| Polimer Yarıçapı (mm) | Q | |
|-----------------------|----------|-----------|
| | Poliamid | Polistren |
| 0.10 | 188.55 | 150.68 |
| 0.25 | 128.17 | 120.32 |
| 0.50 | 91.500 | 101.47 |
| 0.75 | 86.110 | 94.710 |
| 1.00 | 101.27 | 99.660 |
| 1.25 | 100.37 | 102.40 |
| 1.48 | 102.36 | 100.17 |



Şekil 2.33 Hesaplanan Q değerlerinin transdüserin kapakları arasına konulan polimerin yarıçapı ile olan ilişkisi

Rezonans frekansının ilave polimer malzeme ile hangi derecede etkilendiği Şekil 2.34'te gösterilmektedir. Frekanslarda belirgin bir artış gözlenmektedir.



Şekil 2.34 Yarıçap ile ilk rezonans frekansı (f_r) arasındaki ilişki

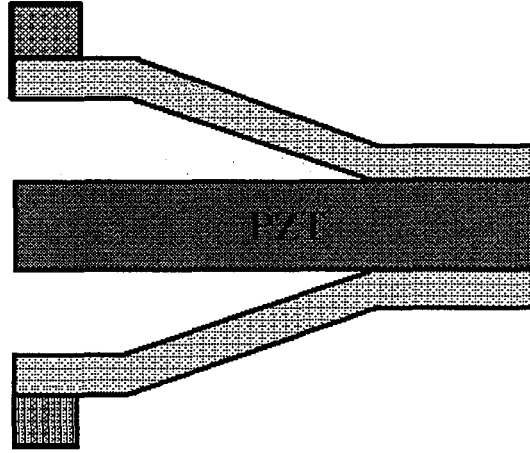
Çizelge 2.20 Polimer yarıçapının artırılmasıyla elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri

| Polimer Yarıçapı (mm) | f_r (Hz) | |
|-----------------------|------------|----------|
| | Polistren | Tungsten |
| 0.10 | 28431 | 31008 |
| 0.25 | 36584 | 40224 |
| 0.50 | 44279 | 45706 |
| 0.75 | 48566 | 49975 |
| 1.00 | 52914 | 55075 |
| 1.25 | 58746 | 61759 |
| 1.48 | 65610 | 69496 |

Kapaklar arasına; PZT disk elemana temas edecek şekilde, yerleştirilen polimerin transdüserin Q değerlerinin düşmesine neden olduğu gözlenmiştir. Bu düşüş; en düşük yarıçap ile en yüksek yarıçap arasında, poliamid kullanıldığında yaklaşık % 46, polistren kullanıldığında ise yaklaşık % 33'lük bir azalıştır.

2.5.2 Kapakların Düz Yüzeyine Konulan Polimer ve Metalik Malzemenin, Zil Tipi Transdüserin Özelliklerine Olan Etkisi

Zil tipi transdüserin kapakları üzerindeki düz yüzeye polimerik bir malzeme konulmasıyla k, Q ve f_r incelenmiştir. Düz yüzeyine kütle konulmuş zil tipi transdüser Şekil 2.35'te gösterilmektedir.

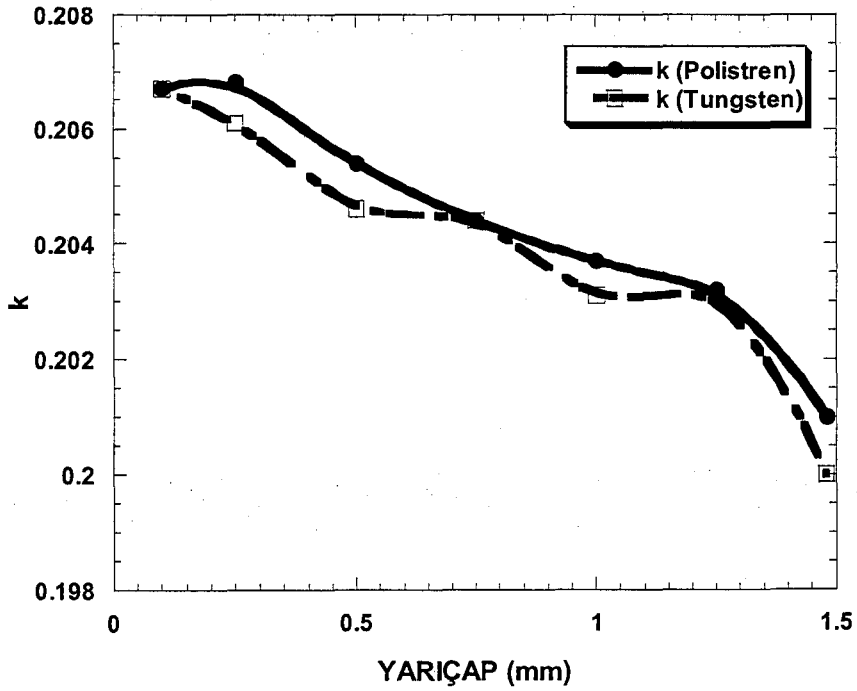


Şekil 2.35 Düz yüzeyine kütle yerleştirilmiş zil tipi transdüserin 2 boyutlu basit modeli

Düz yüzeye konulan ve kütle etkisi yapan 2 farklı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemeler polistren ve tungstendir ve düz yüzeyde ağırlık etkisi yapması istenmiştir. Bu etkiye dayanarak bulunan k değerleri Şekil 2.36 ve Çizelge.2.21'de verilmektedir.

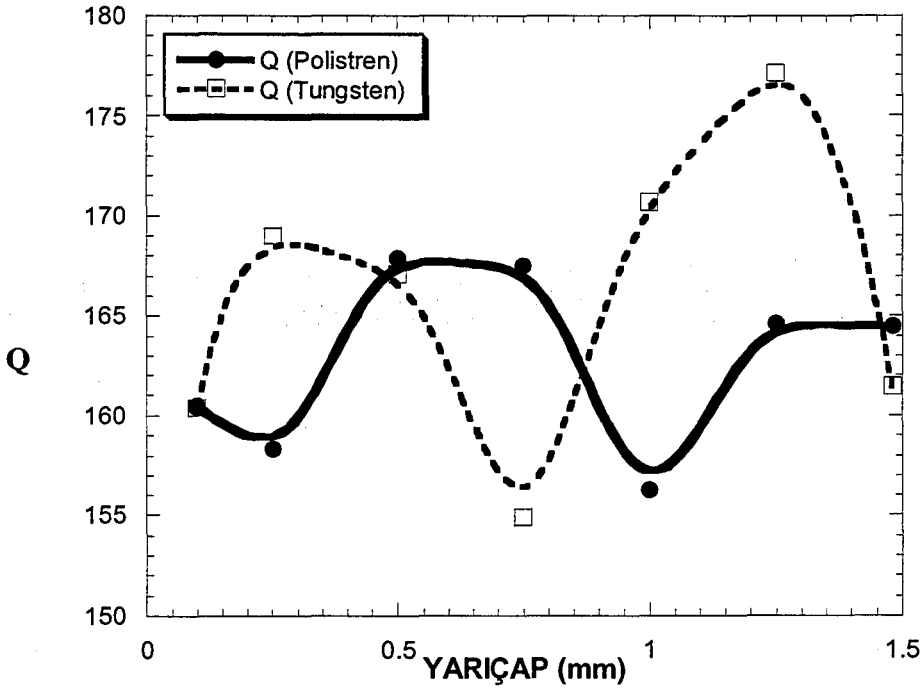
Çizelge 2.21 Düz yüzeye yerleştirilen kütlelerin yarıçapına bağlı olarak hesaplanan k değerleri

| Kütle Yarıçapı (mm) | k | |
|---------------------|-----------|----------|
| | Polistren | Tungsten |
| 0.10 | 0.2067 | 0.2067 |
| 0.25 | 0.2068 | 0.2061 |
| 0.50 | 0.2054 | 0.2046 |
| 0.75 | 0.2044 | 0.2044 |
| 1.00 | 0.2037 | 0.2031 |
| 1.25 | 0.2032 | 0.2031 |
| 1.48 | 0.2010 | 0.2000 |



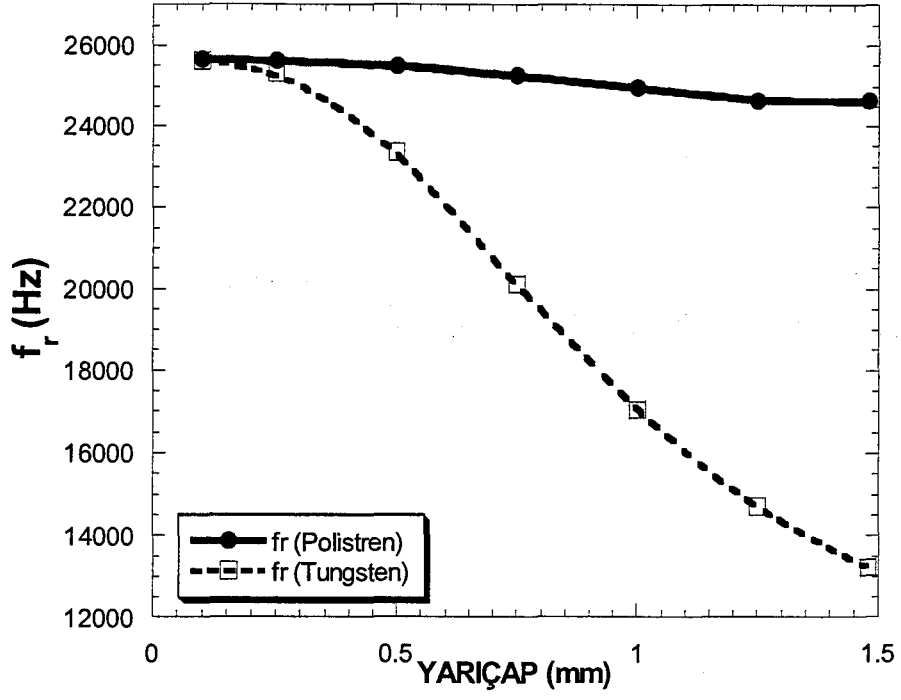
Şekil 2.36 Düz yüzeye yerleştirilen kütlelerin yarıçapına bağlı olarak hesaplanan k değerlerinin grafiği

Zil tipi transdüserde kapakların üzerine polimerik malzeme (polistren) ve tungsten yerleştirildiğinde malzemenin yarıçapının değişimine bağlı olarak transdüserin 'Q' değerinde meydana gelen değişimin grafiği Şekil 2.37'deki gibidir. Hesaplanan Q değerlerinde belirli bir düzende azalış veya artış görülmektedir. Bunun sebebi olarak FEM ile bulunan rezonans frekans değerlerinin bulunmasında hassasiyet sorunu olabileceği akla gelmektedir. Belirli frekans aralıkları içerisinde yapılan analizlerin daha dar aralıklara indirilerek bulunan sonuçlarda değişiklikler meydana getirebilir ve daha düzenli sonuçlar bulunabilir.



Şekil 2.37 Kütleye bağlı olarak transdüserin Q değeri ile yarıçap ilişkisi

Zil tipi transdüser'de kapakların üzerine polimerik malzeme (polistren) ve tungsten yerleştirildiğinde malzemenin artan yarıçapına bağlı olarak transdüserin 'ilk rezonans frekans' değerindeki değişim Şekil 2.38'de ve Çizelge.2.22'de gösterilmektedir.



Şekil 2.38 Yarıçap-ilk rezonans frekansı değişim grafiği

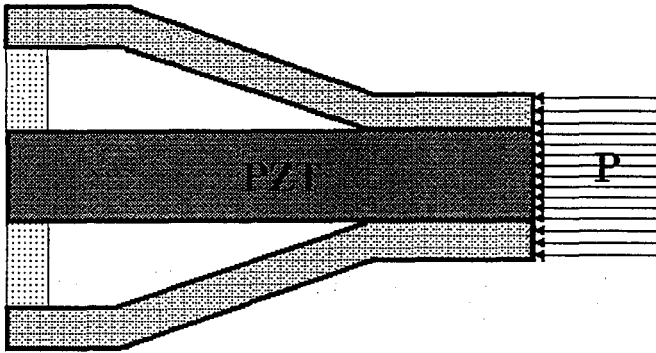
Çizelge 2.22 Düz yüzeye polistren ve tungsten konulmasıyla elde edilen ilk rezonans frekansı değerleri

| Yarıçap (mm) | f_r (Hz) | |
|-----------------|------------|----------|
| | Polistren | Tungsten |
| 0.10 | 25646 | 25626 |
| 0.25 | 25616 | 25323 |
| 0.50 | 25495 | 23364 |
| 0.75 | 25263 | 20111 |
| 1.00 | 24970 | 17051 |
| 1.25 | 24666 | 14697 |
| 1.48 | 24636 | 13222 |

Düz yüzeye polimer veya tungsten malzemenin yerleştirilmesi, transdüserin ilk rezonans frekansında belirli bir düşüşe neden olmaktadır. Tungsten malzemenin polistrene göre daha düşük frekans değerleri ortaya çıkarması tungstenin elastik modülü ve yoğunluğunun bağıl olarak daha yüksek olmasından dolayı kaynaklandığı gösterilebilir. Bu durum Q ve k değerlerinin hesaplanmasında da etkili olacaktır.

2.5.3. Zil Tipi Transdüser Yanal Baskı Kuvveti Uygulandığında Transdüserin Özelliklerinde Meydana Gelen Değişimler

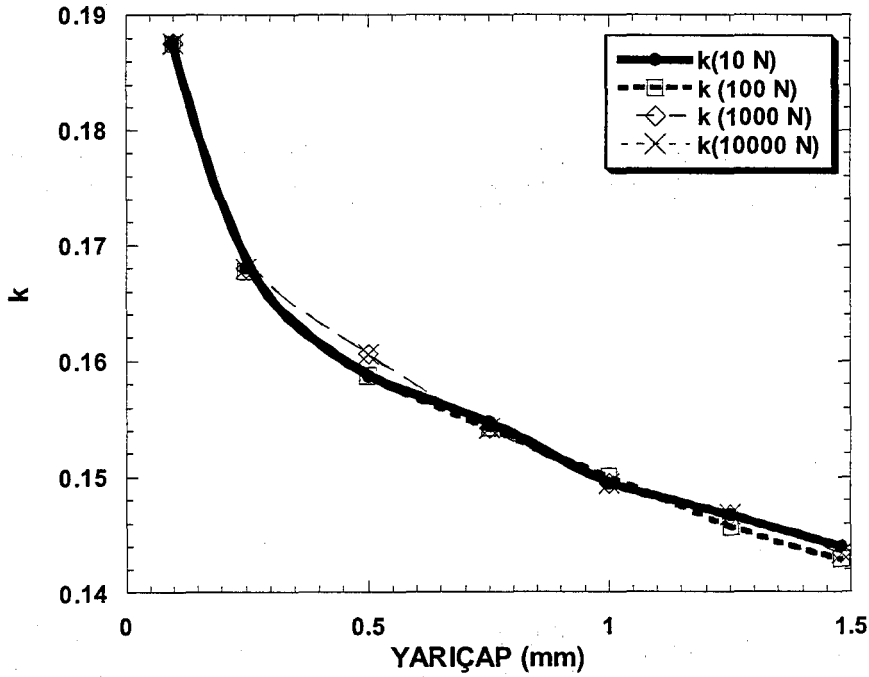
Yanal kuvvetlerin transdüser üzerinde basit olarak gösterimi şekil.3.10'de verilmektedir. Zil tipi transdüser yanal bir baskı kuvveti uygulandığında (10N, 100N, 1000N, 10000N) polimer yarıçapının değişimine bağlı olarak transdüserin 'k' değerindeki değişimler Şekil 2.39 ve Çizelge.2.23'te gösterilmektedir.



Şekil 2.39 Yanal kuvvetin zil tipi transdüser üzerindeki gösterimi

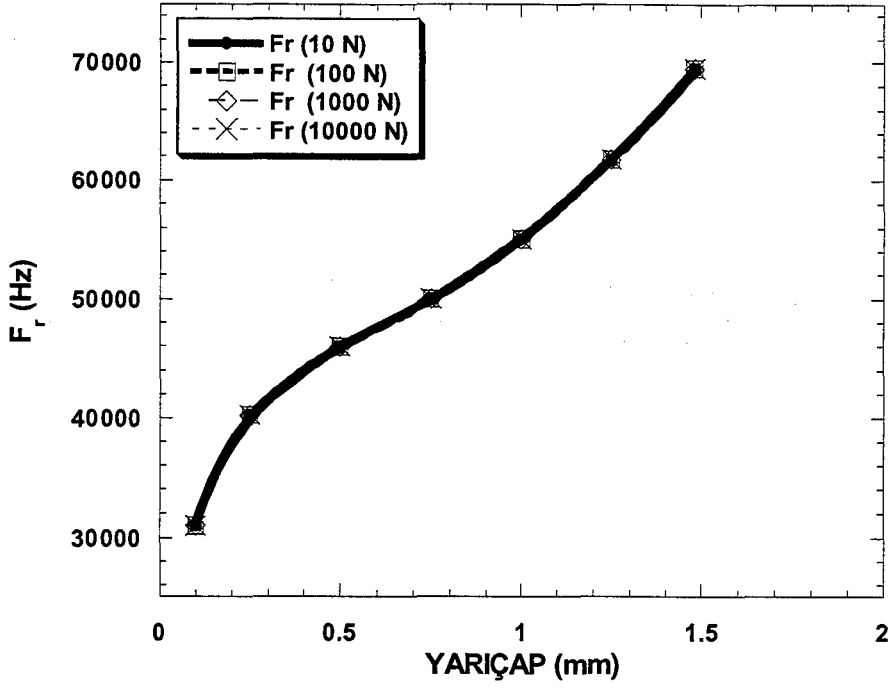
Çizelge.2.23 Yanal kuvvet uygulandığında yarıçapa bağlı olarak hesaplanan değerler

| Yarıçap (mm) | k | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|---------|
| | 10 N | 100 N | 1000 N | 10000 N |
| 0.10 | 0.1875 | 0.1875 | 0.1875 | 0.1875 |
| 0.25 | 0.1680 | 0.1678 | 0.1680 | 0.1680 |
| 0.50 | 0.1587 | 0.1587 | 0.1606 | 0.1606 |
| 0.75 | 0.1548 | 0.1542 | 0.1542 | 0.1542 |
| 1.00 | 0.1494 | 0.1500 | 0.1494 | 0.1494 |
| 1.25 | 0.1467 | 0.1457 | 0.1467 | 0.1467 |
| 1.48 | 0.1440 | 0.1429 | 0.1434 | 0.1434 |

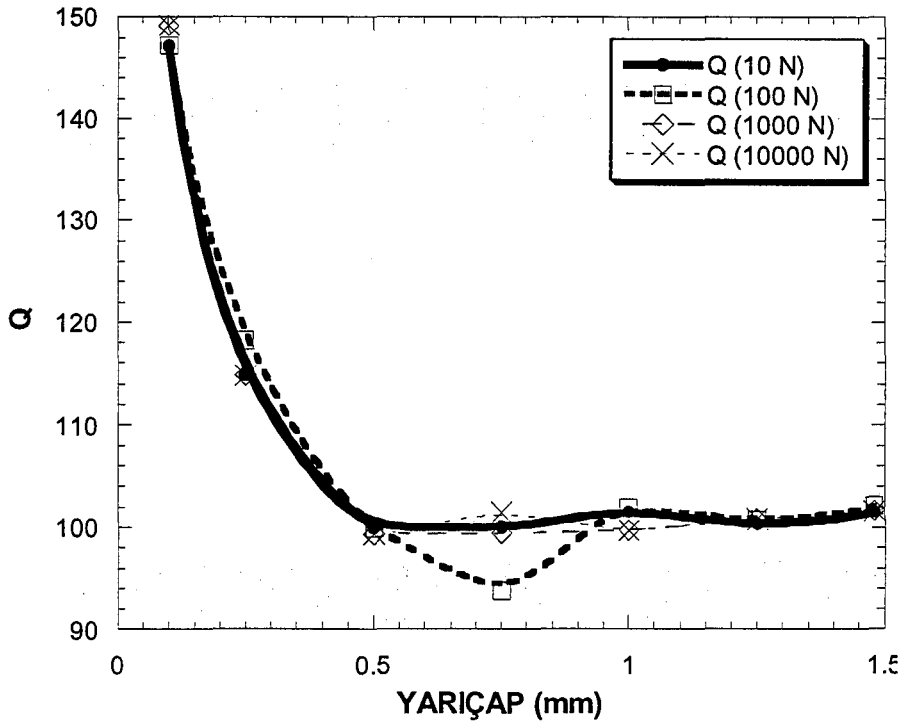


Şekil 2.40 Yanal kuvvet uygulandığında, yarıçap ve ilk rezonans frekansı arasındaki ilişki

10 N, 100 N, 1000 N, 10000 N'luk kuvvetlerin uygulanmasıyla ve polimer yarıçapının değişimine bağlı olarak transdüserin 'ilk rezonans frekans' değerinde meydana gelen değişimler Şekil 2.40'ta gösterilmektedir.



Şekil 2.41 İlk rezonans frekansında meydana gelen değişimler



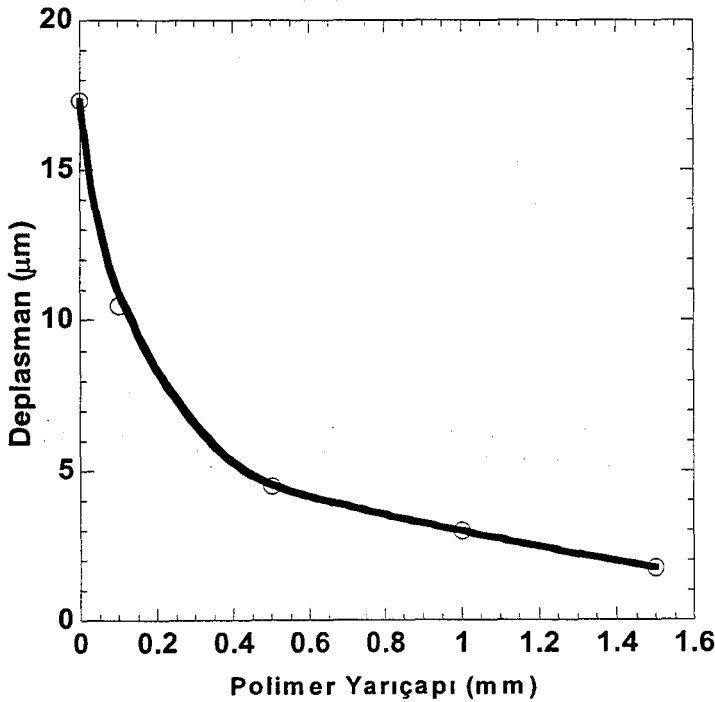
Şekil 2.42 Polistren yarıçapına bağlı olarak Q değerlerinde meydana gelen düşüşü gösteren ilişki

Burada, transdüserine uygulanan yanal bir kuvvetin etkisi, k ve Q katsayılarının değerlerinde belirli bir düşüşe, ilk rezonans frekansı değerlerinde

ise yükselişe neden olduğu görülmektedir. Şekil 2.47'de düz yüzeyine kütle yerleştirilmiş transdüserin admitans grafiği verilmektedir. Bu grafikte polistren ve tungstenin transdüserin rezonans frekansı üzerinde ne derecede etkili olduğu daha açık olarak görülmektedir. Ayrıca, Şekil 2.48'de benzer şekilde kapaklar arasına polistren ve poliamid12 polimerik malzemelerinin yerleştirilmesiyle transdüserin frekans değerlerinde meydana gelen değişimler sergilenmektedir.

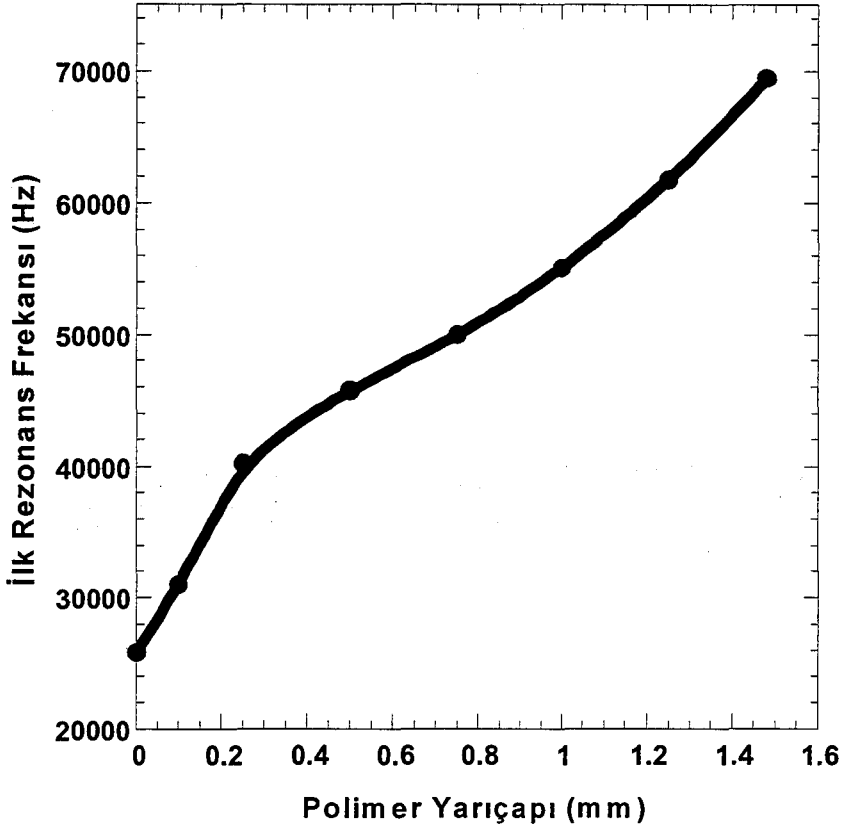
2.5.4. Üst Yüzeyin Boyutu Sabit Tutulurken Polistren Yarıçapının Değiştirilmesiyle Elde Edilen Sonuçlar

Şekil 2.43'te standart zil tipi transdüserin deplasmanı ve polimer eklenerek polimer yarıçapının artırılmasıyla incelenen deplasman karakteristiği verilmektedir. Deplasman miktarı standart cihaz ve 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm ve 1,48 mm'lik polimer yarıçapı ile incelenmiştir. Standart zil tipi transdüser polimerli olan transdüserin deplasmanına göre daha fazla deplasman göstermektedir. Ayrıca polimer yarıçapının artırılması deplasman miktarını beklendiği gibi daha da düşürmektedir. Polimer yarıçapının artırılması deplasmanda ani düşüşler meydana getirmiştir.



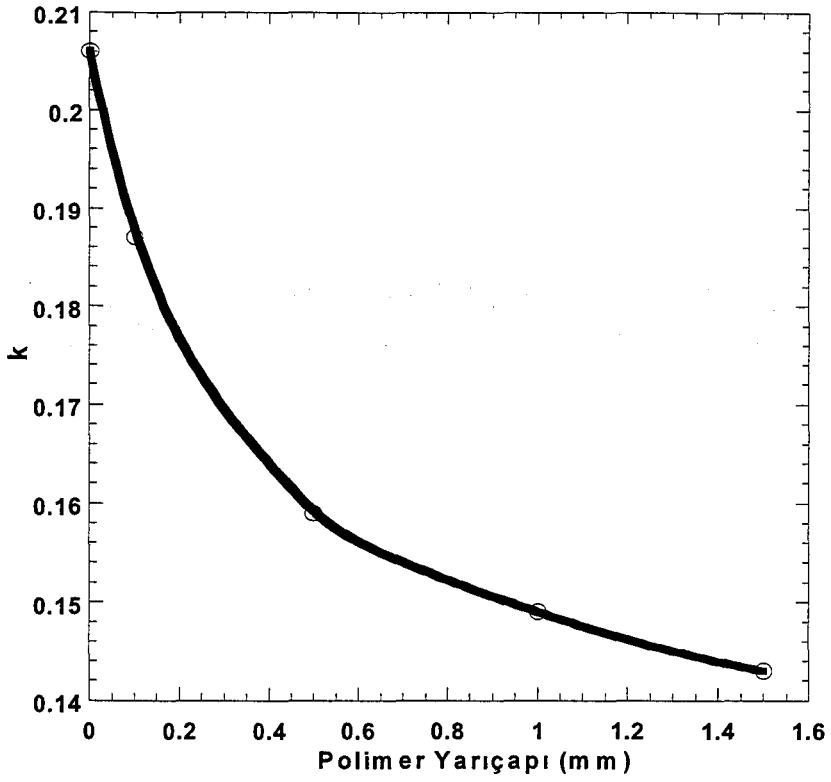
Şekil 2.43 Deplasman – Polimer yarıçapı ilişkisi (Düz yüzey boyutu sabit)

Deplasman karakteristiğinin davranışı incelendikten sonra polimer yarıçapının ilk rezonans frekansını ne derecede etkilediği incelenmiştir. Polimer yarıçapının artırılmasına bağlı olarak ilk rezonans frekansı değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 2.44'te gösterilmektedir. Polimer ilaveli cihaz standart zil tipi transdüserine göre daha yüksek frekanslarda rezonans göstermiştir. Bununla birlikte polimer yarıçapının artmasıyla transdüserin ilk rezonans frekansı belirgin bir artış davranışı sergilemektedir.

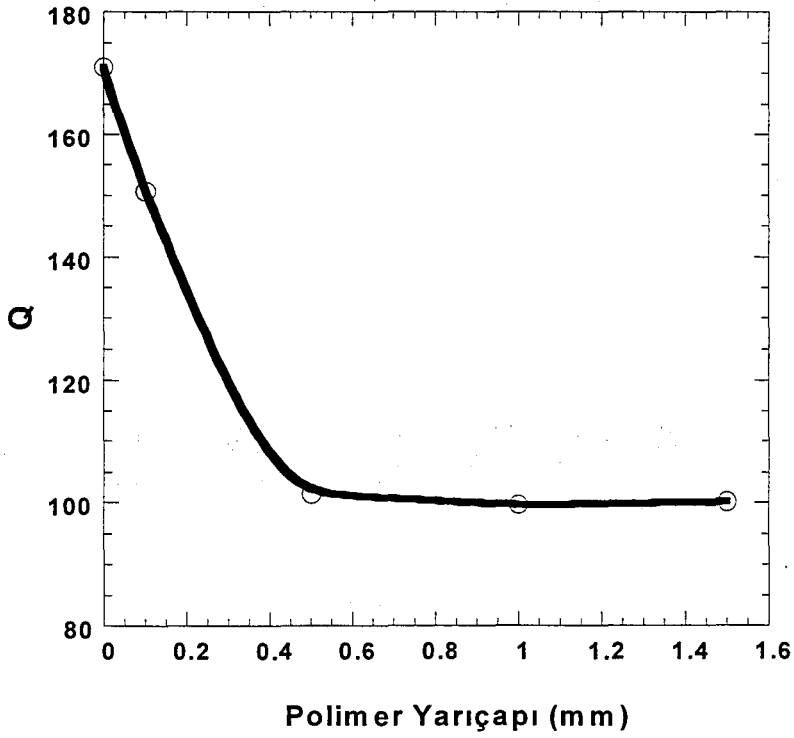


Şekil 2.44 Polimer yarıçapının artmasına bağlı olarak elde edilen rezonans frekansında gözlenen artış grafiği

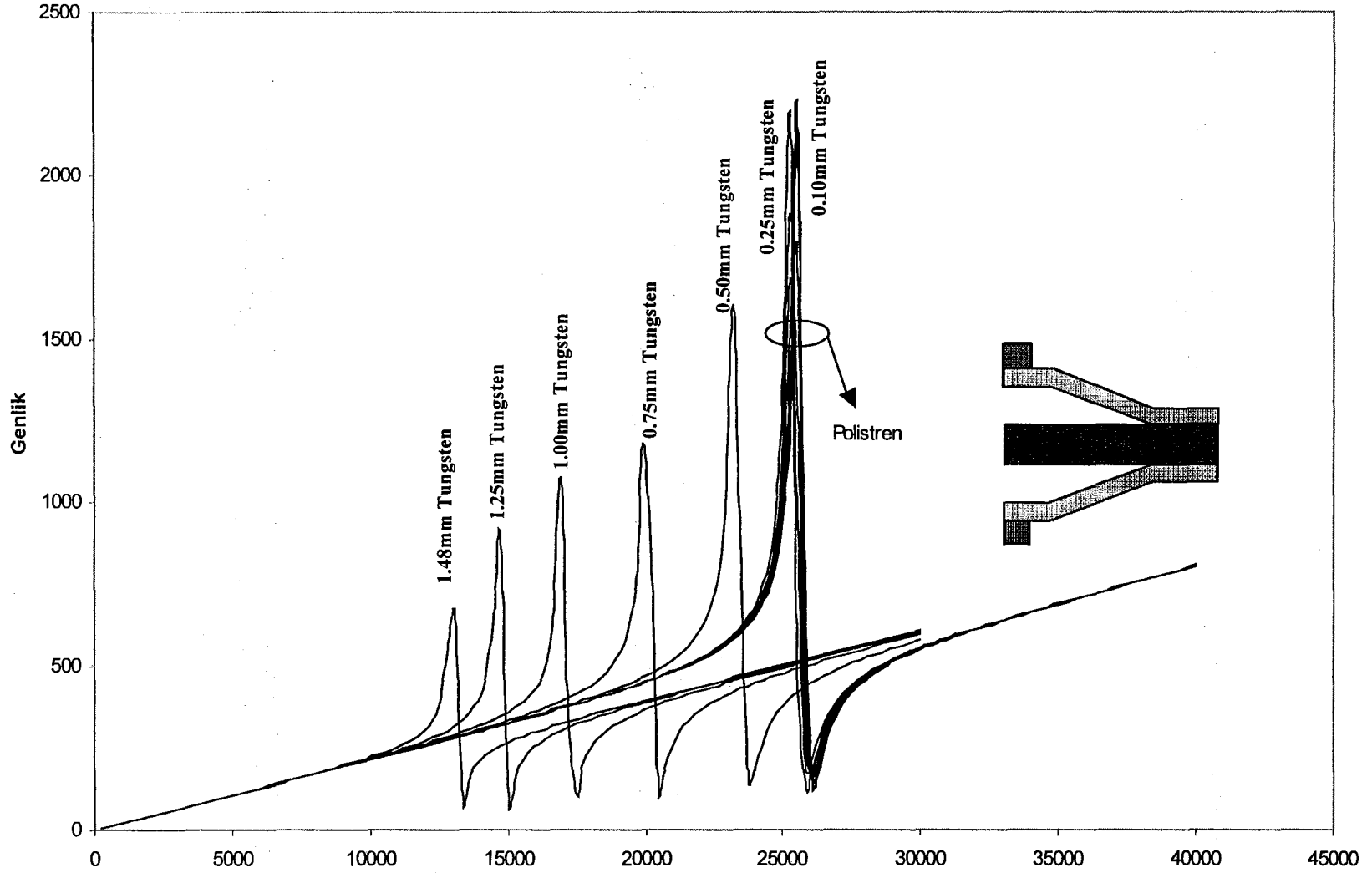
Bu konunun amaçlarından birisi olan k katsayısının incelenmesi için polimer yarıçapının artmasına bağlı olarak hesaplanan k değerleri Şekil 2.45'te gösterilmektedir. Şekildende görüldüğü gibi polimer malzemenin yarıçapının artırılmasıyla birlikte k düşüş göstermiştir. Bununla birlikte polimerik malzemenin yarıçapına bağlı olarak hesaplanan Q değerlerinde de benzer düşüş davranışı gözlenmektedir. Bu davranış Şekil 2.46'da verilmektedir.



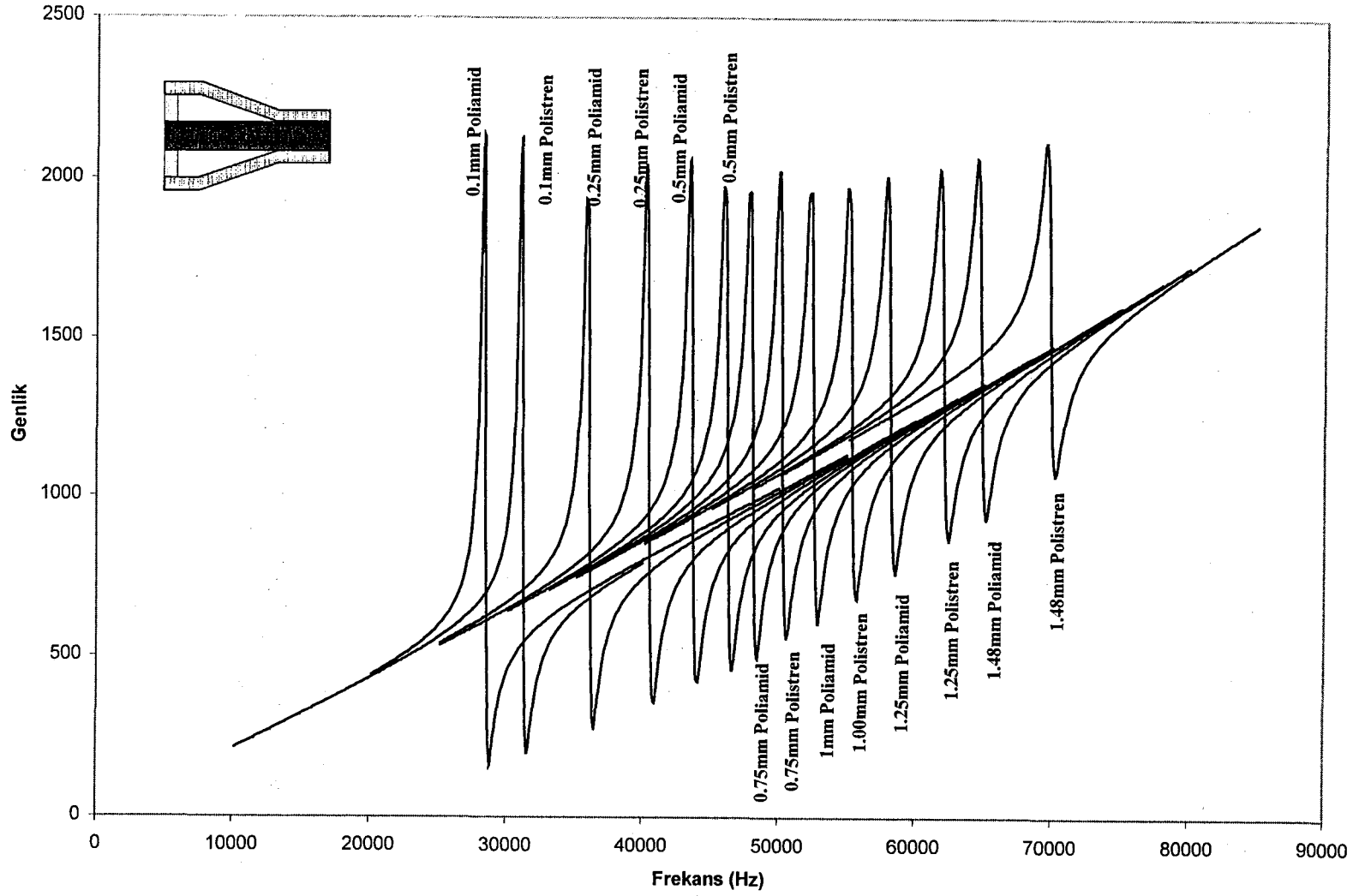
Şekil 2.45 Polimer yarıçapının artmasıyla birlikte k değerlerinde meydana gelen değişim



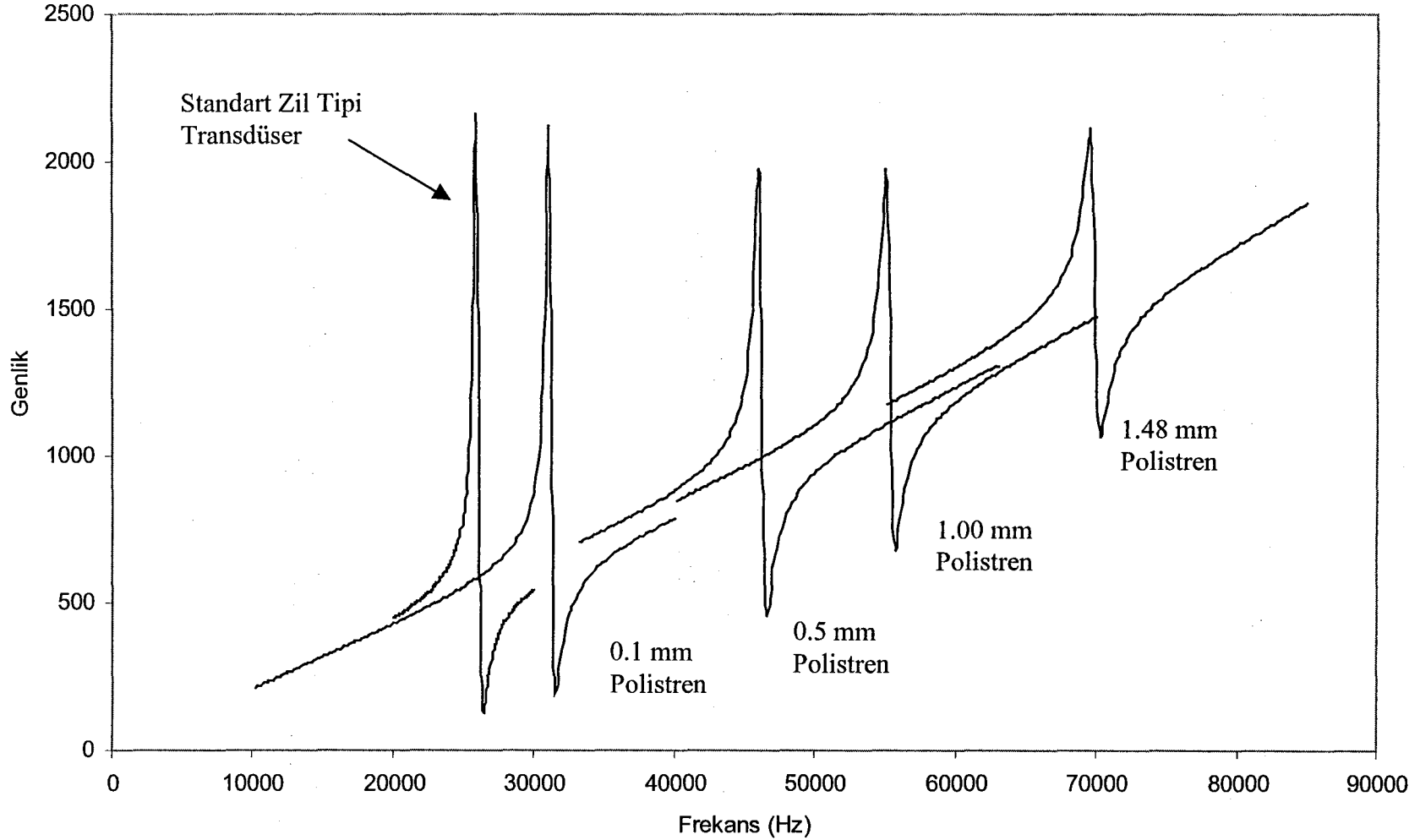
Şekil 2.46 Polimer yarıçapının artmasıyla birlikte Q değerlerinde meydana gelen değişim



Şekil 2.47 Düz yüzey üzerine yerleştirilen kütlelerin transdüslerin frekans değerlerindeki etkileri



Şekil 2.48 Kapakların altında kalan boşluğa yerleştirilen polimerlerin transdüslerin frekans değerlerindeki etkileri



Şekil 2.49 Düz yüzey boyutu sabitken polistren yarıçapının artırılmasıyla elde edilen frekanslardaki değişimler

3. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Teknoloji çağında yaşadığımız günümüzde ana hedef hızlı, dinamik, akılcı, üretimi kolay ve fazla maliyetli olmayan ürünler üretmektir. Transdüser tasarımlarında da aynı özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Transdüserlerden beklenen özellikler geliştirilerek ihtiyaç duyulan uygulamalarda daha verimli çalışmasını sağlamak ana hedeflerdendir. Tepkileyici çeşitleri günden güne geliştirilmekte ve yeni tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni tasarımlar arasındaki zil tipi transdüserler sağladıkları deplasman ve oluşan kuvvet ile karakterize edilirler.

Bu tezde, zil tipi transdüserlerin karakteristiklerini geometrik boyutlarının değişimiyle birlikte izleme çalışmaları yapılmıştır. Geometrik boyutların zil tipi transdüserlerin özelliklerini ne derecede etkilediği araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinin getirdiği avantajlar olarak; hızlı çalışma prensipleri, doğru fakat teorik analizler, düşük maliyet ve kısa zamanda çözüm kabiliyeti verilebilir. Fakat bu çalışmada, zaman yetersizliği ve maliyet konularından dolayı deneysel çalışmalar yapılamamıştır. Sonlu elemanlar analizi ile karmaşık matematiksel denklemler kolaylıkla ve çok kısa bir zamanda modellenen tepkileyici üzerine uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan ANSYS paket programı, gelişen bilgisayar teknolojisinin getirdiği avantajları tasarım sürecine yüksek maliyet ve zaman kaybını önleme konularını ortaya koyarak büyük bir avantaj getirmiştir. Sonlu elemanlar analizinde modellenecek ürün, küçük parçalara ayrılır ve bunları bir bütün içerisinde beraberce gösterdikleri davranışlar belirlenebilir.

Modelleme işlemlerinde sonlu elemanlar analizi kullanılarak zil tipi transdüserin şeklinde bir değişiklik yapılmıştır. Bu değişiklik metal kapak ve piezoelektrik disk arasında bulunan boşluk içerisine; kapak ve seramik diske dokunacak şekilde polimerik bir malzeme konulmasıdır. Böylece son şeklini alan tepkileyicinin karakteristikleri araştırılmıştır. Çalışmalar esnasında tepkileyicinin en önemli özellikleri olan deplasman ve rezonans frekansı açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Metal kapak olarak daha önce üzerinde çalışılan yüksek deplasman değerlerine ulaşılan pirinç seçilmiştir. İtici eleman olarak yumuşak PZT552 kullanılmıştır. PZT ve metal kapaklar arasındaki bağlanma tabakasında epoksi ve metal kapak ve PZT disk arasındaki boşlukta polistren polimer malzeme kullanılmıştır.

Zil tipi transdüserlerin karakteristikleri uygulama alanlarına göre değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla bu karakteristikleri etkileyen geometrik faktörler (boyutlar) incelemiştir. Bunlar sırasıyla, kapak kalınlığı, oyuk çapı, oyuk derinliği, düz yüzey çapı ve

PZT kalınlığıdır. Geometrideki boyutsal değişimlerin tepkileyicinin göstermiş olduğu deplasman, kuvvet ve rezonans frekansı açısından değişimler getirdiği görülmüştür.

Ayrıca polimerik bir malzemenin kapaklar arasındaki boşluğa yerleştirilmesinin veya metal kapaklar üzerine kütle etkisi yapan bir malzemenin sabitlenmesinin transdüserin k , Q ve rezonans frekansları gibi özelliklerini etkilediği belirlenmiştir. Zil tipi transdüser hidrofona olarak ve de olarak sualtı projektör uygulamalarında potansiyel olarak göze çarpmaktadır. Genellikle transdüser uygulamalarında yüksek Q değerleri istenilen bir özelliktir. Ancak, sualtı uygulamalarında istenilen özellik geniş bant aralığıdır. Bundan dolayı Q değerleri geniş bant aralığı elde etmek için yeteri kadar düşük olmalıdır. Bu çalışmadaki cymbal transdüserin kapakları altındaki boşluk visko-elastik bir damping elde etmek için polimerik bir malzeme ile kısmen doldurulmuştur. Genellikle, maksimum Q 'ya sahip bir sistem, verimini maksimum yapma isteğindedir. Transdüserlerin sualtı uygulamalarında iletilen ve alınan sinyaller kullanılır. Eğer çıktı sinyalleri kısa vuruşlar halinde iletilebilirse, alınan sinyaller bozulmayacak, ve alınan sinyaller kesin ve doğru bir şekilde kullanılabilir. Çalışmalar sonucunda k ve Q değerlerinde polimerin visko-elastik etkisiyle birlikte düşüş meydana getirilmiştir.

İleride, zil tipi transdüser tasarım çalışmalarında modelleme üç boyutlu olarak çalışılarak karakteristikler daha detaylı şekilde incelenebilir. Bununla birlikte, tepkileyici boşluğu içerisinde kullanılan polimerik malzemenin değiştirilerek, farklı polimerlerin deplasman, kuvvet ve rezonans frekanslarını nasıl değiştireceği çalışılmalıdır. Buna ilaveten, mekanik kavrama katsayısı; k , mekanik kalite faktörü; Q , gibi özelliklerin hangi ölçüde etkileneceği araştırılmalıdır. Ayrıca, piezoelektrik disk yerine halka şeklindeki bir seramiğin kompozit yapının özelliklerini ne derece etkileyeceği araştırılabilir. Tüm bunların yanında, metal kapağın şekli değiştirilerek farklı sonuçlar da elde edilebilir.

4. KAYNAKLAR

1. WASER, R., "Grain Boundaries – The Functional Hearth of Electronic Ceramics", Third Euro-Ceramics, 2, 23-28, (1993)
2. RICHERSON, D.W., "Modern Ceramic Engineering", 2.nd ed., Marcel Decker, (1992)
3. YANAGIDA, H., KOUMOTO, K. ve MIYAYAMA, M., "The Chemistry of Ceramics-first edition", translated by Yamada, H, John Wiley & Sons, (1996)
4. TRESSLER, J.F., ALKOY, S., DOGAN ve A., NEWNHAM, R.E., "Functional Composites for Sensors, Actuators and Transducers" Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, 30,477-482, (1999)
5. BALBAA, I.S., PRASAD. S.E., YAN, K.L. ve JOHAR, S., "Piezoelectric Composite Materials", Journal of Canadian Ceramic Society, 53, 5-7, 1984
6. CROSS, L.E., "Dielectric, Piezoelectric, and Ferroelectric Components", Ceramic Bulletin, 63,4, (1984)
7. DAMJANOVIC, ve D., NEWNHAM, R.E., "Electrostrictive and Piezoelectric Materials for Actuator Applications", J. of Intell. Mater. Syst. and Struct., 3, 190 (1992)
8. KHAZAN, A.D., "Transducer and Their Elements: Design and Application", PTR Prentice Hall (1994)
9. GARDNER, J.W., "Microsensors-Principles and Applications", John Wiley & Sons (1994)

10. MILNE, J.W., "Electro-Mechanic Engineering-An Integrated Approach", IEEE Press (1994)
11. TRESSLER, F.J., CAO, W. ve UCHINO, K., "Finite Element Analysis of The Cymbal Type Flexensional Transducer", IEEE Transactions on Ultrasonic: Ferroelectrics and Frequency Control, **45**, 5, 1363-1368,(1998)
12. DOGAN, A., YOSHIKAWA, S., UCHINO, K. ve NEWNHAM, R.E., "The Effect of Geometry on Characteristic of Moonie Transducer and Reliability Issue", IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, .935-939, (1994)
13. ONITSUKA, K., DOGAN, A., TRESSLER, J.F., XU, Q., YOSHIKAWA, S. ve NEWNHAM, R.E., "Metal – Ceramic Composite Transducer, The Moonie", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 6-July, (1995)
14. DOGAN, A. ve NEWNHAM, R.E., "Roto-Flexensional Cymbal Transducer", Patent Application, PSU Invention Disclosure **94-1395**, (1994)
15. FERNANDEZ, J.F., DOGAN, A., FILEDING, J.T., UCHINO, K. ve NEWNHAM, R.E., "Tailoring Performance of Ceramic–Metal Piezo Composite Actuators, Cymbals", Sensors and Actuators, **A65**, 228-237, (1998)
16. MEYER, R.J., DOGAN, A., YOON, C., PILGRIM, S.M. ve NEWNHAM, R.E., "Displacement Amplification of Electroactive Materials Using Flexensional Transducer", Sensors and Actuators, **A87**,157-162, (2001)

17. JAFFE, B., COOK, W. ve JAFFE, H., "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, New York, (1971)
18. ÜZGÜR, E.A., "Kompozite Piezoelektrik Transdüserlerin Bilgisayar Yardımı ile Tasarımı", Yük.Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir (2001)
19. TRESSLER, F., "Capped Ceramic Underwater Sound Projector The Cymbal", Ph.D Thesis, Pennsylvania State University, USA, (1997)
20. ZHANG, J.,: "Miniaturized Flexitensional Transducers and Arrays" Ph.D Thesis, Pennsylvania State University, USA, (2000)

EK.1

```
FINISH
/CLEAR, START
/GRA, POWER
/COM, ANSYS RELEASE 5.5.2 14:53:30
10/21/2002
/input, start55, ans
, C:\AnsysED55\docu\,,,,,,,,,,,,,1
!*
/PREP7 !activates `BEGIN` level
/TITLE, Cymbal, dead-mass Tungsten
!*
/COM, selection of material types
ET, 1, PLANE42
!*
KEYOPT, 1, 1, 0
KEYOPT, 1, 2, 0
KEYOPT, 1, 3, 1
KEYOPT, 1, 5, 0
KEYOPT, 1, 6, 0
!*
ET, 2, PLANE13
!*
KEYOPT, 2, 1, 7
KEYOPT, 2, 2, 0
KEYOPT, 2, 3, 1
KEYOPT, 2, 4, 0
KEYOPT, 2, 5, 0
KEYOPT, 2, 6, 0
!*
/COM,
!*
UIMP, 1, EX, , , 100.6e9
UIMP, 1, DENS, , , 8550
UIMP, 1, NUXY, , , 0.35
UIMP, 3, EX, , , 2.5e9
UIMP, 3, DENS, , , 1430
UIMP, 3, NUXY, , , 0.36
UIMP, 4, EX, , , 411e9
UIMP, 4, DENS, , , 19300
UIMP, 4, NUXY, , , 0.28
!*
UIMP, 2, DENS, , , 7600
UIMP, 2, PERX, , , 1.5e-8
UIMP, 2, PERY, , , 1.3e-8
!*
/COM, piezoelectric stiffness coefficients (for
PZT552)
TB, ANEL, 2, , , 0
!*
```

EK.1 (Devami)

```
TBMODIF, 2, 1, 12.72e10
TBMODIF, 3, 1, 8.47e10
TBMODIF, 4, 1, 8.02e10
TBMODIF, 8, 1, 11.47e10
TBMODIF, 9, 1, 8.47e10
TBMODIF, 13, 1, 12.72e10
TBMODIF, 17, 1, 2.3e10
!*
/COM, piezoelectric `e` coefficients (for PZT552)
TB, PIEZ, 2, , , 0
!*
TBMODIF, 1, 2, -6.59
TBMODIF, 2, 2, 23.2
TBMODIF, 3, 2, -6.59
TBMODIF, 4, 1, 17.04
!*
/COM, definition of fixed coordinates
X0=0
X1=1.48e-3
X2=1.5e-3
X3=4.5e-3
X4=6.35e-3
Y0=0
Y1=.5e-3
Y2=.52e-3
Y3=.77e-3
Y4=.77e-3
Y5=1.02e-3
Y6=2.50e-3
!*
/COM, definition of keypoints
k, 1, X1, -Y4
k, 2, X0, -Y4
k, 3, X0, -Y5
k, 4, X0, -Y6
k, 5, X1, -Y6
k, 6, X1, -Y5
k, 7, X2, -Y5
k, 8, X2, -Y4
k, 9, X3, -Y2
k, 10, X3, -Y3
k, 11, X4, -Y3
k, 12, X4, -Y2
k, 13, X4, -Y1
k, 14, X3, -Y1
k, 15, X0, -Y1
k, 16, X0, Y1
k, 17, X3, Y1
k, 18, X4, Y1
```

Ek.1 (Devami)

```
k, 19, X4, Y2
k, 20, X4, Y3
k, 21, X3, Y3
k, 22, X3, Y2
k, 23, X2, Y4
k, 24, X2, Y5
k, 25, X1, Y5
k, 26, X1, Y6
k, 27, X0, Y6
k, 28, X0, Y5
k, 29, X0, Y4
k, 30, X1, Y4
!*
!*GO,: BEND
/COM,    creation of cap areas
A, 1, 2, 3, 6
A, 1, 6, 7, 8
A, 7, 8, 9, 10
A, 9, 10, 11, 12
A, 19, 20, 21, 22
A, 21, 22, 23, 24
A, 23, 24, 25, 30
A, 25, 28, 29, 30
!*GO,: BEND
/TRIAD, OFF
!*GO,: BEND
APLOT
!*GO,: BEND
!*
/COM,    creation of epoxy areas
A, 9, 12, 13, 14
A, 17, 18, 19, 22
!*
!*GO,: BEND
/COM,    creation of PZT areas
A, 13, 14, 17, 18
A, 14, 15, 16, 17
!*
!*GO,: BEND
/COM,    creation of polystren areas
A, 3, 4, 5, 6
A, 25, 26, 27, 28
!*GO,: BEND

/COM,    division of epoxy lines
lssel, s, line, , 2, 6, 2
lssel, a, line, , 9, 12, 3
lssel, a, line, , 14, 16, 2
lssel, a, line, , 5, 7, 2
```

Ek.1 (Devami)

```
lssel, a, line, , 21, 23, 2
lssel, a, line, , 1, 3, 2
lssel, a, line, , 42
lssel, a, line, , 24, 26, 2
lssel, a, line, , 22, 25, 3
lssel, a, line, , 38, 40, 2
lssel, a, line, , 41, 43, 2
lssel, a, line, , 39
lesize, all, , , 3
lssel, all
!*GO, : BEND
lssel, s, line, , 11, 17, 2
lssel, a, line, , 28, 30, 2
lssel, a, line, , 33
lssel, a, line, , 34, 36, 2
lesize, all, , , 8
lssel, all
lssel, s, line, , 27, 29, 2
lssel, a, line, , 31, 32, 1
lesize, all, , , 1
lssel, all
!*GO, : BEND
lssel, s, line, , 8, 10, 2
lssel, a, line, , 18, 20, 2
lesize, all, , , 9
lssel, all
!*GO, : BEND
!*
/COM,      meshing PZT areas
type, 2
mat, 2
amesh, 11, 12, 1
!*GO, : BEND

/COM,      meshing cap areas
type, 1
mat, 1
amesh, 1, 8, 1
!*GO, : BEND

/COM,      meshing epoxy areas
type, 1
mat, 3
amesh, 9, 10, 1
!*GO, : BEND
```

Ek.1 (Devami)

```
/COM,      meshing polystrene areas
```

```

type,1
mat,4
amesh,13,14,1
!*GO,:BEND
/SOLUTION
/COM,symmetry constraints
nset,s,loc,x,0
dsym,symm,x
nset,all
nset,s,loc,y,0
d,all,uy,0
nset,all
/COM, grounding bottom surface of PZT
nset,s,loc,y,-Y1
d,all,volt,0
nset,all
nset,s,loc,y,Y1
cp,1,volt,all
*get,N1,node,,num,min
d,all,volt,-1000
nset,all
ANTYPE,3
outres,all,all
dmprat,5e-3
HARFRQ,12818,13636
NSUBST,109
KBC,1
/STAT,SOLU
solve
save
finish
/POST26
  rforce,2,N1,AMPS
  pi2=(2*3.141592654)
  prod,3,2,1,,mhos,,,pi2
  prod,4,3,,,mmhos,,,1000
  REAL,5,4,,,REAL4
  IMAGIN,6,4,,,IMAG4
  prod,7,5,5
  prod,8,6,6
  add,7,7,8
  sqrt,8,7,,,AMPL4
  prvar,8
SAVE

```