

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

0.70PMN-0.30PT ESASLI PİEZOELEKTRİK SERAMİKLERİN
YAPISAL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE TONPİLZ TİPİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ
UYGULAMALARI

AYKUT AYKAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

0.70PMN-0.30PT ESASLI PİEZOELEKTRİK
SERAMİKLERİN YAPISAL VE
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE TONPİTZ TİPİ
DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMALARI

AYKUT AYKAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. SEDAT ALKOY

GEBZE
2023

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

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL
AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
0.70PMN-0.30PT BASED PIEZOELECTRIC
CERAMICS AND APPLICATIONS OF
TONPILZ TYPE TRANSDUCER**

AYKUT AYKAÇ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCES AND
ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. SEDAT ALKOY

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/07/2023 tarih ve 2023/39 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/07/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Aykut AYKAÇ'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Sedat ALKOY

ÜYE

: Prof. Dr. Koray ÖZTÜRK

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Berksoy YAVUZ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, saf ve nadir toprak elementleri ile katkılanmış tozlar katı hal kalsinasyon ve Columbite yöntemiyle üretilmiştir. Columbite yönteminin amacı piroklor fazı oluşumunu en aza indirmektir. Bu tozlardan hazırlanan numuneler yoğun seramik bir bünye elde etmek amacıyla sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin faz bileşimi X-ışınları kırınım yöntemiyle, mikroyapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ile ortaya konmuştur. Elektriksel karakteristiklerin incelenmesinde ise dielektrik, piezoelektrik ve ferroelektrik ölçümleri kullanılmıştır. Elektriksel özelliklerin belirlenmesinden sonra aynı tozlardan halka formunda seramiklerin üretimi yapılmıştır. Son olarak, sonlu elemanlar analiz yöntemiyle tasarlanmış Tonpilz tipi dönüştürücüler, bu halkalar kullanılarak üretilmiş ve montaj sonrası havada ve suda alınacak admitans-frekans ölçümleri ile dönüştürücü karakteristikleri belirlenmiştir. Üretilen 11 adet halkanın final boyutları iç çap 8 mm, dış çap 20 mm ve kalınlık 5 mm olurken, ortalama piezoelektrik katsayısı 258 pC/N bulunmuştur. Halkaların dielektrik katsayısı ölçüldüğünde ise değerler 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz ve 1000 kHz frekanslarda sırasıyla 17080, 12353, 8886 ve 7992 çıkmıştır. Montajların admitans ölçümlerinde birinci montajın rezonans ve antirezonans frekansı sırasıyla 26.2 kHz ve 27.4 kHz bulunurken ikinci montajın 26 kHz ve 27.1 kHz bulunmuştur. Aynı ölçümler poliüretan kaplama sonrasında yapılmış, rezonans ve antirezonans frekansları sırasıyla birinci montajın 27.3 kHz, 29.4 kHz ve ikinci montajın 27.1 kHz ve 29.1 kHz bulunmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda Kurşun Magnezyum Niyobat – Kurşun Titanat montajların 26.6 kHz frekansında 137.92 dB’lik bir TVR değerine ulaşırken, Kurşun Zirkonat Titanat (PZT4) montajlarının 27.1 kHz değerinde 141 dB’lik TVR değerine ulaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik, Kurşun magnezyum niobat-kurşun titanat (PMN-PT), Kurşun zirkonyum titanat (PZT), Transdüser, Akustik

SUMMARY

In this study, pure and rare earth doped powders were produced by solid state calcination and Columbite method. The aim of the Columbite method is to minimize the formation of the pyrochlore phase. Samples prepared from these powders were sintered to obtain a dense ceramic body. The phase composition of the sintered samples was determined by X-ray diffraction method, and their microstructural properties were revealed by scanning electron microscopy studies. Dielectric, piezoelectric and ferroelectric measurements were used to analyze the electrical characteristics. After the electrical properties were determined, ring-shaped ceramics were produced from the same powders. Finally, Tonpilz type transducers designed with the finite element analysis method were produced using these rings, and the transducer characteristics were determined by admittance-frequency measurements to be taken in air and water after assembly. The final dimensions of the 11 rings produced were 8 mm in inner diameter, 20 mm in outer diameter and 5 mm in thickness, while the average piezoelectric coefficient was 258 pC/N. When the dielectric coefficient of the rings was measured, the values were 17080, 12353, 8886 and 7992 at frequencies of 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz and 1000 kHz, respectively. In the admittance measurements of the montages, the resonance and antiresonance frequencies of the first montage were found to be 26.2 kHz and 27.4 kHz, respectively, while the second montage's resonance and antiresonance frequencies were found to be 26 kHz and 27.1 kHz. The same measurements were made after the polyurethane coating, and the resonance and antiresonance frequencies of the first assembly were found to be 27.3 kHz, 29.4 kHz, and the second assembly 27.1 kHz and 29.1 kHz, respectively. It was observed that it reached a TVR value of 141 dB at 27.1 kHz.

Key Words: Piezoelectric, lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-PT) ,
Lead zirconate titanate (PZT), Transducer, Acoustic

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans hayatım boyunca bana en büyük desteği veren danışman hocam Prof. Dr. Sedat Alkoy'a tüm desteklerinden ve katkılarından dolayı teşekkür ederim. Her zaman desteğini ve katkısını hissettiğim Prof. Dr. Ebru Menşur Alkoy'a teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvarda çalışmalarımda destek olan tüm Piezo Research grubu arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Son olarak beni büyüten ve bugünlere gelmeme destek olan anneme ve babama da teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR	2
2.1. Piezoelektrik Özellik	2
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	4
2.3. Piezoelektrik Dönüştürücüler	7
2.3.1. Tonpilz Tipi Dönüştürücüler	10
2.4. Relaksör Ferroelektrikler	11
2.4.1. PMN-PT Sistemi	13
2.4.2. PMN-PT Üretiminde Columbite Yöntemi	15
2.5. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi	15
3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
3.1. Malzeme ve Yöntem	17
3.1.1. PMN-PT Tozlarının Hazırlanması	17
3.1.2. Kuru Pres Yöntemiyle Seramiklerin ve Halkaların Hazırlanması	18
3.1.3. Seramiklerin Sinterlenmesi	19
3.1.4. Seramiklerin ve Halkaların Elektrot Kaplanması ve Kutuplanması	19
3.1.5. Seramiklerin ve Halkaların Elektriksel ve Yapısal Karakterizasyonu	21

3.1.6. Dönüştürücülerin Montajı	23
3.1.7. Poliüretan Kaplama	26
3.1.8. SEA ile Modelleme	27
3.1.9. Dönüştürücülerin Havada ve Su Altında Elektriksel ve Akustik Ölçümleri	28
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	30
4.1. Yapısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi	30
4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi	32
4.3. Dönüştürücülerin Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi	36
4.4. SEA ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	40
5. Genel Sonuçlar	44
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>: Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
F_a	: Anti-rezonans Frekansı
T_c	: Curie Sıcaklığı
dB	: Desibel
ϵ_p	: Dielektrik Sabiti
P_r	: Kalıcı Polarizasyon
x_{max}	: Maksimum Gerinim
P_{max}	: Maksimum Polarizasyon
P_c	: Paraelektrik Kübik Faz
d_{33}	: Piezoelektrik yük katsayısı
pC	: pikoCoulomb
F_r	: Rezonans Frekansı
$F_{R(HT)}$	: Rombohedral Ferroelektrik
$^{\circ}C$	: Santigrat
cm	: Santimetre
F_T	: Tetragonal Ferroelektrik
E_c	: Zorlayıcı Alan
AC	: Alternatif Akım
Hz	: Hertz
kHz	: Kilohertz
kV	: Kilovolt
PMN	: Kurşun Magnezyum Niyobat
PMN-PT	: Kurşun Magnezyum Niyobat – Kurşun Titanat
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
MPa	: Megapaskal
mm	: Milimetre
MPB	: Morfotropik Faz Sınırı
N	: Newton
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi

SONAR	: Sound Navigation and Ranging
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TVR	: Transmitting Voltage Response
XRD	: X Işınları Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması.	2
2.2: Düz piezoelektrik etki.	3
2.3: Ters piezoelektrik etki.	3
2.4: PZT kristal yapısı.	5
2.5: PZT faz diyagramı.	6
2.6: Langevin'in icat ettiği kuvars dönüştürücü. Çelik (g) – kuvars (a) – çelik (g') dönüştürücü.	9
2.7: Silindirik dizin şeklinde yerleştirilmiş Tonpilz tipi dönüştürücüler.	9
2.8: Denizaltıya yerleştirilecek bir küresel dizin.	10
2.9: Tonpilz tipi bir dönüştürücünün genel yapısı.	11
2.10: PMN malzemesinin dielektrik özelliğinin sıcaklığa bağlı değişimi.	12
2.11: PMN-PT sistemi faz diyagramı.	13
2.12: PMN-PT sisteminin sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçümü.	14
3.1: Kutuplama işleminde elektrik alan uygulayan DC güç kaynağı ve yükselticisi.	20
3.2: Kutuplama işleminin gerçekleştirildiği düzenek ve yağ banyosu.	20
3.3: Sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçüm düzeneği.	21
3.4: Piezoelektrik d_{33} yük katsayısı ölçüm cihazı.	22
3.5: Ferroelektrik Polarizasyon- Elektrik Alan ve Gerinim – Elektrik Alan ölçüm cihazı.	22
3.6: Admitans ölçümünde kullanılan LCR Metre cihazı.	23
3.7: Montajı tamamlanan dönüştürücü.	24
3.8: Montajda kullanılan halkaların boyutları.	24
3.9: Kafa kütesinin teknik resmi.	25
3.10: Kuyruk kütesinin teknik resmi.	26
3.11: PU kaplanmış dönüştürücü.	27
3.12: Dönüştürücünün 2 boyutlu modellemesi.	28
3.13: Dönüştürücünün 3 boyutlu modellemesi.	28
3.14: Su tankı.	29

4.1:	PMN-PT seramiklerin XRD faz analizi.	30
4.2:	Elde edilen tozların parçacık boyutu dağılımı.	31
4.3:	Üretilen halkaların 1000 büyütmede SEM görüntüleri.	31
4.4:	Elde edilen halkaların 2000 büyütmede SEM görüntüleri.	32
4.5:	Polarizasyon – Elektrik Alan Ölçümü.	33
4.6:	Gerinim – Elektrik Alan Ölçümü.	34
4.7:	Sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçüm sonucu.	35
4.8:	Halkaların frekansa bağlı admitans ölçümleri.	36
4.9:	Montajı yapılan dönüştürücülerin havada admitans ölçümü.	37
4.10:	Dönüştürücüleri PU kaplandıktan sonra havada admitans ölçümleri.	38
4.11:	Dönüştürücülerin PU kaplaması sonrasında su altı admitans ölçüm sonuçları.	39
4.12:	PMN-PT ve PZT4 montajlarının TVR değerleri.	40
4.13:	2 boyutlu PU kaplanmamış analiz sonuçları.	41
4.14:	2 boyutlu PU kaplanmış haliyle analiz sonuçları.	42
4.15:	2 boyutlu PU kaplanmış ve su ortamına konulmuş analiz sonuçları.	43

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Bazı PZT kompozisyonlarının özellikleri.	7
2.2: PMN-PT kompozisyonlarının piezoelektrik yük katsayıları	14
3.1: 0.70PMN-0.30PT tozu hazırlanırken kullanılan kaynak tozların formülleri, alınan firmalar ve CAS numaraları.	17
4.1: Ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerin frekansa bağlı değişimi.	33
4.2: Üretilen halkaların piezoelektrik katsayıları.	34
4.3: Frekansa göre maksimum dielektrik sabitleri.	35
4.4: Dönüştürücülerin rezonans ve anti-rezonans frekansları.	37
4.5: PMN-PT ve PZT4 montajlarının karşılaştırılması.	40

1. GİRİŞ

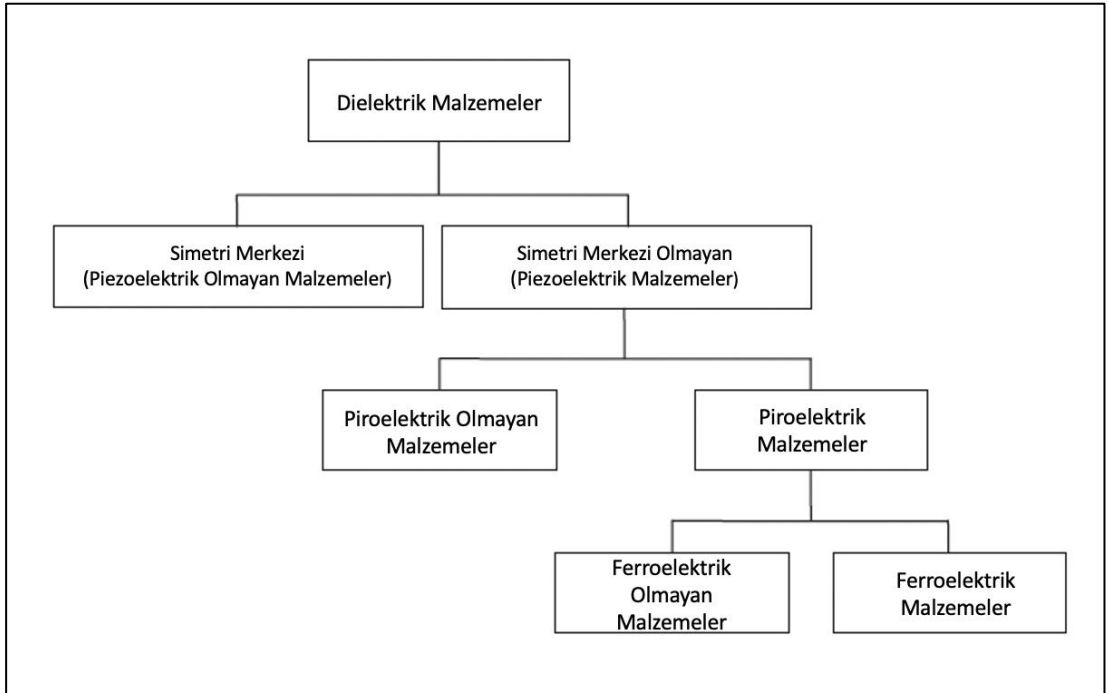
1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, 20-30 kHz frekans aralığında çalışacak ve potansiyel olarak insansız su altı araçlarında navigasyon ve hedef tespiti amaçlı temel akustik başlık olarak kullanılabilecek Tonpilz tipi bir dönüştürücünün 0.70PMN-0.30PT seramik halkalar kullanılarak tasarımı, geliştirilmesi ve üretimi hedeflenmiştir. Çalışmada öncelikle dönüştürücülerin ticari ATILA sonlu elemanlar analiz programı ile tasarımı ve optimizasyonu yapılmış, buradan çıkan sonuçlar temel alınarak dönüştürücünün boyutları, halka boyutları ve malzemesi belirlenmiştir. Dönüştürücüde kullanılacak seramik halkaların üretimi için PMN-PT tozları katı hal kalsinasyon metodu ile sentezlenmiş, sonrasında tek eksenli pres ile halka formunda şekillendirilen tozların sinterleme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Seramiklerin elektriksel ve yapısal karakterizasyonu sonrası dönüştürücülerin montajında kullanılan ön gerilme miktarına göre rezonans frekanslarındaki kayma incelenmiş, hedeflenen rezonans frekansına sahip olan dönüştürücülerin admitans-frekans tepkisinin poliüretan kaplama ve hava veya su ortamına bağlı olarak rezonans davranışındaki değişimin belirlenmesi hedeflenmiştir. Son olarak da cihazların sualtı admitans ölçümleri alınarak elektroakustik performansının ortaya konması amaçlanmıştır.

2.LİTERATÜR

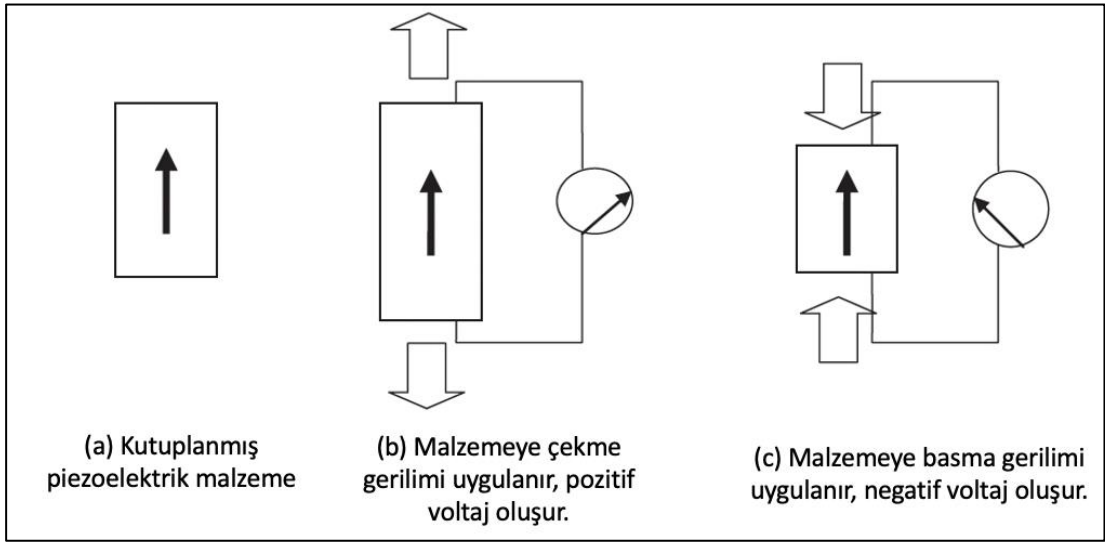
2.1. Piezoelektrik Özellik

Dielektrik malzemeler elektrik alana maruz bırakıldığında boyutsal değişimlere uğrarlar. Bunun nedeni elektrik alan altında pozitif ve negatif yüklerin hareket etmesidir. Elektrik alan uygulandığı zaman katyonlar elektrik alan yönünde hareket ederken, anyonlar elektrik alana zıt yönde hareket eder. Böylece malzemede şekil değişimi meydana gelir. Elektrik alanın karesi ile orantılı olarak gerçekleşen gerinim elektrostriktif etki olarak isimlendirilir ve tüm dielektrik malzemelerde gözlenirken, elektrik alanla doğru orantılı olarak gerçekleşen gerinim piezoelektrik etki olarak adlandırılmakta ve sadece simetri merkezi olmayan nokta gruplarında kristalleşen dielektriklerde gözlenmektedir. Toplam 32 tane kristal sınıfının 11 tanesi simetri merkezine sahip iken, 21 tanesi simetri merkezine sahip değildir ve bunlardan 20 tanesinde piezoelektrik etki gözlenir [1].

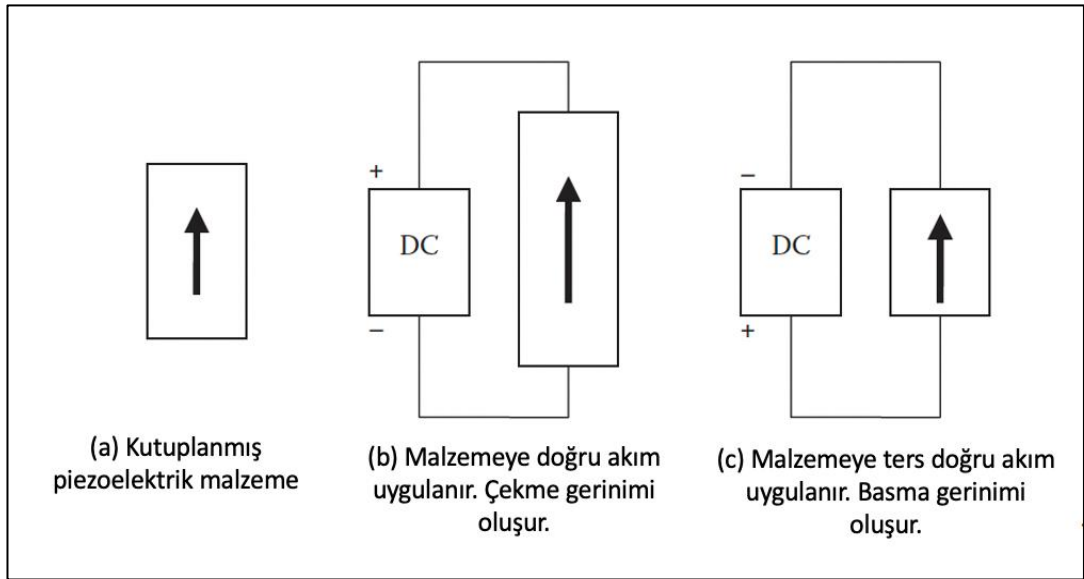


Şekil 2.1: Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması

Jaques ve Pierri Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilen piezoelektrik etki ikiye ayrılmaktadır. Düz piezoelektrik etkide malzemeye uygulanan mekanik gerilme sonucunda elektrik yükü ortaya çıkmaktadır. Keşfinden hemen sonra bu özelliği gösteren malzemelerin aynı zamanda tersi özelliği de gösterdiği keşfedilmiştir. Ters piezoelektrik etki olarak adlandırılan bu olgu da ise uygulanan elektrik alan altında malzemede şekil değişimi gözlenir [2]. Düz ve ters piezoelektrik özellikler Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2: Düz piezoelektrik etki.



Şekil 2.3: Ters piezoelektrik etki.

Piezoelektrik etki mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesini veya tam tersi enerji dönüşümüne neden olduğu için çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulama alanlarından bazıları tahribatsız hasar analizi (NDT), SONAR, ultrasonik kaynak ve enerji hasatıdır [1].

2.2. Piezoelektrik Malzemeler

2.2.1 Tek Kristaller

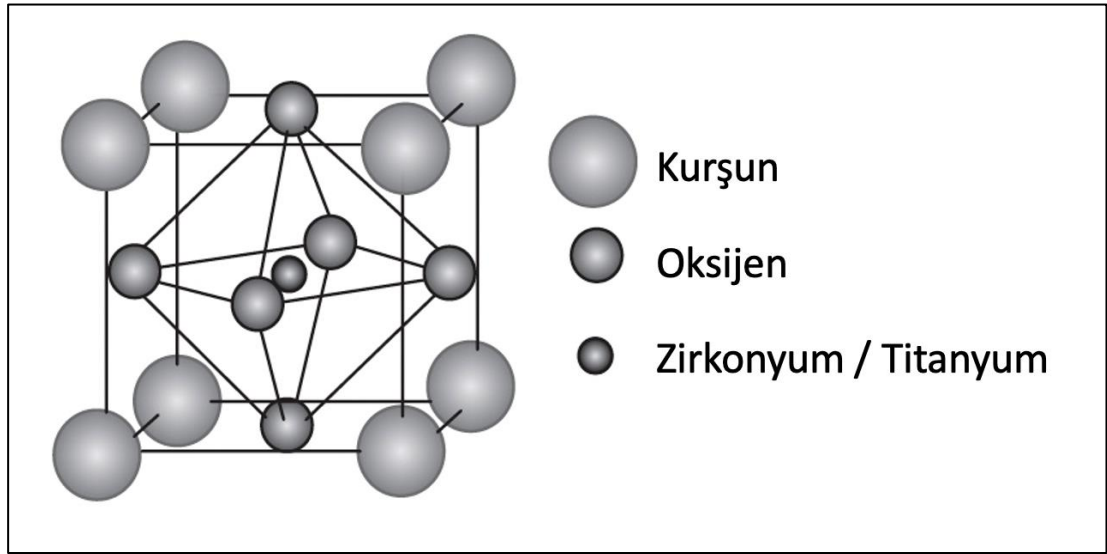
Tek kristal halinde piezoelektrik olarak kullanılan malzemelerden biri Kuvarstır. Kuvars silisyum dioksit (SiO_2) bileşiğinin tek kristal halidir ve doğal bir piezoelektrik malzemedir. Piezoelektrik özelliğinden dolayı kuvars elektrik sinyali ile mekanik olarak uyarılabilir. Kristale alternatif bir akım (AC) uygulanırsa titreşime başlar ve bu sinyalin frekansı kuvarsin doğal frekansı ile eşleşirse en büyük genlikte titreşim yapmaya başlar. Belirli kristalografik doğrultularda kesilen kuvars kristalinin piezoelektrik davranışı sıcaklık ve çevresel etmenlerden etkilenmemektedir. Kuvars kristalleri çok hassas frekans kontrolünün gerektiği yerlerde kullanılırlar. Bu uygulamalardan bazıları, elektronik saatler, bilgisayarlar ve mikroişlemcilerden yapılmış aygıtlar, alıcılar ve vericilerdir [1].

Diğer kristallere örnek olarak ise lityum sülfat ve turmalin kristalleridir. Bunlar günümüzde de ticari hidrofonlarda kullanılmaktadır. Rochelle tuzu çok yaygın olarak kullanılmasa da sonik patlama sensörlerinin bir türünde kullanılmaktadır. Lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3) tek kristalleri ise yüksek sıcaklık akustik sensörleri olarak kullanılmaktadırlar. Özelliklerini yaklaşık 400°C 'ye kadar koruyabilmektedirler [3].

2.2.2 Seramikler

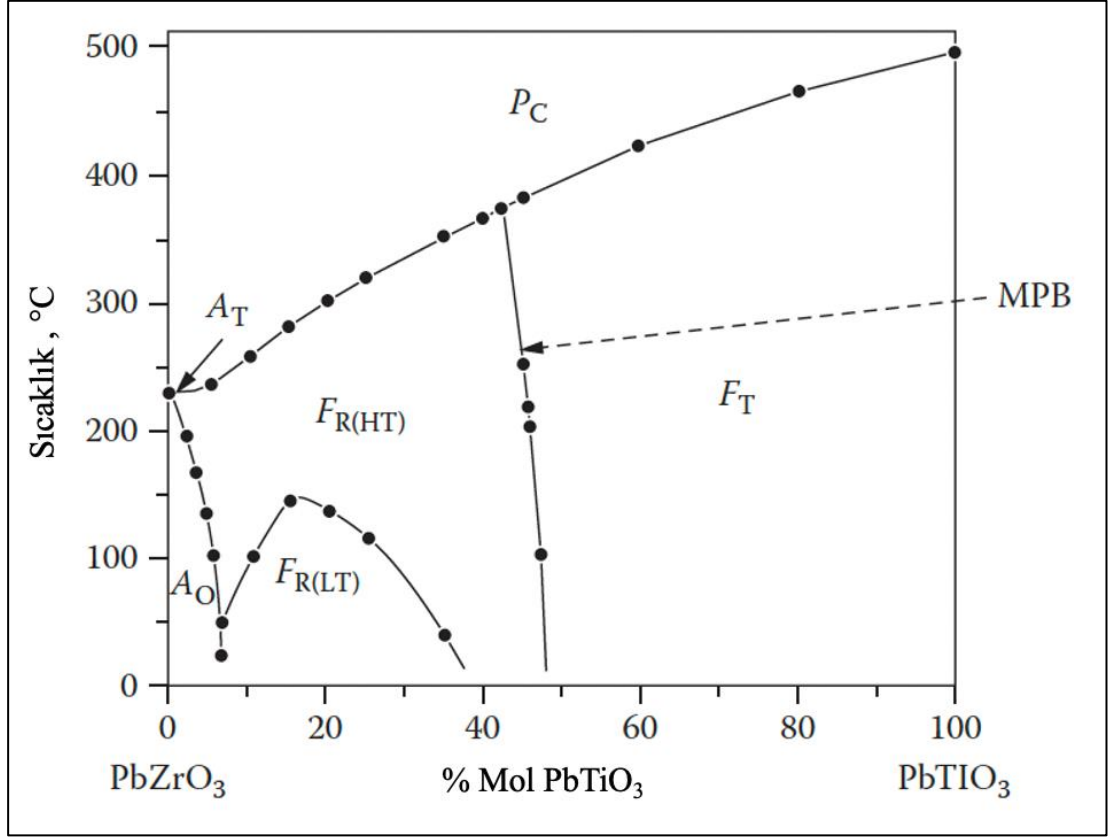
Kullanılan piezoelektrik seramikler arasında en yaygını $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ - PZT (kurşun zirkonat titanat) sistemidir. En çok bilinen piezoelektrik malzemelerden biridir ve mükemmel piezoelektrik ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu malzemenin avantajlarından biri çok kristalli formunun elektriksel kutuplama yoluyla dönüştürücü

uygulamalarında kullanılabiliyor olmasıdır. Ayrıca PZT seramikler tek kristallere kıyasla istenen geometri ve boyutlarda standart seramik üretim süreçleri ile üretilabilmektedir. PZT, molce %52-54 arasında kurşun zirkonat (PbZrO_3) %46-48 arasında ise kurşun titanat (PbTiO_3) içerir. Perovskit kristal yapısında kristalleşir. Kristal yapıda kurşun atomları kafesin köşelerinde bulunurken oksijen atomları ise yüzeyin merkezlerinde bulunur. Zirkonyum ve Titanyum atomları ise merkezdedir [1,4]. PZT kristal yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: PZT kristal yapısı

PZT yüksek sıcaklıklarda kübik yapıda bulunmaktadır ve paraelektrik özellik göstermektedir. Bu yüksek sıcaklık bileşime bağlı olarak değişmekle birlikte morfortropik faz sınırı çivarında 350°C 'nin üstündedir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte yapı ferroelektrik bir karakter kazanmakta ve yine bileşime bağlı olarak tetragonal veya rombohedral yapıya dönüşmektedir ve bu faz geçiş sıcaklığına Curie Sıcaklığı (T_c) denmektedir [1]. PZT'nin faz diyagramı Şekil 2.5'te verilmiştir [1].



Şekil 2.5: PZT faz diyagramı

Curie sıcaklığı üzerinde yapı kübiktir ve malzeme paralelektrik fazındadır (P_C). Faz diyagramından da görülebileceği üzere Curie sıcaklığı kompozisyon ile değişmektedir. Curie sıcaklığı altındaki kristal yapı ise kompozisyona bağlıdır. Titanyumca zengin kompozisyonlarda Curie sıcaklığının altına inildiğinde yapı ferroelektrik faza geçiş yapar ve kristal yapı kübikten tetragonale geçiş yapar. Zirkonyumca zengin kompozisyonlar soğutulduğunda ise malzeme tekrar ferroelektrik faza geçer ancak kristal yapı bu sefer kübikten rombohedral yapıya döner. %5'ten fazla kurşun titanat içeren bütün PZT kompozisyonları Curie sıcaklığının altında ferroelektrik olsa da, %48 PbTiO₃ ve %52 PbZrO₃ içeren küçük bir kompozisyon aralığı uygulamalar için daha kullanışlıdır. Bu verilen aralık rombohedral ($F_{R(HT)}$) ve tetragonal (F_T) iki fazın sınırı yakınında bulunmaktadır. Bu sınıra morfortropik faz sınırı (MPB) denmektedir. Bu kompozisyonda PZT'de iki kristal yapı da dengede bulunabilmektedir. Tetrahedral fazda $\langle 001 \rangle$ doğrultusunda 6, rombohedral fazda ise $\langle 111 \rangle$ doğrultusunda 8 polarizasyon yönü olmak üzere toplamda 14 tane muhtemel

polarizasyon yönü bulunmaktadır. Buna bağlı olarak MPB civarındaki bileşimlerde malzemenin dielektrik ve piezoelektrik özellikleri en üst düzeye çıkmaktadır [1].

PZT genellikle katkı atomları eklenerek kullanılır, böylece özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenir. Katkı atomları ise vericiler ve alıcılar olarak ikiye ayrılır. Verici katkılar kristal yapıda metal boşlukları yaratarak domain bölgelerin dönmesini kolaylaştırır ve piezoelektrik özelliklerde artışa neden olur. Bunun sonucunda elektriksel olarak yumuşak PZT'ler ortaya çıkar. Bunlara örnek olarak PZT 5A ve PZT 5H kompozisyonları verilebilir. Bu kompozisyonlar yüksek piezoelektrik katsayılarla, yüksek dielektrik geçirgenliğe, yüksek elektrik kayba, yüksek elektromekanik bağlaşma faktörlerine sahiptir. Alıcı katkılar ise kristal yapıda oksijen boşlukları yaratır. Bu oksijen boşlukları domain duvarlarını engelleyerek domain bölgelerinin dönmesini zorlaştırırlar. Böylece, elektriksel olarak sert PZT'ler ortaya çıkar. Bunlara örnek olarak PZT 4 ve PZT 8 kompozisyonları verilebilir. Bu kompozisyonlar düşük piezoelektrik katsayılarla, düşük geçirgenliğe, düşük elektrik kaybına sahiptirler. Tablo 2.1'de en bilinen PZT kompozisyonlarının özellikleri verilmiştir [18, 19].

Tablo 2.1 Bazı PZT kompozisyonlarının özellikleri.

Kompozisyon	T _c (°C)	d ₃₃	ε
PZT 4	325	285	1275
PZT 5A	365	374	1900
PZT 5H	195	593	3300
PZT 8	300	225	1050

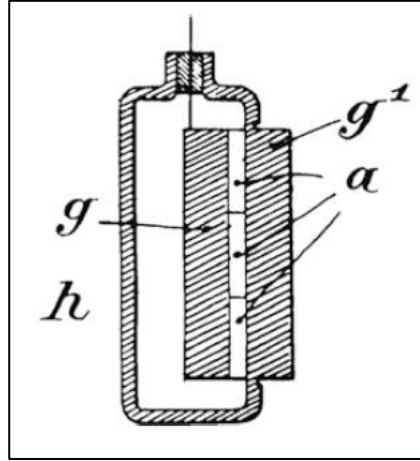
2.3. Piezoelektrik Dönüştürücüler

Elektro akustik dönüştürücüler akustik enerjiyi (ses dalgası) elektrik enerjisine (voltaj veya akım) dönüştüren veya tam tersini yapan cihazlara verilen isimdir. Eğer bu dönüştürücü ses dalgası oluşturmak için kullanılıyorsa buna aktif veya projektör dönüştürücü adı verilir. Eğer ses dalgalarını algılamak için kullanılıyor ise pasif veya alıcı adı verilir. Pasif dönüştürücü su altında kullanılır ise hidrofon adını alır. Su altı akustik sistemleri pasif ve aktif dönüştürücüler, ve bunların kullanımını sağlayan elektronik sistemlerden oluşmaktadır. Bu tarz sistemler genellikle savunma sanayinde

SONAR olarak kullanılmaktadır. Silahlarda kullanılan SONAR sistemleri 1-100 kHz frekans aralığında çalışırken, navigasyon ve görüntüleme için kullanılan SONAR sistemleri 100 kHz – 1MHz frekans aralığında çalışmaktadır [4].

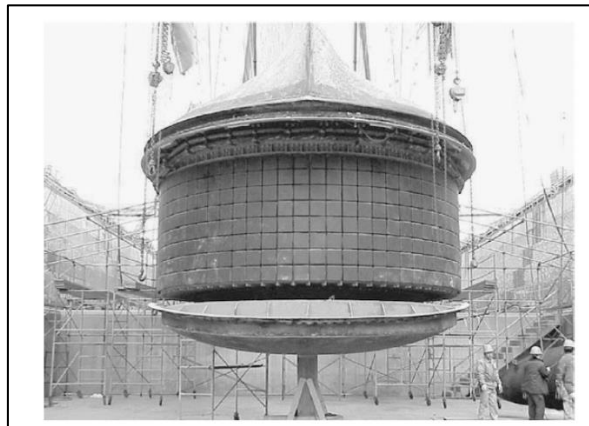
Elektro akustik dönüştürücüler 200 yılı aşkın süre önce geliştirilmeye başlanmıştır. 1880 yılında Jacques ve Pierre Curie'nin piezo elektrik etkiyi keşfetmesi ile elektro akustik dönüştürücülerin gelişiminde yeni bir çağ başlamıştır. Artık piezo elektrik malzemeler bu dönüştürücülerde kullanılabilecektir. Su altında ses dalgalarının navigasyon sağlayıcı olarak ilk kullanımı Submarine Signal Company (daha sonra Raytheon Şirketi'nin bir parçası olmuştur) tarafından yirminci yüzyılın başlarında yapılmıştır. R. A. Fessenden geliştirdiği yeni bir tür dönüştürücü ile denizaltılar arasında iletişimi 1914 yılında sağlamıştır. 27 Nisan 1914 tarihinde bir buzdağı yaklaşık 2 deniz mili uzaklıktan saptanmıştır. Bu uygulama muhtemelen elektro akustik dönüştürücülerin su altındaki ilk pratik uygulamasıdır. Daha sonra 500 – 1000 Hz aralığında çalışan bu dönüştürücüler “Fessenden Osilatörleri” adı altında ABD donanmasındaki deniz altılara takılmış ve birinci dünya savaşı boyunca kullanılmıştır [5].

1915 yılında Fransa'da Paul Langevin ve arkadaşları elektro statik dönüştürücülerini projektör olarak kullanmış ve su geçirmez bir karbon mikrofonu da hidrofon olarak kullanmışlardır. Kısa mesafelerde işe yarasa da uzun mesafeler için geliştirme yapılması gerektiğini görmüşlerdir. Bu sonuçlar İngiliz'ler ile paylaşıldığında onlar da aynı çalışmalara 1916 yılında başlamışlardır. İki taraf da piezoelektrik kuvars malzemesinin dönüştürücülerde kullanılmasının önemli olduğunu fark etmiştir ve Langevin uygun kuvars numunelerini bulduğu gibi piezoelektrik etkinin önemini deneyler ile kanıtlamıştır. Daha önce kullandıkları karbon hidrofonu kuvars hidrofon ile değiştirmişlerdir. 1917'nin başlarında kuvars dönüştürücüler hem projektör hem de hidrofon olarak kullanılmıştır. Yapılan ekstra geliştirmeler ile 1918 yılının başlarında denizaltından ilk ekolar duyulmuştur. Bu geliştirme kuvarsı iki tane çelik plakanın arasına sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir [5]. Şekil 2.6'da bu geliştirme görülebilir.

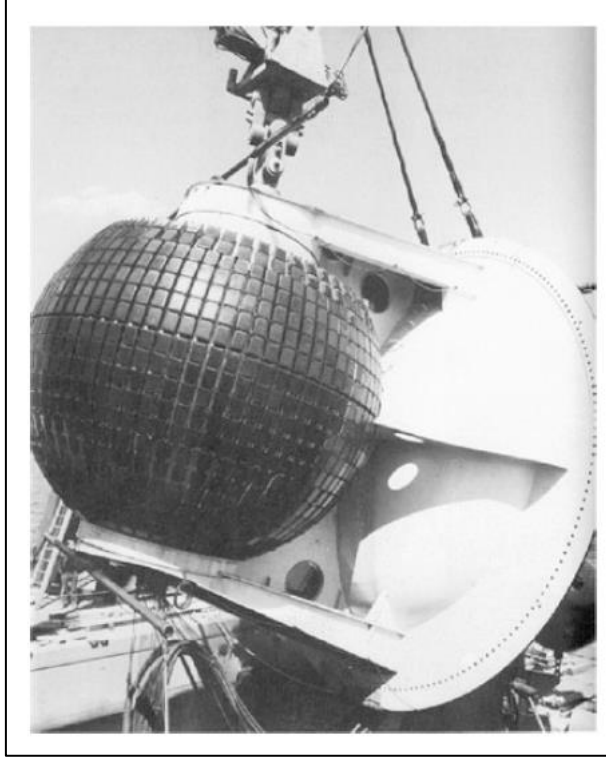


Şekil 2.6: Langevin'in icat ettiği kuvars dönüştürücü. Çelik (g) – kuvars (a) – çelik (g¹) dönüştürücü.

İleriki yıllarda yaşanan gelişmeler ile elektro akustik dönüştürücüler günümüze kadar gelmiştir. Donanmada kullanılan uygulamaları sadece denizaltılar ve navigasyon ile sınırlı değildir. Akustik mayın, torpidolar gibi uygulamaları da vardır. Akustik mayınlarda bulunan hidrofon ile mayının yakınlarından gemi geçtiği zaman ses dalgasını voltaja çevirerek mayının patlamasını sağlar. Torpidolarda bulunan aktif dönüştürücüler rezonans frekansında çalışarak navigasyon ve hedef tespiti yaparken, pasif dönüştürücüler rezonans frekansının altındaki frekanslarda dinleme yaparak gemilerden çıkan ses dalgalarını yakalamaya çalışırlar [5]. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de donanmada kullanılan bazı dönüştürücüler ve dizinleri görülebilir.



Şekil 2.7: Silindirik dizin şeklinde yerleştirilmiş Tonpils tipi dönüştürücüler.

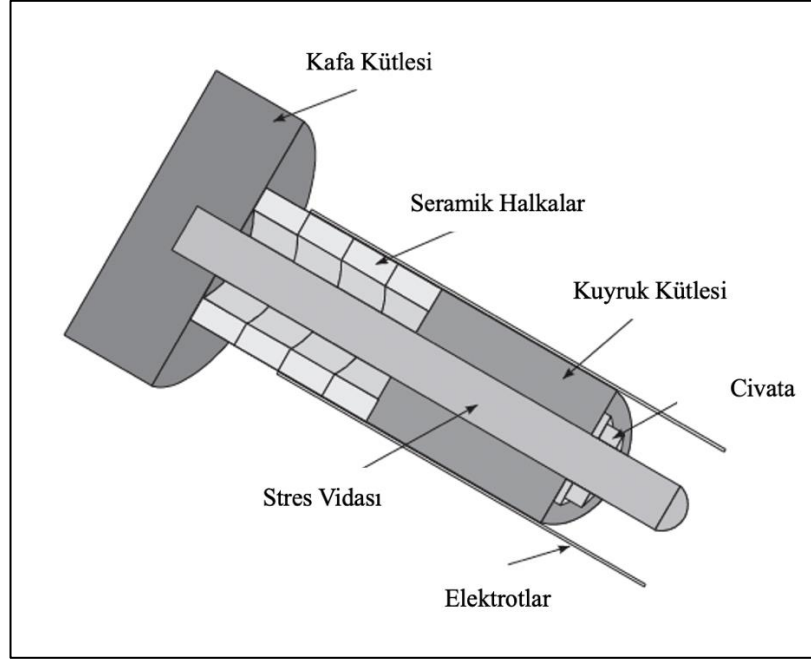


Şekil 2.8: Denizaltıya yerleştirilecek bir küresel dizin

2.3.1. Tonpilz Tipi Piezoelektrik Dönüştürücüler

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan Tonpilz Tipi dönüştürücülerden bahsedilecektir.

Orta frekans bandı için en çok kullanılan dönüştürücü tasarımı Tonpilz tipi dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücüler genelde mantara benzeyen şekilleri ile tanınmaktadır. Almancada Tonpilz kelimesi “ses mantarı” anlamına gelmektedir. Bu tip dönüştürücüler genellikle tek bir yönde ses dalgası oluştururlar. Büyük dizinler oluşturulduğu zaman tek bir yönde yüksek yoğunluklu ses dalgası oluşturma kapasitesine sahiptirler. Tonpilz tipi dönüştürücüler genellikle 1-50 kHz arasında çalışırlar [4,5]. Şekil 2.9’da Tonpilz tipi bir dönüştürücünün gelen yapısı görülebilir. [4].



Şekil 2.9: Tonpilz tipi bir dönüştürücünün genel yapısı

Bu tip dönüştürücülerin tasarımı basittir. Boyuna kutuplanmış piezoelektrik halkaları baskı kuvveti ile bir arada tutan ön gerilme vidası ve iki tane metal kütleden oluşmaktadır. Piezoelektrik halkalar yerleştirilirken kutuplanma yönleri birbirine ters olarak yerleştirilir, böylece elektriksel olarak paralel bağlanmış olurlar. Ön gerilme vidası ile sıkıştırma kuvveti uygulanarak, çalışma esnasında seramikler üzerinde oluşacak çekme kuvvetleri engellenir. Böylece çalışma esnasında çatlamlar en aza indirgenir. Akustik başlık kütlesi genelde alüminyum vb. hafif bir metalden oluşur. Kuyruk kütlesi genelde akustik başlık kütlesinden 3-5 kat daha ağır ve büyük olur. Böylece kuyruk kütlesinde hareket neredeyse yok sayılacak kadar aza indirgenir, bütün hareket kafa kütlesinden yapılır. Bu dönüştürücüler su altında kullanılırken su sızdırmaması için genellikle neopren, butil kauçuk veya poliüretan ile kaplanırlar [4,5].

2.4. Relaksör Ferroelektrikler

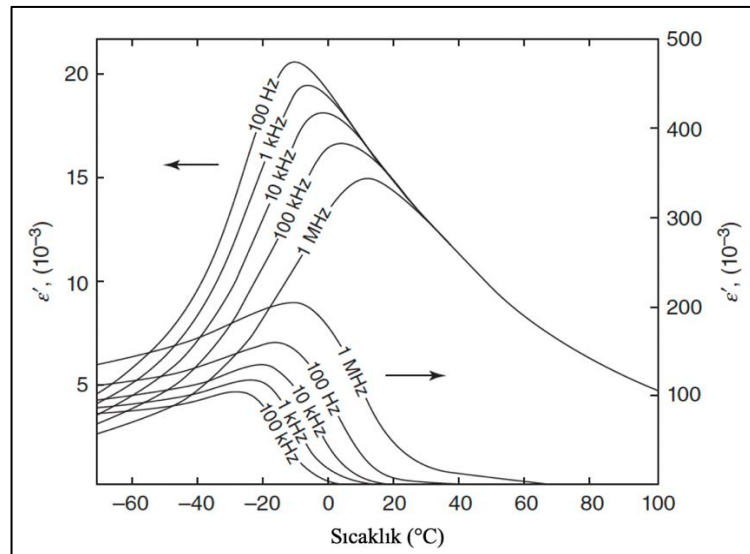
Relaksör ferroelektrik malzemelerin keşfedilmesi 1960'ların başında tek kristal $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PMN) ile başlamıştır. Daha sonra 1980'lerin başında PMN bazlı (örn. PMN-PT) seramiklerin geliştirilmesi ile relaksör ferroelektrikler kapasitör ve

elektrostriktif eyleyici gibi uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Relaksör ferroelektrikler kurşun bazlı piezoelektrik bileşiklerdir. Genel formülleri $Pb(B_1B_2)O_3$ şeklindedir. Burada B_1 düşük valanslı (örn. Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} ve Fe^{3+}) bir katyonu belirtir. B_2 ise yüksek valanslı (örn. Nb^{5+} , Ta^{5+} ve W^{5+}) katyonu belirtir. Saf PMN relaksör bir malzemedir ve Curie sıcaklığı yaklaşık $-10^\circ C$ 'dir [6].

Relaksör malzemeler Curie sıcaklığından soğutulmaya başlandığı zaman ergodik relaksör adı verilen bir duruma geçiş yaparlar. Bu durumda yapıda rastgele dağılmış polar nano bölgeler ortaya çıkmaya başlar. Bu dönüşümün başladığı sıcaklığa Burns sıcaklığı (T_B) denmektedir [7]. Polar nano bölgelerin yüksek dielektrik ve piezoelektrik özelliklere yol açtığı düşünülmektedir. Bu malzemelere örnek $P(B_1B_2) - PT$ verilebilir. Polar nano bölgeler sayesinde normal ferroelektrik malzemelere göre dış uyarıcılara daha duyarlı ve dinamik oldukları görülmüştür. İki özellikleri sayesinde normal ferroelektrik malzemelerden ayırt edilirler [9].

- Tek bir sıcaklık yerine, belirli bir sıcaklık aralığında paraelektrik fazdan ferroelektrik faza geçiş gösterirler. İlk çalışılmaya başladığı zaman relaksörlere bu özellikleri yüzünden “geniş faz geçişli ferroelektrikler” denmekteydi [7,9].
- Dielektrik sabitleri frekansa bağlıdır. Frekans arttıkça dielektrik sabitlerinde düşüş görülür.

Şekil 2.10'da relaksör bir malzeme olan PMN'nin dielektrik ölçümleri verilmiştir [6]. Yukarıda bahsedilen iki farklı özellik de bu grafikten görülebilir.



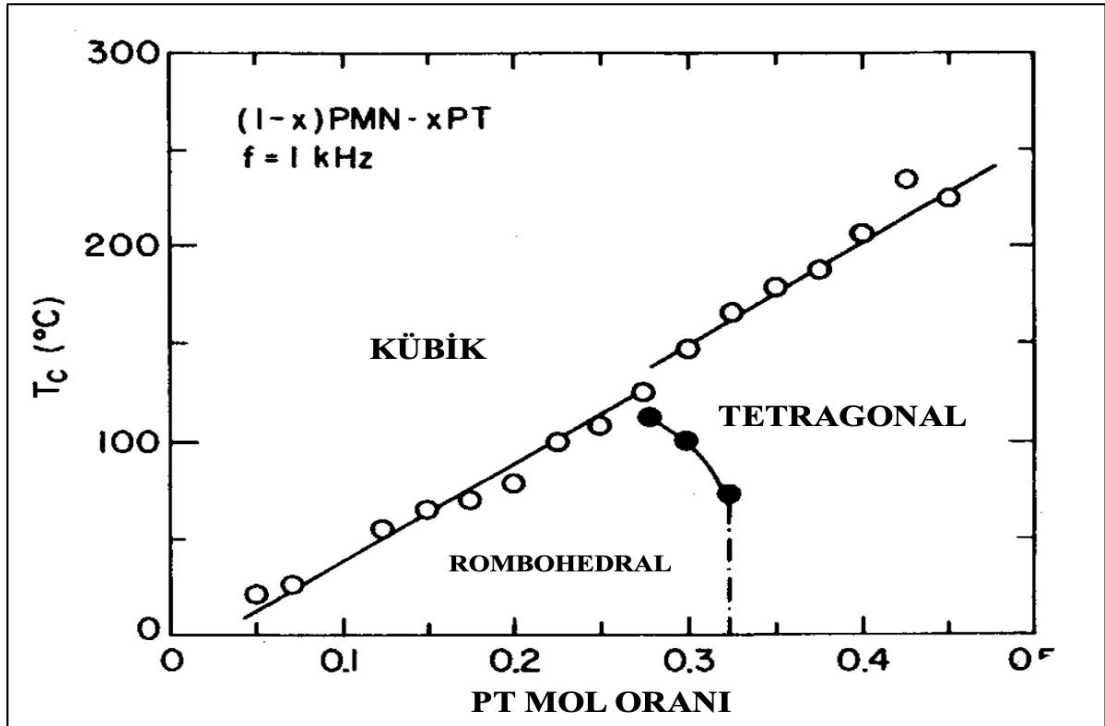
Şekil 2.10: PMN malzemesinin dielektrik özelliğinin sıcaklığa bağlı değişimi

Bu özelliklerin nedeni kompozisyonda görülen heterojen bölgelerdir. PMN kristalinde B atomunun yerine Mg ve Nb olabileceği bilinmektedir. Mg ve Nb kompozisyonunun stokiometrik olmaması durumunda farklı polar nanobölgeler oluşmakta ve böylece dielektrik piklerini genişleten farklı geçiş sıcaklıkları görülmektedir [6].

2.4.1. PMN-PT Sistemi

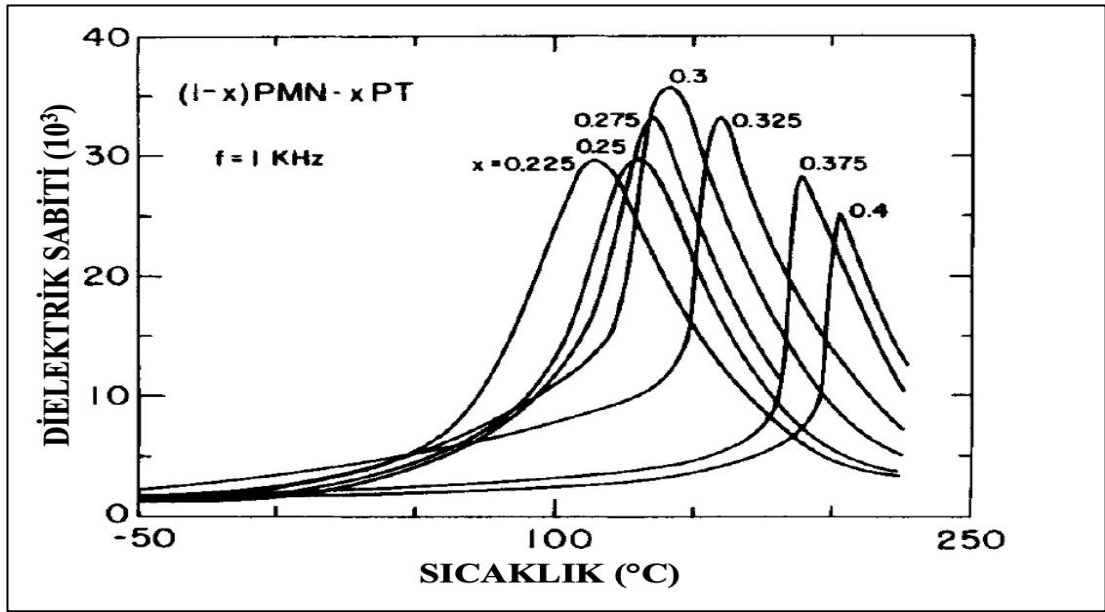
Kurşun magnezyum niobat (PMN) bilinen ilk relaksör malzemelerdendir. Yaklaşık -15°C sıcaklıkta faz geçişine sahip iken, -10°C sıcaklıkta da maksimum dielektrik sabitine sahiptir [10,11]. Kurşun titanat (PT) perovskite kristal yapısına sahiptir ve 490°C Curie sıcaklığına sahiptir. Bu ikisi birleştirildiğinde PMN-PT sistemini oluştururlar ve sahip olduğu yüksek elektromekanik özellikler sayesinde piezoelektrik dönüştürücü uygulamalarında kullanılabilirler [11].

1989 yılında yapılan çalışmalar ile PMN-PT sisteminin morfolitik faz sınırı bulunmaya çalışılmış, faz diyagramı çıkarılmış ve çeşitli kompozisyonlarda dielektrik ve piezoelektrik özellikleri incelenmiştir [10,12]. PMN-PT sisteminin faz diyagramı Şekil 2.11’de verilmiştir [10].



Şekil 2.11 PMN-PT sistemi faz diyagramı

PMN-PT sisteminde de PZT'ye benzer şekilde morfolotropik faz sınırı bulunmaktadır. Bu faz sınırı ile rombohedral ve tetragonal fazlar birbirinden ayrılmaktadır. Piezoelektrik özellikler bu faz sınırında en yükseğe ulaşmaktadır. PMN-PT sisteminin morfolotropik faz sınırının 0.300 – 0.325 mol PT arasında olduğu düşünülmektedir. Yapılan dielektrik, piroelektrik ve piezoelektrik ölçümleri ile bu sonuca varılmıştır [10]. Şekil 2.12'de bu ölçümlerden dielektrik sabitine ilişkin sonuçlar verilmiştir.



Şekil 2.12 PMN-PT sisteminin sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçümü

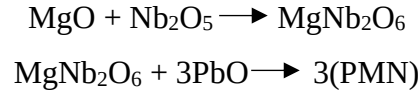
PMN-PT sisteminde morfolotropik faz sınırının yakınında yer alan kompozisyonların piezoelektrik yük katsayıları Tablo 2.2'de verilmiştir [10].

Tablo 2.2 PMN-PT kompozisyonlarının piezoelektrik yük katsayıları.

Kompozisyon	$d_{33}(\text{pC/N})$
0.75PMN – 0.25PT	305
0.725PMN – 0.275PT	353
0.7PMN – 0.3PT	669
0.675PMN – 0.325PT	663
0.65PMN – 0.35PT	456
0.625PMN – 0.375PT	405

2.4.2. PMN-PT Üretiminde Columbite Yöntemi

PMN-PT seramikler yüksek piezoelektrik ve dielektrik özellikleriyle uygulamada tercih edilen malzemelerdir. Ancak üretimleri sırasında piroklor fazı oluşumu sorunu vardır. Kurşun niobat bazlı bu faz düşük dielektrik özellikleri sahiptir ve ferroelektrik karakterde olmaması nedeniyle sistemde bulunması piezoelektrik ve dielektrik özellikleri düşürebilmektedir [14]. 1982 yılında Shrout ve arkadaşları bu soruna bir çözüm bularak günümüzde de halihazırda kullanılan Columbite yöntemini geliştirmiştir [13]. Geleneksel yöntemde tüm oksitler önceden karıştırılarak daha sonra kalsine edilmektedir. Bu yöntem ile önce MgO ve Nb₂O₅ kalsine edilerek Columbite (MgNb₂O₆) oluşturulmakta, daha sonra oluşan ürün PbO ile reaksiyona sokulmaktadır [14]. Bu yöntemin reaksiyon denklemleri aşağıda verilmiştir.



Bu yöntem sayesinde Nb₂O₅ ve PbO'nun direkt tepkimeye girmesi ile oluşan piroklor fazı engellenmektedir [13]. Ancak sinterleme sırasında meydana gelen PbO uçuşması ile PMN perovskit fazı bozulabilmekte ve böylece piroklor fazı gene de oluşabilmektedir. Bu yüzden sentez sırasında PbO stokiometrisini korumak büyük önem arz etmektedir [14].

2.5. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi

Sonlu elemanlar analiz (SEA) yöntemi mühendislikte veya matematiksel modellemede karşılaşılan diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan bir yaklaşımdır. Büyük bir sistem sonlu elemanlar adı verilen küçük ve basit parçalara ayrılmakta ve sınır koşulları tanımlanarak denklemler düğüm noktaları için çözülmektedir. Piezoelektrik dönüştürücülerin tasarımında ve dönüştürücülerin üretim öncesi analizinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında özel olarak dönüştürücüler ve akustik problemler için geliştirilmiş olan ATILA sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. ATILA programı ISEN Enstitüsü, Akustik Departmanı tarafından geliştirilmiş bir SEA kodudur [15]. Bir sıvı içerisinde akustik yayılım yapan elastik, piezoelektrik, magnetostriktif ve elektrostriktif malzemelerin

modellenmesi için kullanılmaktadır. Öngerilmeler, hidrostatik basınç altındaki davranışlar, çeşitli rezonans modları ve eşleşme faktörleri, havada veya suda empedans ve yer değiştirme, TVR, FFVS, ve dinamik stresler hakkında bilgi vermektedir [16].

Bu yöntemde analiz edilmek istenen yapı çok küçük parçalara ayrılmaktadır ve bu parçalar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmaktadır [15]. Bu düğüm noktaları ve küçük parçalarda istenen analizler yapılarak tüm yapıya ulaşılmaktadır.

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzeme ve Yöntem

Deneyisel çalışmalarda PMN-PT tozları katı hal kalsinasyon yöntemi ile hazırlanmış, bu tozlardan peletler ve halkalar üretilmiştir. Üretilen tozun, peletlerin ve halkaların yapısal ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. En son olarak ise dönüştürücü montajları yapılarak elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. PMN-PT Tozlarının Hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan 0.70PMN-0.30PT tozları hazırlanırken kullanılan kaynak tozlar formülleri, alınan firmalar ve CAS numaraları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: 0.70PMN-0.30PT tozu hazırlanırken kullanılan kaynak tozların ve tozların kuru preslenmesi aşamasında bağlayıcı olarak kullanılan polimerlerin formülleri, alınan firmalar ve CAS numaraları.

Kimyasal Formül	Alınan Firma	Safılık Derecesi(%)	CAS #
PbO	Alfa Aesar	99	1317-36-8
TiO ₂	Degussa, P25	99	13463-67-7
MgNb ₂ O ₆	Laboratuvar Sentezi [17]	-	-
Polivinil Butiral (PVB)	Sigma Aldrich	-	63148-65-2
Polietilen Glikol (PEG)	Fluka	-	25322-68-3
Benzil Butil Phatalat	Sigma Aldrich	-	85-68-7

Tablo 3.1’de verilen polimer bileşikleri toz yapımı sırasında bağlayıcı olarak kullanılmıştır. MgNb₂O₆ tozu laboratuvar senteziyle üretilmiştir [17].

İlk adımda PbO, TiO₂ ve MgNb₂O₆ tozları 0.70PMN-0.30PT kompozisyonunu oluşturmak için stokiyometrik oranlarda karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi içinde Al₂O₃ bilyeler bulunan plastik bir kaptaki gerçekleştirilmiştir. Stokiyometrik oranlarda tartılan tozlar, etanol ve bilyeler ile plastik kabın içine konulmuştur. Daha sonra bu plastik kap bilyalı değirmene konmuş ve 200 rpm’de 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen bu karışım manyetik karıştırıcıda 90°C’de kurutularak etanol

uçurulmuştur. Kuruma işleminin etkisini arttırmak amacıyla ve yapıda kalabilecek etanol ve su miktarını iyice düşürmek amacıyla manyetik karıştırıcıdan alınan kurutulmuş toz etüvde 24 saat daha bekletilmiştir.

Kurutma işleminin ardından toz alümina potaya konularak kalsinasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon işleminin amacı perovskite fazına ulaşmaktır. Bu işlem MSE marka fırında 850°C sıcaklıkta 4 saat gerçekleştirilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığına 5°C/dk hızla çıkılmış ve 850°C sıcaklıkta 4 saat boyunca beklenmiştir.

Sinterleme işleminin gerçekleştiği sıcaklıkta Kurşun (Pb) uçucu olduğundan dolayı, bu işlemden sonra toza %2 kadar Kurşun Oksit (PbO) daha eklenmiştir. Bu ekleme ile sinterleme sırasında uçabileceği varsayılan kurşun yerine tekrar konmaktadır.

Kalsinasyon işleminden alınan toz tekrar bilyeli plastik kaba etanol eklenerek konmuştur ve bilyeli değirmende 72 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra karışım 90°C’de kurutulmuş ve 24 saat boyunca etüvde bekletilmiştir.

3.1.2. Kuru Pres Yöntemiyle Seramiklerin ve Halkaların Hazırlanması

Son olarak hazırlanan toza %7 oranında bağlayıcı karışımı (PVB+PEG+ Benzil Butil Phatalat) eklenmiştir. Bağlayıcı eklenmesinden sonra karışım tekrar bilyeli plastik kaba konmuş ve etil metil keton eklenmiştir. Bilyeli değirmende 4-8 saat karıştıktan sonra manyetik karıştırıcıda 90°C’de kurutulmuş ve 24 saat etüvde bekletilmiştir. Daha sonra hazır hale gelen tozlar elektriksel karakterizasyon sürecinde kullanmak amacıyla 16 mm çapındaki kalıba doldurulmuştur. 100 MPa basınç ile 3 dakika boyunca preste basılmıştır.

Tonpilz tipi dönüştürücü montajında kullanılacak halka formundaki seramiklerin üretimi için de yine PMN-PT tozları kuru pres yöntemi ile şekillendirilmiştir. Tozlar halka kalıbına dökülmüş ve 100 mPa basınç altında 4 dakika boyunca preslenmiştir.

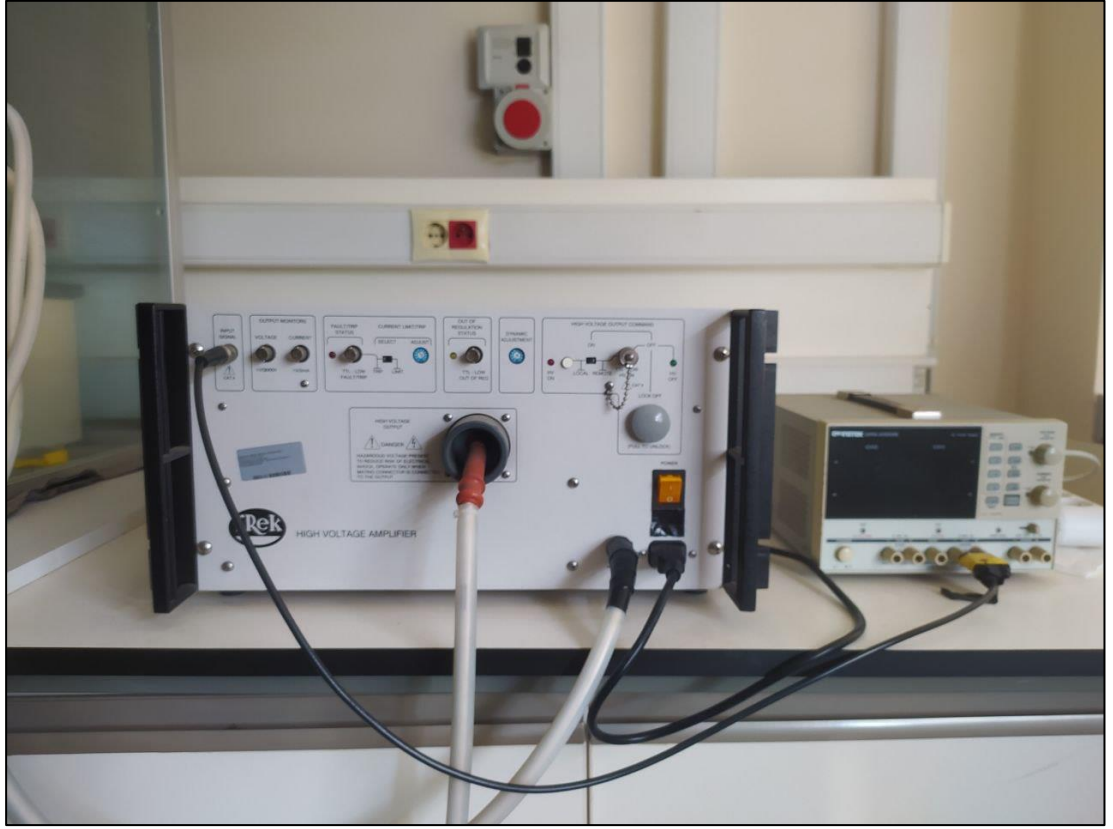
3.1.3. Seramiklerin Sinterlenmesi

Kuru pres yöntemi ile hazırlanan yaş peletler yüksek mukavemete ve yoğunluğa sahip seramik formuna dönüştürülmek için sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi kapalı alümina potalarda yapılmıştır. Potanın dibine öncelikle alümina toz serpilmiştir böylelikle peletler düz bir şekilde durmakta ve potaya yapışmamaktadır. Daha sonra peletlerin altına kendi tozlarından konularak alümina tozun yapışmaması sağlanmıştır. Bu işleminden sonra ise potanın tam ortasına atmosfer tozu konularak sinterleme işleminde uçacak olan kurşun (Pb) kaybının en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. En son olarak ise potanın üstü kapatılmış ve kenarları tekrar alümina tozu ile doldurularak hava teması olabildiğince azaltılmıştır. Pota MSE markalı fırına konulmuş ve 1150°C'de 4 saat boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası disklerin final boyutlarında çapı 13 mm ve kalınlığı 1 mm olmuştur. Halkaların sinterleme sonrası boyutları ise iç çap 8 mm, dış çap 20 mm ve kalınlık 5 mm olmuştur.

3.1.4. Seramiklerin ve Halkaların Elektrot Kaplanması ve Kutuplanması

Sinterleme işleminden sonra hazır olan disk formundaki peletler potadan alınarak alkol çözeltisinde temizlenmiştir. Daha sonra alt ve üst yüzeyleri 1200 numara zımpara ile düzleştirilmiştir ve 0.90 mm kalınlığa inceltirilmiştir. Sinterlemeden alınan halkalar da lepleme işlemi ile 5 mm kalınlığa indirilmiştir. Yüzeyleri düzeltilen ve temizlenen peletlerin ve halkaların elektriksel ölçümlerinin yapılabilmesi amacıyla iletken gümüş elektrot kaplanmıştır. Gümüş elektrot kaplama işlemi ipek baskı yöntemiyle yapılmıştır. Daha sonra elektrotun seramik yüzeyine sağlam bir şekilde tutunması için 600°C sıcaklıkta 30 dakika boyunca pişirilmiştir.

Elektrot kaplama işleminden sonra seramiklerin piezoelektrik ve ferroelektrik özelliklerini gösterebilmesi için kutuplama işlemi yapılmıştır. Kutuplama işlemi yağ banyosunda yapılmıştır. Julabo marka yağ banyosuna konan peletler 70°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Daha sonra Trek yükseltici ile 22 kV/cm elektrik alan 15 dakika boyunca uygulanmıştır. Kutuplama düzeneği Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Kutuplama işleminde elektrik alan uygulayan DC güç kaynağı ve yükselticisi.



Şekil 3.2: Kutuplama işleminin gerçekleştirildiği düzenek ve yağ banyosu.

3.1.5. Seramiklerin ve Halkaların Elektriksel ve Yapısal Karakterizasyonu

Sinterlenen peletler yapıdaki fazların belirlenmesi amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) ve mikroyapılarının görüntülenmesi amacı ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. XRD yönteminde 20° - 70° arası taranmıştır. SEM cihazında ise yüzeyden incelemeler yapılmıştır.

Elektriksel karakterizasyon ise sıcaklığa bağlı dielektrik ölçümü, ferroelektrik polarizasyon – elektrik alan histerisiz ölçümü, piezoelektrik d_{33} yük katsayısının ölçümü ve frekansa bağlı admitans ölçümü ile yapılmıştır. Tüm ölçümler kutuplama işleminden 24 saat sonra yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı dielektrik ölçüm düzeneği Şekil 3.3'te verilmiştir.

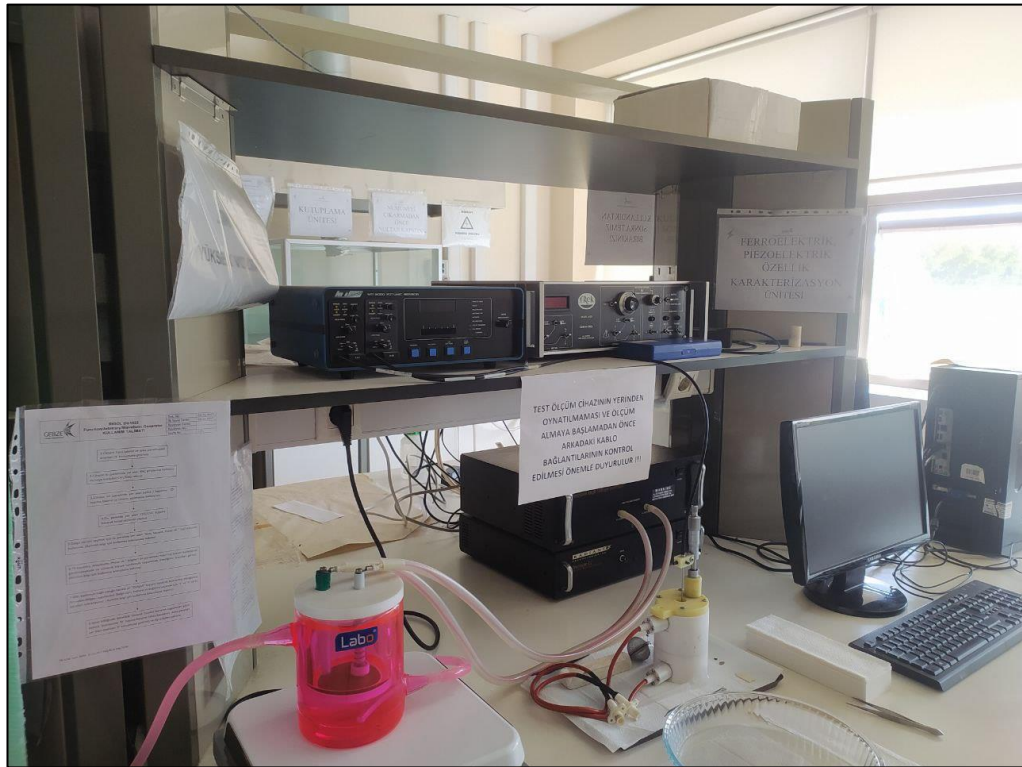
Halkaların elektriksel karakterizasyonu piezoelektrik katsayısı ölçümü, ferroelektrik ölçüm ve admitans ölçümleri ile yapılmıştır. Cihazlar sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.3: Sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçüm düzeneği.



Şekil 3.4: Piezoelektrik d_{33} yük katsayısı ölçüm cihazı.



Şekil 3.5: Ferroelektrik Polarizasyon – Elektrik Alan ve Gerinim – Elektrik Alan ölçüm cihazı.



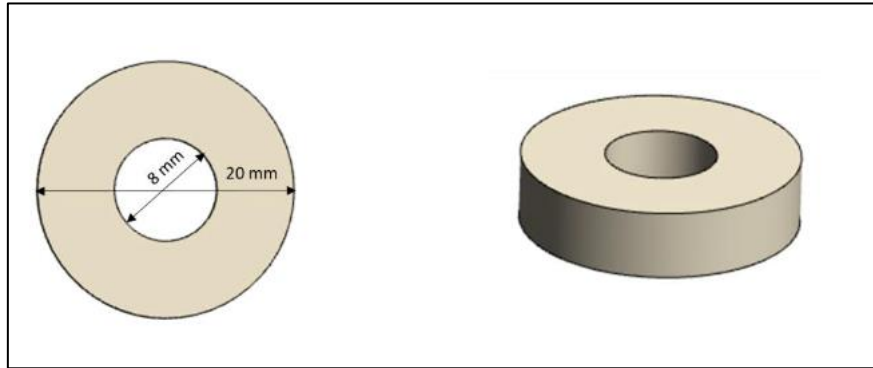
Şekil 3.6 Admitans ölçümünde kullanılan LCR Metre cihazı.

3.1.6. Dönüştürücülerin Montajı

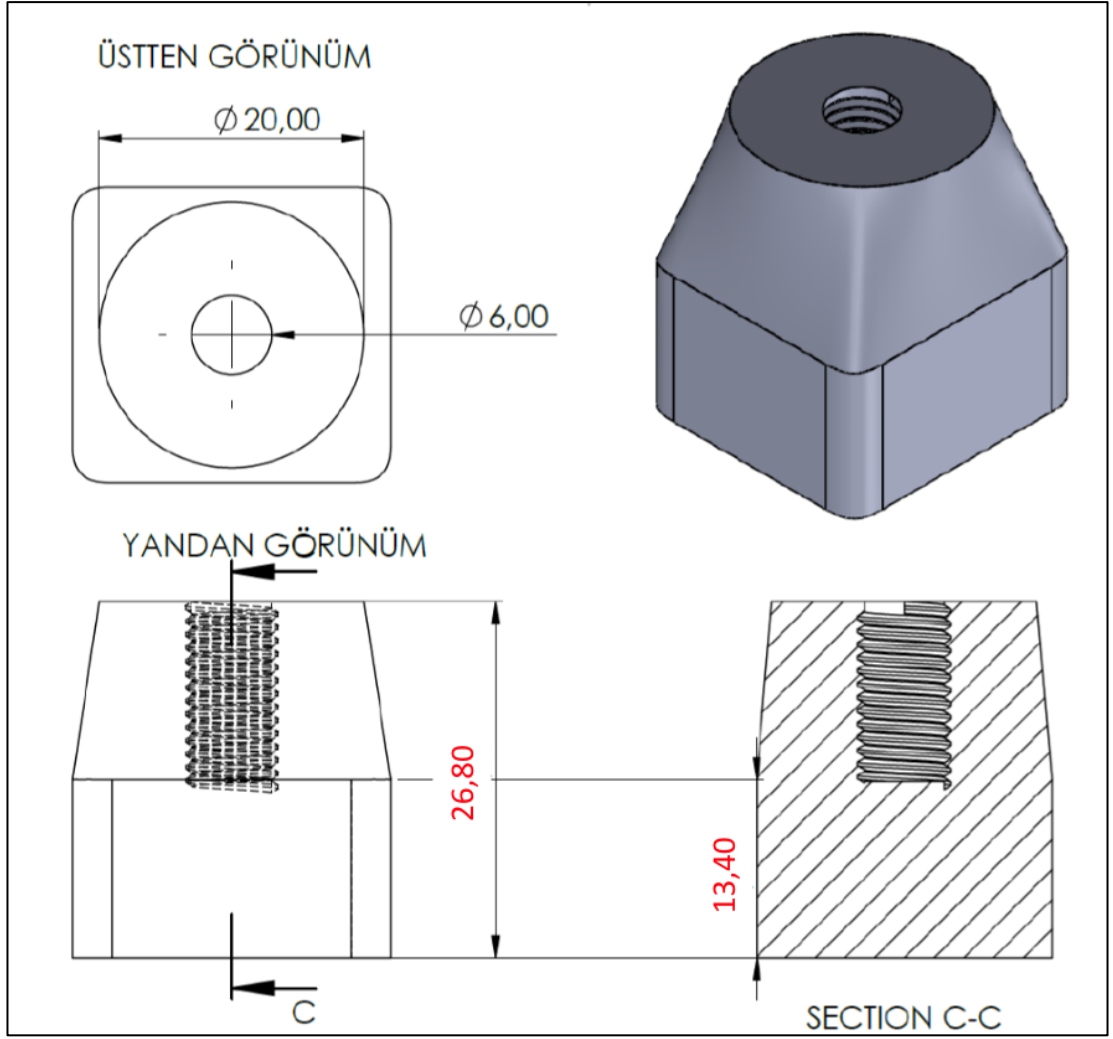
Dönüştürücülerin montajı birkaç aşamada yapılmıştır. Öncelikle halkaların arasına halka formunda bakır plakalar yerleştirilmiştir. Daha sonra bu plakalara pozitif ve toprak kabloları lehimlenmiştir. Halkalar ve bakır plakalar bir araya getirilerek alüminyum kafa ve çelik kuyruk kütesinin arasına konulmuş ön gerilme vidası ile sıkıştırılmıştır. Montaj sonucu üretilen dönüştürücüler, halkaların boyutları, kafa ve kuyruk kütlelerinin teknik resimleri Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



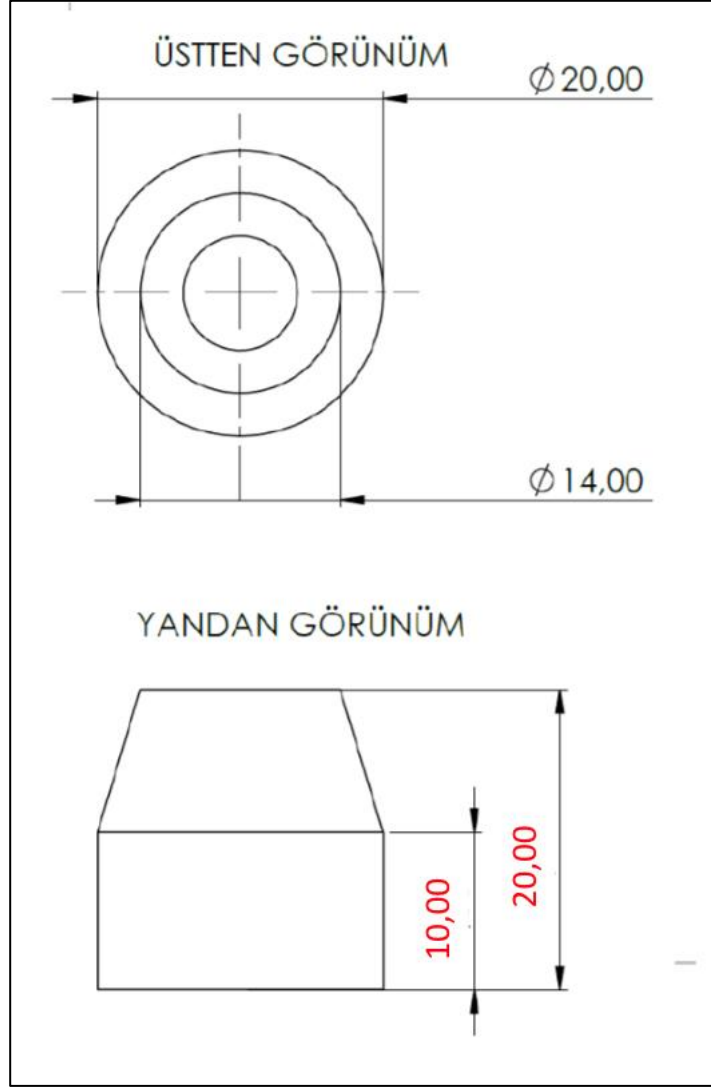
Şekil 3.7: Montajı tamamlanan dönüştürücü.



Şekil 3.8: Montajda kullanılan halkaların boyutları.



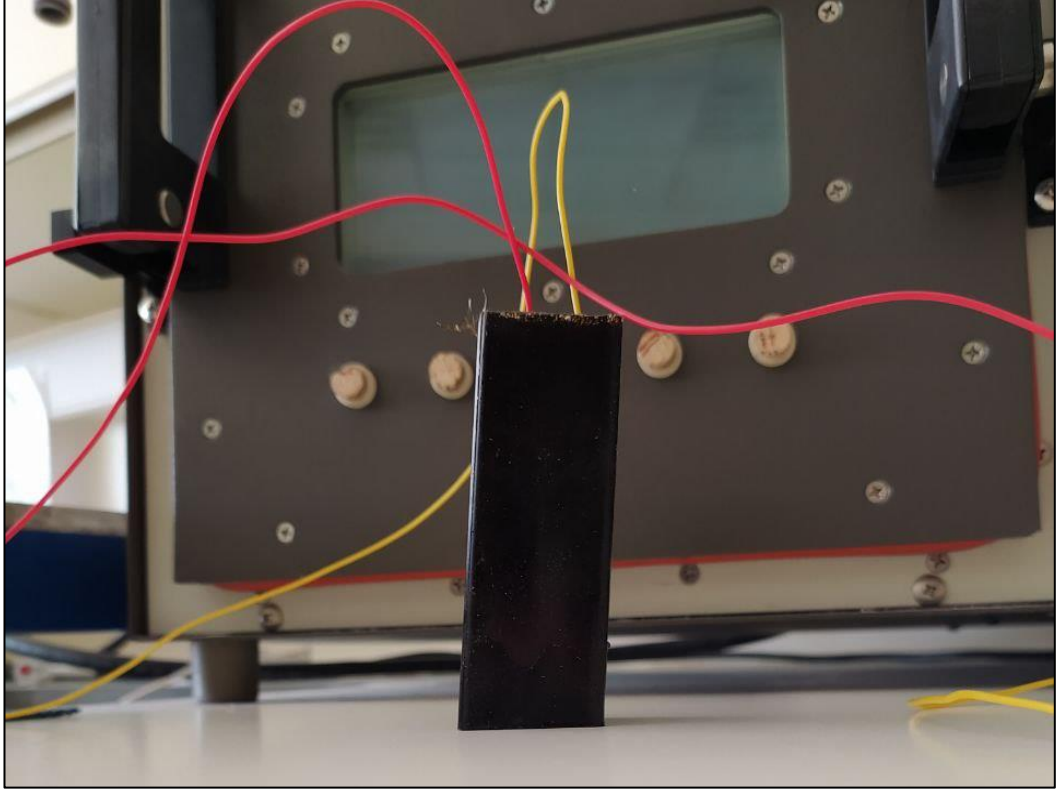
Şekil 3.9: Kafa kütlesinin teknik resmi.



Şekil 3.10: Kuyruk kütlesinin teknik resmi.

3.1.7. Poliüretan Kaplama

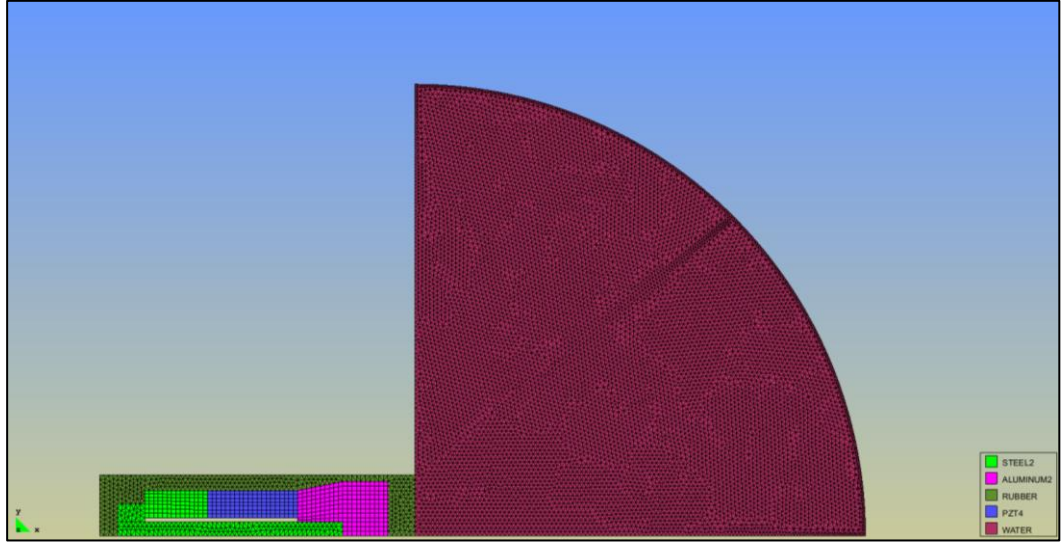
Dönüştürücüler su altında kullanılacağından dolayı poliüretan ile kaplama yapılarak su geçirmemesi ve elektriksel olarak ortamdan yalıtılması sağlanmıştır. Ayrıca poliüretan (PU) kaplama kullanılmasının diğer bir amacı metal ve su arasındaki akustik empedans farkını düşürerek ses dalgalarının daha verimli bir şekilde dönüştürücüden suya iletilmesidir. Dönüştürücüler silikon bir kaba konarak üstüne poliüretan karışımı dökülmüştür ve 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Daha sonra kalıptan çıkarılmış ve ölçümlere geçilmiştir. Kaplanmış dönüştürücü Şekil 3.11’de verilmiştir.



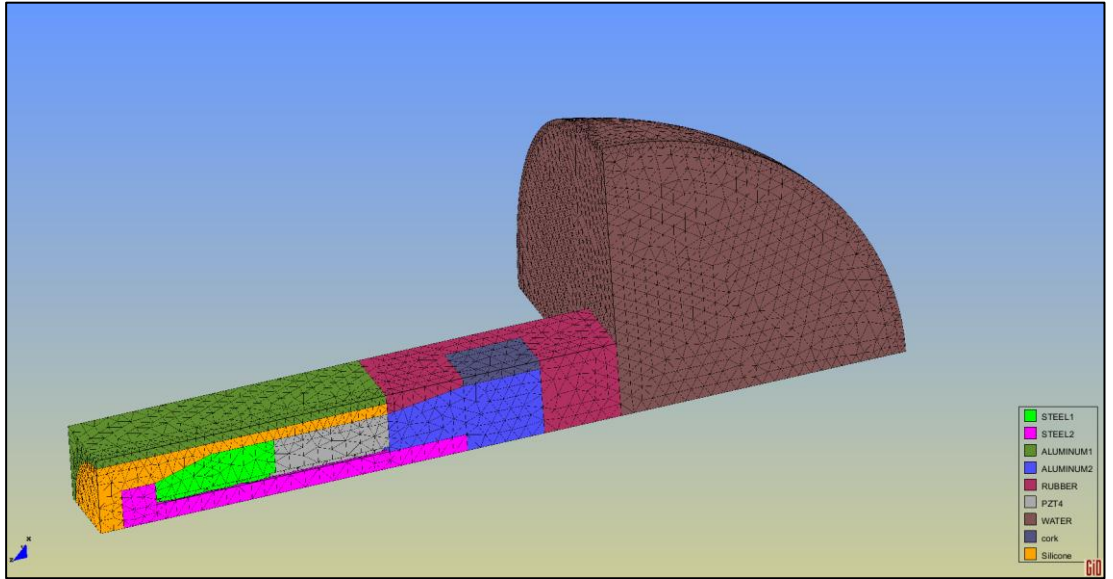
Şekil 3.11: PU kaplanmış dönüştürücü.

3.1.8. SEA ile Modelleme

Dönüştürücülerin montajı yapılmadan önce SEA programı olan ATILA ile modellemeleri ve analizleri yapılmıştır. Analizler 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere ayrı ayrı yapılmıştır. Buradan çıkan sonuçlar doğrultusunda dönüştürücü tasarımında geliştirmeler yapılmıştır. ATILA’da yapılan çizimler Şekil 3.12 ve 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Dönüştürücünün 2 boyutlu modellemesi.

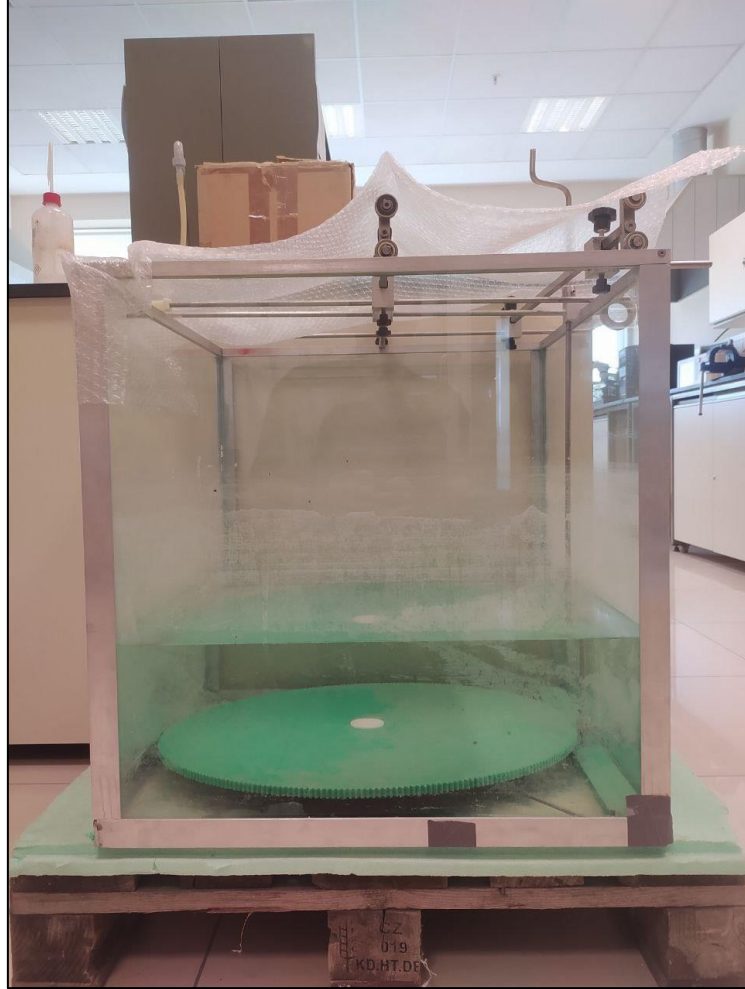


Şekil 3.13: Dönüştürücünün 3 boyutlu modellemesi.

3.1.9. Dönüştürücülerin Havada ve Su Altında Elektriksel ve Akustik Ölçümleri

Havada yapılan elektriksel ölçümler LCR cihazına dönüştürücülerin bağlanmasıyla yapılmıştır.

Suda yapılan akustik ölçümlerde ise dönüştürücüler 1x1x1 metre ebatlarındaki su tankına daldırılarak admitans – frekans ölçümü tekrarlanmıştır. Su tankı Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. Su tankı.

Su içerisinde ölçülen admitans değerlerinden aşağıdaki bağıntılar kullanılarak TVR (Transmitting Voltage Response) değerleri hesaplanmıştır [4].

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

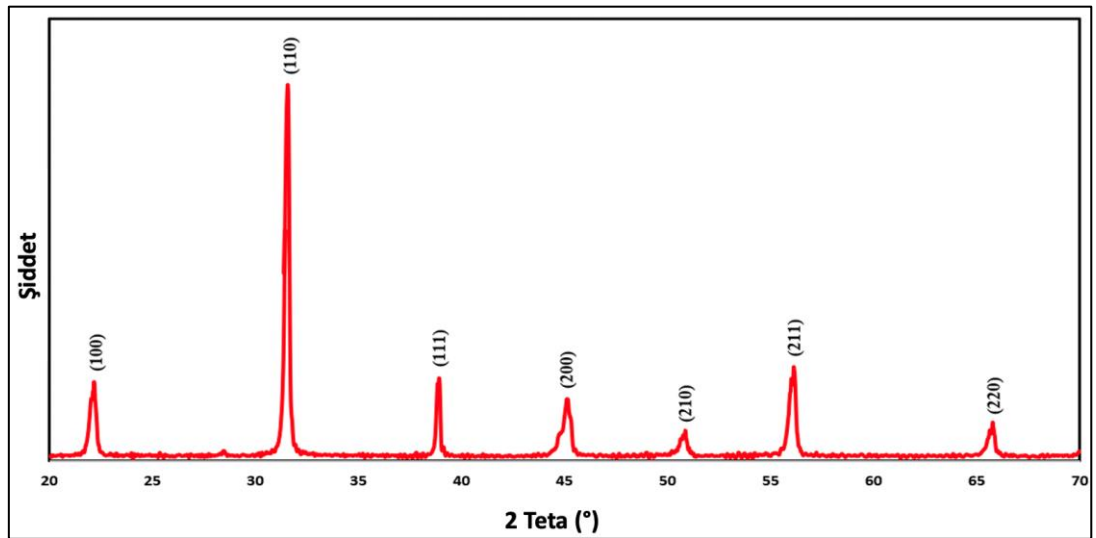
Bu bağıntıda (Y) admitans değerinin reel kısmını, DI ise dB cinsinden yönlülük değerini, n ise dB cinsinden verimlilik sabitini ifade etmektedir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde üretilen tozların ve seramiklerin hem yapısal hem de elektriksel karakterizasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca bu seramiklerden üretilen dönüştürücülerin montajı ve bu dönüştürücülerin ölçüm sonuçları da gösterilmiştir.

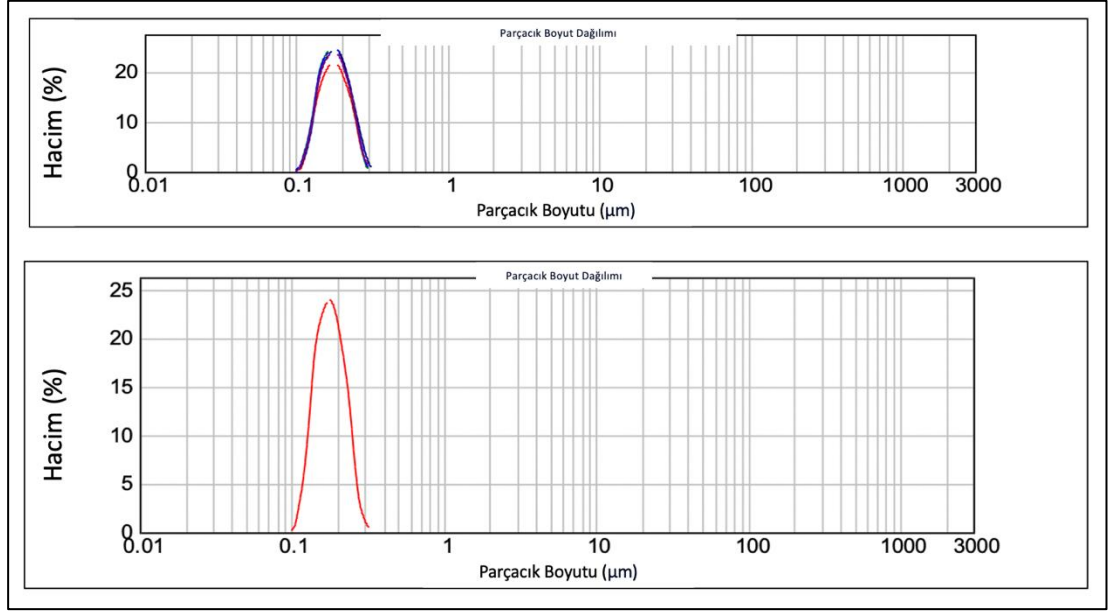
4.1. Yapısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Seramiklerin yapısal karakterizasyonu Bölüm 3.1.5'te anlatıldığı gibi X-ışını kırınımı (XRD), parçacık boyutu analizi ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

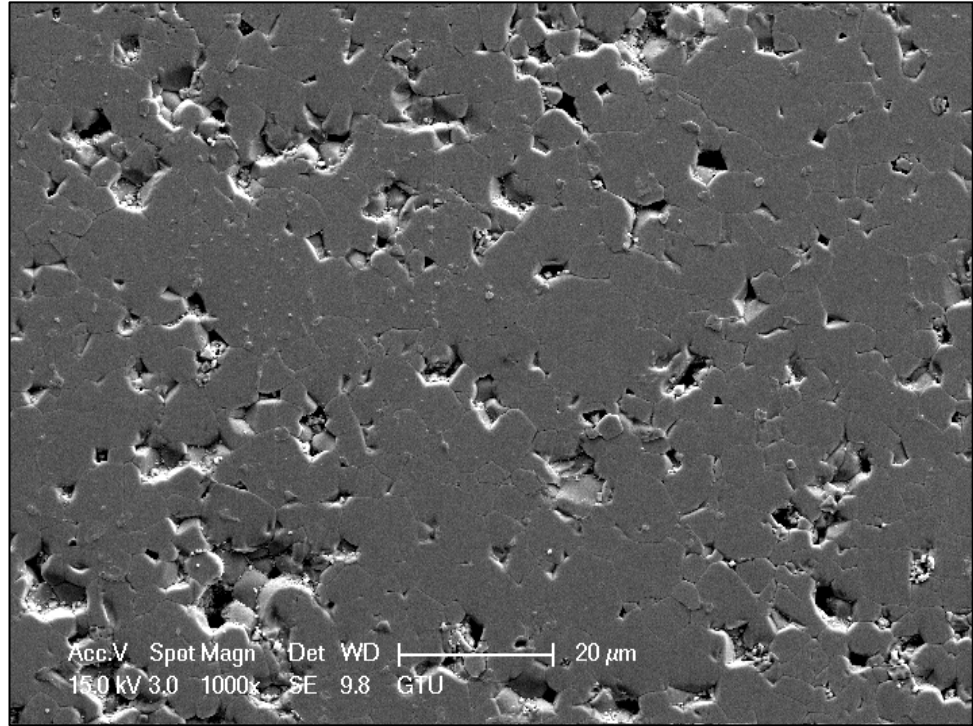


Şekil 4.1: PMN-PT seramiklerin XRD faz analizi.

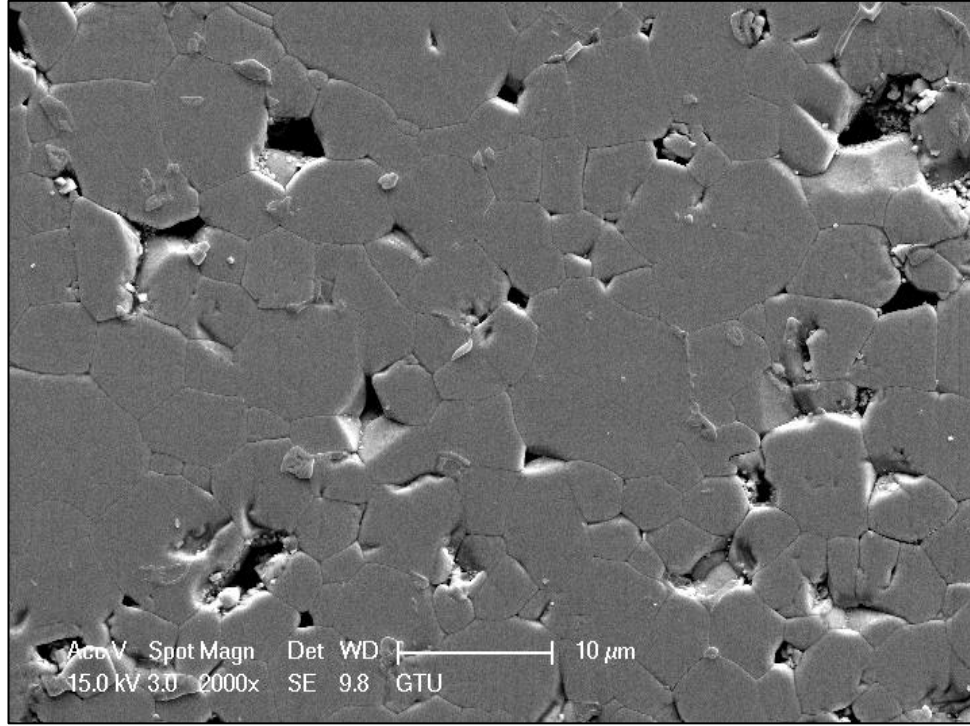
1150°C sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenmiş seramiklerin XRD sonuçlarına bakıldığında yapıda herhangi bir istenmeyen faz veya safsızlık bulunmamaktadır. Pikler ve açılar incelendiğinde perovskite fazının elde edildiği görülmektedir. Parçacık boyutu analizleri sonucunda parçacık boyutları mikron altı olarak bulunmuştur. Elde edilen tozların parçacık boyutu dağılımı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Elde edilen tozların parçacık boyutu dağılımı.



Şekil 4.3: Üretilen halkaların 1000 büyütmede SEM görüntüleri.



Şekil 4.4: Elde edilen halkaların 2000 büyütmede SEM görüntüleri.

SEM görüntülerine bakıldığında sinterleme işleminin başarıyla gerçekleştirildiği ve yapının yoğunlaştığı ve gözeneklerin azaldığı görülmektedir.

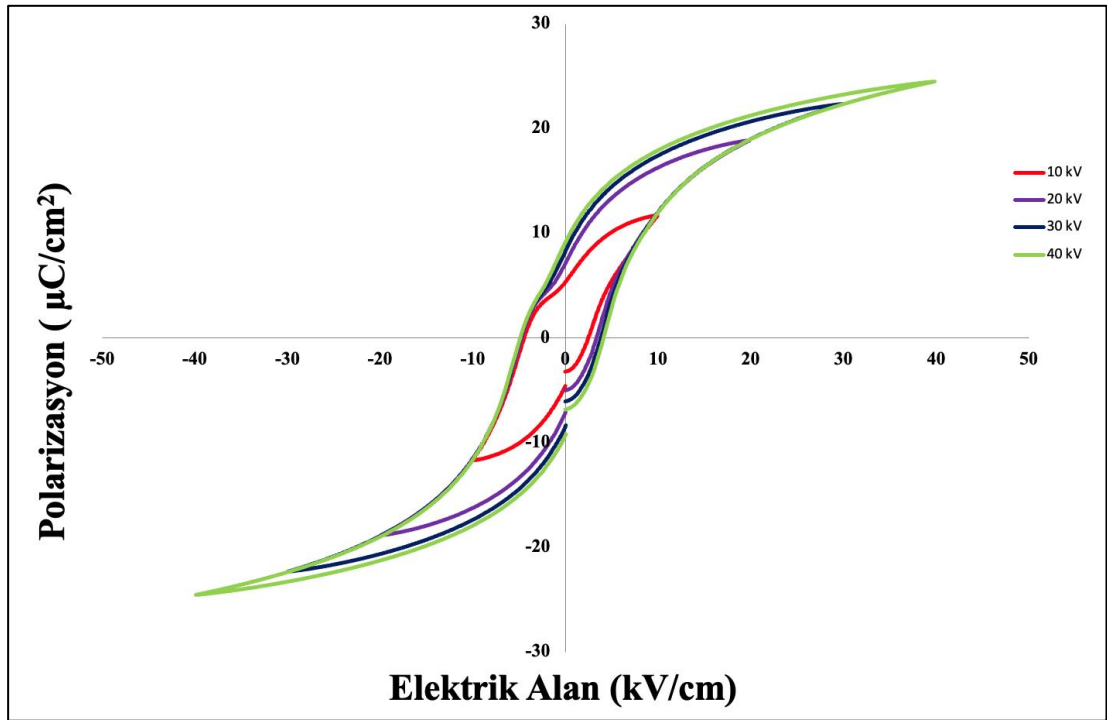
4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu kısımda Bölüm 3'te bahsedildiği gibi üretilen halkaların elektriksel karakterizasyon sonuçları sırasıyla paylaşılacak ve tartışılacaktır.

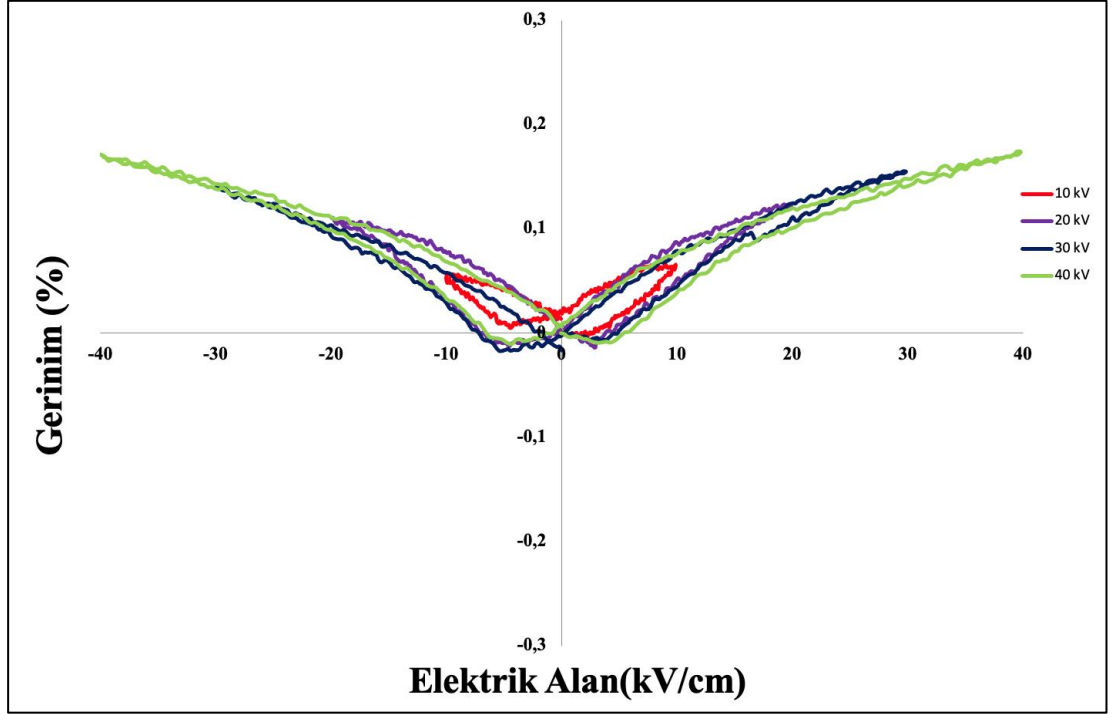
İlk olarak üretilen tozlardan disk üretimi gerçekleştirilmiş ve ferroelektrik özellikleri ölçülmüştür. Ferroelektrik özellikleri Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerin frekansa bağlı değişimi.

Elektrik Alan	E_c	P_r	P_{max}	x_{max}
10 kV	2,42	5,29	11,67	% 0,065
20 kV	3,20	7,05	18,85	% 0,12
30 kV	3,87	8,13	22,31	% 0,154
40 kV	4,20	9,55	24,52	% 0,1740



Şekil 4.5: Polarizasyon – Elektrik Alan Ölçümü



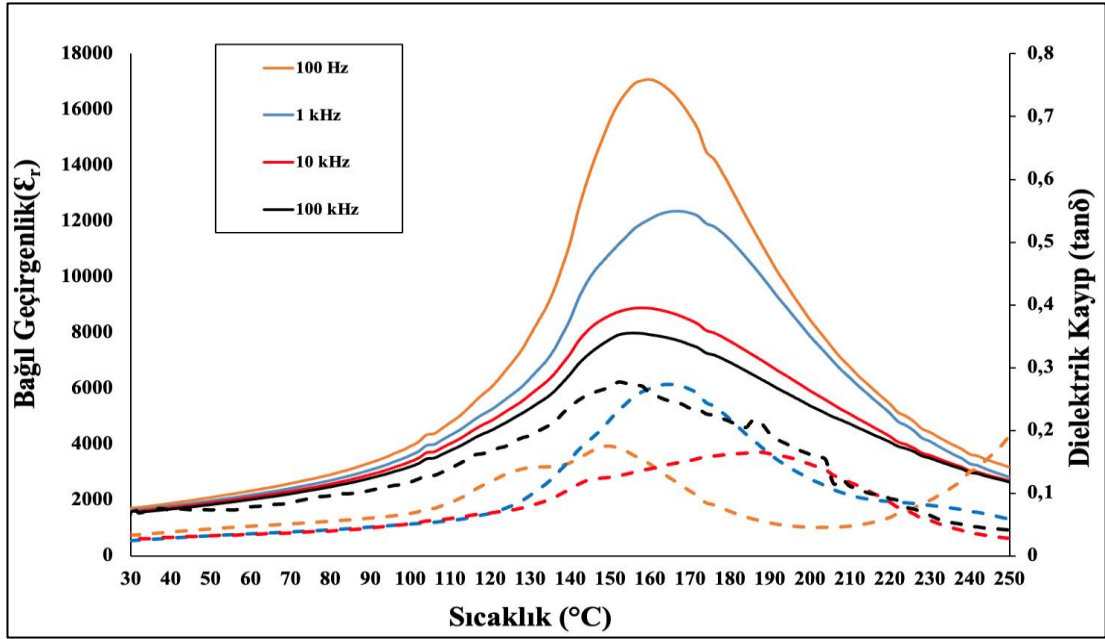
Şekil 4.6: Gerinim – Elektrik Alan Ölçümü

Üretilen 11 tane halkanın piezoelektrik katsayıları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Üretilen halkaların piezoelektrik katsayıları.

NUMUNE	$d_{33}(\text{pC/N})$
Halka 1	245
Halka 2	262
Halka 3	251
Halka 4	289
Halka 5	270
Halka 6	260
Halka 7	230
Halka 8	226
Halka 9	255
Halka 10	272
Halka 11	276
Ortalama	257,81

11 halkanın ortalama piezoelektrik katsayısı 258 olarak hesaplanmıştır. 11 halkanın arasından en yüksek piezoelektrik katsayıya sahip olan 8 halka seçilerek 2 tane dönüştürücü montajı gerçekleştirilmiştir. Bu halkalar 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11 numaralı halkalardır. Sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçüm sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir.



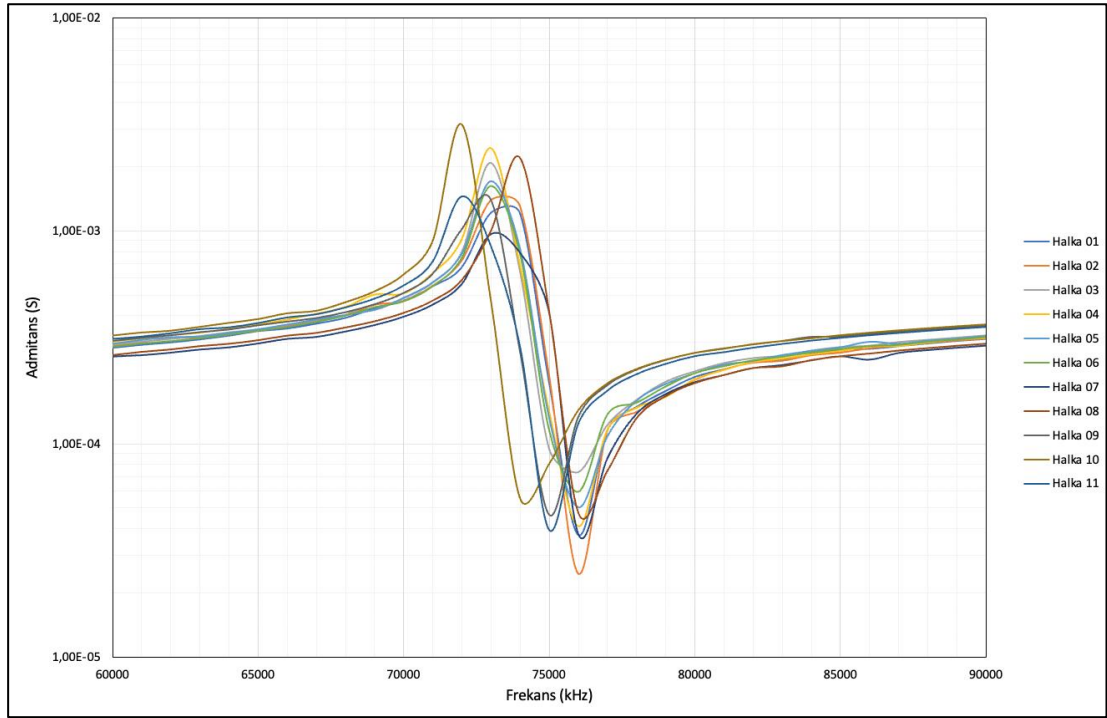
Şekil 4.7: Sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı ölçüm sonucu.

Ölçüm 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz ve 1000 kHz frekanslarda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre Curie Sıcaklığı (T_c) 160°C olarak belirlenmiştir. Yüksek Curie Sıcaklığı bu malzemelerin yüksek sıcaklıklarda da depolarize olmadan çalışabileceği anlamına gelmektedir. Frekansa bağlı olarak maksimum dielektrik sabitleri (ϵ_r) Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Frekansa göre maksimum dielektrik sabitleri.

Ölçüm Frekansı	Dielektrik Sabiti (ϵ_r)
100 Hz	17080
1 kHz	12353
10 kHz	8886
1000 kHz	7992

Halkaların frekansa bağıl admitans ölçümleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

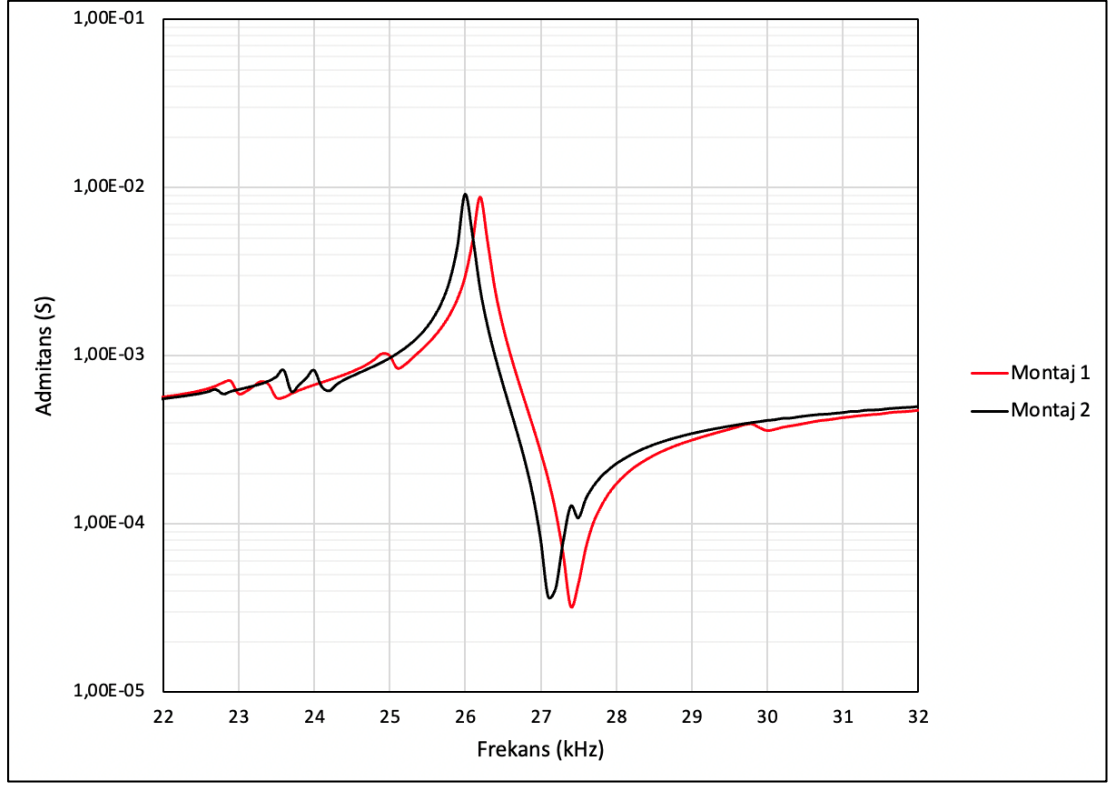


Şekil 4.8: Halkaların frekansa bağıl admitans ölçümleri.

Çıkan sonuçlara bakıldığında halkaların rezonans frekansları (F_r) 72-76 kHz aralığında değişmektedir. Dönüştürücü montajı sırasında halkalar arasında en iyi frekans eşleşmesini yakalamak amacıyla rezonans (F_r) ve anti-rezonans (F_a) frekansları birbirine en yakın olan halkalar seçilerek montaj yapılmıştır.

4.3. Dönüştürücülerin Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Dönüştürücülerin karakterizasyonu bölüm 3.1.12’de anlatıldığı gibi havada ve su altı admitans ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarından TVR değerleri denklem ile hesaplanmıştır. Daha sonra bu ölçümler geleneksel PZT 4 seramik montajları ile karşılaştırılmıştır. Montajı yapılan iki dönüştürücünün havada admitans ölçümü sonuçları Şekil 4.9’da verilmiştir.



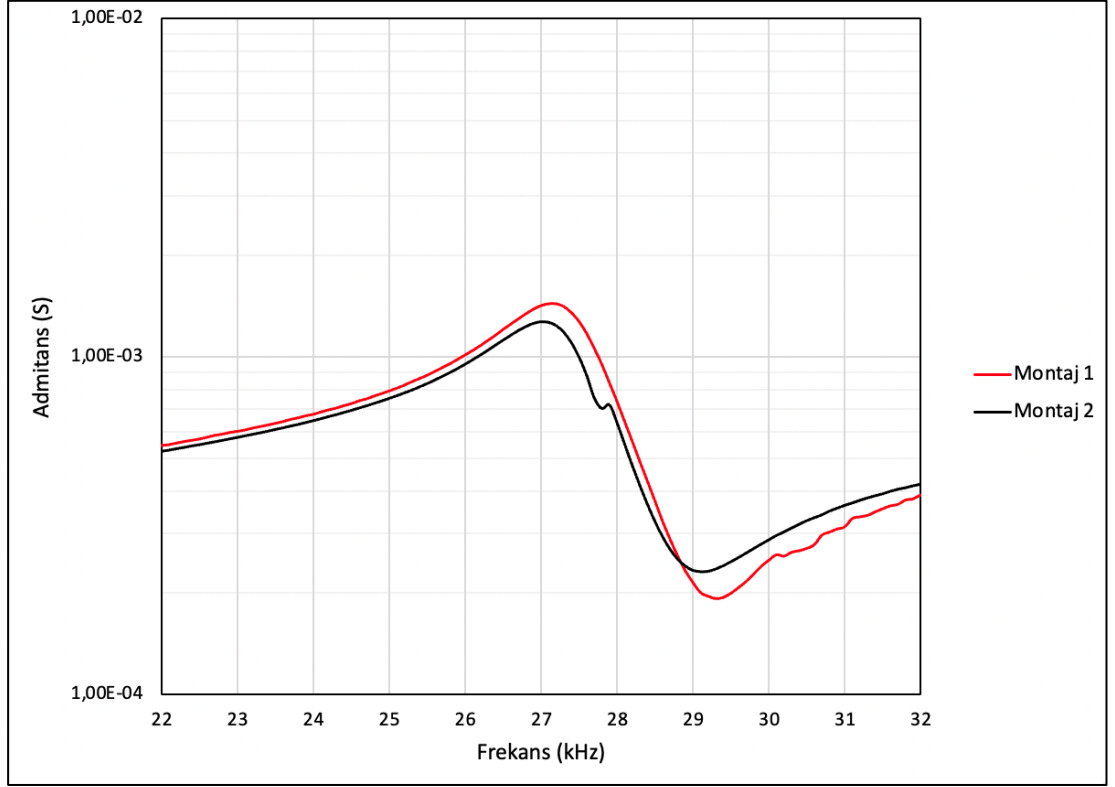
Şekil 4.9: Montajı yapılan dönüştürücülerin havada admitans ölçümü

Ölçüm sonuçlarında her iki montajın da rezonans ve anti-rezonans frekanslarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Rezonans ve anti-rezonans frekansları Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu sonuçlar montajın tekrarlanabilir bir şekilde yapıldığını göstermektedir.

Tablo 4.4: Dönüştürücülerin rezonans ve anti-rezonans frekansları.

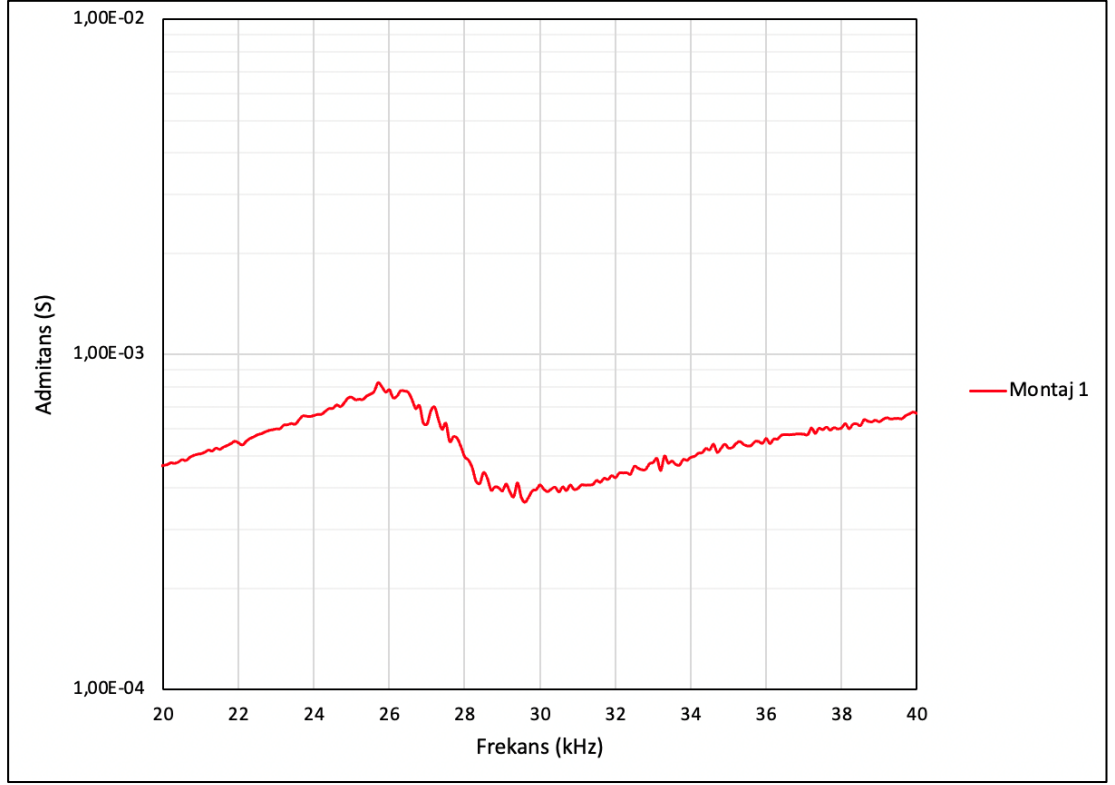
Montaj	Rezonans Frekansı (F_r)	Anti-Rezonans Frekansı (F_a)
1	26,1 kHz	27,4 kHz
2	26,0 kHz	27,1 kHz

Montaj sonrası, su altı ölçümlerinden önce dönüştürücüler PU (poliüretan) kaplanmıştır ve PU kaplandıktan sonra havada alınan admitans ölçümleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: Dönüştürücülerin PU kaplandıktan sonra havada admitans ölçümleri.

Kaplama yapıldıktan sonra gerçekleştirilen ölçümlerde rezonans piklerinde baskılanma ve rezonans frekansı civarında admitans değerlerinde azalma görülürken rezonans ve anti-rezonans piklerinde de daha yüksek frekanslara kayma gözlemlenmektedir. Admittans değerinde görülen azalma PU kaplama ile ilgilidir. Yapılan kaplama sonucunda akustik kafanın titreşim genliği daha sınırlı olmakta ve bu da admitans değerlerinde düşmeye yol açmaktadır. Rezonans ve anti-rezonans piklerindeki kaymanın nedeni ise PU kaplama sonucunda dönüştürücünün boyutlarında meydana gelen değişimdir. Kaplama sonrasında su altında yapılan admitans ölçümleri Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11: Dönüştürücülerin PU kaplaması sonrasında su altı admitans ölçüm sonuçları.

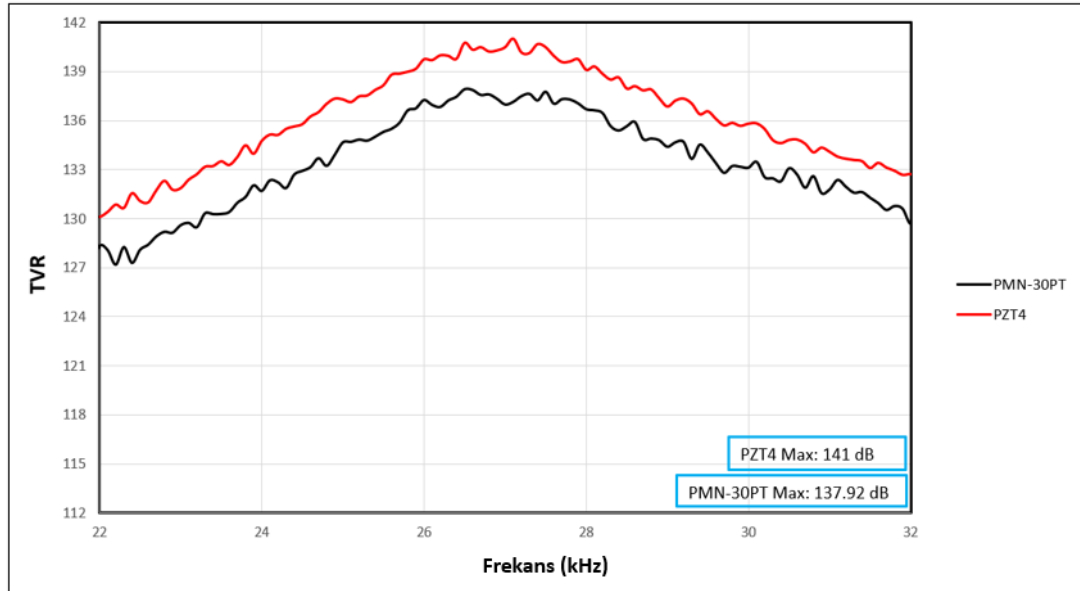
Su altı ölçümlerinde sadece Montaj 1’den sonuç alınabilmektedir. Montaj 2’de admitans değerleri çok düşük çıkmıştır. Bunun nedeni kaplama sırasında kablo bağlantılarında meydana gelen hasardır. Montaj 1’den alınan sonuçlara bakıldığında ise admitans değerlerinde bir miktar daha baskılanma ve azalma görülmüştür. Bunun nedeni su ortamıdır. Su ortamı da PU kaplamaya ek olarak kütleli bir yük yaratarak admitans değerlerinde daha da düşmeye neden olmuştur. Ölçüm sonuçlarının gürültülü çıkmasının nedeni ise ölçümlerin küçük su tankında yapılmasıdır. Küçük su tankında dönüştürücünün yarattığı dalgalar tank duvarına çarparak geri dönmekte ve dönüştürücüye tekrar ulaşmaktadır. Bu olay dönüştürücüde tekrar sinyal yaratmaktadır. Daha sağlıklı ölçümlerin alınabilmesi için su tankının boyutlarının çok daha büyük olması ve uzak alan (far field) koşullarının yaratılması gerekmektedir.

Daha sonra kaplama yapılmadan yapılan ölçümler standart PZT4 tozundan üretilen halkalar ile yapılan bir montaj ile karşılaştırılmıştır. PMN-PT ve PZT4 tozundan üretilen halkaların rezonans ve anti-rezonans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.5: PMN-PT ve PZT4 montajlarının karşılaştırılması.

Kullanılan Halka	Rezonans (F_r)	Anti-rezonans (F_a)
PMN-PT	26.1 kHz	27.4 kHz
PZT4	25.6 kHz	29.4 kHz

Rezonans ve antirezonsans frekanslarına bakıldığında PZT4 dönüştürücülerin daha geniş bir frekans aralığında (geniş bantta) çalışabilme potansiyeli olduğu görülmekle birlikte Şekil 4.12’de verilen frekansa bağlı TVR değerleri incelendiğinde PZT’ye ait söz konusu bant genişliği avantajının sualtında gözlenmediği saptanmıştır.



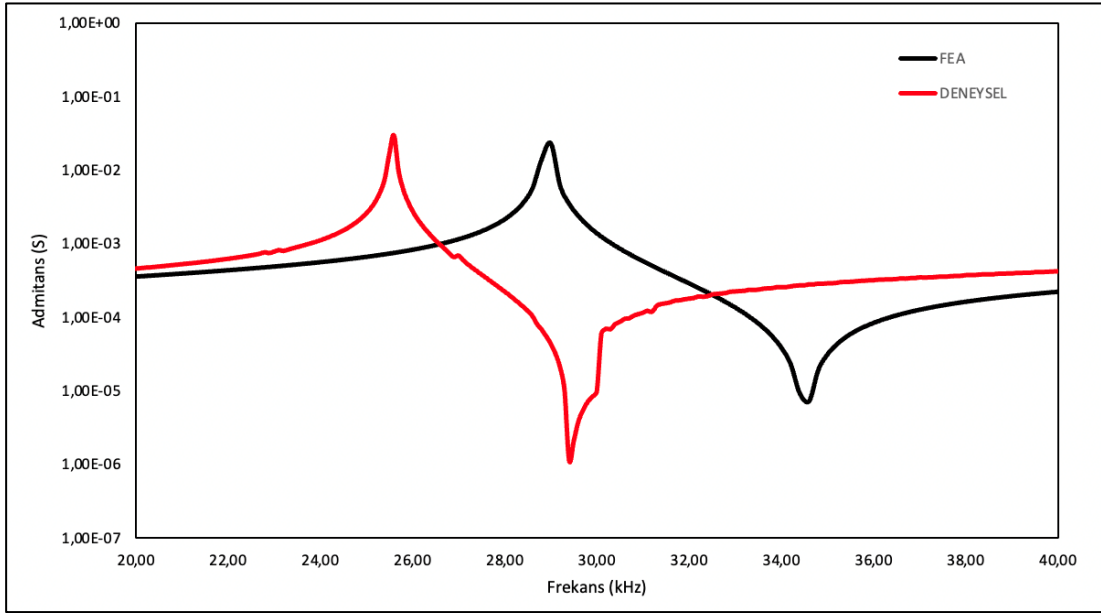
Şekil 4.12: PMN-PT ve PZT4 montajlarının TVR değerleri

TVR değerlerine bakıldığında PMN-PT ve PZT4 montajları arasında 4 dB’lık bir fark görülmüştür. Bu fark çok ciddi bir fark değildir ve her iki montaj da benzer bant genişliğine sahiptir.

4.4 SEA ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

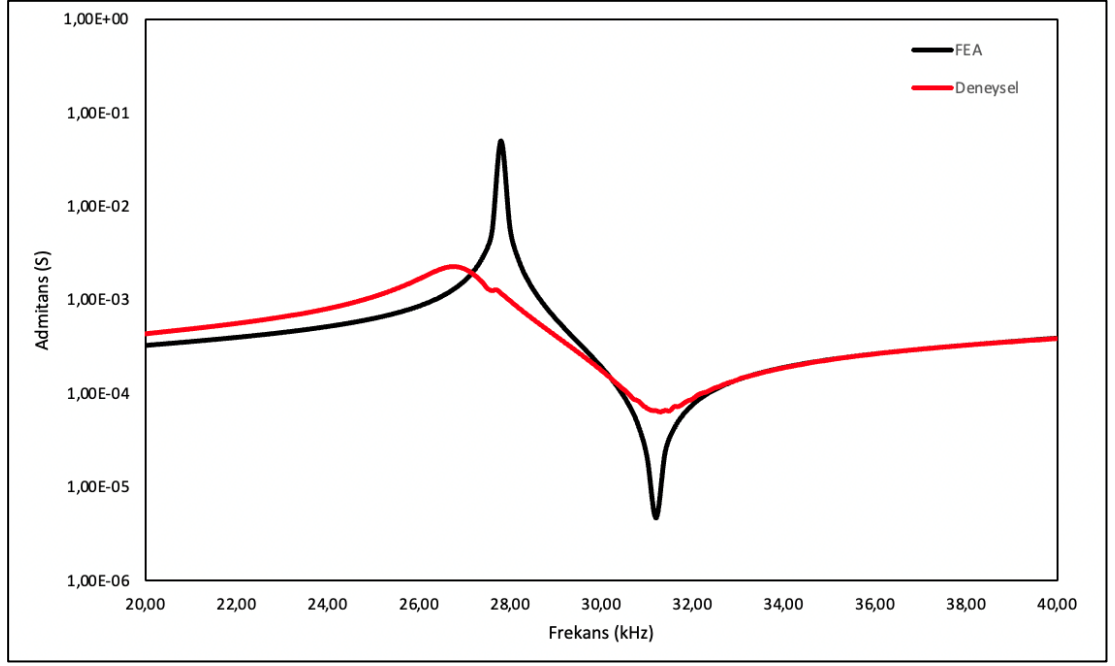
Yapılan modellemelerden sonra ATILA programında analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda çıkan admitans verileri yapılan montajların

sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



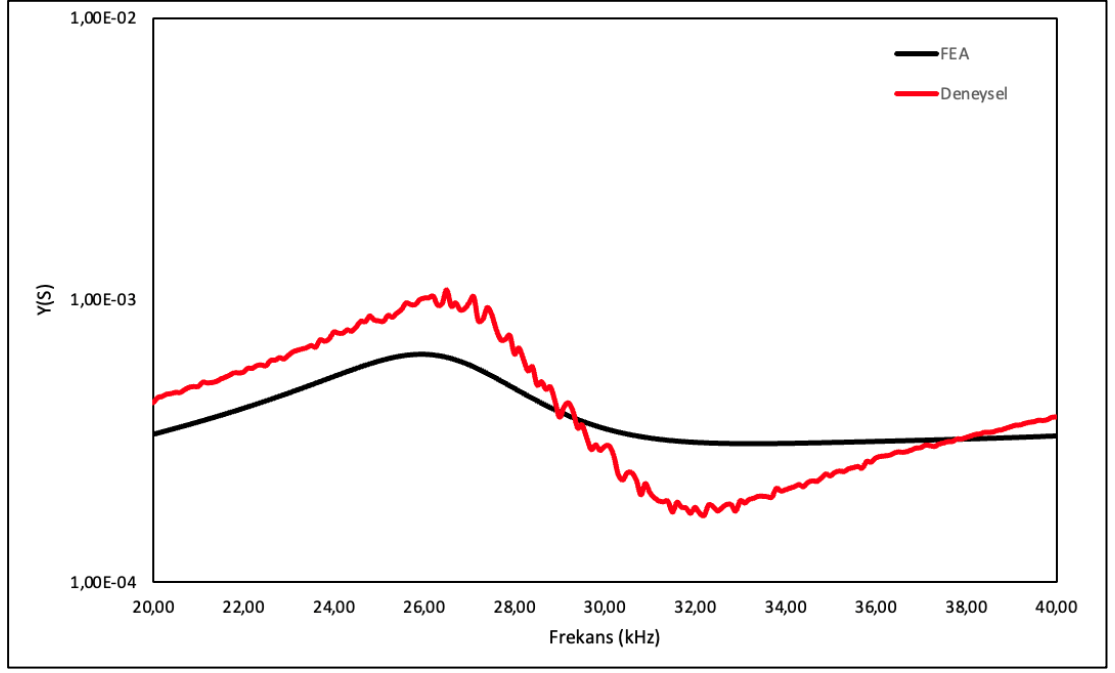
Şekil 4.13: 2 boyutlu PU kaplanmamış analiz sonuçları.

Şekil 4.12'ye göre modelleme ile deneysel sonuçlar arasında yaklaşık 4 kHz'lik bir fark görülmektedir. Bu fark dönüştürücünün montajı sırasında uygulanan ön gerilmeye bağlı olarak malzeme özelliklerinde kaçınılmaz olarak gerçekleşen değişimlerin sonlu elemanlar analiz programının veri tabanındaki malzeme özelliklerine yansıtılamamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.14: 2 boyutlu PU kaplanmış haliyle analiz sonuçları.

Şekil 4.13'te verilen ve poliüretan kaplanmış dönüştürücülere ait modelleme ve deneysel sonuçların kıyaslanmasında ise frekans açısından daha iyi bir uyum gözlenmektedir. Ancak burada sonlu elemanlar analiz yazılımının, poliüretanın kütleli yükünün admitans seviyelerinde yarattığı baskılamanın yeterince iyi hesaplanamadığını göstermektedir. Bu durum da polimer malzemelerin doğrusal olmayan elastik davranışlarının sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme özelliklerine yeterince iyi aktarılamadığını göstermektedir.



Şekil 4.15: 2 boyutlu PU kaplanmış ve su ortamına konulmuş analiz sonuçları.

Son olarak dönüştürücünün su içerisindeki admitans frekans tepkisinin sonlu elemanlar analizi ve deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlarının Şekil 4.12’de verilen kıyaslamasına bakıldığında, su altı ölçüm sonuçlarında daha iyi bir uyum elde edildiği gözlenmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada PMN-PT tozu sentezlendikten sonra üretilen halkalardan bir dönüştürücü montajı yapılmıştır. Çıkan sonuçlar geleneksel PZT4 tozundan üretilen halkalar ile üretilen bir dönüştürücü ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel PZT4 kullanılarak yapılan dönüştürücülere alternatif bir malzeme geliştirilmeye çalışılmıştır.

Katı hal kalsinasyon toz sentez yöntemi kullanılarak PMN-PT tozları elde edilmiştir. Bu tozlar kuru presleme yöntemi ile pelet ve halka haline getirilerek 1150°C sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenmiştir. Zımpara ve lapping yöntemleri ile istenilen boyutlara inceltilen peletler ve halkalar 70°C sıcaklıkta 22 kV/cm elektrik alan altında 15 dakika boyunca kutuplanmıştır. Seramiklerin ferroelektrik ve dielektrik karakterizasyonları yapılmış, sonraki aşamada ise üretilen halkaların piezoelektrik katsayısı ve frekansa bağlı admitans değerleri ölçülmüştür. Ayrıca halkaların XRD ile faz analizi ve SEM ile mikroyapısal analizleri yapılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda PMN-PT montajların 26.6 kHz frekansında 137.92 dB'lik bir TVR değerine ulaşırken, PZT4 montajlarının 27.1 kHz değerinde 141 dB'lik TVR değerine ulaştığı görülmüştür. Bant genişliği aralıkları incelendiğinde önemli bir fark görülmemiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde PMN-PT seramiğinin katkı elementleri ile modifikasyonu sonrası PMN-PT'den üretilen dönüştürücülerin PZT4 dönüştürücülerin yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Gelecek çalışmalarda bu amaçla PMN-PT'nin nadir toprak elementleri ile katkılanmasının incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Vijaya M. S., (2012), “Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences”, 978-1-4398-8788-2, CRC Press.
- [2] Jaffe B., Cook Jr. W. R., Jaffe H., (1971), “Piezoelectric Ceramics”, 0-12-379550-8, Academic Press Inc.
- [3] Tressler J. F., Alkoy S., Newnham R. E., (1998), “Piezoelectric sensors and sensor materials”, Journal of Electroceramics, 2(4), 257-272.
- [4] Safari A., Akdoğan E. K., (2008), “Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications”, Springer.
- [5] Butler John L., Sherman Charles H., (2016), “Transucers and Arrays for Underwater Sound”, Springer.
- [6] Bain Ashim Kumar., Chand Prem., (2017), “Ferroelectrics Principles and Applications”, Wiley – VCH.
- [7] Bokov A. A., Ye Z. -G., (2006), “Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure”, Journal of Materials Science, 41 (2006), 31–52.
- [8] B. Noheda, D. E. Cox, AND G. Shirane, J. Gao, AND Z.-G. Ye (2002), “Phase diagram of the ferroelectric relaxor $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ ”, Physical Review B, 66, 054104.
- [9] Li F., Zhang S., Damjanovic D., Chen L-Q., Shrout T. R., (2018), “Local Structural Heterogeneity and Electromechanical Responses of Ferroelectrics: Learning from Relaxor Ferroelectrics”, Advanced Functional Materials, 1801504.
- [10] Choi S. W., Shrout R T. R., Jang J. S., Bhalla A. S., (1989) “Dielectric and pyroelectric properties in the $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3) - \text{PbTiO}_3$ System”, Ferroelectrics, 100:1, 29-38.
- [11] Kelly J., Leonard M., Tantigate C., Safari A., (1997), “Effect of Composition on the Electromechanical Properties of $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ Ceramics”, Journal of American Ceramic Society, 80 [4], 957-64.
- [12] Choi S. W., Shrout R T. R., Jang J. S., Bhalla A. S., (1989), “Morphotropic Phase Boundary In $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ System”, Materials Letters, 8(6-7), 253-255.
- [13] Swartz S.L., Shrout T.R., (1982),”Fabrication of Perovskite Lead Magnesium Niobate”, Materials Research Bullettin, 17(10), 1245-1250.
- [14] Costa, A. ., Galassi, C., Fabbri, G., Roncari, E., Capianni, C., (2001), “Pyrochlore phase and microstructure development in lead magnesium niobate materials”, Journal of the European Ceramic Society, 21(9), 1165–1170.

- [15] Hennion-Hladky A.C., Bossut R., Alkoy S., Lopath P., Newnham R.E., (1998), "Finite Element Modeling Of Transduction Materials With Application To Piezoelectric Hollow Sphere Transducers", IEEE International Frequency Control Symposium, 0 78034373-5/98.
- [16] Hennion-Hladky Anne-Christine, Uzgur A.Erman, Markley Douglas C., Safari Ahmad, Jr., Cochran Joe K., Newnham Robert E.,(2007) , "Miniature Multimode Monolithic Flexensional Transducers", IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control, 54 (10), 1992-2000.
- [17] Berksoy-Yavuz, A., & Mensur-Alkoy, E. (2018). Enhanced Soft Character of Crystallographically Textured Mn-Doped Binary $0.675[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ – $0.325[\text{PbTiO}_3]$ Ceramics. Journal of Electronic Materials.
- [18] Tressler, J. F., Alkoy, S., Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric Sensors and Sensor materials. Journal of Electroceramics, 2(4), 257–272.
- [19] Web 1, (2020), <https://www.americanpiezo.com/apc-materials/piezoelectric-properties.html>, (Eriřim tarihi: 04/07/2023).

ÖZGEÇMİŞ

2011 yılında başladığı lise eğitimini 2015 yılında bitirdi. Aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında lisans eğitimini tamamlayarak aynı bölümde Prof. Dr. Sedat ALKOY danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi süresince ENS Piezoaygıtlar şirketinde Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı. 2022 Şubat ayından itibaren ise Pimsa Otomotiv A.Ş. şirketinde Ar-Ge Uzmanı olarak çalışmaktadır.