

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASIK SFEREOİD GEOMETRİSİNDE ÇOKLU REZONANSA
SAHİP PİEZOELEKTRİK SERAMİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

AYLİN ÖTÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASIK SFEREOİD GEOMETRİSİNDE ÇOKLU
REZONANSA SAHİP PİEZOELEKTRİK
SERAMİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

AYLİN ÖTÜN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. EBRU MENŞUR ALKOY

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**FABRICATION AND CHARACTERISATION OF
MULTIMODE PIEZOELECTRIC CERAMIC
TRANSDUCERS WITH OBLATE SPHEROID FORM**

AYLİN ÖTÜN
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE DEPARTMENT OF MATERIAL
SCIENCE AND ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. EBRU MENŞUR ALKOY

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2023 tarih ve 2023/40 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25/07/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Aylin ÖTÜN'ün tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ebru MENŞUR ALKOY

ÜYE

: Doç. Dr. Aligül BÜYÜKAKSOY

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe BERKSOY YAVUZ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Tez çalışması kapsamında basık sfereoid geometrisinde dönüştürücülerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada iki eğrilik yarıçapına sahip basık sferoid geometrideki dönüştürücüler hazırlanarak iki ayrı frekansta rezonansın elde edilmesi amaçlanmıştır. Üretilen dönüştürücülerde 100 kHz altındaki frekanslarda rezonanslar tespit edilerek su altı sonar uygulamalarında kullanılabilecek bir dönüştürücü geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda 30-10-XX mm ölçüsü doğrultusunda bir eğrilik yarıçapı değiştirilerek ATILA sonlu elemanlar analiz programı ile dört farklı tasarım (30-10-35 mm, 30-10-40 mm, 30-10-50 mm, 30-10-60 mm) modellenmiş ve tasarımların admitans – frekans grafikleri kıyaslanmıştır. 30-10-35 mm eğrilik yarıçapına sahip olan numunenin rezonans frekansları 31 kHz ve 61 kHz olarak bulunmuştur. Bu frekansların istenilen aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda TVR’da (Transmitting Voltage Response - Voltaj İletim Cevabı) ciddi bir düşüş gözlenmemiştir. Modelleme sonrasında numuneler 30-10-35 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Numunelerin üretilmesinde ticari PZT-5A (T&Partners Praha, Çek Cumhuriyeti) seramik tozu kullanılmış ve şekillendirme yöntemi olarak asıltı döküm yöntemi tercih edilmiştir. Dökümleri tamamlanan seramikler kurumaya bırakılmış olup ardından parçaların yoğunlaşması için 1260 °C’de 4 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında numunelerin yüzeyinin düzeltilmesi için zımparalama işlemi gerçekleştirilmiş ve numunelerin iç ve dış yüzeylerine gümüş elektrot kaplaması yapılmıştır. Kaplama sonrasında numuneler 700 °C’de 30 dakika boyunca pişirilmiştir. Pişirme sonrası kutuplama işlemi 2 kV/mm elektrik alan altında 120 °C’de silikon yağı içerisinde 10 dakika süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Numunelerin iç ve dış bağlantıları yapılarak montajları gerçekleştirilmiştir. Prototiplerin hava ölçümleri alınmıştır. Ardından farklı kalınlık ve sertlikte poliüretan kaplamaları yapılan prototiplerin su altında ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çoklu Rezonans, Piezoelektrik Dönüştürücü, Sonlu Elemanlar Analizi, Asıltı Döküm, Kurşun Zirkonat Titanat (PZT).

SUMMARY

In the scope of the thesis, the design, production and characterization of transducers in oblate spheroid geometry were carried out. In this study, it is aimed to obtain resonance at two different frequencies by preparing transducers in oblate spheroid geometry with two radii of curvature. In addition, it is aimed to develop a transducer that can be used in underwater sonar applications by detecting resonances at frequencies below 100 kHz in the produced transducers. In this direction, radius of curvature of 30-10-XX mm design changed and four different designs (30-10-35 mm, 30-10-40 mm, 30-10-50 mm, 30-10-60 mm) researched with the ATILA finite element analysis program. Then, the admittance-frequency graphs of the designs were compared. The resonance frequencies of the sample with a radius of curvature of 30-10-35 mm were found as 31 kHz and 61 kHz. It has been determined that these frequencies are in the desired range. At the same time, no significant decrease in TVR (Transmitting Voltage Response) was observed. After modeling, the samples were prepared in 30-10-35 mm dimensions. Commercial PZT-5A (T&Partners Praha, Çek Cumhuriyeti) ceramic powder was used in the production of the samples and the shaping was carried out by suspension casting method. After the castings were completed, the ceramics were left to dry and then sintered at 1260 °C in silicone oil for 4 hours to condense the samples. After sintering, sanding was carried out to smooth the surface of the samples and silver electrode coating was applied to the inner and outer surfaces of the samples. Then, the samples were fired at 700 °C for 30 minutes. Polarization after firing was carried out under 2 kV/mm electric field at 120 °C for 10 minutes. The samples were assembled by making internal and external connections. Air measurements of the prototypes were taken. Then, the performances of the prototypes with different thickness and hardness polyurethane coating were taken under water and their performances were revealed.

Keywords: Multimode, Piezoelectric Transducer, Finite Element Analysis, Suspension Casting Method, Lead Zirconate Titanate (PZT).

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimin ilk gününden beri elini hep omzumda hissettiğim, mücadelesinden, bilime duyduğu aşktan, duruşundan ve başardıklarından feyzaldığım, yalnızca akademik kariyerime değil hayatımın birçok alanına dokunan, yolumu aydınlatan çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Ebru MENŞUR ALKOY’a öğretmekteki ısrarı ve inadı ve bana inandığı için tüm kalbimle teşekkür ederim. Derslerinde konuyu daha da derinlemesine anlamamı sağlayan, tez konusunun belirlenmesinden deneysel çalışmalara kadar tezin her aşamasında kıymetli katkılarını sunan ve yönümü bulmamı sağlayan çok değerli öğretmenim Prof. Dr. Sedat ALKOY’a çok teşekkür ederim. Sürecin başından beri hem akademik bilgisiyle hem de hoş sohbetiyle beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşım Yük. Müh. Muhammet BOZ’a tüm bilgisini ve tecrübesini cömertçe ortaya koyduğu ve tezimi tamamlamam için ilk andan itibaren benimle birlikte omuz omuza çalıştığı için, emeği, hoşgörüsü ve sabrı için teşekkür ederim.

Bugün üzerimde etkisi kalmasa dahi; bir dönem beni oldukça zorlayan ve yüksek lisansa başlamama vesile olan tüm sıkıntılı anlarıma teşekkür ederim. Konfor alanımın epey dışındayken, daha da dışına çıkma cesareti gösterebilmiş olmanın; beni daha iyi bir versiyonuma götüreceğini bilemezdim.

Beni her anımda destekleyen, motive eden, ilgisini ve sevgisini benden hiçbir zaman esirgemeyen babama ve anneme, hayatı el ele yürüdüğüm ablama ve kardeşime, içimi umutla dolduran yeğenim Asya’ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
SUMMARY	Vi
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	Xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Piezoelektrik Özellik	3
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	7
2.3. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları	10
2.3.1. Sensörler	10
2.3.2. İvmeölçerler	10
2.3.3. Hidrofonlar ve Projektörler	12
2.3.4. Ateşleyiciler	13
2.3.5. Eyleyiciler	13
2.3.6. Hava Dönüştürücüleri	14
2.3.7. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcılar	14
2.3.8. Su Altı Elektroakustik Dönüştürücüler	15
2.3.8.1. Tonpilz Dönüştürücüler	16
2.3.8.2. Esnek Gerilmeli Dönüştürücüler	16
2.3.8.3. Disk, Bar, Küre ve Silindir Formunda Dönüştürücüler	17
2.4. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi	18
2.5. Asıltı Döküm Yöntemi	18
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
3.1. Malzeme ve Yöntem	22
3.1.1. Asıltının Hazırlanması	23
3.1.2. Kalıp Hazırlanması	24

3.1.3. Asıltı Döküm	25
3.1.4. Sinterleme	26
3.1.5. Elektrot Kaplama ve Kutuplama	26
3.1.6. Montaj	27
3.1.7. Elektriksel Karakterizasyon	28
3.1.8. Poliüretan Kaplama	28
3.1.9. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme	29
3.1.10. Su Altı Akustik Ölçümleri	29
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	30
4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları	32
4.3. Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçları	33
4.4. Genel Değerlendirme	37
5. GENEL SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR	39
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	42

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

ϵ	: Dielektrik sabiti
η	: Verimlilik sabiti
d	: Piezoelektrik katsayı
D	: Dielektrik yer değiştirme
DI	: Yönlülük indeksi
E	: Elektrik alan
f	: Frekans
g	: Piezoelektrik voltaj katsayısı
Hz	: Hertz
k	: Kilo
K	: Bağlı dielektrik sabiti
K_{ϵ_0}	: Vakum geçirgenliği
Ps	: Kendiliğinden polarizasyon
Pr	: Kalıcı polarizasyon
R	: Zorlayıcı alan
s	: Malzeme uyumluluğu
S	: Gerinim
T	: Gerilme
Tc	: Curie sıcaklığı
BT	: Baryum Titanat
FFVS	: Serbest Alan Voltaj Hassasiyeti
MPB	: Morfotropik Faz Sınırı
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
SONAR	: Sound Navigation and Ranging
TVR	: Voltaj İleti Cevabı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Düz ve ters piezoelektrik etkilerin şematik gösterimi.	4
2.2: Piezoelektrik ilişkiler için kullanılan doğrultular.	4
2.3: Ferroelektrik malzemenin histerezis döngüsünün şematik gösterimi.	6
2.4: Perovskit kristal yapının şematik görünümü.	8
2.5: PZT'nin Curie sıcaklığı altında ve üstünde hücre yapısı.	8
2.6: PZT'nin faz diyagramı.	9
2.7: Kayma modundaki ivmeölçerin şematik görünümü.	11
2.8: Basma modundaki ivmeölçerin şematik görünümü	11
2.9: Piezoelektrik ateşleyicinin şematik görünümü.	13
2.10: Mürekkep püskürtmeli yazıcının çalışma prensibine ilişkin şematik görünüm.	15
2.11: Tonpiz dönüştürücü şematik gösterimi.	16
2.12: Esnek gerilmeli dönüştürücü tipleri.	17
2.13: Asıltı döküm yönteminin aşamaları.	19
3.1: Deneysel çalışma aşamalarına ait akış şeması.	22
3.2: Basık sfereoid geometrisindeki seramiğin şematik görünümü.	23
3.3: Kalıbın teknik çizimi.	24
3.4: Hazırlanan model (a) ve kalıbın (b) görüntüsü.	25
3.5: Asıltı döküm yönteminin gerçekleştirilmesi.	25
3.6: Sinterleme sonrası numunelerin görüntüsü.	26
3.7: Kutuplama işlemi.	27
3.8: Montaj işleminin aşamaları.	27
3.9: Poliüretan kaplama aşamaları.	28
3.10: Seramik parçanın poliüretan kaplanmış halinin su altı modellemesi.	29
4.1: Farklı eğrilik yarıçapında basık sfereoid geometriye sahip tasarımların modelleme sonuçlarının kıyaslaması.	30
4.2: MM4 tasarımının modelleme sonuçları.	31
4.3: MM1 tasarımının modelleme sonuçları.	31

4.4: MM1 tasarımının modellemesinde (a) 30 kHz ve (b) 61 kHz’de maksimum TVR değerlerindeki yönelim endeksleri.	32
4.5: MM1 tasarımının deneysel hava ölçümleri ile modelleme sonuçlarının kıyaslaması.	32
4.6: P1 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.	34
4.7: P1 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.	34
4.8: P2 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.	35
4.9: P2 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.	35
4.10: P3 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.	36
4.11: P3 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.	36
4.12: P4 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.	36
4.13: P4 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.	37
4.14: P1, P2, P3 ve P4 prototiplerinin frekansa bağlı TVR sonuçlarının kıyaslaması.	37

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bazı seramiklerin piezoelektrik özellikleri.	9
4.1: MM1 tasarımının modelleme ve deneysel ölçüm sonuçları.	33
4.2: Prototiplerin poliüretan kaplama parametreleri.	33

1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler, mekanik etkiye maruz kaldığında elektriksel sinyal üreten (direkt etki) veya elektrik alan uygulandığında şekil değişimine uğrayan (ters etki) malzemelerdir [1]. Bu malzemeler direkt etki sayesinde sensörlerde, ivme ölçerlerde ve enerji hasadı gibi uygulamalarda; ters etki sayesinde ise sonar uygulamalarda, ultrasonik görüntüleme veya ultrasonik temizleme gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

PZT, en önemli piezoelektrik malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Yüksek Curie sıcaklığı ve nispeten düşük işlem sıcaklıkları PZT'yi öne çıkarmaktadır. Aynı zamanda yüksek dielektrik ve piezoelektrik sabitlerine sahip olması PZT'nin üstün performans beklenen cihazlarda kullanılmasını sağlamaktadır [2].

Su altı uygulamalarında kullanılan piezoelektrikler genelde 1 – 100 kHz aralığında çalışmaktadır. Bu bant aralığında çalışan sistemler çoğunlukla birden fazla dönüştürücü kullanılarak hazırlanmaktadır. Bunun sebebi tek bir dönüştürücünün bu aralığı tarayabilecek çalışma frekansına sahip olmamasıdır. Birden fazla dönüştürücü kombine edilerek geniş bant aralıkları taranabilmektedir ancak sonar sistemde piezoelektrik dönüştürücülere ayrılan kısmın sınırlı olması durumunda birden fazla dönüştürücü kullanımı, hacimsel olarak problem yaratabilmektedir. Bu probleme çözüm olarak birbirine yakın frekanslarda birden fazla rezonansa sahip dönüştürücülerin üretilmesi sunulabilmektedir. Dönüştürücülerin geometrisi, tasarımı ve bileşenleri, rezonans frekansları üzerinde doğrudan etkili olduğu için bunlar üzerinde yapılan değiştirmeler ile birbirine yakın rezonanslara sahip dönüştürücüler geliştirilebilmektedir. Böylece hacimsel sınırlamalarla ilgili sorun çözülmekte, dönüştürücü performansı geliştirilmekte ve birden fazla dönüştürücü üretiminin sebep olduğu yüksek maliyetin de önüne geçilmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Piezoelektrik seramiklerle üretilen dönüştürücülere bakıldığında; Tonpilz, seramik kabuk dönüştürücü, esnek gerilmeli dönüştürücü gibi birçok farklı türde dönüştürücü bulunmaktadır. Bu tip dönüştürücülerde genellikle tek bir rezonans frekansından bahsedilmektedir. Uygulamaya bağlı olarak geniş bir frekans bant aralığı taranmak istendiğinde ise birden fazla dönüştürücünün kullanımına ihtiyaç

duyulmaktadır. Bu durum, özellikle SONAR uygulamalarında hacimsel problemlere neden olmaktadır.

Çoklu modda çalışan dönüştürücüler ise birbirine yakın birden fazla rezonans içerdikleri için geniş bir frekans aralığında ve daha yüksek performansla çalışabilmektedir. Bu sayede birden fazla dönüştürücü ile taranabilecek frekans aralığı aslında tek bir dönüştürücü ile taranabilmektedir.

Çalışma kapsamında iki eğrilik yarıçapına sahip basık sferoid geometrideki dönüştürücüler hazırlanarak iki ayrı frekansta rezonansın elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda bir eğrilik yarıçapı değiştirilerek dört ayrı tasarımın rezonans frekansları ATILA sonlu elemanlar analiz programı ile değerlendirilmiştir. Dört ayrı modelleme içerisinde daha geniş bant aralığını tarayabilen, TVR’da ciddi bir düşüş gözlenmeyen ve daha iyi performans göstereceği öngörülen tasarım baz alınmış ve numuneler, belirlenen eğrilik yarıçaplarında hazırlanmıştır. Numunelerin üretilmesinde asıltı döküm yöntemi kullanılmıştır. Sinterleme, elektrotlama, kutuplama ve farklı kalınlık ve sertlikte poliüretan kaplamaları tamamlanan numunelerin montajları gerçekleştirilmiş ve prototipler hazırlanmıştır. Prototiplerin hava ortamında ve su altında ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Piezoelektrik Özellik

Piezoelektrik özellik, 1880 yılında Jacques ve Pierre Curie kardeşlerin kristaller üzerinde yaptıkları çalışmada bazı kristallerin mekanik gerilme altında elektrik yükü ürettiğini keşfetmeleri sonucu bulunmuştur [1]. 1881 yılında ise Gabriel Lippman, elektrik alanın piezoelektrik malzemelerde mekanik bir baskıya ve elastik deformasyona sebep olduğunu söylemiş ve bu durum, Curie kardeşler tarafından deneysel olarak ispatlanmıştır. Piezoelektrik malzemelerin pratik uygulamaları 1917 yılında, Fransız bilim insanı Paul Langevin'in sualtındaki cisimlerin tespitinde kullanılması için ultrasonik dönüştürücü tavsiye etmesi üzerine başlamıştır. Geliştirilen cihazda çelik kütleler arasına kuvars plakalar yerleştirilmiş ve bu şekilde malzemelerin tek başlarına sahip olduğu rezonans frekansına kıyasla daha düşük rezonans frekansına sahip bir dönüştürücü elde edilmiştir. Paul Langevin'in icadından sonra ilk piezoelektrik mikrofonlar, telefonlar, ses kayıt cihazları, titreşim ölçerler ve hızlandırıcılar geliştirilmiştir [3].

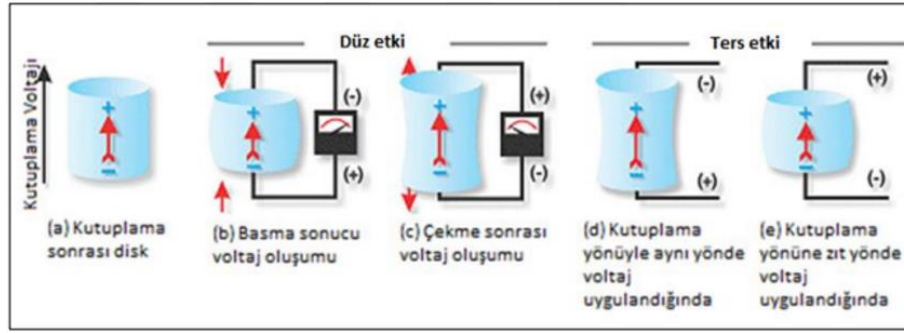
Piezoelektrik malzemelerde 2 farklı etkiden söz edilmektedir. Düz piezoelektrik etkide mekanik gerilme altında elektrik yükü oluşurken, ters piezoelektrik etkide ise elektrik alan altında mekanik gerinim oluşmaktadır [1]. Düz ve ters piezoelektrik etkilerin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir [4].

Düz ve ters piezoelektrik etkiyi açıklayan temel denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir;

$$D = dE + \epsilon^T \quad (2.1)$$

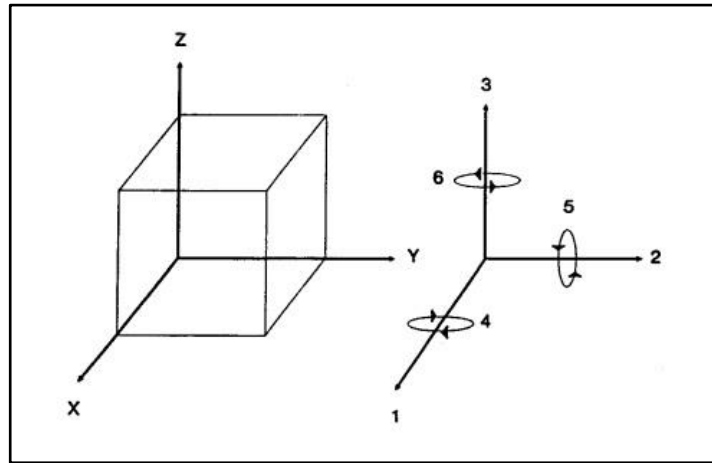
$$S = s^E T + dE \quad (2.2)$$

D dielektrik yer değiştirmeyi, T gerilmeyi, E elektrik alanı, S gerinimi, d piezoelektrik katsayısı, ϵ dielektrik sabitini, s ise malzeme uyumluluğunu göstermektedir [1].



Şekil 2.1: Düz ve ters piezoelektrik etkilerin şematik gösterimi.

Piezoelektrik malzemeler anizotropiktir ve X-Y-Z doğrultularında 1-2-3 alt indisleriyle gösterilmektedir. Bu eksenlerde oluşan kayma ise 4-5-6 alt indisleriyle ifade edilmektedir. Piezoelektrik sabitler, i ve j olmak üzere 2 ayrı alt indise sahiptir. i indisi elektriksel eksen, j indisi ise mekaniksel eksen ifade etmektedir [5]. Piezoelektrik ilişkiler için kullanılan doğrultular Şekil 2.2’de gösterilmiştir [6].



Şekil 2.2: Piezoelektrik ilişkiler için kullanılan doğrultular.

Piezoelektrik malzemeler için önemli bazı sabitler aşağıda verilmiştir;

- Piezoelektrik Gerinim Sabiti (d_{ij}): Piezoelektrik malzemeye uygulanan mekanik gerilim sonucu oluşan polarizasyonu veya uygulanan elektrik alan sonucu oluşan mekanik gerinimi ifade etmektedir.
- Dielektrik Sabiti (ϵ_{ij}): Piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik alan sonucu birim alanda oluşan yük miktarını ifade etmektedir.

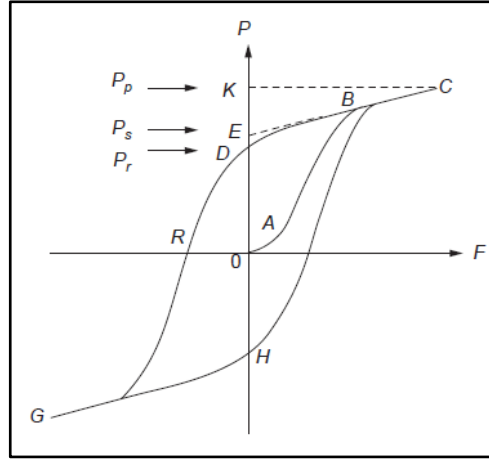
- Bağıl Dielektrik Sabiti (K): Piezoelektrik malzemenin dielektrik sabitinin vakumun dielektrik sabitine oranıyla bulunan sabiti ifade etmektedir.

- Curie Sıcaklığı (T_c): Malzemenin kristal yapısı Curie noktasında değişmektedir. Malzemeler, yalnızca belli bir sıcaklık aralığında piezoelektrik özellik göstermekte olup Curie sıcaklığının üzerinde piezoelektrik özellik göstermemektedir. Curie sıcaklığı, karakteristik bir sıcaklık olup her malzeme için farklıdır.

- Dielektrik Kayıp Faktörü: Dielektrik kayıp faktörü, kayıp açısının tanjantı olarak da tanımlanmaktadır. Piezoelektrik malzemelere uygulanan elektriksel voltajın, iletkenlikle birlikte kaybolan kısmının ölçüsüdür. Piezoelektrik malzemelerin düşük dielektrik kayıp faktörüne sahip olması beklenmektedir.

- Elastik Sabiti: Young modülü, malzemenin mekanik rijitlik özelliklerini tanımlamakta ve gerilimin gerinime oranını ifade etmektedir. Piezoelektrik malzemede, Young modülünün değeri, gerilim ve gerinimin yönüne ve elektriksel koşullara bağlı olmaktadır. Piezoelektrik malzemenin birim alanına uygulanan gerilim sonucu malzemede oluşan gerinim ise “elastik uygunluk (S_{ij})” olarak ifade edilmektedir [5,6].

Ferroelektrikler, piezoelektrik malzemelerin bir grubu olarak karşımıza çıkmaktadır. Herhangi bir elektrik alan altında kalmadığı halde kendi doğal dipol momentine sahip olan ferroelektrik malzemeler Curie sıcaklığının altında kendiliğinden polarizasyon göstermekte ve uygulanan elektrik alan ile birlikte domainler yeniden yönlendirebilmektedir. Farklı kristal yapılarıdaki ferroelektrik oksitler, yüksek dielektrik sabiti ve yüksek elektromekanik eşleşme katsayısı göstermektedir [7].



Şekil 2.3: Ferroelektrik malzemenin histerezis döngüsünün şematik gösterimi.

Şekil 2.3'te ferroelektrik malzemelerin tipik bir histerezis döngüsünün şematik gösterimi verilmiştir. Düşük elektrik alan altında, elektrik alan artışıyla birlikte polarizasyon da artmaktadır ancak elektrik alan domainleri yeniden yönlendirmeye yetecek kadar yüksek değildir (0-A arası). Elektrik alan biraz daha arttırıldığında polarizasyon lineer olmayan bir biçimde artmakta çünkü domainler, elektrik alan yönünde yönelmeye başlamaktadır (A-B arası). Elektrik alanın arttırılmaya devam etmesiyle birlikte polarizasyon doyuma ulaşmaktadır. Domainlerin çoğu elektrik alan yönünde yönelmektedir (B-C arası). Elektrik alan bu noktadan sonra azaltıldığında ise CBD yolunu izleyerek polarizasyonda da azalma gözlenmektedir. Elektrik alanın yönü, tersi yönde değiştirildiğinde ise polarizasyon azalarak işaret değiştirmekte ve yine belli bir elektrik alan değerinde doyuma ulaşmaktadır (DRG eğrisi). Bu şekilde devam eden döngü ise histerezis döngüsü olarak adlandırılmaktadır [7].

Burada P_s kendiliğinden polarizasyonu, P_r kalıntı polarizasyonu, P_p ise maksimum polarizasyonu göstermektedir. Elektrik alanın düşmesiyle birlikte bazı domainlerin esas pozisyonlarına dönmelerinden dolayı P_p değeri P_r değerine düşmektedir. P_r değeri, kutuplanmış ferroelektriklerde sıfır elektrik alan altında var olan polarizasyonu ifade etmektedir. R ile tanımlanan elektrik alan değerine ise zorlayıcı alan denilmekte ve polarizasyon değerini sıfıra getirmek için gerekli elektrik alanının büyüklüğünü vermektedir [7].

2.2. Piezoelektrik Malzemeler

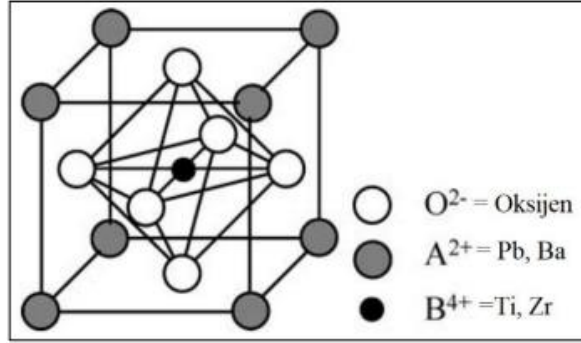
Seramiklerdeki piezoelektrik özelliğın keşfedilmesiyle birlikte özellikle ticari dönüştürücü uygulamalarında kullanılmak üzere maliyeti daha uygun olan piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğı doğmuştur. Piezoelektrik seramikler için farklı kompozisyonlar denenerek geniş bir aralıkta elektromekanik özellik elde edilmiş ve böylece farklı uygulamalarda kullanılmaya uygun birçok piezoelektrik kompozisyon keşfedilmiştir. Aynı zamanda 1940'lı yılların ortasında BaTiO₃'ün yüksek dielektrik sabitine sahip olması ferroelektrik bir malzeme oluşunun sonucu olarak belirlenmiştir. Ardından ferroelektrik BaTiO₃'ün belli bir sıcaklıkta ve yüksek elektrik alan altında kaldıktan sonra elektriksel ve termal etkiler kaldırıldığında da kalıntı polarizasyon gösterdiği fark edilmiştir. Kutuplama olarak da bilinen bu prosesin bulunması seramik endüstrisi için çok önemli bir gelişme olmuş ve pizelektrik malzemelerin birçok farklı uygulamada kullanımını sağlamıştır [6].

Tek kristal kuvars ve Rochelle tuzu bilinen en eski piezoelektrik malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Tek kristal üretmenin zorluğu, istenilen boyut ve şekillerde üretimin sağlanması gibi gereksinimler dolayısıyla yeni malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. İlk kez 1947 yılında Rochelle tuzu yerine BaTiO₃ (BT) kullanılmıştır. 1950'li yılların başında, füze güdüm sistemlerindeki iyileştirmeleri desteklemek için baryum titanat ivmeölçerler geliştirilmiştir. 1950'li yılların sonlarına doğru medikal sistemlerde de baryum titanat kullanılmaya başlanmıştır. Baryum titanat aynı zamanda piezoelektrik olmayan uygulamalarda da ısıtıcı element, kapasitör, resistor olarak kullanılmaktadır [6].

Diğer perovskit ve oksit seramik kompozisyonları, 1950'lerde keşfedilmeye başlanmıştır. PbTiO₃ ve PbZrO₃ 1950'de, [Pb(Zr,Ti)O₃] ve PbNb₂O₆ kompozisyonları ise 1952'de keşfedilmiştir [6].

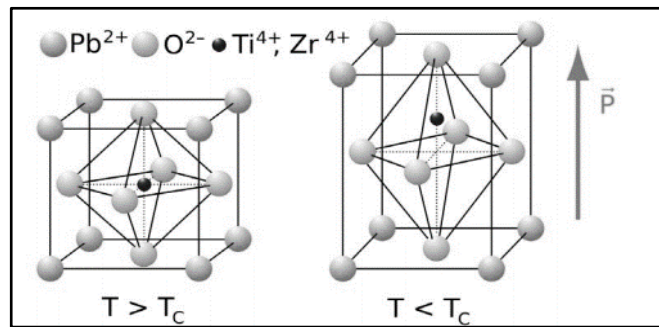
Kurşun zirkonat titanat (PZT), yüksek bağlaşma katsayısı dolayısıyla dönüştürücüler için kullanılan piezoelektrik malzemeler arasında öne çıkan baskın bir kompozisyonudur [6]. 1950'lerden beri yüksek elektromekanik ve ferroelektrik özelliklerinden dolayı araştırılmakta olan PZT'nin öne çıkan özellikleri; yüksek kalıntı polarizasyonu, nispeten düşük işlem sıcaklıkları ve yüksek Curie sıcaklığına sahip olmasıdır. Aynı zamanda yüksek dielektrik, piezoelektrik sabitleri sayesinde üstün performanslı cihazlarda kullanılmaktadır [2,8].

PZT, kurşun zirkonat titanat esaslı malzemelere Clevit firması tarafından verilen ticari bir isimdir. Kompozisyonunda molce %52-54 kurşun zirkonat (PbZrO_3) ve %46-48 kurşun titanat (PbTiO_3) bulunur ve perovskit yapıda kristalleşir [2]. Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere perovskit kristal yapı incelendiğinde köşe kısımlarda (A iyonları) Pb^{+2} , merkezde (B iyonu) Zr^{+4} ve Ti^{+4} ve yüzey merkezlerinde oksijen iyonları yer almaktadır [4,8].



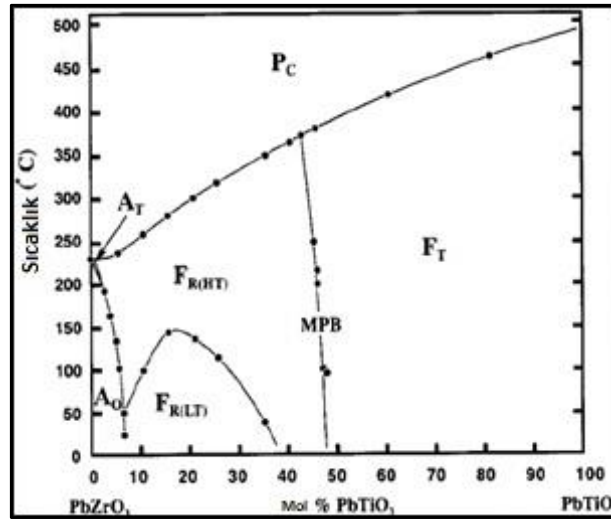
Şekil 2.4: Perovskit kristal yapının şematik görünümü.

Piezoseramiklerin, piezoelektrik özellik gösterebilmesi için Curie sıcaklığı en önemli koşullardan biridir çünkü Curie sıcaklığı malzemelerin karakteristik bir sıcaklığıdır ve bu sıcaklığın üzerinde dielektrik sabitleri ve polarizasyon özellikleri düşmeye başlar. Şekil 2.5'te de PZT hücre yapısında görüldüğü üzere Curie sıcaklığının üzerinde dipol momentler oluşmamıştır ve yapı simetriktir. Curie sıcaklığının altında ise hücre yapısı simetrik değildir. Merkezdeki pozitif yüklü iyonla yüzeylerdeki negatif yüklü iyonlar birbirine zıt yönde hareket ederek birim hücre bazında yük ayrışmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda birim hücrede belirli bir yönde net dipol momentini açığa çıkarmaktadır. Bu durum ferroelektrik özellik olarak adlandırılmaktadır [5].



Şekil 2.5: PZT'nin Curie sıcaklığı altında ve üstünde hücre yapısı.

PZT, en iyi piezoelektrik ve dielektrik özelliklerini morfortropik faz sınırı (MPB) etrafındaki kompozisyonlarında göstermektedir (Bkz. Şekil 2.6). Oda sıcaklığında Titanyumca zengin tarafta tetragonal, Zirkonyumca zengin tarafta ise rombohedral kristal yapıya sahiptir [9]. MPB civarındaki kristal yapıları ve geniş polarizasyonları dolayısıyla PZT, genellikle bu faz sınırı civarında üretilmektedir. Curie sıcaklığında PZT, paraelektrik fazdan ferroelektrik faza geçmektedir. Aynı zamanda malzeme, MPB civarında 14 farklı kutuplama yönünü kullanabilmekte ve haliyle malzemenin kutuplanması çok daha kolay gerçekleşmektedir [10]. MPB civarındaki kompozisyonlarda üretilen PZT'nin özellikleri, geniş bir sıcaklık aralığı boyunca değişmemektedir.



Şekil 2.6: PZT'nin faz diyagramı.

BT ve PZT de dahil olmak üzere öne çıkan seramik bileşimlerinin yoğunluk, Curie sıcaklığı, piezoelektrik katsayısı vb. özellikleri ise Tablo 2.1'de verilmiştir [1].

Tablo 2.1 Bazı seramiklerin piezoelektrik özellikleri.

Bileşim	Yoğunluk (g/cm ³)	T _c (°C)	d ₃₃ (pC/N)	k _p	k ₃₃
BaTiO ₃	5.7	115	190	0.36	0.5
PZT-4	7.5	328	289	0.58	0.7
PZT-5A	7.8	365	374	0.6	0.71
PMN-PT (65/35)	7.6	185	563	0.58	0.7
PMN-PT (90/10)	7.6	40	0	0	0
PbNb ₂ O ₆	6.0	570	85	0.07	0.38

2.3. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları

Piezoelektrik malzemelerdeki farklı etkiler, bu malzemelerin çeşitli uygulamalarda kullanımına olanak sağlamaktadır. Düz piezoelektrik etki sayesinde, mekanik gerilme altında elektrik yükü oluşmakta ve bu sayede piezoelektrik malzemeler; sensörler, ivmeölçerler, hidrofonlar, mikrofonlar ve ateşleyicilerde kullanılabilir. Piezoelektrik malzemelerin ters piezoelektrik etkisi sayesinde ise elektrik alan altında mekanik gerilim oluşmakta ve bu sayede piezoelektrik malzemeler; eyleyiciler, su altı dönüştürücüleri, hava dönüştürücüleri ve mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılabilir.

2.3.1. Sensörler

Piezoelektrik seramiklerin mekanik gerilmedeki değişimi ölçebilme yeteneği, bu malzemelerin sensör uygulamalarında kullanımını sağlamaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak sensörler, farklı şiddetteki mekanik gerilmeler altında çalışabilir. Daha yüksek mekanik gerilme değişimlerinin olduğu uygulamalarda; disk veya pul formundaki seramikler tercih edilmektedir. Bu seramikler, diğer formdaki seramiklere kıyasla yüksek mekanik gerilmelere maruz kaldığında çok daha iyi bir dayanım göstermektedir [6].

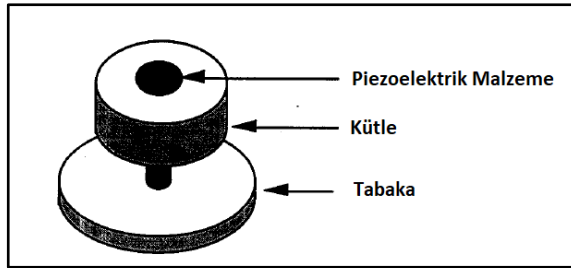
Bir piezoelektrik malzemenin hassasiyeti; uygulanan mekanik gerilmenin, bu gerilmeye bağlı olarak ortaya çıkan açık devre voltajına eşit olmasıyla ölçülmektedir. Üretilen sinyalin arka fondaki gürültüye rağmen tespit edilebilmesi için piezoelektrik malzemenin hassasiyeti olabildiğince yüksek olmalıdır. Malzemenin hassasiyeti doğrudan piezoelektrik voltaj katsayısının (g) yüksek olmasına bağlıdır. Piezoelektrik voltaj katsayısı ise dielektrik sabiti (d) ve vakum geçirgenliğine (K_{ϵ_0}) bağlı olmaktadır. Haliyle sensörlerde yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerin kullanımı oldukça büyük önem arz etmektedir [10].

2.3.2. İvmeölçerler

Piezoelektrik ivmeölçerler, piezoelektrik etki sayesinde oluşan elektriksel yük doğrultusunda çalışmaktadır. Oluşan elektriksel yükün miktarı, piezoelektrik

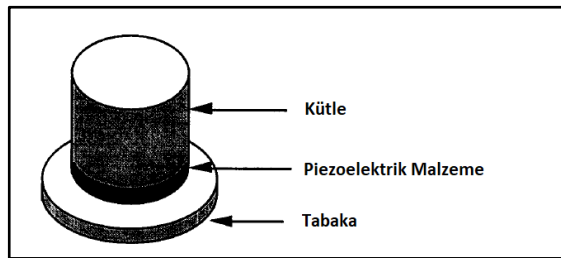
malzemeye uygulanan mekanik gerilmeye bağlıdır. Bir başka deyişle, toplamda biriken elektriksel yük, uygulanan mekanik gerilmenin şiddetine bağlı olmaktadır [6].

İvmeölçerlerin tasarımında farklı mekanik konfigürasyonlar kullanılmaktadır. Bu konfigürasyonlarda hızlandırılmış bir kütle, piezoelektrik malzemeye etki etmektedir. Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere kayma modundaki ivmeölçerlerde, çubuk benzeri bir forma sahip olan piezoelektrik malzeme, bir tabaka ve kütlenin ortasından geçmektedir. Bu yapıda kütle, piezoseramik malzeme üzerinde bir kayma gerilmesine neden olmaktadır [6].



Şekil 2.7: Kayma modundaki ivmeölçerin şematik görünümü.

Şekil 2.8’de de görüldüğü üzere basma modundaki ivmeölçerde ise piezoelektrik malzeme, kütle ve rijit bir tabaka arasında pozisyonlanmaktadır. Bu tip ivmeölçerlerde, kütleyle ilgili olarak piezoelektrik malzemeye uygulanan güç değiştirilebilmekte ve böylelikle oluşturulan elektriksel yük miktarı da farklı olabilmektedir. Bu konfigürasyonda, kütlenin artırılması mekanik gerilmenin şiddetini ve dolayısıyla oluşan elektriksel yük miktarını da artırmaktadır [6].



Şekil 2.8: Basma modundaki ivmeölçerin şematik görünümü

2.3.3. Hidrofonlar ve Projektörler

Günümüzde kullanılan hidrofon ve projektörlerin büyük bir çoğunluğu piezoelektrik malzemelerden üretilmektedir. Bu durum, piezoelektrik malzemelerin çok çeşitli geometrik form ve boyutlarda üretilebilmesi ve üstün dönüştürücü yeteneğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [11].

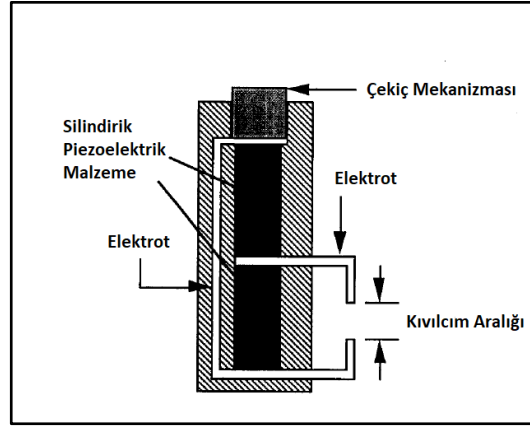
Sualtı sonar sistemlerinde akustik ses dalgalarını iletme için projektör, gelen ses dalgalarını tespit edebilmek için ise hidrofon kullanılmaktadır. Bazı sonar sistemlerde ise dönüştürücü; ağırlık, alan ve maliyetten tasarruf edebilmek için hem projektör hem de hidrofon olarak kullanılabilir. Disk, tabaka, tüp, halka vb. birçok farklı formda üretilebilen piezoelektrik malzemelerin yüzeyine uygulanan elektrik alan sonucu yüzeyde bir yer değiştirme yani mekanik bir gerinim meydana gelmektedir. Projektör ve hidrofonların çalışma prensibi de bu temele dayanmaktadır. Uygulanan elektrik alanına bağlı olarak oluşan mekanik gerinim, bir elektriksel yalıtım katmanıyla doğrudan su içerisine aktarılmaktadır. Genelde dönüştürücülerin tarayabileceği bant aralığı dar olmaktadır. Dönüştürücünün polarizasyon yönünde uygulanan elektrik alan ile birlikte artan elektrotlar arası mesafe yani kalınlık miktarı, dönüştürücünün çalışabileceği rezonans frekans aralığını da belirlemektedir. Çoğu kalın dönüştürücüler 100 kHz ve üzerinde çalışırken, daha kalın diskler ve plakalar ise 50 kHz ve altında rezonans frekans aralıklarında çalışmaktadır. Disk şeklindeki dönüştürücüler, oldukça düşük rezonans frekanslarının altındaki değerlerde hidrofon olarak kullanılmaktadır [11].

Normal şartlarda ilgili rezonans frekansında çalışan projektör, özellikle aktif sonar sistemlerinde belli frekans aralıklarında alıcı olarak da kullanılabilir. Hidrofonların rezonans frekansı doğrudan boyutuna bağlı olmaktadır. Özellikle daha büyük hidrofonlar daha hassas uygulamalarda kullanılabilir. Üretilen hidrofonun, uygulama bazlı olarak beklenen en yüksek rezonans frekansından bir miktar daha yüksek bir bant aralığını taraması yeterli olmakta ve maliyetin optimize edilmesi açısından tercih edilmektedir. Hidrofonun hassasiyeti, yalnızca hidrofonun gelen sinyali ölçebilme yeteneğine bağlı olmamaktadır. Hidrofonun kendi gürültüsü ve kablolarına ek olarak denizdeki termal dalgalanmalardan kaynaklanan gürültü de hidrofonun performansını doğrudan etkilemektedir [11].

2.3.4. Ateşleyiciler

Ateşleyiciler (Igniters) genelde yanıcı gazların yer aldığı çakmaklar ve ocaklarda kullanılmaktadır. Piezoelektrik ateşleyicilerin çalışma prensibi; düz piezoelektrik etki sayesinde birbirinden boşlukla ayrılmış olan iki elektrot arasında voltaj oluşturulmasına dayanmaktadır [6].

Piezoelektrik ateşleyiciler, elektrik yükü yani voltaj oluşturmak için uygulanan mekanik gerinmenin çeşidine bağlı olarak kategorize edilmektedir. Şekil 2.9'da piezoelektrik ateşleyicinin şematik görünümü verilmiştir. Darbeli ateşleyici, bir piezoelektrik silindir boyunca yük oluşumunu dinamik olarak sağlamak için yaylı bir çekiç kullanırken, sıkıştırırmalı ateşleyici, bir kaldıraç sistemi kullanarak piezoelektrik silindire yarı statik bir yük uygulamaktadır [6].



Şekil 2.9: Piezoelektrik ateşleyicinin şematik görünümü.

2.3.5. Eyleyiciler

Piezoelektrik malzemelerdeki gelişim ve mekanik farklı konfigürasyonlarla birlikte geleneksel piezoelektrik malzemelerde yaşanan yer değiştirme limitlerine ilişkin problemler aşılmakta ancak daha yüksek yer değiştirme elde edebilmek için üretilen cihazlarda da maliyet yükselmektedir [6].

Piezoelektrik disk ve pullar, düşük yer değiştirme ve yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Bununla birlikte eyleyiciler, yüksek yer değiştirme sağlarken aynı zamanda yüksek güç üretimini de koruyabilmektedir. Bu tip uygulamalara örnek olarak; piezoelektrik eyleyiciler, esnek su altı dönüştürücü tasarımlarında kullanılabilir. Bu dönüştürücüler, büyük bir su kütesinin olması

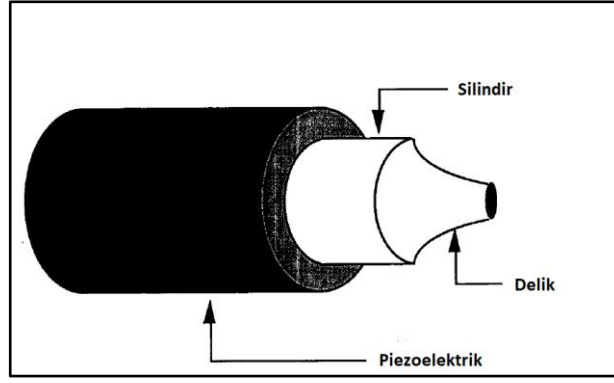
durumunda, büyük genlikli ses dalgalarını daha da baskın bir hale getirmek için piezoelektrik malzemenin büyük yer değiştirme kapasitesini ve aktif ve pasif komponentlerin arasındaki mekanik kaldıracı kullanmaktadır. Daha düşük güç ve yüksek yer değiştirme gerektiren uygulamalarda kullanılan piezoelektrik malzeme genelde maliyeti daha uygun olan eyleyicilerdir [6].

2.3.6. Hava Dönüştürücüleri

Hava dönüştürücüleri, elektriksel gücün havada yayılan akustik dalgalara dönüştürülmesi prensibiyle çalışmaktadır. Su altı dönüştürücülerinin aksine hava dönüştürücülerinin duyulabilir bir ses dalgası üretebilmesi için daha yüksek yer değiştirme miktarlarına ihtiyacı bulunmaktadır. Bu prosesi tamamlamak için hava dönüştürücülerinin, su altı dönüştürücülerdeki gibi büyük bir kuvvet üretmesi gerekmediğinden, düşük kuvvetli bükme elemanları kullanılabilir. Nispeten daha esnek olan bu bükücüler ise bipleyciler, sesli hoparlörler ve ton dönüştürücüler gibi birçok dönüştürücü uygulamasında kullanılabilir [6].

2.3.7. Mürekkep Püskürtmeli Yazıcılar

Şekil 2.10'da da görüldüğü üzere; bazı mürekkep püskürtmeli yazıcılarda, darbeli mürekkep püskürtmesi, yaklaşık 2-3 mililitrelik cam bir deliğin dış yüzeyine sıkıca bağlanan silindirik bir dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Piezoelektrik dönüştürücünün mürekkep üzerinde ürettiği basınç dalgası, mürekkebin cam deliğe doğru hızlanmasını sağlamaktadır. İlgili basıncın, mürekkebin yüzey gerilimini aşmasıyla birlikte deliğin ağzında bir mürekkep damlacığı oluşmaktadır. Bu sistemlerin çalışma frekansları, büyük bir kartuştan mürekkebin yeniden doldurulması gerekeceği için 10 kHz civarında sınırlandırılmaktadır [6].



Şekil 2.10: Mürekkep püskürtmeli yazıcının çalışma prensibine ilişkin şematik görünüm.

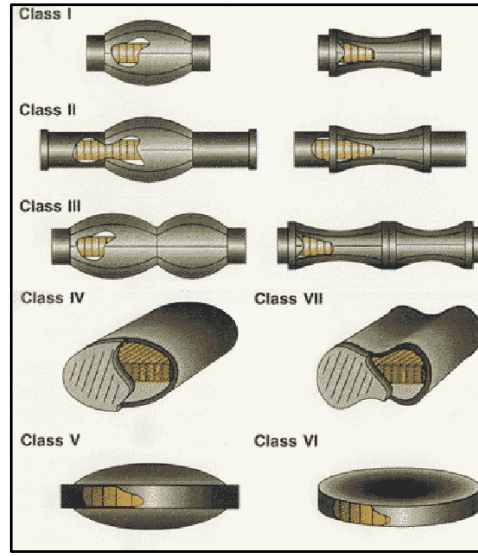
2.3.8. Su Altı Elektroakustik Dönüştürücüler

Dönüştürücü, enerjiyi bir formdan başka bir forma dönüştüren cihaza denmektedir. SONAR sistemlerde kullanılan su altı dönüştürücüleri, karşılıklı olarak akustik enerjiyi yani ses dalgalarını almakta ve iletmektedir. Ses dalgalarının iletiminde kullanılan dönüştürücüler projektör, ses dalgalarının alımında kullanılan dönüştürücüler ise hidrofon adını almaktadır [12].

Donanmada kullanılan bazı dönüştürücüler ise ses dalgalarının hem iletimi hem de alımında kullanılmaktadır. Bu tip dönüştürücülerde ağırlıklı olarak ticari PZT kullanılmaktadır. Donanma Tipi-1 dönüştürücüler PZT-4'ten yapılmakta ve elektriksel ve termal olarak depolarize edilmesi zor olan piezoelektrik malzemelerden oluşmaktadır. Bu tip dönüştürücüler aktif projektörlerde, pasif hidrofonlarda ve her iki fonksiyona gereksinim duyulan uygulamalarda kullanılmaktadır. Donanma Tipi-2 dönüştürücüler ise PZT-5'ten yapılmaktadır. Donanma Tipi-2 dönüştürücülerin depolarize edilmesi nispeten kolay olmaktadır ve özellikle hidrofon uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Donanma Tipi-3 dönüştürücüler ise elektriksel ve mekanik kaybın az olması nedeniyle yüksek güçlü projektörlerde kullanılmaktadır [12].

Piezoelektrik dönüştürücüler, dönüştürücünün kullanım alanına bağlı olarak; farklı geometrilerde olabilmektedir. Bu dönüştürücüler, farklı bant aralıklarında çalışmakta ve yönlülükleri birbirinden farklı olmaktadır. Herhangi bir uygulama için kullanılacak dönüştürücünün tasarımı, aynı zamanda çevresine sağlayacağı adaptasyon da göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Piezoelektrik seramiklerle üretilen dönüştürücülere bakıldığında; Tonpilz dönüştürücüler, esnek

üzerinde bir dizin halinde sıralanması sonucu oluşturulur. Sınıf II ve Sınıf III dönüştürücülerin biçimi ise tıpkı Sınıf I dönüştürücülere benzemekte ancak bu dönüştürücüler, Sınıf I dönüştürücülere kıyasla daha geniş bant aralıklarında çalışabilmekte ve daha yüksek akustik güç yayabilmektedir. Sınıf IV dönüştürücüler ise bu grupta üzerinde en çok çalışılan ve en çok kullanılan dönüştürücü tipidir ve alüminyum veya çelikten üretilen eliptik silindirik kabuktan oluşur. Sınıf V ve Sınıf VI dönüştürücüler ise piezoseramik disk veya halka dönüştürücülerle oluşturulmuş düzlemsel, dairesel dönüştürücülerdir [11].



Şekil 2.12: Esnek gerilmeli dönüştürücü tipleri.

2.3.8.3.Disk, Bar, Küre ve Silindir Formunda Dönüştürücüler

Disk, bar ve silindir formundaki dönüştürücülerin üretilmesi, diğer dönüştürücü tiplerine göre daha kolay olmaktadır. Bu dönüştürücüler, tekrar eden birimler halinde veya kesitlerin birleştirilmesiyle üretilmektedir. Bu dönüştürücülerin rezonansı, doğrudan boyutları tarafından kontrol edilmektedir. Düşük ultrasonik frekans aralığında bir rezonans elde edebilmek için bu dönüştürücülerin birkaç metre uzunluğunda veya çapında veya yüzlerce, binlerce kilogram ağırlığında olması gerekmektedir. Özellikle hidrofونların kendi rezonanslarının altında çalışması dolayısıyla, su altı uygulamalarında alıcı olarak kullanılabilmesi için farklı konfigürasyonlar tercih edilebilmektedir. Küresel seramikler ise dönüştürücünün her yönde bir alım yapmasını gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [10].

2.4. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi

Sonlu eleman analiz yöntemi, karmaşık bir problemin çözümünü daha kolay bir şekilde bulma fikrine dayanmaktadır. Bu matematiksel yöntemle birlikte asıl çözüme oldukça yakın bir sonuç bulunabilmektedir. Var olan matematiksel araçlar, asıl çözümü ve hatta bazen yakın bir çözümü dahi bulmakta yetersiz kalabilmektedir. Pratik uygulamalarda, asıl çözüme yakın bir sonuç elde edebilmek için sonlu eleman analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, ağırlıklı olarak yapısal mekanikte kullanılmasına karşın mühendislikte çok fazla ve farklı problemin de çözümünü sağlamaktadır. Isı iletimi, akışkanlar dinamiği, sızıntı akımı, elektrik ve manyetik alan çözümlemelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Üretim sonrası tasarımın nihai durumunu öngörebilmek amacıyla da faydalanan bu yöntem, maliyetleri düşürmekte ve anlamlı bir yaklaşım ortaya koymaktadır [15].

Sonlu eleman analiz yönteminde çözüm bölgesi, birbiriyle bağlantılı olmayan daha küçük bölgelere ayrılmaktadır. Bu alt bölgelere de malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmaktadır. Gerçekleştirilen hesaplama hem alt bölgelerin hem de bunların birbiri ile etkileşiminin sonucu olarak verilmektedir. Böylelikle kompleks geometrik formlarda dahi bu yöntem kullanılabilir [15].

2.5. Asıltı Döküm Yöntemi

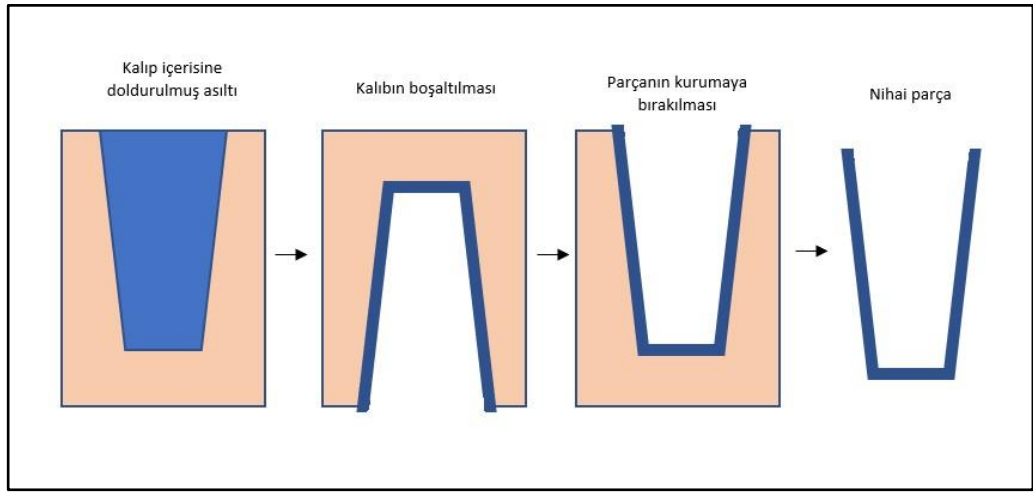
Asıltı döküm yöntemi çok uzun süredir gerek seramik sanatçıları gerekse de teknik seramik üreticileri tarafından kullanılmakta olan önemli bir yöntemdir. Bu çok yönlü yöntem sayesinde farklı malzemeler için farklı döküm yöntemleri geliştirilebilmektedir [16]. Özellikle düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması sebebiyle çokça tercih edilen bir seramik şekillendirme yöntemidir.

Asıltı döküm yöntemi birkaç aşamadan oluşmaktadır:

- Toz malzeme ve sıvı bileşenler (su, plastikleştirici ve dağıtıcı ajan) karıştırılarak kimyasal olarak stabil bir asıltı oluşturulur.
- Hazırlanan asıltı, genellikle Paris alçısından yapılmış kalıba dökülür. Burada asıltı içerisindeki sıvı bileşen kalıp tarafından emilir. Katı bileşen ise kalıp kenarlarında birikmeye başlar.
- Kalıptaki asıltı seviyesi düştükçe sürekli olarak beslenmeye devam edilir.

- Biriken katı faz miktarı istenilen kalınlığa ulaştığında ise kalıp içerisinde kalan asıltı boşaltılır ve kalıp içerisindeki parça kurumaya bırakılır.
- Yeterince kurduğuna emin olunan parça dikkatlice kalıptan çıkartılır.

Asıltı döküm yöntemi ile üretilen seramik parça oldukça gözenekli bir yapıda olup herhangi bir uygulama için yeterli mukavemete sahip değildir. Parçanın yeterli dayanıklılığa ulaşabilmesi için yüksek sıcaklıkta sinterleme işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.13: Asıltı döküm yönteminin aşamaları.

Asıltı döküm yöntemi, kompleks olmayan şekillerin homojen kalınlıkta üretimine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda kalıp üretiminde kullanılan Paris alçısının ucuz olması da bu yöntemi ekonomik kılmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise kesin bir boyutsal kontrol sağlamamasıdır [16].

Asıltı döküm işlemini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır;

1.Viskozite: Asıltının içerisindeki hava kabarcıkları nihai parçanın gözenekliliğini artıracığından dolayı hava kabarcıklarının kolayca giderilebilmesi gerekir. Ayrıca gerçekleştirilecek döküm işleminde asıltı, kolayca kalıba dökülebilmeli ve kalıbın tüm detaylarını doldurabilmelidir. Tüm bu gereklilikleri sağlayabilmek için asıltı viskozitesi olabildiğince düşük tutulmalıdır.

2. Çökme Oranı: Dökümün gerçekleştiği süre boyunca asıltıdaki partiküllerin olabildiğince kararlı olması gerekmektedir. Partiküllerin hızlı çökme göstermesi

halinde nihai parçanın dip kısmındaki kalınlık beklenenden fazla, kenar kısımları ise beklenenden az olmaktadır. Bu durum parçanın şekline doğrudan etki etmektedir.

3. Kalıp Koşullarına Duyarlılık: İyi hazırlanmamış bir kalıp nihai parçanın istenen özelliklere sahip olmamasına sebep olmaktadır.

4. Kalıptan Çıkartma: Asıltı döküm sonrasında kurumaya bırakılan parça, doğru zamanlama ile kalıptan çıkartılmalıdır. Parçanın yeterince kurumadan kalıptan çıkartılması, düzensiz duvar kalınlıklarına sebep olmaktadır. Aynı zamanda parça, kalıptan çıkartılırken kırılabilmektedir.

5. Döküm Parçasının Mukavemeti: Dökümü gerçekleştirilen parça işleme, düzeltme veya şekillendirme işlemleri için yeterli dayanıma sahip olmalıdır. Parçanın yeterli dayanıma sahip olmaması halinde kalıptan çıkartılırken kırılma ihtimali oluşmaktadır.

6. Köpüklenme Problemi: Hazırlanan asıltının köpüklü olması, içerisinde sıkışmış hava kabarcıkları nedeniyle nihai parçanın gözenek oranının artmasına ve kötü bir üretime sebep olmaktadır. Bu yüzden asıltının olabildiğince köpüksüz olması, üretilecek parçanın yüksek yoğunluğa sahip olması açısından büyük önem arz etmektedir.

7. Düşük Buharlaşma Hızı: Asıltı içerisindeki sıvının buharlaşma hızı düşük olmalıdır. Buharlaşma hızının yüksek olması halinde yüzeyde kuru ve ince bir film oluşabilmektedir. Bu durum asıltının kalıptan boşaltılmasını engelleyebilmekte ve üretimde problem yaşanmaktadır [16].

Asıltı döküm yönteminin başarıyla gerçekleştirilmesi ve asıltının istenen özellikleri sağlaması için dağıtıcı, plastikleştirici (bağlayıcı) ve köpük giderici gibi katkıları kullanılmaktadır [4].

Asıltı içerisindeki partiküllerin yüzeyine tutunan ve partiküller arasında bir itme kuvveti yaratan dağıtıcılarda katyonlar ve organik moleküller bulunmaktadır. Endüstride yaygın olarak kullanılan birçok dağıtıcı katkı bulunmaktadır. Sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum oksalat kimyasalları dağıtıcı katkı elemanı olarak kullanılmaktadır [4].

Döküm sonrası parçanın kalıptan çıkartılırken kırılmaması ve pişirme işlemine kadar kendi ağırlığını taşıması için yeterli mukavemete sahip olması önemlidir. Döküm sonrası nihai parçanın mukavemetinin yüksek olması için asıltıya bağlayıcı

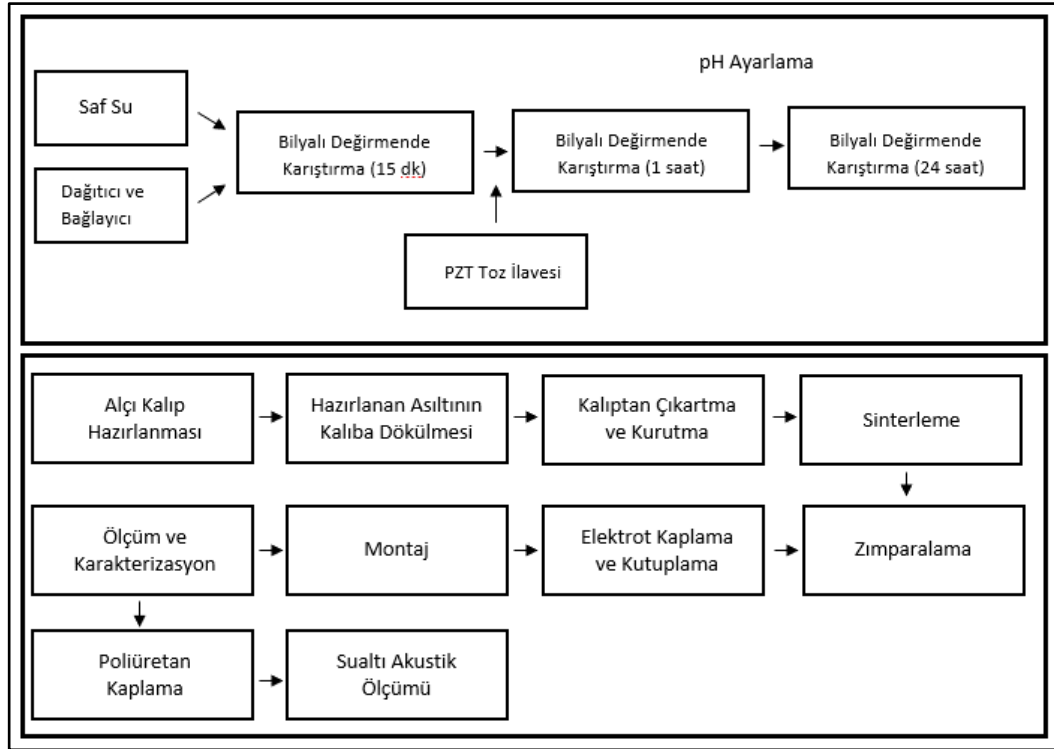
katkılar ilave edilmektedir. İlave edilen miktarı titizlikle ayarlanması gereken bağlayıcılar, pişme sırasında yanarak yapıyı terk etmektedir. Haliyle gereğinden fazla kullanımı, pişme sırasında parçanın kırılmasına sebep olabilmektedir. Gliserol, polivinil alkol ve etil silikat bileşikleri bağlayıcı olarak kullanılmaktadır [4].

Asıltıların köpüklenme problemine karşın asıltıya oktil alkol ilavesi yapılmaktadır. Köpük giderici katkıların gereğinden fazla kullanılması, asıltının daha da köpüklenmesine yol açabilmektedir. Bu yüzden miktarı dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır [4].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

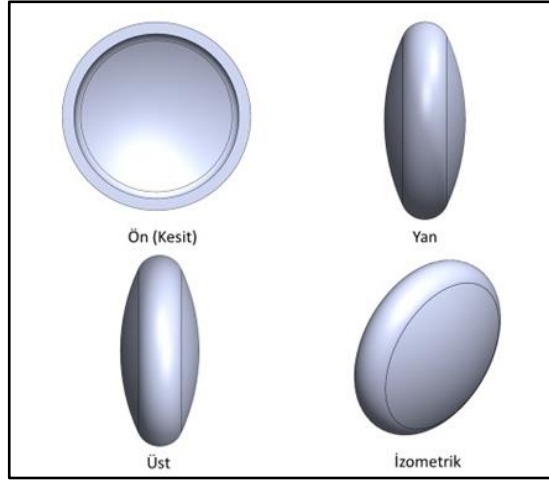
3.1. Malzeme ve Yöntem

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada PZT-5A (T&Partners Praha, Çek Cumhuriyeti) seramik tozu kullanılarak asıltı döküm yöntemiyle seramiklerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de deneysel çalışmanın tüm aşamaları sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.1: Deneysel çalışma aşamalarına ait akış şeması.

Çalışmanın amacı doğrultusunda basık sfereoid geometrisinde seramik numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin farklı açılardan görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Basık sfereoid geometrisindeki seramiğin şematik görünümü.

3.1.1. Asıltının Hazırlanması

Çalışma kapsamında basık sfereoid geometrisindeki dönüştürücülerde kullanılan seramiklerin üretimi asıltı döküm yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Asıltının hazırlığında öncelikli olarak sıvı bileşenler 15 dk süreyle bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Sıvı bileşenlerin içerisinde saf su, plastikleştirici olarak gliserol (Merck KGaA, Almanya) ve dağıtıcı olarak da Reotan L (Lamberti Chemical Specialties, İtalya) bulunmaktadır. Ardından sıvı bileşenlerin üzerine seramik tozu ilave edilerek 1 saat boyunca bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Asıltının pH ayarlaması için amonyak ilave edilerek, tüm bileşenlerin homojen bir şekilde karışması için 24 saat boyunca bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Nihai asıltı pH'ı 10,5 olarak ayarlanmıştır. Karıştırma işlemleri, bilyalı değirmende 160 rpm hızda gerçekleştirilmiştir.

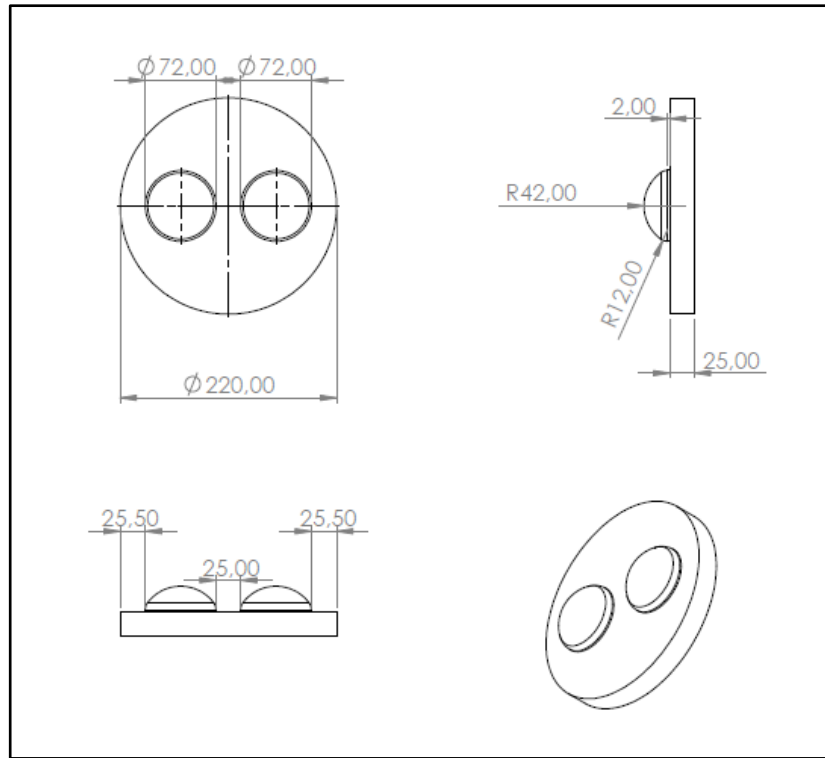
Toplam asıltı hacminin 1/3'ü kadar bilye ile gerçekleştirilen çalışmada asıltı reçetesi aşağıda verilmiştir;

- 14 gram gliserol,
- 14 gram Reotan,
- 138 gram saf su,
- 700 gram PZT-5A,
- ~15 mililitre amonyak.

3.1.2. Kalıp Hazırlanması

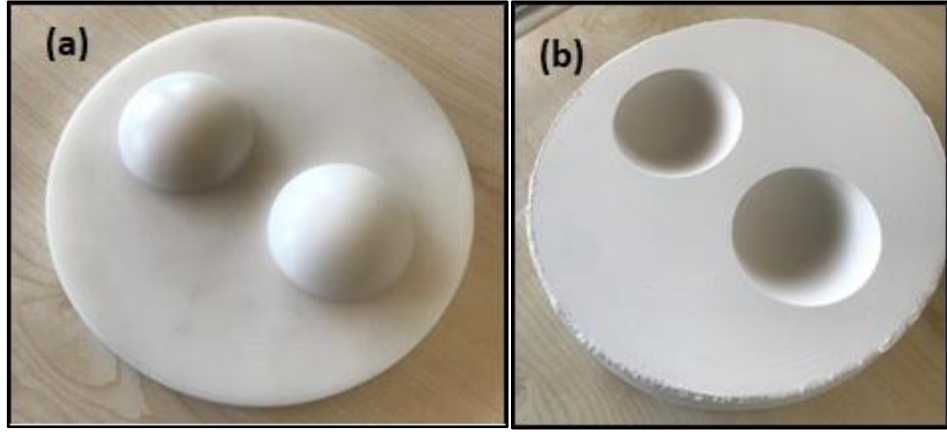
Belirlenen boyut ve formda dönüştürücü tasarımına bağlı olarak elde edilecek sonuçların öngörülebilmesi adına ATILA Sonlu Elemanlar Analiz Yazılımı ile modelleme gerçekleştirilmiştir.

Modelleme çıktılarının analizi gerçekleştirildikten sonra yapılacak uygulama kapsamında uygun olduğuna kanaat getirilen boyutlar baz alınarak kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıp tasarımı Solidworks programı ile gerçekleştirilmiştir. Kalıba ait teknik çizim Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3: Kalıbın teknik çizimi.

Kalıbın teknik çiziminin gerçekleştirilmesinin ardından model oluşturulmuş ve alçı kalıp hazırlanmıştır. 1,66 alçı/su oranıyla 2000 gram alçı ve 1200 gram suyla hazırlanan karışımla üç ayrı kalıp hazırlanmıştır. Şekil 3.4'te model ve kalıp görselleri verilmiştir.



Şekil 3.4: Hazırlanan model (a) ve kalıbın (b) görüntüsü.

3.1.3. Asıltı Döküm

Hazırlanan asıltı, kalıplara dökülerek üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te de görüldüğü üzere kalıp içerisinde bir prototipi oluşturan her iki numunenin dökümü aynı anda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin et kalınlığı seviyesinde sapma olmaması için asıltının kalıba dökümü, olabildiğince hassas ve hızlı yapılmıştır. Numuneler kalınlık alırken asıltı olabildiğince beslenmiş ve et kalınlığı periyodik olarak ölçülmüştür. Numunelerin belirlenen ölçülere ulaşmasıyla birlikte numuneler kalıptan çıkarılarak kurumaya bırakılmıştır. Bu aşamada 16 numunenin dökümü yapılmış ancak bazı numuneler istenilen kalınlıkta üretilemediği ve bazı numunelerin ise çatlak olduğu tespit edildiği için 12 numune deney kapsamına dahil edilmiştir.



Şekil 3.5: Asıltı döküm yönteminin gerçekleştirilmesi.

3.1.4. Sinterleme

Numunelerin yoğunluğunun artırılması amacıyla yapılan sinterleme işlemi kapalı alumina potalarda gerçekleştirilmiştir. PZT içerisinde yer alan kurşun bileşeninin, sıcaklığın artmasıyla birlikte yapıyı terk etmesi, bileşimdeki kurşun miktarının düşmesine yol açmaktadır. Gerçekleştirilen sinterleme işleminde bu durumu önlemek için PZT ağırlığının 1/5'i miktarında PZ (kurşun zirkonat) esaslı atmosfer tozu ($1.8\text{PbO} \cdot \text{ZrO}_2$) kullanılmıştır.

Döküm sonrasında kurumaya bırakılan numuneler, yoğunlaştırılmak üzere 1260°C 'de 4 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası fırından çıkan numunelerin görüntüleri Şekil 3.6'da verilmiştir.

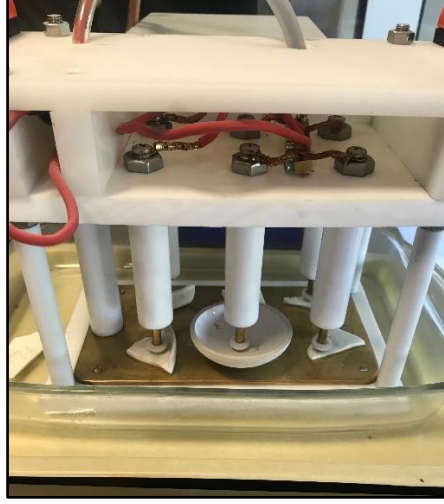


Şekil 3.6: Sinterleme sonrası numunelerin görüntüsü.

3.1.5. Elektrot Kaplama ve Kutuplama

Sinterleme sonrasında numunelerin montaj esnasında birbirine tutunmasında problem yaşanmaması ve istenilen boyutta olması için zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından asetonla temizlenen numunelerin iç ve dış yüzeylerine iki katman gümüş elektrot kaplaması yapılmıştır. Kaplama sonrasında numuneler 700°C 'de 30 dakika boyunca pişirilmiştir. Böylece elektrot katmanının yüzeye sağlam bir şekilde tutunması sağlanmıştır.

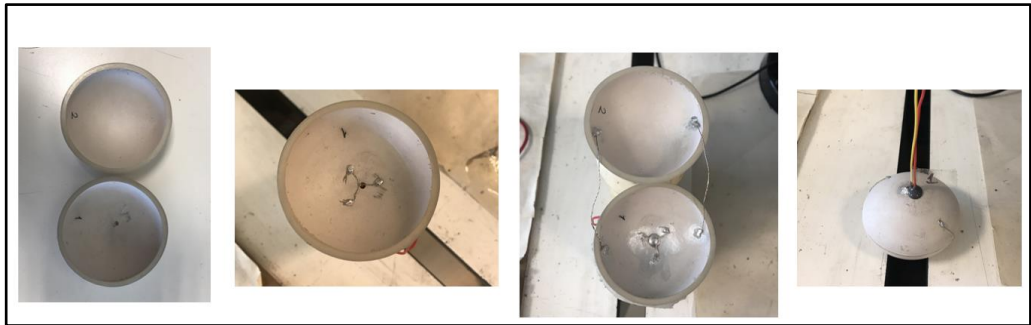
Pişirme sonrası kutuplama işlemi 120 °C'deki silikon yağ banyosu (Labo, Türkiye) içerisinde doğru akım güç kaynağıyla (Spellman High Voltage Electronics, ABD) 2 kV/mm elektrik alan uygulanarak 10 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir.



şekil 3.7: Kutuplama işlemi.

3.1.6. Montaj

Prototipi hazırlamak üzere iki numuneden bir tanesi delinmiş ve tel dıştan içe geçirilerek  farklı noktaya lehimlenmiştir. Telin geçirildiği kısım epoksi yapıştırıcı ile sabitlenmiş ve kapatılmıştır. Her iki numunenin de iç kısımlarında iki ayrı yere lehimle teller bağlanmış ve böylelikle iç bağlantı tamamlanmıştır. Ardından numuneler epoksi yapıştırıcı ile birbirlerine yapıştırılmış ve numunelerin dış bağlantısı iki ayrı telin parçaya lehimlenmesiyle sağlanmıştır. Kablo bağlantıları da gerçekleştirilerek montaj tamamlanmıştır.



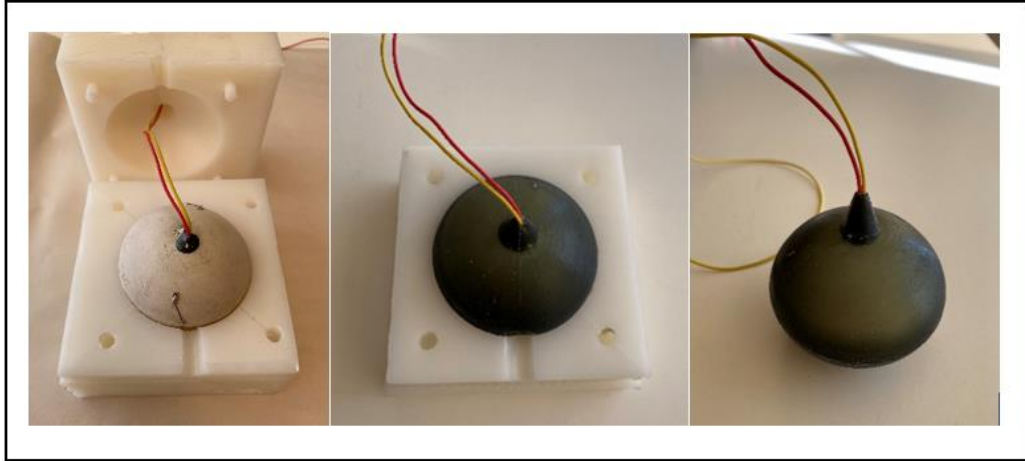
şekil 3.8: Montaj işleminin aşamaları.

3.1.7. Elektriksel Karakterizasyon

Kutuplama sonrasında 24 saat bekletilen numunelerin frekansa bağılı admitans ölçümleri alınmıştır. Ölçümler, HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.8. Poliüretan Kaplama

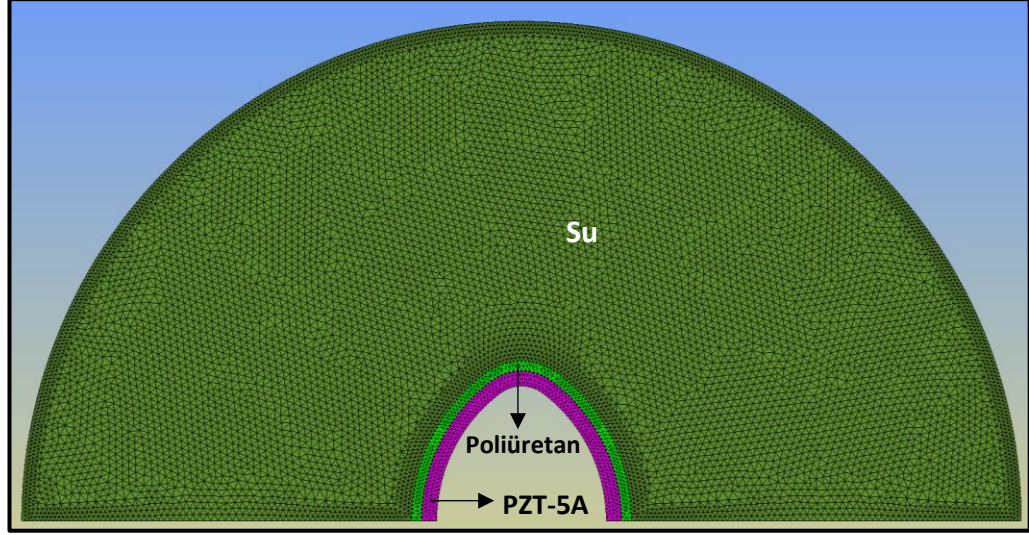
Su altı uygulamalarında, dönüştürücülerin basınca ve darbeye karşı dayanımının artırılması amacıyla poliüretan kaplama gerçekleştirilmektedir. Farklı kalınlık ve farklı sertlikte poliüretan kaplamalar yapılarak, ilgili koşulların prototiplerin TVR değerlerine olan etkileri araştırılmıştır. Poliüretanın A komponentinin sert ve yumuşak olanı kullanılarak; ayrıca sert komponentte farklı oranda sıkamol (Biresin, Almanya) ilave edilerek değişen sertliklerde poliüretan kaplamalar elde edilmiştir. Bu doğrultuda, hazırlanan prototiplere poliüretan kaplama yapmak için CNC ile ayrı kalıplar hazırlanmış ve kalıp dışarıdan sürekli olarak beslenerek, prototiplerin kaplaması tamamlanmıştır. Kaplaması gerçekleştirilen prototiplerin performanslarını ortaya koymak üzere havada ve suda ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.9'da poliüretan kaplama aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Poliüretan kaplama aşamaları.

3.1.9. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme

Çalışma kapsamında ATILA Sonlu Elemanlar Analiz Programı ile poliüretan kaplanmış seramik parçanın su altındaki davranışı modellenmiştir. Şekil 3.10'da seramik parçaya ait modelleme verilmiştir.



Şekil 3.10: Seramik parçanın poliüretan kaplanmış halinin su altı modellemesi.

3.1.10. Su Altı Akustik Ölçümleri

Farklı kalınlık ve sertlikte poliüretan kaplanmış prototipler $1 \times 1 \times 0.5$ m boyutlarındaki su tankı içerisine daldırılmış ve su altı akustik ölçümleri alınmıştır.

Su altı ölçümünde elde edilen admitans-frekans verileri ile birlikte aşağıdaki bağıntılardan faydalanılarak İletim Voltaj Tepkisi (TVR) ve Serbest Alan Voltaj Hassasiyeti (FFVS) hesaplanmıştır [8].

$$TVR = 170.8 + 10 \log(re\{Y\}) DI + \eta \quad (3.1)$$

Bağıntı 3.1'de; $re\{Y\}$ ölçülen admitans değerinin gerçekte kısmını, DI yönlülük indeksini, η ise verimlilik sabitini ifade etmektedir. Verimlilik sabiti, akustik gücün elektrik gücüne oranıdır ve 0 olarak kabul edilmiştir [8].

$$FFVS = TVR - 20 \log(|Y|) - 20 \log(f/1000) - 354 \quad (3.2)$$

Bağıntı 3.2'de $|Y|$ ölçülen admitans şiddetini, f ise frekansı ifade etmektedir [8].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

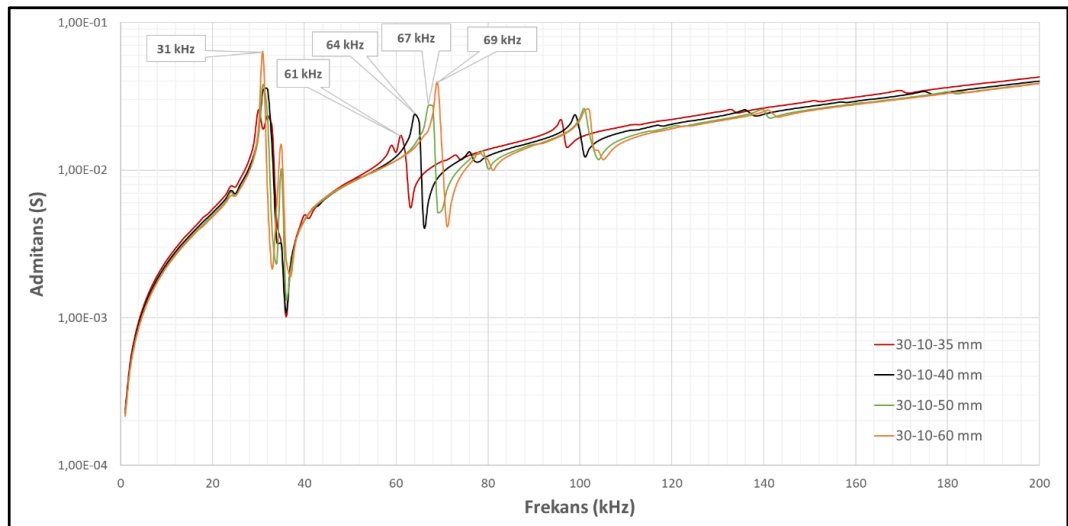
Farklı eğrilik yarıçapındaki basık sfereoid geometrilerin modelleme sonuçlarını incelemek üzere ön kesit ve en uçta kalan eğrilik yarıçapları sabit tutulmuş, tepe noktaları arasındaki eğrilik yarıçapı değiştirilerek modelleme yapılmıştır. Farklı geometriye sahip tasarımların eğrilik yarıçapları aşağıda verilmiştir;

MM1: 30-10-35 mm

MM2: 30-10-40 mm

MM3: 30-10-50 mm

MM4: 30-10-60 mm



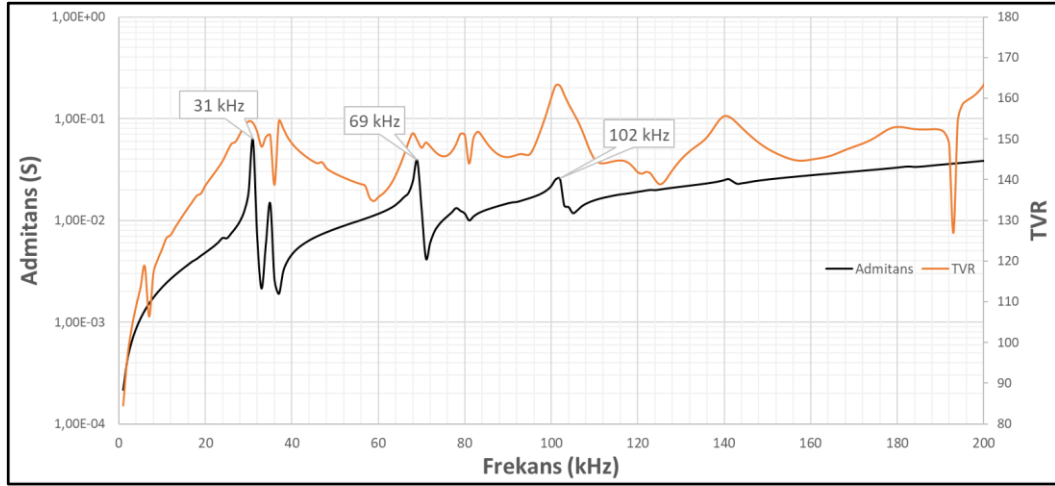
Şekil 4.1: Farklı eğrilik yarıçapında basık sfereoid geometriye sahip tasarımların modelleme sonuçlarının kıyaslaması.

Şekil 4.1'de de görüldüğü üzere modelleme sonuçlarına bakıldığında MM1, MM2, MM3 ve MM4 tasarımlarının birinci rezonansı birbirine oldukça yakın, 31 kHz seviyelerinde çıkmıştır. Bu durum ön kesit çapının tüm tasarımlar için 30 mm olarak belirlenmesinden kaynaklanmaktadır.

MM1 tasarımında birinci ve ikinci rezonans arasındaki fark, diğer tasarımlara göre daha düşük olup MM4 tasarımında birinci ve ikinci rezonans arasındaki fark

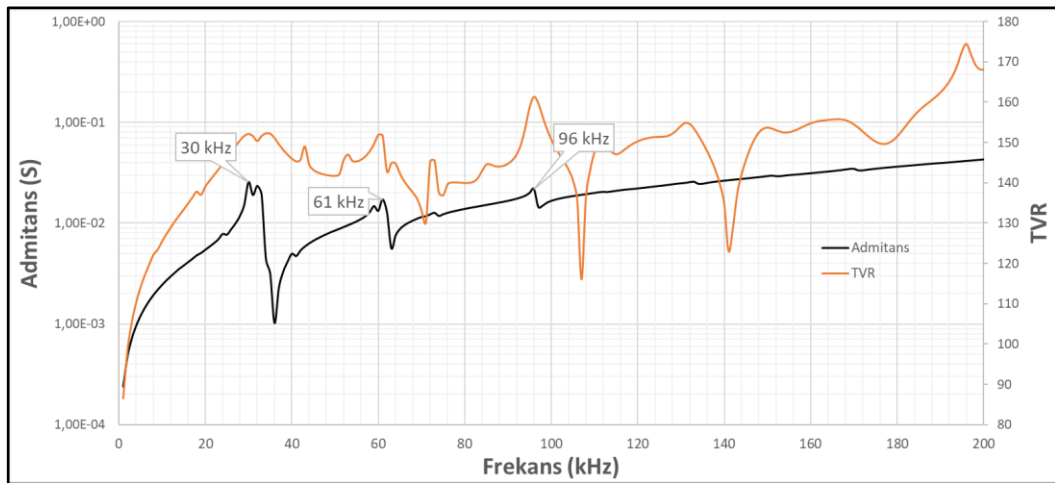
artmıştır. Aynı şekilde MM1 tasarımında TVR'daki düşüşün diğer tasarımlara kıyasla daha az olduğu gözlenmiştir.

30-10-60 mm boyutuna sahip MM4 tasarımının modelleme sonucu Şekil 4.2'de verilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere birinci rezonans (31 kHz) ve ikinci rezonans (69 kHz) arasında TVR'da ciddi bir düşüş gerçekleşmiştir.

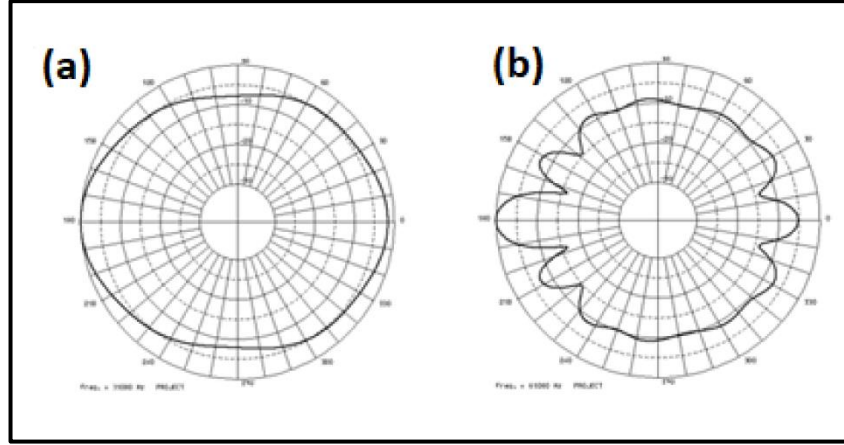


Şekil 4.2: MM4 tasarımının modelleme sonuçları.

30-10-35 mm boyutuna sahip MM1 tasarımının modelleme sonucu Şekil 4.3'te verilmiştir. Birinci rezonans (30 kHz) ve ikinci rezonans (61 kHz) arasında TVR'da bir düşüş olduğu ancak düşüşün MM4 tasarımına kıyasla daha az olduğu gözlenmiştir. MM1 tasarımının modelleme sonuçları doğrultusunda birinci ve ikinci rezonanslarındaki yönlülük deseni ise Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3: MM1 tasarımının modelleme sonuçları.

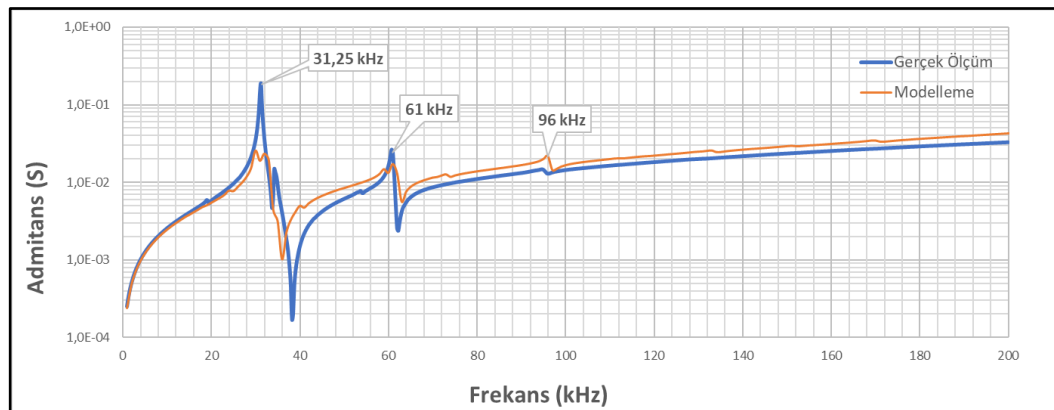


Şekil 4.4: MM1 tasarımının modellemesinde (a) 30 kHz ve (b) 61 kHz’de maksimum TVR değerlerindeki yönelim endeksleri.

Deneyisel çalışma kapsamında üretilecek numune boyutları için birinci ve ikinci rezonans arasında daha az fark olması ve TVR’da daha az düşüş görülmesi dolayısıyla MM1 tasarımı tercih edilmiştir. Böylelikle üretilecek aygıtın her iki rezonans arasında da çalışabilir durumda olacağı tespit edilmiştir.

4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları

MM1 tasarımının hava ortamında elektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilerek sonuçlar ortaya konmuş ve rezonans değerleri ölçülmüştür. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneyel ölçüm sonuçları Şekil 4.5’te ve Tablo 4.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.5: MM1 tasarımının deneyel hava ölçümleri ile modelleme sonuçlarının kıyaslaması.

Tablo 10.1: MM1 tasarımının modelleme ve deneysel ölçüm sonuçları.

	Modelleme Sonuçları (kHz)	Deneysel Ölçüm Sonuçları (kHz)
1. Rezonans	30	31,25
2. Rezonans	61	61
3. Rezonans	96	96

Sonlu elemanlar analiz yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçümle birlikte elde edilen sonuçlar arasında ufak sapmalar olması beklenen bir durumdur. Sonlu elemanlar analiz yöntemine ait malzeme özellikleri, veritabanı kuru preslenmiş numuneler üzerinden oluşturulmuştur ancak bu çalışma kapsamında numuneler, asıltı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Asıltı döküm yöntemiyle üretilen numunelerin yapılarında bir miktar gözenek olması, kuru preslenmiş numunelere kıyasla daha az yoğun olmalarına sebep olmaktadır. Bu da modelleme ile gerçek ölçüm arasında farklılık olmasına sebep olmaktadır.

Sonuçlarda gözlemlenen bir miktar sapmanın; sonlu elemanlar analiz kapsamında değerlendirilen numune boyutlarına, asıltı döküm yöntemiyle tam olarak ulaşılamamış olmasından da kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.3. Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçları

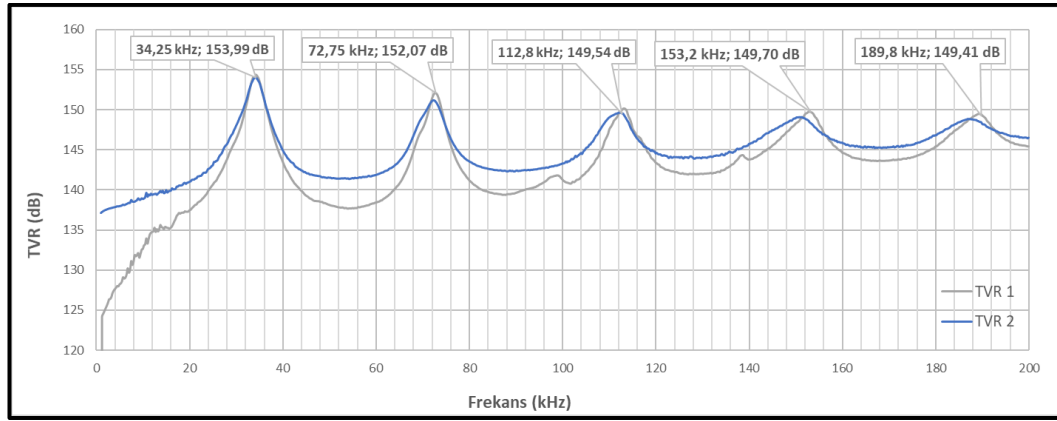
Tablo 10: Prototiplerin poliüretan kaplama parametreleri.

Prototip Kodu	Sıkamol/A Komponenti	A Komponent Türü	Kalınlık (mm)
P1	40/60	Sert	3
P2	0/100	Yumuşak	3
P3	20/80	Sert	6
P4	40/60	Sert	6

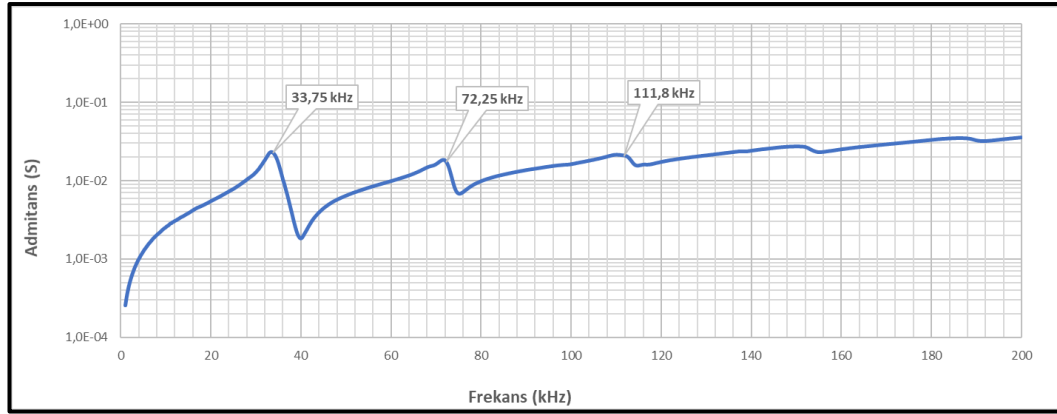
Su altı ölçümleri yapılmadan önce numunelerin poliüretan kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Poliüretan kaplamada kullanılan farklı bileşen ve kaplama kalınlığı parametreleri prototip koduna bağlı olarak Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu doğrultuda P1, P2, P3 ve P4 olarak kodlanan prototiplerin su altında ölçümleri alınmış

ve frekansa bağı TVR ve frekansa bağı admitans ölçüm sonuçları ortaya konmuştur. Her bir prototip için frekansa bağı TVR değerleri, yaklaşık 5 ay sonra tekrar ölçülmüş ve sonuçlar ortaya konmuştur. Prototiplerin frekansa bağı TVR sonuçlarında TVR 1 ilk ölçümü, TVR 2 ise 5 ay sonra gerçekleştirilen ölçümü ifade etmektedir.

3 mm kalınlığında sert (Sıkamol/A Komponenti 40/60) poliüretanla kaplanan P1 prototipine ait frekansa bağı TVR sonuçları Şekil 4.6'da, frekansa bağı admitans sonuçları ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

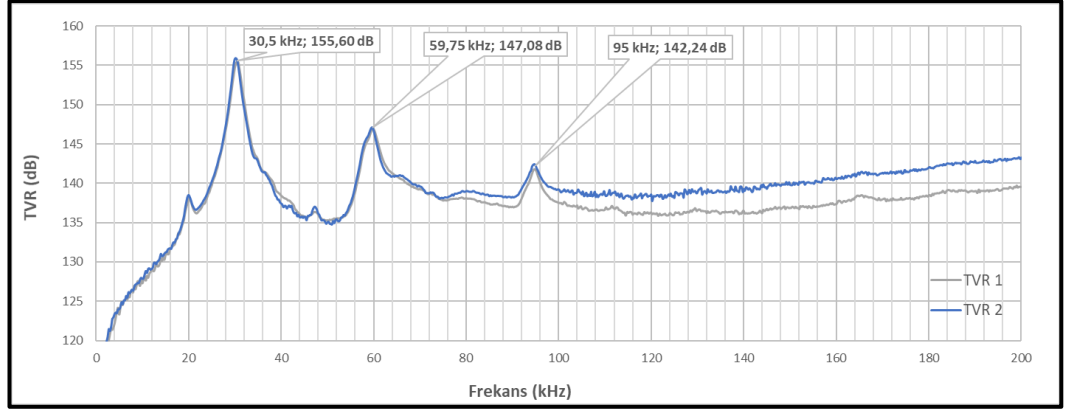


Şekil 4.6: P1 prototipinin su altında frekansa bağı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.

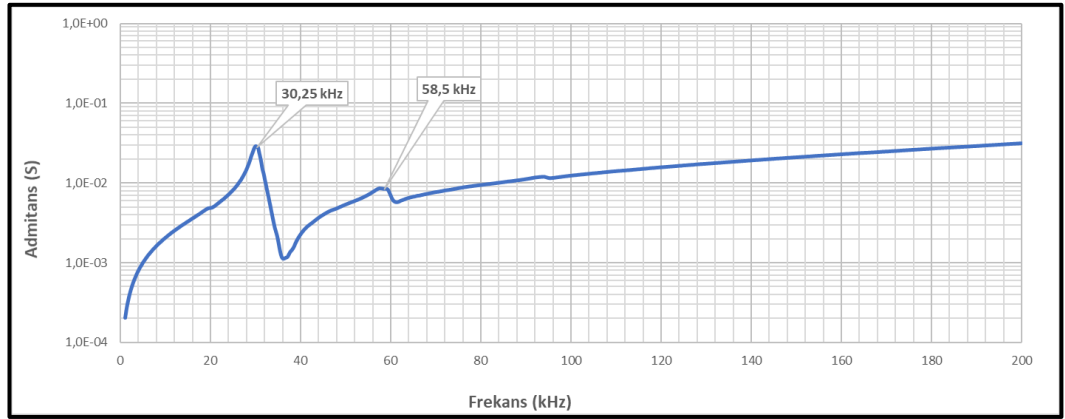


Şekil 4.7: P1 prototipinin su altında frekansa bağı Admitans (S) sonuçları.

3 mm kalınlığında yumuşak (Sıkamol/A Komponenti 0/100) poliüretanla kaplanan P2 prototipine ait frekansa bağı TVR sonuçları Şekil 4.8'de, frekansa bağı admitans sonuçları ise Şekil 4.9'da verilmiştir.

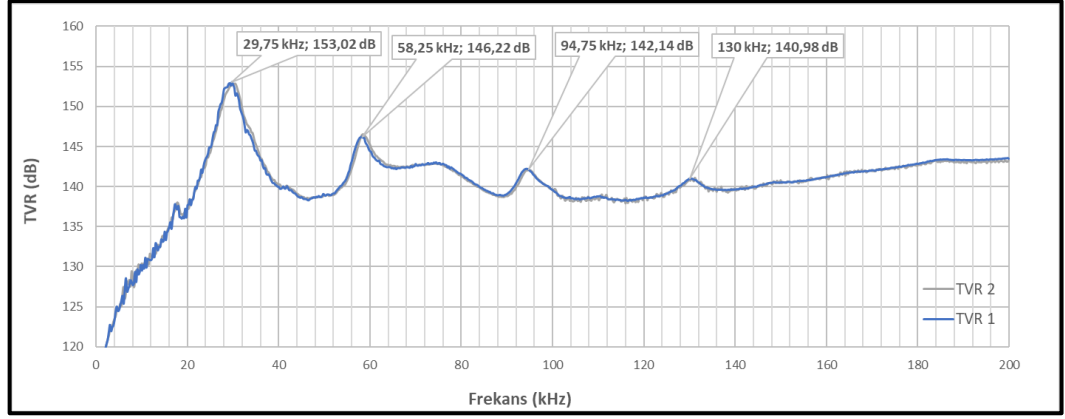


Şekil 4.8: P2 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.

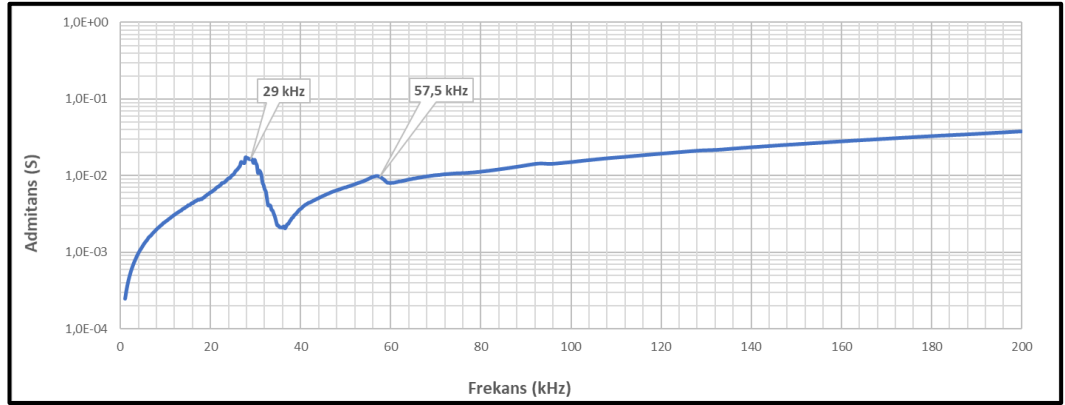


Şekil 4.9: P2 prototipinin su altında frekansa bağlı Admittans (S) sonuçları.

6 mm kalınlığında sert (Sıkamol/A Komponenti 20/80) poliüretanla kaplanan P3 prototipine ait frekansa bağlı TVR sonuçları Şekil 4.10’da, frekansa bağlı admittans sonuçları ise Şekil 4.11’de verilmiştir.

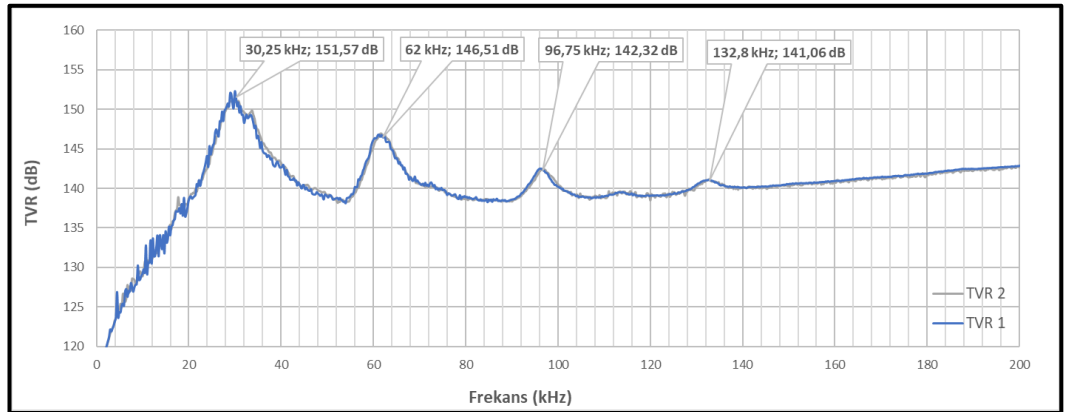


Şekil 4.10: P3 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.

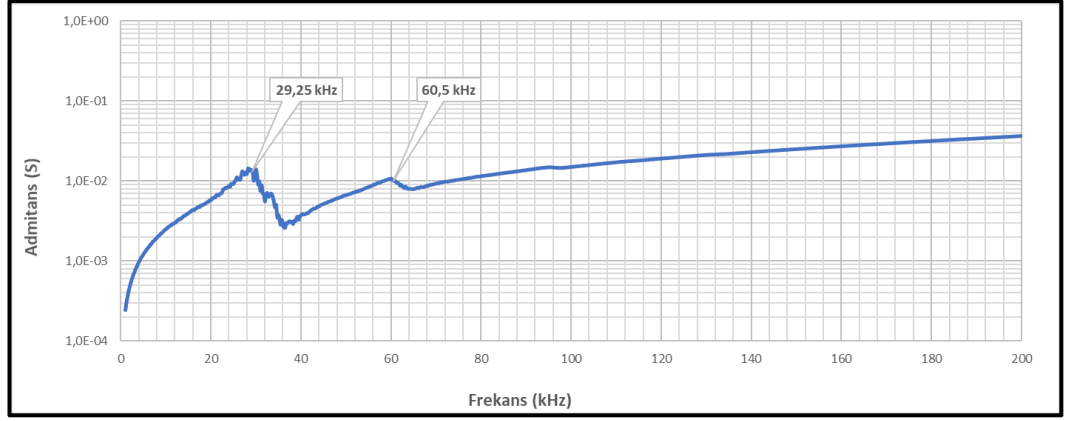


Şekil 4.11: P3 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.

6 mm kalınlığında sert (Sıkamol/A Komponenti 40/60) poliüretanla kaplanan P4 prototipine ait frekansa bağlı TVR sonuçları Şekil 4.12’de, frekansa bağlı admitans sonuçları ise Şekil 4.13’te verilmiştir.

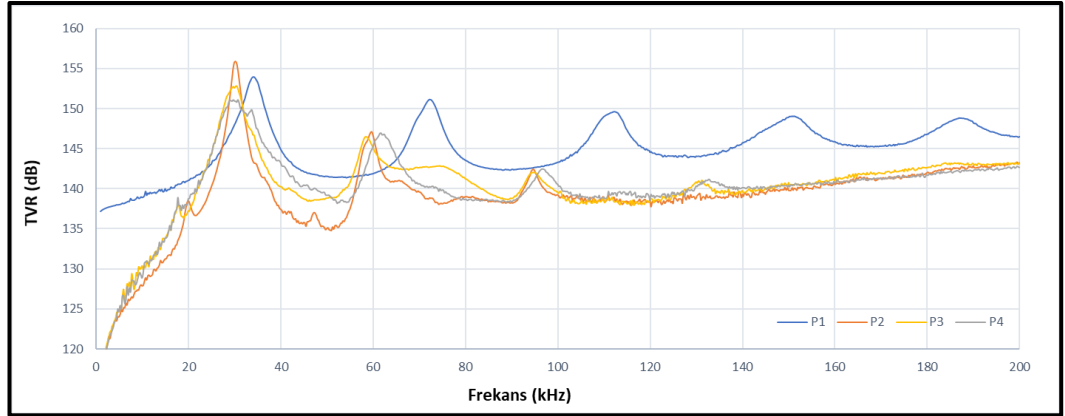


Şekil 4.12: P4 prototipinin su altında frekansa bağlı Transmitting Voltage Response (TVR) sonuçları.



Şekil 4.13: P4 prototipinin su altında frekansa bağlı Admitans (S) sonuçları.

P1, P2, P3 ve P4 prototiplerinin frekansa bağlı TVR sonuçlarının kıyaslaması ise Şekil 4.14’te verilmiştir. TVR sonuçları yaklaşık 5 ay sonra alınan ölçümleri (TVR2) ifade etmektedir.



Şekil 4.14: P1, P2, P3 ve P4 prototiplerinin frekansa bağlı TVR sonuçlarının kıyaslaması.

4.4. Genel Değerlendirme

Çalışma kapsamında kurşun zirkonat titanat esaslı basık sfereoid geometrisine sahip dönüştürücüler üretilmiştir. Basık sfereoid geometrisinin, dönüştürücünün çalıştığı frekans aralığı ve TVR (Transmitting Voltage Response) değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Sonlu elemanlar analiz yöntemiyle ortaya konan tasarımlardan diğer tasarımlara kıyasla birinci ve ikinci rezonans frekansları arasındaki farkın düşüklüğü de göz önünde bulundurularak; 30 kHz ve 61 kHz’de rezonans frekansı elde edilen ve su altı

modellemesinde de TVR’da ciddi bir düşüş gözlenmeyen 30-10-35 mm boyutundaki MM1 tasarımı seçilmiş ve üretim öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Numunelerin üretimi asıltı döküm yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve numuneler 1260 °C’de 4 saat süre ile sinterlenmiştir. Ardından zımparalanan ve elektrot kaplaması gerçekleştirilen numuneler, 120 °C’deki silikon yağ banyosu içerisinde 2 kV/mm elektrik alan uygulanarak 10 dakika süreyle kutuplama işlemine tabi tutulmuştur. Tüm bu işlemlerin ardından numunelerin montajı gerçekleştirilerek prototipler hazırlanmıştır. Hava ölçümleri tamamlanan prototiplerin frekansa bağlı admitans ölçümleri alınmış ve rezonans frekanslarının 31,25 kHz, 61 kHz ve 96 kHz olduğu gözlenmiştir.

Prototiplerin farklı kalınlık ve bileşen oranlarıyla poliüretan kaplamaları yapılmış ve ardından su altı ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur. Üretilen aygıtın kullanılacağı alan göz önünde bulundurulduğunda; P1, P2, P3 ve P4 prototiplerine ait frekansa bağlı TVR sonuçlarında TVR’ın birden fazla noktada pik yapması ve tüm spektrumun 140 dB’in üzerinde olması pozitif değerlendirilmiştir. Aynı zamanda hazırlanan tüm prototipler incelendiğinde; P1 prototipinin poliüretan kaplama koşullarının istenilen sonuca en yakın çözümü sağladığı ortaya konmuştur. P1 prototipinin su altı ölçümleri yapıldığında ise rezonans frekanslarının 33,75 kHz, 72,25 kHz ve 111,8 kHz olduğu gözlenmiştir.

Poliüretan kaplı prototiplerin hava ve su altı ölçümleri yaklaşık 5 ay sonra tekrarlandığında poliüretan türüne bağlı olarak P1 kodlu prototipin TVR grafiğinde değişim olduğu gözlenirken; P2, P3 ve P4 kodlu prototiplerde anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir. Bu durumun, poliüretan kaplamanın yaşlanması sonucu poliüretanın özelliklerindeki değişim ve bunun dönüştürücünün TVR performansı üzerindeki etkisi sonucu ortaya çıktığı değerlendirilmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında elde edilen bulgulara bakıldığında; geometri üzerinde yapılan modifikasyonların dönüştürücünün çalışabileceği bant aralığını ve rezonans frekansını doğrudan etkilediği ortaya konmuştur.

Su altı dönüştürücülerinin basınca ve darbeye karşı dayanımını geliştirmek üzere dönüştürücü üzerine yapılan poliüretan kaplamanın cinsi ve kaplamanın kalınlığı, farklı rezonans grafikleri elde edilmesini sağlamıştır. Kaplama kalınlığının artırılmasının, nispeten daha stabil bir sinyal şiddeti yakalanmasına olanak tanıdığı ortaya konmuştur.

Üretimi gerçekleştirilen dönüştürücülerin, çoklu mod dönüştürücü kullanımı gereken uygulamalarda, belirli bir frekans aralığında kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Dönüştürücülerin, birbirine daha yakın rezonanslar elde edilecek şekilde farklı bir modifikasyonunun geliştirilmesi halinde daha geniş bant aralıklarına erişilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Haertling G.H., (1999), “Ferroelectric Ceramics: History and Technology”, Journal of the American Ceramic Society, 82(4), 797-818.
- [2] Alkoy S., Menşur-Alkoy E., Uchiyama K., Shiosaki T., (2006), “Fatigue Behaviour of Pb (Zr,Ti)O₃/PbZrO₃ Multilayer Ferroelectric Thin Films”, Japanese Journal of Applied Physics, 45(9 B):7275-7278.
- [3] Sharapov V., (2011), “Piezoceramic Sensors”, 978-3-642-15310-5, Springer Science & Business Media.
- [4] Boz M., (2021), “Silindirik Kabuk Formunda Piezoelektrik Dönüştürücülerin Asıltı Dökümle Üretimi, Karakterizasyonu ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi“, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [5] Korkmaz Z., (2015), “MEMS Teknikleri Kullanarak Esnek Piezoelektrik Dokunsal Algılayıcı Dizini Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- [6] Jones D.J., Prasad S.E., Wallace J.B., (1996), “Piezoelectric Materials and Their Applications”, Key Engineering Materials (Volumes 122-124), 71-144.
- [7] Kao K.C., (2004), “Dielectric Phonema in Solids”, Academic Press, 1st Edition.
- [8] Kaya M.Y., Menşur-Alkoy E., Gürbüz A., Öner M., Alkoy S., (2018), “Influence of Compositional Variation on the Electrical Properties of [Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃]-[Pb(Zr,Ti)O₃] Ceramics and Their Transducer Application”, USA: IEEE, 65(7), 1268-1277.
- [9] Matsunaga T., Hosokawa T., Umetani Y., Takayama R., Kanno I., (2002), “Structural Investigation of Pb_y(Zr_{0.57}Ti_{0.43})_{2-y}O₃ Films Deposited on Pt (001)/MgO (001) Substrates by Rf Sputtering”, The American Physical Society, 064102-(1-8).
- [10] Tressler J. F., Alkoy S., Newnham R. E., (1998), “Piezoelectric Sensors and Sensor Materials”, Journal of Electroceramics, 2(4), 257-272.
- [11] Bjørnø L., (2017), “Applied Underwater Acoustics”, Elsevier, 587-742.
- [12] Butler S.C., (2018), “Properties of Transducers: Underwater Sound Sources and Receivers”, Naval Undersea Warfare Center Division Newport, Rhode Island, TD 12,289.
- [13] Kang K., Roh Y., (2008), “Optimal Structural Design of a Flextensional Transducer Considering the Working Environment”, Journal of The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Volume 21, 1063-1070.

- [14] Abdullah Z., Naz S., Raja M.A.Z., Zameer A., (2021), “Design of Wideband Tonpilz Transducers for Underwater SONAR Applications with Finite Element Model”, Applied Acoustics, Volume 183, 108293, Elsevier.
- [15] Rao S., (2017), “The Finite Element Method in Engineering”, 978-0-12-811768-2, Butterworth-heinemann.
- [16] Wang F. F., (1976), “Treatise on Materials Science and Technology. vol, 9, Ceramic Fabrication Processes”, 0-12-341809-7, Academic Press.

ÖZGEÇMİŞ

Aylin ÖTÜN, İstanbul Anadolu Lisesi'nde öğrenimini tamamladıktan sonra Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde üniversite hayatına başlamıştır. Üniversite süresi boyunca Sağlam Metal ve Diler Holding'de kısa dönem staj yapmıştır. Üniversite mezuniyeti sonrası GOSB Teknopark'ta profesyonel kariyerine başlamıştır. GOSB Teknopark'ta çalıştığı dört buçuk yıl içerisinde TÜBİTAK 1601 – TTO Kapasite Artırma Programı, Ticaret Bakanlığı Endüstri 4.0 Kümelenme Programı ve TÜBİTAK 1512 – BİGG Girişimcilik Destek Programı'nda aktif olarak görev almıştır. Sözleşmeler Hukuku, Fikri Sınai Mülkiyet Hakları, Müzakere Teknikleri gibi birçok konuda eğitime katılım sağlamıştır. 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başlamıştır. Bir buçuk yıldır kariyerine İTÜ ARI Teknokent'te devam eden Aylin ÖTÜN, İTÜ Çekirdek Girişimcilik Programları kapsamında görev almaktadır.