

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKULU PİEZOELEKTRİK SERAMİKLERDEN**  
**MİNİ TONPİLZ DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI, ÜRETİMİ VE**  
**KARAKTERİZASYONU**

**KADİR KOÇAK**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2018**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKULU PİEZOELEKTRİK**  
**SERAMİKLERDEN MİNİ TONPİLZ**  
**DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI, ÜRETİMİ VE**  
**KARAKTERİZASYONU**

**KADİR KOÇAK**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. SEDAT ALKOY**

**GEBZE**  
**2018**

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

**DESIGN AND FABRICATION OF A MINI  
TONPILZ TRANSDUCER FROM  
PIEZOELECTRIC TEXTURED CERAMICS**

**KADİR KOÇAK**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**PROF. DR. SEDAT ALKOY**

**GEBZE**  
**2018**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 28/03/2018 tarih ve 2018/19 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 02/04/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Kadir KOÇAK' 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. Ahmet ÇAPOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Cengiz KAYA

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

.../.../2018 tarih ve 2018/... sayılı kararı.

## ÖZET

Bu tez çalışmasında  $0.4\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-0.25\text{PbZrO}_3-0.35\text{PbTiO}_3$  (PMN-PZT) kompozisyonu sentezlenmiştir. Baryum titanat- $\text{BaTiO}_3$  (BT) plakasal şablon eklenerek dokulu seramik üretimi için şerit döküm yapılmıştır. Şerit döküm ile Baryum titanat- $\text{BaTiO}_3$  (BT) şablonların yönlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra döküm sonrası kurutulan şerit istenilen boyutlarda halka şeklinde kesilmiştir. Kesilen şeritler  $60^\circ\text{C}$  etüvde 30 dakika bekletildikten sonra tek eksenli presle birleştirilmiştir ve maksimum yoğunluğa ulaşması için hem bağlayıcı uzaklaştırma işleminden önce ve sonra soğuk izostatik preste yoğunluk kazandırılmıştır. Aynı işlem rastgele yönlendirilmiş seramikler için de yapılmıştır. Bu kompozisyondaki seramiklerin tez çalışmasında ticari olarak üretilen PZT5A tozuyla karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra birbiri ile aynı boyutlarda üretilen seramikler elektriksel olarak karakterize edilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme yapılarak belirlenen boyutlardaki kullanılacak olan alüminyum ve çelik kütle CNC’de işlenmiştir. Her bir mini-tonpiz için iki adet seramik kullanılmıştır. Her kompozisyondan iki adet aygıt montajı yapılmıştır. Son olarak montajı yapılan aygıtlar poliüretan kaplanarak elektriksel olarak karakterize edilmiştir. Elektriksel karakterizasyon sırasıyla montaj sonrası, poliüretan kaplama öncesi, poliüretan kaplama sonrası ve en son olarak su altı ölçümleri şeklinde yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Şablonlu Tane Büyümesi, Dokulu Piezoelektrik Seramikler, Sualtı Akustik, Mini-Tonpiz Dönüştürücüler.

## SUMMARY

In this thesis study  $0.4\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-0.25\text{PbZrO}_3-0.35\text{PbTiO}_3$  (PMN PZT) composition had been synthesized, tape casting was carried out for textured ceramic production with the addition of barium titanate- $\text{BaTiO}_3$  (BT) plate template. Barium titanate- $\text{BaTiO}_3$  (BT) templates were oriented by the tape casting process. The tapes were dried after the casting then they were cut into ring shape with the desired dimensions. After the cutting, tapes were kept under  $60^\circ\text{C}$  for 30 minutes, then joined together by uniaxial press and densified by isostatic press before and after the binder removal process. Same process was carried out for the randomly oriented ceramics as well. In this thesis study commercial PZT5A powder was used for comparison. After production, the ceramics that were produced with the same size were electrically characterized. The aluminium and steel blocks with the sizes determined by the finite elements method were processed with CNC. Two ceramics were used for each mini-tonpiz. Two devices were fabricated out of every composition. Finally, devices were electrically characterized after they were coated with polyurathane. Electrical characterizations were performed; before polyurathane coating, after polyurathane coating and finally underwater measurement.

**Key Words: Templated Grain Growth(TGG), Textured Piezoelectric Ceramics, Underwater Acustics, Mini-Tonpiz Transducers.**

## TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Sedat ALKOY'a, ve değerli katkı ve mentörlüğünden dolayı saygıdeğer hocam Doç. Dr. Ebru MENŞUR ALKOY'a,

Bütün çalışmalarım boyunca yanımda yer alan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli büyüklerim ve arkadaşlarım Arş. Gör. M.Yunus KAYA'ya, Doktora öğrencisi Ayşe BERKSOY YAVUZ'a, M.Ünsal ÜNVER'e, M.Gürkan ÖZYACI'ya, Hüseyin A. SARI'ya, Tuba YILDIZ'a, Merve TEBER'e, Yenal YALÇINKAYA'ya ve ismini sayamadığım diğer arkadaşlarıma,

Son olarak göstermiş olduğu desteklerinden dolayı çok değerli KOÇAK ailesine en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                               | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                          | v                   |
| SUMMARY                                                                       | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                      | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                   | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                                | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                               | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ                                                               | xv                  |
| <br>                                                                          |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                      | 1                   |
| 1.1. Tezin Amacı, Literatüre Katkısı ve Genel İçeriği                         | 1                   |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ                                                            | 2                   |
| 2.1. Elektrosramikler                                                         | 2                   |
| 2.2. Sramiklerde Dielektrik ve Piezoelektrik Davranış                         | 2                   |
| 2.3. Ferroelektrik ve Relaksör Özellikler                                     | 5                   |
| 2.4. Piezoelektrik Malzemeler ve PMN-PZT                                      | 8                   |
| 2.5. Ergiyik Tuz Sentezi ve Ergiyik Tuz Sentezi ile Şablon Üretimi, BT Şablon | 10                  |
| 2.6. Şablonlu Tane Büyütme Metodu ile Dokulu Sramik Üretimi                   | 11                  |
| 2.6.1. Şablon Seçimi                                                          | 14                  |
| 2.6.2. Şerit Döküm Yöntemi                                                    | 15                  |
| 2.6.3. Dokulu PMN-PZT Sramik Üretimi                                          | 16                  |
| 2.7. Su Altı Akustiğine Genel Bakış                                           | 17                  |
| 2.7.1. Su Altı Akustiğine Giriş                                               | 18                  |
| 2.7.2. Tonpils Tipi Dönüştürücüler Hakkında Genel Bilgi                       | 18                  |
| 2.7.3. Dönüştürücülerin Temelleri                                             | 21                  |
| 2.7.4. Sonlu Elemanlar Modellemesi                                            | 23                  |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR                                                        | 24                  |
| 3.1. Plakasal BaTiO <sub>3</sub> Şablon Parçacıklarının Sentezlenmesi         | 25                  |

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. 0.4Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )-0.25PbZrO <sub>3</sub> -0.35PbTiO <sub>3</sub> (PMN-PZT) Tozunun Sentezlenmesi | 28 |
| 3.3. Şerit Döküm Yöntemiyle Tane Yönlenmesi ve Şekillendirme                                                                    | 29 |
| 3.4. Şablonlu Tane Büyütme Yöntemiyle Dokulu Seramiklerin Eldesi                                                                | 30 |
| 3.5. Yapısal Analizler (XRD-SEM)                                                                                                | 31 |
| 3.6. Numune Hazırlama                                                                                                           | 31 |
| 3.7. Elektriksel Karakterizasyonu                                                                                               | 32 |
| 3.8. Tonpiliz Tipi Dönüştürücünün Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemiyle Modellenmesi                                                | 33 |
| 3.9. Tonpiliz Tipi Dönüştürücünün Montajı ve Polimer ile Kaplanması                                                             | 34 |
| 3.10. Tonpiliz Tipi Dönüştürücünün Elektriksel ve Akustik Karakterizasyonu                                                      | 35 |
| 4. SONUÇLAR                                                                                                                     | 36 |
| 4.1. PMN-PZT Toz Sentezi ve Faz Analizi                                                                                         | 36 |
| 4.2. BT Şablon Üretimi, Faz Analizi ve Mikroyapı İncelenmesi                                                                    | 37 |
| 4.3. PMN-PZT Kompozisyonuna Sahip Dokulu ve Rastgele Yönlenmiş Seramiklerin Üretimi, Faz Analizi ve Mikroyapı İncelenmesi       | 38 |
| 4.4. Tonpiliz Tipi Dönüştürücünün Sonlu Elemanlar Analizi                                                                       | 40 |
| 4.5. PMN-PZT ve PZT5A Seramiklerin Seramiklerin Karakterizasyonu                                                                | 44 |
| 4.6. Mini-Tonpiliz Dönüştürücülerin Elektriksel Karakterizasyonu                                                                | 46 |
| 4.6.1. Havadaki Karakterizasyonu                                                                                                | 46 |
| 4.6.2. Akustik Karakterizasyonu                                                                                                 | 49 |
| 4.7. Mekanik Gerilimin Seramiklerin Özelliklerine Etkisi                                                                        | 52 |
| 5. GENEL SONUÇLARIN YORUMLANMASI                                                                                                | 54 |

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

EKLER

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler ve</u> | <u> Açıklamalar</u>                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------|
| <u>Kısaltmalar</u> |                                                        |
| $2\Theta$          | : 2 Teta(X ışını yatay eksen)                          |
| $\epsilon$         | : Dielektrik Geçirgenlik                               |
| $x_T$              | : Şablon Aralığı                                       |
| $\eta_{ea}$        | : Dönüştürücünün Elektroakustik Verimliliği            |
| $^{\circ}\text{C}$ | : Santigrat derece                                     |
| %                  | : Yüzde                                                |
| $a$                | : Aktif Yüzey Yarıçapı                                 |
| Ag                 | : Gümüş                                                |
| B                  | : Süseptans                                            |
| $\text{Ba}^{+2}$   | : +2 Değerlikli Baryum İyonu                           |
| BT                 | : Baryum Titanat                                       |
| $\text{Bi}^{+3}$   | : +3 Değerlikli Bizmut İyonu                           |
| $C_f$              | : 1 kHz'deki kapasitans                                |
| cm                 | : Santimetre                                           |
| dB                 | : Desibel                                              |
| DI                 | : Yönlenme Faktörü                                     |
| $D_f$              | : Dairesel Aktif Yüzeye Sahip Tonpilz Yönlülük Faktörü |
| $d_{ij}$           | : Piezoelektrik Yük Katsayısı                          |
| $f_a$              | : Anti-Rezonans Frekansı                               |
| $f_r$              | : Rezonans Frekansı                                    |
| FEM                | : Sonlu Elemanlar Modellemesi                          |
| $f_T$              | : Şablon Sayı Frekansı                                 |
| G                  | : İletkenlik (Conductance)                             |
| Hz                 | : Hertz                                                |
| k                  | : Dalga Sayısı                                         |
| kHz                | : KiloHertz                                            |
| $k_p$              | : Elektromekanik düzlemsel bağlaşma katsayısı          |
| kV                 | : KiloVolt                                             |
| mm                 | : Milimetre                                            |

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| MPa           | : MegaPaskal                        |
| PT            | : Kurşun Titanat                    |
| PMN           | : Kurşun Magnezyum Niyobat          |
| PZN           | : Kurşun Çinko Niyobat              |
| PZT           | : Kurşun Zirkonat Titanat           |
| $P_r$         | : Kalıcı Polarizasyon               |
| $R_1$         | : Rezonans Empedans                 |
| $Q_m$         | : Mekanik Kalite Faktörü            |
| SL            | : Kaynak Seviyesi                   |
| SEM           | : Taramalı Elektron Mikroskobu      |
| ŞTB           | : Şablonlu Tane Büyümesi            |
| $\tan \delta$ | : Dielektrik Kayıp                  |
| $T_c$         | : Curie Sıcaklığı                   |
| TVR           | : İletim Gerilim Tepkisi            |
| $V_{drive}$   | : Sürüş Voltajı                     |
| $W_e$         | : Verimlilik ve Giriş Elektrik Gücü |
| Y             | : Admitans                          |
| Z             | : Empedans                          |
| XRD           | : X-Işını Kırınımı                  |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                                                           | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1 : Empedansın frekans döngüsünün fonksiyonu olarak gösterimi.                                                                  | 5                   |
| 2.2 : PMN relaksör ferroelektrik seramiğin geçirgenlik ve maksimum kaybının frekansa bağıllığı.                                   | 6                   |
| 2.3 : Relaksör ve ferroelektrik seramikler arasındaki farklar.                                                                    | 8                   |
| 2.4 : a) Şerit döküm ile şablon diziliminin gösterimi b) sıcaklıkla birlikte doku fraksiyonunun artışı.                           | 12                  |
| 2.5 : %100 Dokulu seramikler için şablon boyutu ve şablon konsantrasyonunun fonksiyonu olarak şablon tane boyutunun hesaplanması. | 13                  |
| 2.6 : Tek kristal ve farklı tip dokuların şematik gösterimi.                                                                      | 14                  |
| 2.7 : Tonpiliz tipi dönüştürücülerin temsili gösterimi.                                                                           | 19                  |
| 3.1 : Tez çalışmasının üretim aşamasını gösteren akış şeması.                                                                     | 24                  |
| 3.2 : $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ sentezi aşamaları.                                                                    | 25                  |
| 3.3 : $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sentezi aşamaları.                                                                  | 26                  |
| 3.4 : $\text{BaTiO}_3$ (BT) şablon sentezi aşamaları.                                                                             | 27                  |
| 3.5 : PMN-PZT (Molce %1.5 Mn Katkılı) kompozisyonunun hazırlanışı.                                                                | 29                  |
| 3.6 : Üretilen seramiklerin gösterimi.                                                                                            | 31                  |
| 3.7 : Kutuplama işleminin yapıldığı Trek 610 D COR-A-TROL H.V. Supply Amplifier/controller cihazı.                                | 32                  |
| 3.8 : a) Piezoelektrik yük katsayısını ölçme cihazı ( $d_{33}$ metre) b) Hioki LCR metre.                                         | 33                  |
| 3.9 : Modellemede kullanılan malzemelerin gösterimi.                                                                              | 33                  |
| 3.10: Polimer kaplama öncesi ve sonrası a) üstten b) yandan mini-tonpiliz montaj gösterimi.                                       | 34                  |
| 4.1 : 1000 °C’de 6 saat kalsine edilen Columbite $\text{MgNb}_2\text{O}_6$ tozuna ait X-Işını Kırınımı Deseni.                    | 36                  |
| 4.2 : 750 °C’de 2 Saat kalsine edilen %1,5 Mn’lı 0.4PMN-0.25PZ-0.35PT (PMN-PZT) tozunun X-Işını Kırınımı Deseni.                  | 37                  |
| 4.3 : Sentezlenen BT şablonların a) X-Işını Kırınımı Deseni b) SEM görüntüsü.                                                     | 38                  |

|       |                                                                                                                                                   |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 : | %1.5 Mn'lı PMN-PZT seramiklerin X-Işını Kırınımı Deseni.                                                                                          | 39 |
| 4.5 : | PMN-PZT seramikleri SEM görüntüleri a) BT şablonların matris içindeki dağılımı, b) matris içindeki tek bt şablon, c) ve d) dokusuz seramik.       | 40 |
| 4.6 : | ATILA modelleme birinci aşama (ana malzemelerin atanması).                                                                                        | 41 |
| 4.7 : | ATILA modelleme birinci aşama rezonans spektrumu.                                                                                                 | 41 |
| 4.8 : | ATILA modelleme ikinci aşama (polimer kaplanması).                                                                                                | 42 |
| 4.9 : | ATILA modelleme ikinci aşama rezonans spektrumu.                                                                                                  | 42 |
| 4.10: | ATILA modelleme üçüncü aşama (akustik ortamının tanımlanması).                                                                                    | 43 |
| 4.11: | ATILA modelleme üçüncü aşama rezonans spektrumu.                                                                                                  | 43 |
| 4.12: | ATILA modelleme üçüncü aşama a) TVR, b) FFVS Ölçümleri.                                                                                           | 44 |
| 4.13: | ATILA modelleme üçüncü aşama yönlülük indeksi.                                                                                                    | 44 |
| 4.14: | Üretilen seramiklerin a) admitans-frekans, b) faz açısı- frekans grafiği.                                                                         | 45 |
| 4.15: | Mini-tonpizl elektriksel karakterizasyonu, a) poliüretan kaplama öncesi admitans-frekans, b) poliüretan kaplama sonrası admitans-frekans grafiği. | 47 |
| 4.16: | Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpizl (PZT5A) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.              | 47 |
| 4.17: | Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpizl (dokusuz) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.            | 48 |
| 4.18: | Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpizl (dokulu) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.             | 48 |
| 4.19: | Mini tonpizl (PZT5A) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans, faz açısı-frekans, b) TVR ölçümleri.                                             | 49 |
| 4.20: | Mini tonpizl (Dokulu) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans, faz açısı-frekans, b) TVR ölçümleri.                                            | 50 |
| 4.21: | Mini tonpizl (Dokusuz) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans, faz açısı-frekans, b) TVR ölçümleri.                                           | 51 |
| 4.22: | Mini tonpizl (dokulu) dönüştürücünün yönlülük indeksi.                                                                                            | 51 |
| 4.23: | Dokulu PMN-PZT seramiklerin montaj öncesi ve montaj sonrası (mekanik gerilimden sonra) a) admitans, frekans, b) faz açısı-frekans grafiği.        | 52 |

|       |                                                                                                                                     |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.24: | Dokusuz PMN-PZT seramiklerin montaj öncesi ve sonrası (mekanik gerilimden sonra) a) admitans-frekans, b) faz açısı-frekans grafiği. | 53 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3.1: Birinci aşama $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ sentezi için kullanılan reçete.  | 25                  |
| 3.2: İkinci aşama $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ sentezi için kullanılan reçete. | 26                  |
| 3.3: Üçüncü aşama $\text{BaTiO}_3$ (BT) şablon sentezi için kullanılan reçete.            | 27                  |
| 3.4: $\text{MgNb}_2\text{O}_6$ tozu sentezi için kullanılan reçete.                       | 28                  |
| 3.5: PMN-PZT (Molce %1.5 Mn Katkılı) kompozisyonunun reçetesi.                            | 28                  |
| 3.6: Şerit döküm yöntemi için seramik çamur reçetesi.                                     | 30                  |
| 4.1: PMN-PZT (dokulu ve dokusuz) ve PZT5A özellikleri.                                    | 46                  |

# 1.GİRİŞ

## 1.1.Tezin Amacı, Literatüre Katkısı ve Genel İçeriği

Tonpilz tipi dönüştürücüler (transducer) sualtı sonar uygulamalarında, genellikle 3-50 kHz rezonans frekansı aralığında, projektör veya hidrofön olarak yaygın kullanıma sahiptir. Bu dönüştürücülerde temel olarak halka formunda üretilmiş piezoelektrik seramikler ana bileşen olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çerçevesinde birinci ana amaç olarak minyatür boyutta bir dönüştürücü tasarımı ile tonpilz tipi dönüştürücülerin temel rezonans frekansının 50 kHz'in üzerine çıkarılması hedeflenmiştir. Bu sayede tonpilz tipi dönüştürücülere yeni kullanım alanları açılacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada tasarım aşamasında ticari bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak optimizasyon çalışması yürütülmüş ve ayrıca optimize edilen tasarımların üretilmesi yoluyla tasarımın doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Şerit döküm ve şablonlu tane büyütme yöntemleri ile üretilen kristalografik dokulu piezoelektrik seramiklerin geleneksel yöntemlerle üretilen ve rastgele yönelime sahip piezoelektrik seramiklerden daha üstün özellikli olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında ikinci ana amaç olarak dokulu seramiklerden hazırlanan seramik halkaların literatürde ilk kez tonpilz tipi dönüştürücülerde kullanımı yoluyla aygıtın frekans bandının genişletilmesi ve akustik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

## 2.LİTERATÜR ÖZETİ

### 2.1.Elektroseramikler

Elektroseramik, terimi genel olarak elektronik, manyetik ve optik özellikleri olan seramik malzemeleri ifade etmekte kullanılır. Seramik bir malzeme elektrik alanına maruz bırakıldığında elektronik, manyetik ve optik özelliklerinde karakteristik değişiklikler meydana gelir. Elektrik alana verdikleri düzenli ve ölçülebilir tepkileri farklı teknolojik uygulama alanlarında kullanılan seramikler elektroseramik olarak adlandırılır [Kingery, 1990].

Seramik endüstrisinin en önemli yanı, diğer birçok endüstrinin yapıtaşını oluşturmasıdır. Örneğin; refrakterler, metalurji endüstrisinin esas tamamlayıcısıdır. Cam ürünler, otomotiv endüstrisi, elektrik ve elektronik endüstrisi ve mimari uygulamaların en önünde gelir. 20. yüzyılın ilk yarısında elektriksel uygulamalarda kullanılan seramiklerin bazı belirli özellikleri; kimyasal olarak kararlı olması ve yüksek elektriksel direnç göstermesidir. Ayrıca, belirtilen bu özelliklerin kullanım aralığı oldukça geniştir. Bilgisayarların ve elektronik devrelerin temeli özel çeşitli elektronik ve manyetik seramikler tarafından oluşturulmaktadır. Baryum titanat gibi oldukça yüksek dielektrik sabitine sahip olan ferroelektrik seramikler üretilmiştir. Bu seramikler, elektronik malzemeler için oldukça önemli bir yere sahiptir [Moulson A.J., 2003].

### 2.2.Seramiklerde Dielektrik ve Piezoelektrik Davranış

Dielektrikler, yüksek elektriksel direncine sahip yalıtkan ve bu özellikleri bakımından ise elektronik uygulamalarında kapasitif olarak kullanılan malzemelerdir. [Barsoum, 2003]. Dielektrikler ve yalıtkanlar birbirine benzer kavramlardır. Ancak genellikle dielektrikler sadece elektriksel olarak yalıtkan değil aynı zamanda yüksek dielektrik sabitine ( $\epsilon_r$ ) sahip malzemeler olarak tanımlanır. Çok iyi bir dielektrik malzeme iyi bir yalıtandır ama çok iyi bir yalıtkan iyi bir dielektrik malzemesi olduğu anlamına gelmez. Tüm malzemeler bünyesinde atomların bir parçası olan proton ve elektron bulundurduğundan elektriksel olarak yüklü parçacıklar içerir. Çoğu seramiklerde aynı zamanda yüklü iyonlar da bulunur.

Dielektriklerde yüklerin hareketliliği sınırlı olup ancak yükler eylemsizliklerinin üstesinden gelmek için yeterli bir enerjiye sahip olduklarında hareket ederler. İletkenlerde yüklerin hareketliliği malzeme içinde serbest bir biçimdeyken yalıtkanlar bir yük aldığı anda lokalize edilmiş bir bölgede yüklerin konumlarını korumaktadır. İletkenler ve yalıtkanlar arasındaki bu fark malzeme içindeki yüklerin bağıl hareketinden dolayı ortaya çıkmaktadır [Carter, Norton, 2007]. Dielektrik malzemeler yalıtkan olsalar da elektrik alana karşı tepki verirler. Buna bağlı olarak da dielektrik sabiti, elektrik alan altında malzemenin yük depolayabilmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Ancak dielektriklere baktığımızda enerjinin bir kısmı dielektrik kayıp ( $\tan\delta$ ) sebebiyle ısı olarak kaybolmaktadır. Bundan dolayıdır ki mükemmel bir dielektrik malzeme de yoktur.

Katılardaki piezoelektrik kavramı, tek kristal seramiklerin iç yapılarının anlaşılmasıyla başlamıştır. Bu kristaller pozitif ve negatif iyonlardan oluşmuş kimyasal bir bileşime sahip olup ve bu iyonlar kristal içerisinde belirli yerlerde tekrarlanıp kristal kafesi oluştururlar. Kafesin tekrarlanan en küçük birimine birim hücre denir ve birim hücrenin sahip olduğu simetri piezoelektrik davranışın olup olmadığını tayin eder. Ayrıca Neumann prensibine (Neumann's principle) göre kristalin iç yapısının simetrisi dış özelliklerinin simetrisini gösterir yani bir kristalin herhangi bir fiziksel özelliğinin simetrisi, bu kristalin nokta grubunun simetrisini de içermek zorundadır [Newnham, 2005].

Simetri merkezi bulunmayan kristallerde piezoelektriklik 19.yy sonlarına doğru Jacques and Pierre Curie tarafından quartz, turmalin gibi kristallerde maruz kaldığı etki kuvvetine karşı tepki olarak, kristal yüzeyinde elektrik yüklerinin birikmesiyle keşfedilmiştir. Yunanca “piezo”nun kelime anlamı sıkışma veya basınç anlamına gelir. Piezoelektrik etki, kristal malzemelerin mekanik basınç uygulandığında elektriksel yük yaratması veya elektrik alana tabi tutulduğunda mekanik şekil değişiminin meydana gelmesidir. Malzemenin mekanik basınç altında polarizasyon göstermesi düz piezoelektrik etki; bunun tam tersi olan elektrik alan uygulandığında ise mekanik şekil değişimine uğraması ters piezoelektrik etkidir [Haertling, 1999].

Bazı önemli piezoelektrik parametreler şunlardır:

- Piezoelektrik yük katsayısı ( $d_{ij}$ ): Piezoelektrik malzemede, birim mekanik gerilmeye karşılık meydana gelen polarizasyon veya piezoelektrik malzemeye uygulanan birim elektrik alana karşılık oluşan gerinim şeklinde ifade edilir.

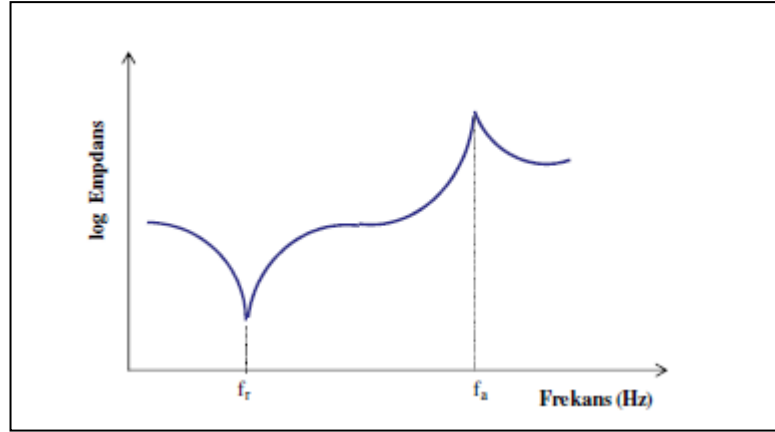
Birinci alt indis elektrik alan sıfırken malzemede meydana gelen kutuplanma doğrultusunu veya uygulanan alan kuvvetinin doğrultusunu ifade eder. İkinci alt indis ise, uygulanan gerilim veya uyarılmış gerilimin doğrultusunu ifade eder. "d" kat sayısı gerinime bağlı (eyleyici) uygulamalarda malzemenin uygunluğu için önemli bir göstergedir [APC Int. Ltd., 2002]. Örneğin;  $d_{33}$ : 3 doğrultusunda uygulanan birim gerilimin, 3 doğrultusunda (seramiğin kutuplama yönüne paralel) açığa çıkardığı kutuplanmayı ifade eder veya 3 doğrultusunda uygulanan birim elektrik alanın, 3 doğrultusunda yapmış olduğu uyarılmış gerinimi ifade eder.

- Elektromekanik düzlemsel bağlaşma katsayısı ( $k_p$ ), ince bir disk piezoelektrik seramiğin radyal titreşimlere sebep olan, 3 yönündeki uygulanan elektrik alan ile 1 ve 2 yönündeki eş zamanlı meydana gelen mekanik etkiyi temsil eder [APC Int. Ltd., 2002].

$$\frac{1}{k_p^2} = 0.395 \frac{f_r}{f_a - f_r} + 0.574 \quad (2.1)$$

$k_p$ : Elektromekanik düzlemsel bağlaşma katsayısı,  $f_r$ : Rezonans frekansı (Hz),  
 $f_a$ : Anti rezonans frekansı (Hz) [Alkoy and Papila, 2010].

- Dielektrik enerji kayıp faktörü veya dielektrik kayıp faktörü ( $\tan \delta$ ); Seramik malzeme için dielektrik kayıp açısının tanjantına eşittir.  $\tan \delta$  devreye paralel olarak bağlanan veya empedans (impedans) köprüsü kullanılarak malzemenin iletkenliğinin uygunluğuna oranından hesaplanır [APC Int. Ltd., 2002].
- Mekanik Kalite Faktörü ( $Q_m$ ); Bu parametre, elektromekaniksel rezonans spektrumun keskinliği olarak tanımlanır [Uchino K., 2000]. Mekanik kalite faktörü ne kadar büyük ise rezonans ve antirezonans pikleri de, o kadar keskin geçişlere sahiptir. Şekil 2.1 de empedansın frekans döngüsünün fonksiyonu olarak gösterimi verilmiştir [APC Int. Ltd., 2002].



Şekil 2.1: Empedansın frekans döngüsünün fonksiyonu olarak gösterimi.

$$Q_m = \frac{1}{2\pi R_1 C_f [1 - (\frac{f_a}{f_r})^2]} \quad (2.2)$$

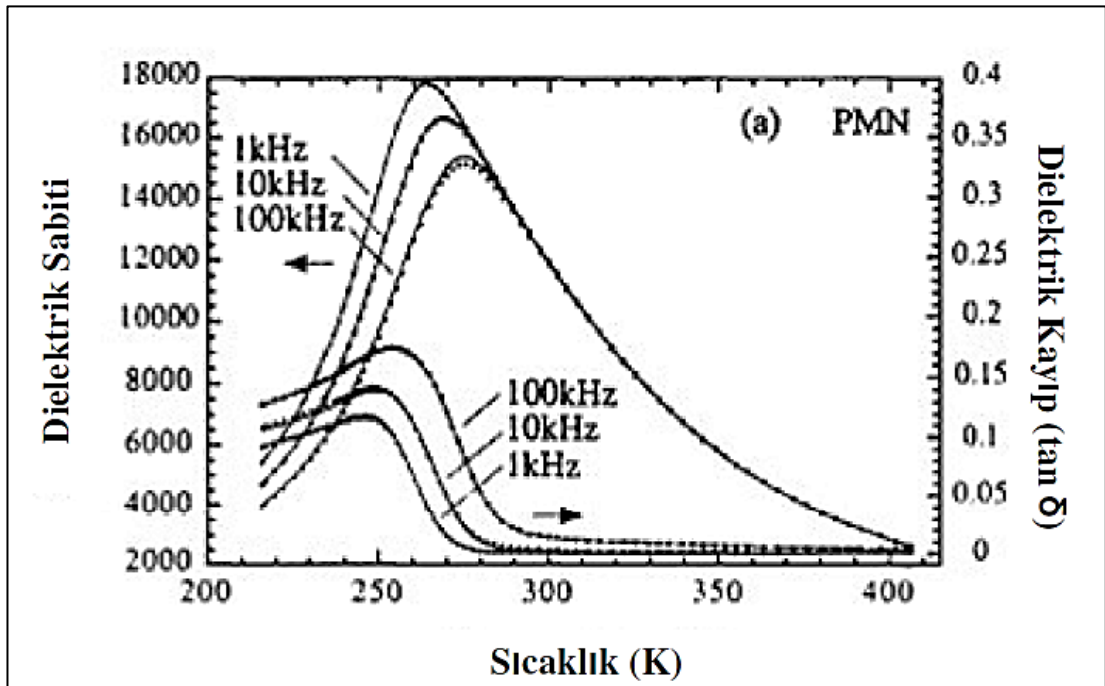
$f_r$ : Rezonans frekansı (Hz),  $f_a$ : Anti-rezonans frekansı (Hz),  $R_1$ : Rezonans empedans,  $C_f$ : 1 kHz'deki kapasitans [Alkoy, Papila, 2010 ].

### 2.3.Ferroelektrik ve Relaksör Özellikler

Ferroelektrik özellik, dielektrik malzemelerin en etkileyici özelliklerinden birisidir. Tek kristal ve polikristal malzemeler, ferroelektrik özellik sergileyebilirler. Bunun için, tersinir kendiliğinden polarizasyona sahip olmalıdırlar. Kendiliğinden polarizasyon, dışarıdan herhangi bir elektrik alan uygulanmadan malzemenin bünyesinde dipol momentleri içermesidir. Tersinir terimini ise, elektrik alan etkisi ile kendiliğinden polarizasyon yönünün yeniden yönlendirilebilmesini ifade etmektedir[Kao K.C.,2004]. Kristal yapıya bağlı olarak, elektrik alan uygulanmadan da pozitif ve negatif yüklerin merkezleri örtüşmeyebilir. Bu kristal malzemeler, kendiliğinden polarizasyona sahiptirler. Elektrik alan uygulanarak kendiliğinden polarizasyonu tersine çevrile bildiğinde ferroelektrik adını alır [Uchino K., 2000]. Ferroelektrikler,piroelektrik kristallerin bir alt grubunda yer alır. Ferroelektriklerin polarizasyonu ile piroelektriklerin polarizasyonu birbirine benzerdir. Tek fark; uygulanan elektrik alan, kristalin dielektrik bozunmasından daha az ise ferroelektrik polarizasyon, uygulanan elektrik alan ile tersinirdir. O halde, ferroelektrik malzemelerin en önemli iki karakteristikliği kendiliğinden polarizasyona sahip

olması ve elektrik alan altında polarizasyonun ters çevrilebilir olmasıdır [Kong L.B.,2008].

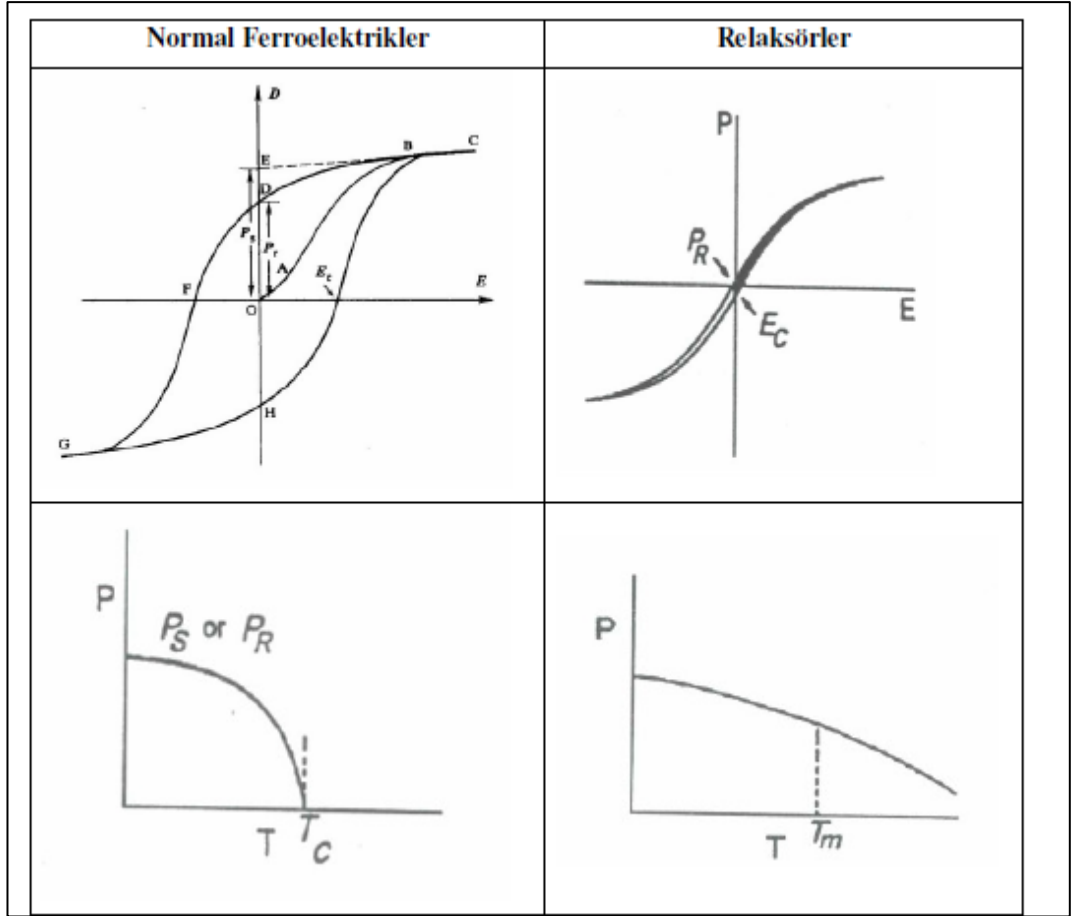
Relaksör davranış, kurşun içeren kompleks perovskit yapıya sahip sistemlerde yaygın olarak çalışılmaktadır. Relaksör ferroelektrikler, normal ferroelektriklerden belirli karakteristik özellikleri ile ayırt edilirler. En belirgin karakteristik özellikleri, sıcaklığa bağlı olarak dielektrik kayıp ( $\tan \delta$ ) ve dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon$ ) maksimum sıcaklıkta ( $T_m$ ) difuze olmasıyla ve frekansa maksimum seviyede bağımlılık göstermesidir. Relaksör sistemlerde, normal ferroelektriklere nazaran dielektrik yanıt sıcaklığa bağlı olarak keskin bir geçiş piki yerine geniş(yayvan) bir pike sahiptir. [Sheets S.A., 2000- Gonzalo J.A., 2005]. Geçirgenliğin maksimum sıcaklığı ve dielektrik kayıp, frekansın artmasıyla birlikte artar. Şekil 2.2'de  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  (PMN) relaksör ferroelektriği için geçirgenlik ve kaybın frekansa bağlı dağılımı belirtilmiştir[L. Huh-Tswen, 1996]. Maksimum sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda frekans dağılımı göz ardı edilir [Sheets S.A., 2000].



Şekil 2.2: PMN Relaksör ferroelektrik seramiğin geçirgenlik ve maksimum kaybının frekansa bağımlılığı.

Duygunluk veya dielektrik sabitinde sıcaklığın ( $T_m$ ) pik noktasının frekansa bağlı olmasına ilave olarak, relaksörler çok düşük kalıcı polarizasyon ve dönüşümdeki makroskopik faz (simetri) değişiminin varlığı ile karakterize edilirler.

Bununla beraber,  $T_m$ 'nin üstünde ki sıcaklıklarda bulunan polar nano domainlerin oluşumuna bağlı olarak nanometre ölçeğinde simetri bozulması olur ve özellikleri ciddi şekilde etkiler. Relaksörler, çok geniş dielektrik sabitine sahip olmaları sebebiyle süper kapasitörler uygulamaları için ilgi çekicidirler; son derece geniş elektrostriktif katsayıları ise eyleyiciler (actuators) ve mikro konumlayıcılar için önem arz etmektedir. Ayrıca, geniş elektro optik sabitinden dolayı, bilgi depolama, objektif kapakları (shutters) ve optik ayarlayıcılar için kullanım alanı oluşturur. Dikkat çeken özellikleri ve uygulama alanları sebebiyle relaksörler, ferroelektriğin güncel araştırma alanlarının başında gelmektedir [Samara G.A., 2005]. Elektro mekaniksel eyleyiciler, direkt olarak elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler. Piezoelektrik ve elektrostriktif seramikler, yüksek üretici (generative) kuvvet, hızlı tepki (response) zamanı, yüksek frekansta çalışabilme, kesin yer değiştirme ve küçük devre boyutları ihtiyacı duyulan uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [Park S.E, Shrout T.R., 1997]. Şekil 2.3'de normal ferroelektrik seramikler ve relaksör seramikler arasındaki elektriksel karakterizasyon farklılıkları gösterilmiştir. Buna göre, dielektrik sabiti, sıcaklık eğrisinin keskinlik ve difüzeliğe sahip olması, normal ferroelektrikler ile relaksörleri ayırt etmekte kullanılmıştır. Histerisis eğrilerine baktığımızda ise ferroelektrikler, geniş histerisis eğrisine sahip iken relaksörler, dar bir histerisis eğrisine sahiptir. Tipik relaksör ferroelektrikler, kurşun magnezyum niobat (PMN), kurşun çinko niobat (PZN) lerden oluşmaktadır. Relaksör özelliklerinin iyileştirilmesi için PT, PZT, BT ve ST ile modifiye edilirler [Kong L.B., 2008].



Şekil 2.3: Relaksör ve ferroelektrik seramikler arasındaki farklar.

## 2.4. Piezoelektrik Malzemeler ve PMN-PZT

İnsanoğlunun varoluşundan beri seramikler hayatımızın bir parçası olmuştur. Yaşadığımız teknolojik çağda, araba parçaları, çakmaklar, hoparlörler gibi günlük hayatımızda kullandığımız çeşitli eşyalarda yer alan seramikleri göz ardı etmemiz mümkün değildir. Seramiklerin kullanım alanları çok kapsamlı olsada, en ilgi çekici sınıf elektronik seramiklerdir. Bu seramikler özel kompozisyonlardan hazırlanır ve kontrollü bir işleme tabi tutulurlar. Piezoelektrik seramikler de değişik alanlarda sıkça tercih edilen elektronik seramikler içerisinde yer almaktadır.

Piezoelektrik, belirli bir seramik grubunun sahip olabileceği elektriksel bir özelliktir. İlk olarak 1880’de Pierre ve Jacques Curie’nin kuartz ve çinko üzerindeki çalışmaları esnasında keşfettikleri piezoelektriğin, yapılan sonraki araştırmalarda, özel bir kristal yapıya ve kompozisyona sahip seramiklerde görüldüğü ortaya çıkmıştır. Bu keşiften sonraki 40 yıl içerisindeki çalışmalar göstermiştir ki, baryum

titanattan yapılan seramiklere yüksek statik elektrik alanı uygulandığı takdirde piezoelektrik özelliğe rastlanabilmektedir. Ancak baryum titanatın yapısal bazı nitelikleri, piezoelektriksel özelliğinin ortaya çıkmasına engel teşkil etmektedir. Bu durum başka piezoelektrik seramiklere de gereksinim duyulduğunu ortaya çıkartmıştır. Yapılan daha geniş çaplı araştırmalar, kurşun titanat-kurşun zirkonat sisteminin varlığını kanıtlamıştır.

Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması piezoelektrik, piroelektrik ve ferroelektrik olarak farklılıklar içerir. Dielektrik malzemelerin özel bir sınıfı olan piezoelektrik malzemeler nonsentrosimetrik kristal yapılarından dolayı transdüser karakteristik gösterirler. Bazı piezoelektrik malzemelerin kendiliğinden sahip olduğu polarizasyon artan sıcaklıkla birlikte azalır. Bu sınıfa piroelektrik malzemeler deniliyor. Bu piroelektrik malzemelerin bazılarında dışarıdan uygulanan elektrik alanla birlikte kendiliğinden polarizasyona yeniden yön verilebilir. Bu gibi malzemeler ferroelektrik malzemeler olarak sınıflandırılır. Böylece ferroelektrik malzemeler piroelektrik ve piezoelektrik karakteristiğe sahip olabilirler.

Ferroelektrik malzemeler ferroelektrik olmayan malzemelerden daha iyi piezoelektrik ve piroelektrik karakteristik gösterirler. Çoğu piezoelektrik cihaz ferroelektrik malzemelere bağlı olarak dönüştürücü ve eyleyici karakteristiği ferroelektrik olmayan piezoelektrik malzemelere göre daha iyidir. Kuartz ferroelektrik olmayan piezoelektrik malzemeye örnektir. Dönüştürücü veya eyleyici olarak kullanılamaz ama resanatör ve sensör olarak kullanılabilir. Kuartz tek kristali resanatör uygulamaları için oldukça uygundur çünkü dirençli mekanik karakteristiğe sahiptir [Vijaya M.S. ,2013].

Yüksek güç uygulamaları için sert ve yumuşak karakterlerin birlikte olduğu modifiye edilmiş PZT esaslı seramikler gereklidir. Genellikle, PZT çeşitli oranlarda kompleks bir A veya B-yeri iyonu (Pb bazlı relaksör tipi malzemeler) ile modifiye edilir ve bu bileşime bazı akseptör iyon eklenir. Relaksör tipi bileşen eklendiğinde akseptör iyon mekanik kalite faktörünü artırıp dielektrik kaybı azaltırken malzemenin piezoelektrik özelliğinin arttığı görülür [Yan, 2011].

Hem PMN hemde PZT kurşun esaslı piezoelektrik malzeme ailesinde yer almaktadır. Elektronik ve mikroelektronik cihazlar için cihazlar için umut vadeden adaylardır. PMN seramikler yüksek dielektrik özellik, düşük kayıp, histerik olmayan davranış ve düşük sinterleme sıcaklığı sergilerken curie sıcaklığı oda sıcaklığının altında kalır. Piezoelektrik seramiklerden biri olan PZT yüksek dielektrik ve

elektrosikriktif özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılır. Buna rağmen uygulama alanlarını kısıtlayan düşük sıcaklıklarda ki düşük piezoelektrik özellikler ve yüksek curie sıcaklığı gibi bazı dezavantajları vardır. Bundan dolayı PMN'nin PZT'ye katılmasıyla her iki seramiğin karışık özelliklerini ifade eden yeni bir ürünün oluşmasına neden olur.

Kurşun esaslı piezoelektrik seramiklerde ki en büyük problem düşük dielektrik özellik sergileyen pyroclor fazının oluşmasıdır. PMN seramiklerde pyroclor fazının oluşması çok kolaydır, tek fazlı PMN'i üretmek için sentez yöntemlerini kullanmak çok önemlidir. PMN-PZT seramiklerini üretmenin en kolay yolu toz karışım metodudur, PMN ve PZT tozları ayrı ayrı sentezlenir ve sonra birlikte karıştırılır ve PMN-PZT seramiklerini üretmek için sinterlenir. PMN ve PZT tek fazlı tozları üretmenin farklı yolları da vardır. PZT tek fazlı seramikler katı hal reaksiyonu, mekanik aktivasyon veya sol-jel metodlarıyla ile üretilebilirler. Tek faz PMN sentezi için gerekli daha fazla özel yol vardır, örneğin columbite metodu, mekanik aktivasyon prosesi, reaksiyon sinterleme prosesi ve sol-jel metodu gibi özel proseler vardır [Moetakef P., Nematı Z.A., 2009].

## **2.5.Ergiyik Tuz Sentezi ve Ergiyik Tuz Sentezi ile Şablon Üretimi ve BT Şablon**

Ergiyik tuz sentezi ile oksitli ve karbonatlı bileşiklerden kompleks oksitli seramiklerin sentezini sağlayan en önemli seramik toz üretim yöntemlerinden birisidir. Ergiyik tuz sentezi, düşük ergime noktasına sahip tuzun reaktanlara eklenmesi ve tuzun ergime noktasının üstünde bir sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Burada ergiyik tuz çözücü olarak davranır. Ergiyik tuz sentezi ile birlikte toz karakteristiği (boyut, şekil vs.) kontrol eden bir çözücü olarak çok büyük miktarlarda kullanılmaya başlandı. Ergiyik tuz sentezinde kullanılan tuzlar genellikle kloritler ve sülfatlardır. Genel olarak amaç tuzların ötektik karışımını kullanarak sıvılaştırma sıcaklığını düşürmek ve reaksiyon hızını artırmaktır [Kimura T., 2011].

Tabaka şeklindeki tek kristaller son zamanlarda dokulu seramiklerin üretilmesinde etkili bir yöntem olan şablonlu tane büyümesi (ŞTB) işleminde şablon çekirdekleri olarak kullanılması nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmüştür.

ŞTB prosesi boyunca tabakasal parçacıklar matris tozuyla karıştırılır ve şerit döküm yöntemiyle hizalanır. Matris taneleri şablonlar üzerinde epitaksiyel olarak büyür ve ısıtıl işlem sonucu dokulu seramikler oluşur. Şablon parçacıklarının yapısı, şekli ve boyutu da dahil olmak üzere karakterleri, nihai üründe kritik faktörlerdir [Liu , 2007].

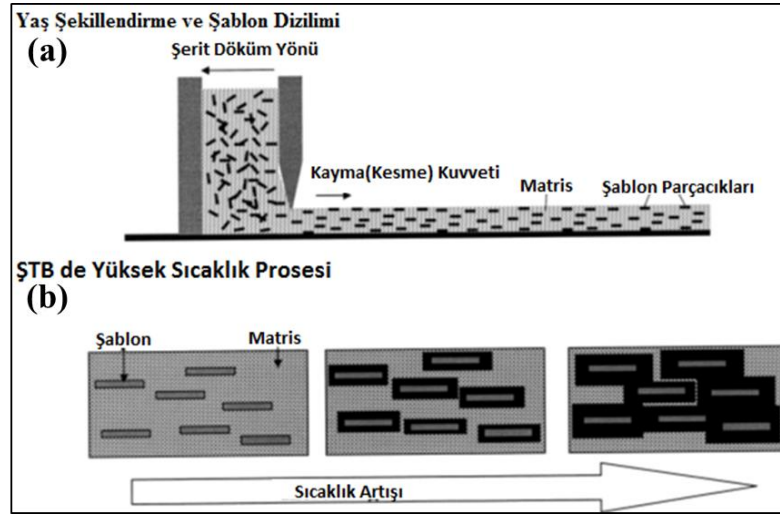
Mikron ölçeğinde tabakasal baryum titanat, iki aşamalı bir ergiyik tuz ve topokimyasal teknik kullanılarak sentezlenir. Levha benzeri  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  ilk olarak ergiyik tuz sentezi ile öncül olarak sentezlenir. Sonra, öncül içindeki  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  ile değişimi topokimyasal reaksiyon vasıtasıyla gerçekleşir ve perovskit-yapılı  $\text{BaTiO}_3$ 'ü oluşur [Liu , 2007].

BT şablon parçacıkları tek aşamada üretildiği zaman yüksek simetrisinden dolayı tek kristal kübik yapıda büyümektedir. Bu da doku gelişimi sırasında yüksek dereceden bir yönlenmenin önüne geçer ve diğer bir başka sorun ise büyük kübik parçacıklardan dolayı seramikte anormal tane büyümesine yol açarak seramiğin parçalanmasına sebep olmaktadır [Dursun S.,2017].

## **2.6.Şablonlu Tane Büyütme Metodu ile Dokulu Seramik Üretimi**

Dokulu piezoelektrik seramiklerin üretilmesi yönelik ilk çalışmaların çoğu ya tanelerin plastik deformasyonu ile anizometrik tanelerin yönlenme işlemini takip eden sinterleme işlemi ile ya da bir sıcaklık gradyanında cam seramikleri kristalize etmek için sıcak dövme yöntemleri kullanılır. Bu yaklaşımların maliyet, büyük numuneler elde etme, bileşim veya tamamen yoğun malzemeler elde etme konularında sınırlamaları vardır. Şablonlu tane büyümesi (ŞTB) yaklaşımı bu sınırlamaların birçoğunu önlemektedir. Dokulu malzemelerin şablonlu tane büyümesi (ŞTB) yoğun mikroyapıda yönlendirilmiş büyük parçacıkların tercihli büyümesinden faydalanmaktadır. Dokulu malzemeleri üretmek için az olan büyük şablon parçacıklarının görece ince ve eş partiküllerden oluşan matris içerisinde dağıtılır. Başlangıçta şablon parçacıkları rastgele yönlenmiş durumdadır fakat daha sonra üretim boyunca yönlendirilirler. Şerit döküm ve ekstrüzyon gibi kesme şekillendirme prosesleriyle yönlendirmenin kolay olması için şablon parçacıkları anizometrik olmalıdır [Messing G. L., 2004].

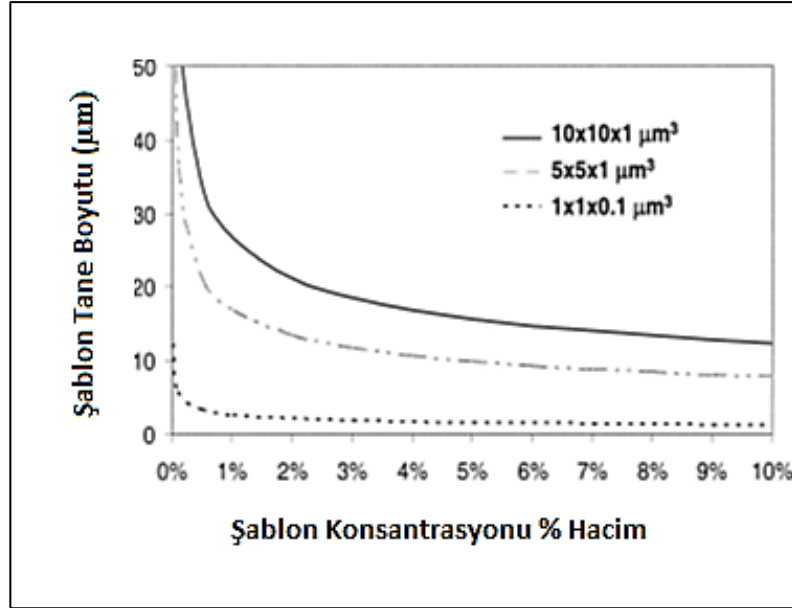
Aşağıda Şekil 2.4 de Şablonlu tane büyümesi prosesi ve sıcaklıkla birlikte mikroyapı oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.4: a) Şerit döküm ile şablon diziliminin gösterimi b) Sıcaklıkla birlikte doku oranının artışı.

Şablonlu tane büyümesi sırasında şablon boyutunun ve konsantrasyonunun mikroyapı üzerinde ki etkisini tahmin etmek için, şablon yükleme ve boyutuna dayanarak komşu şablon parçacıklarının ortalama merkez-merkez mesafesini hesaplamak yararlı olur. Dokulu bir malzemenin tamamen büyüdüğünü varsayarsak son büyütülen tanenin boyutu Eşitlik 2.3'e göre şablon sayı frekansına ( $f_T$ ) bağlı olan şablonların aralığıyla ( $x_T$ ), aynı olacaktır [Messing G. L., 2004].

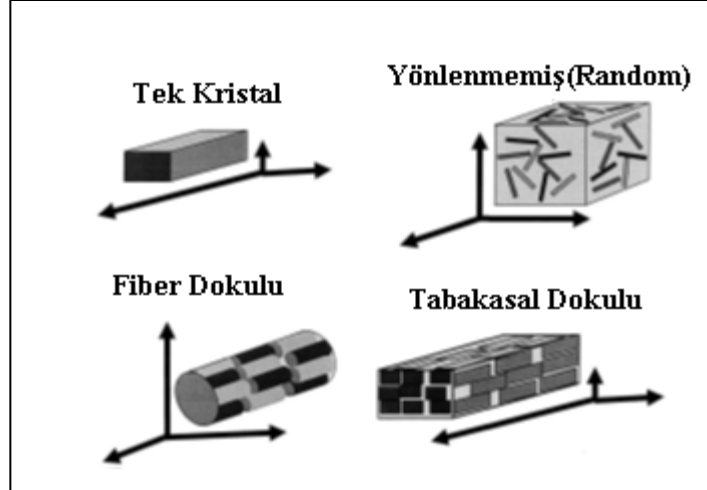
$$x_T = \left(\frac{6}{\pi f_T}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$



Şekil 2.5: %100 Dokulu seramikler için şablon boyutu ve şablon konsantrasyonunun fonksiyonu olarak şablon tane boyutunun hesaplanması.

Eşitlik 2.3 de eşit mesafe aralıklı parçacıkların bir 2-B latis varsayımı ile türetilir. Şekil 2.5 de %100 dokulu malzemeler için hacimce yüzde şablon miktarının fonksiyonu olarak şablon tanelerinin boyutunu gösterir (kenar uzunluğu 10 mikrondan büyük şablonlar ve kenar uzunluğu 1 mikrondan büyük şablonlar için). Eşitlik 2.3'den, dokulu malzemelerin içeriğinde bulunan şablonların tane boyutları hacimce %1 ve kenar uzunluğu 1 mikron olan şablonun tane boyutu 3 mikron olarak tahmin edilir ve buna karşılık 27 mikron tane boyutuna sahip olan şablonun hacimce %1 olduğunda ki kenar uzunluğu da 10 mikron olduğu görülür. Şablon büyümesi Kwon tarafından fiber dokulu PMN-32.5PT ye  $\text{SrTiO}_3$  şablonu eklenerek ilişkilendirilmiştir. İlk analizler oldukça basittir çünkü şerit döküm tekniği sırasında şablon parçacıkları rastgele dağılır ve bu nedenle şablon taneleri arasında çarpma öncesi büyüme miktarı değişir. Daha önce ki analizin basitliği şablon parçacıklarının rastgele dağılmış olduğu sistemde şablonlu tane büyümesinin (ŞTB) modellenmesi gerektiğini açıkça ortaya koyar ve aynı zamanda yüksek doku fraksiyonu elde etmek için yalnızca küçük miktarlarda büyüme gerektiğini gösterir. Yönlendirmenin kaç eksene bağlı olduğu kontrol edilir, fiber veya çift eksenli (tabakalı) doku elde etmek mümkündür. Açıkça iki eksenli yönlendirme tercih edilir çünkü tek kristal özelliklerini daha iyi taklit eder fakat tabakasal dokuya erişmek, şablon tanelerini en azından 2 yönde yönlendirme kabiliyetine bağlılık gösterir. Kübik malzemeler sentez sırasında

morfolojik dokuyu gösterme eğiliminde olmazken simetrik olmayan kristalografi esaslı büyüme anizotropisinin bir sonucu olarak güçlü morfolojik dokuyu göstermek tedir [Messing G. L., 2004].



Şekil 2.6: Tek kristal ve farklı tip dokuların şematik gösterimi.

### 2.6.1. Şablon Seçimi

ŞTB tarafından dokulu malzeme üretmek için birtakım kriterlerin karşılanması gerekiyor. Şablon parçacıkların büyümesi (1) matris malzemesine göre şablon parçacığın termal ve kristalografik özellikleri (2) şablon büyümesi için uygun termodinamik ve kinetik şartların sağlanması durumlarına bağlıdır. Büyüme miktarı ve dolayısıyla doku derecesi şablon parçacıklarının sayısına, boyutuna ve matris içinde ki dağılımına bağlıdır. Doku kalitesi (derecesi ve yönlenmesi) şablon parçacıklarının başlangıç yönlenmesine bağlıdır. ŞTB ile dokulu malzemelerin eldesi temel olarak yaş proses boyunca seramik bünye içerisinde ki şablon parçacıkların başlangıç dizilimine ve yüksek sıcaklık işlemi sırasında da yönlenmiş şablonlarda istenilen fazların büyümesine ve epitaksiyel çekirdeklenmeye bağlıdır. Bu nedenle ŞTB’de önemli bir fiziksel bileşen epitaksi için altlık görevi gören ve aşırı tane büyümesi için çekirdek görevi gören şablon parçacıktır. Epitaksi, tanelerin küçük gruplaşmasının kristalografik dizilimini belirler yönlenmiş aşırı büyük taneler olarak da düşünülebilir. Böylelikle aşırı tane büyümesi ile dokulu malzemenin hacim fraksiyonu artar. Şablon parçacıkları, benzer bir kristal yapıya sahip olmalı ve istenilen fazla birlikte kafes parametreleri arasında ki uyumsuzluk %15 den az

olmalıdır. Şablon fazı, yüksek sıcaklıkta yönlendirilmiş şablon parçacıklarından çekirdeklenebilir ve büyüyebilir olmalıdır. Şablon parçacığı, yaş şekillendirme esnasında uygulanan bir kesme kuvveti altında mekanik olarak yönlendirilebilecek şekilde uygun olarak yüksek bir en boy oranında (aspect ratio) bir morfolojiye (iğnemsî, yaprak, levha) sahip olmalıdır. Şekil anizotropisi, proses sırasında şablon yönlendirmede faydalı bir özellik olmasına rağmen, hizalama için başka yöntemlerin (örneğin manyetik alan) olup olmadığını gerekli değildir. Dokulu yapıyı elde etme amacının doğrudan kristalografik yönelime ilişkin fiziksel özelliklere (termal iletkenlik, dielektrik geçirgenlik, piezoelektriklik, elektrik iletkenliği gibi) erişmek olduğu durumlarda, şablon eksenini istenilen kristalografik yönelimle eşleşirse tercih edilir. Ayrıca şablon parçacığı, bulunduğu matris içerisinde termodinamik olarak stabil olmalı yani şablon parçacığı matris içerisinde reaksiyona girmemeli ve matris içerisinde çözünmemelidir. Çoğu ŞTB sistemi sıvı faz içerdiğinden dolayı şablon büyüme sıcaklığında da sıvı faz mevcudiyeti olacağı için şablonun yeterli kararlılığı göstermesi gerekir. Diğer bir deyişle şablon yüzeyinde istenilen fazın oluşmasını engelleyecek ikinci bir fazı oluşturmak için sıvıyla reaksiyona girmemelidir [Messing G. L., 2004].

### **2.6.2. Şerit Döküm Yöntemi**

Şerit dökümüne doktor bıçağı veya bant dökümü de denir. Seramik çamuru hareketli bant üzerinde yayılır, kurutulur, bant üzerinden kaldırılır ve bir sonraki işleme tabi tutulmadan önce sarılır. Çamur asıltı dökümde kullanılan çamura göre farklıdır çünkü sıvı faz giderildiğinde seramik parçacıkları için çok daha kuvvetli bir bağlayıcı olarak davranmalıdır. Su bazlı çamurlar bağlayıcı olarak polivinly alkol, plastikleştirici olarak gliserin, dağıtıcı olarak ta amonyum polyakrilat içerirler. Daha çok organik çözücülerin karışımının içeriği örneğin polivinly alkol, dibütil fatalat ve faty acid dağıtıcı maddelerine bağlıdır. Vakum uygulayarak seramik çamurdan hava kabarcıkları giderilmelidir ve sinterlemede arkasında boşluk bırakacak yabancı maddeleri yapıdan kovmak gereklidir. Bant çok parlatılmış paslanmaz çelikten olabilir veya uygun bir polimerden taşıyıcı tabaka olabilir. Çamur ile dolu olan haznenin altında hareket eder ve çamurunda yayılabilmesi için haznenin bir kenarının yeterince yükseltilmiş olması gereklidir. Çözücünün uçurulmasına sıcaklık

veya filtrelenmiş hava akımı yardımcı olabilir. Kalın filmleri ( $>0.5$  mm) başarılı bir şekilde kurutması zordur çünkü film yüzeyi ilk yanlardan çekmeye başlar ve kenarların hareketi kısıtlandığı için çatlaklar oluşur ve kalan kısımdan daha hızlı kururlar. Uygun çözücü bileşimleri ve ince tabakalarla birlikte filmler düzgün şekilde kurur. Banda yapışma yanal çekmeleri önler ve bu aşamada çekme tamamen kalınlıkta meydana gelir. Dolayısıyla, sinterleme sırasında yanal çekme, kalınlıkta ki büzülmeden yaklaşık 4 kat daha fazladır (örn: %20 ye %5 gibi).

Yukarıda ki varsayımlar üzerinde değişiklikler vardır. Örneğin, hazne sabit bir taşıyıcı film üzerinde hareket edebilir. Her iki yüzeyde de polimer şerit çekerek boydan boya ince tabakalı çamur elde etmek mümkündür. Hacimce %30 dan fazla bağlayıcı gibi organik katıları içermesi ve çözücülerin uçurulması yüzünden döküm filmi gözenekli yapıya sahiptir. Organik malzemeleri yaktıktan sonra nispeten yüksek gözenekliliğe rağmen, döküm filmi yüksek yoğunlukta sinterlenebilmektedir [Moulson A.J., Herbert J.M., 2003].

### **2.6.3. Dokulu PMN-PZT Seramik Üretimi**

Dokulu PMN-PZT elde etmek için (0.4PMN-0.25PZ-0.35PT) kompozisyonu seçilmiştir.  $MnO_2$  katkılı (0.4PMN-0.25PZ-0.35PT) kompozisyonunu kristalografik yönlenmiş olarak üretmek için tek faz olarak üretilen plakasal  $BaTiO_3$  şablonlar kullanılmıştır. (0.4PMN-0.25PZ-0.35PT) tozu + bağlayıcı çözeltisine %3 BT şablonlar eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan döküm karışımında ki fazladan çözücü (metil etil keton/etanol karışımını) uçurulduktan ve karışım şerit döküme uygun kıvama (viskoziteye) getirilmiş ve şerit döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Şerit döküm işleminden sonra şerit kurutulmuştur. Laminasyon (katmanlama) ve presleme işlemi için istenen şekillerde kesilen katmanlar üst üste (yaklaşık 30-40 lamine) getirilerek tek eksenli pres ile preslenmeye uygun hale getirilmiştir. Daha sonra 20MPa altında tek eksenli pres ile preslendikten sonra numuneler faz, mikro yapı, elektriksel karakterizasyon için bağlayıcı uzaklaştırma ve takiben sinterleme işlemi için hazır hale getirilmiştir [Dursun S., 2017].

## 2.7. Su Altı Akustiğine Genel Bakış

Sesin sudaki duyulabilirliği ilk Aristo tarafından belirtilmiştir [Bjorno, L., 2002]. Akustikte ki fiziksel anlayış Marin Mersenne ve Galileo tarafından birbirinden bağımsız olarak telin titreşimi yasalarının keşfedilmesiyle ilerletilmiştir. Mersenne sesin havada ki hızını ölçmüştür ve bu çalışma 1620'lerde L'Harmonie Universelle de yayınlanmıştır. Daha derin bir yaklaşım Lord Rayleigh (John William Strut) tarafından gelmiştir. Ses dalgalarını matematiksel olarak tanımladı ve bu dalga denklemini Theory of Sound kitabında belirtti [Urick, R. J., 1983].

Ses teorisi hakkında ki ilk çalışma Isac Newton tarafından 1687 de Mathematical Principles of Natural Philosophy adlı çalışmasında gelmiştir. Newton'un odak noktası havada ki ses ile sınırlıydı, aynı matematiksel eşitlikler ve prensipler su altı akustiği için de geçerlidir [Çiçek M., 2014].

Suyun içinde ki ses hızı İsviçreli bir bilim adamı tarafından yürütülen deneyde bulundu," Daniel Colladon ve Fransız matematikçi Charles Sturm, Cenevre Gölünde Eylül 1826 " [Bjorno L., 2002].

Dönüştürme mekanizmalarının keşfi, su altı akustiğinin gelişimi üzerinde büyük etkilere sahiptir. Bu mekanizmalardan biri, manyetik alan altında manyetik malzemenin boyutundaki değişimi gösteren James Joule tarafından keşfedilen manyetostriksiyon deneylerine dayanmaktadır. Sualtı akustiğinin gelişimi için önde gelen bir buluş, 1880'de Jacques ve Pierre Curie kardeşler tarafından piezoelektrik etkinin keşfedilmesidir [Sherman C. H., Butler J. L., 2007].

Piezoelektrikliğin keşfi dönüştürücü teknolojisine yol açtı. Piezoelektrik malzemeler, değişen bir voltaj uygulandığında genişler ve daralarak ses dalgaları üretebilir. 1917'de Fransız bilim adamı Paul Langevin, eko-ölçme sistemi oluşturmak için piezoelektrik etkiyi kullanan ilk kişi oldu. Dönüştürücü teknolojisinde ki gelişme malzeme biliminde ki buluşlarla mümkün hale gelmiştir. II. Dünya Savaşı ve sonraki yıllar, farklı dönüştürücü malzemelerinin araştırmalarını motive etti. II. Dünya Savaşı'ndan başlayarak, elektronikte sonar bilgisinin güçlendirilmesi ve işlenmesi ile su altı akustiği kavramlarının daha iyi anlaşılması gibi gelişmeler, hem askeri hem de askeri olmayan kullanımlar için su altı akustiği teknolojisindeki gelişmeleri etkiledi. O günlerde kazanılan bilgi ve gelişmeler hala sualtı akustik teknolojisine öncülük ediyor [Çiçek M., 2014].

### **2.7.1. Su Altı Akustiğine Giriş**

Deniz suyu havadan daha yoğun ve elektriksel olarak iletken olduğu için elektromanyetik dalgaların yayılımı farklı karakteristik gösterir. Bu nedenle, havadaki gibi elektromanyetik dalgalar, iletişim amaçları için suda kullanılamaz. Bununla birlikte, akustik dalgalar, suda göz ardı edilebilir miktarda azalma sergilerler ve büyük mesafelerde yayılabilirler. Böylece, akustik dalgalar neredeyse tüm su altı uygulamalarına hakim olur.

SONAR sözcüğü, su altında seyrüsefer, algılama ve iletişim teknolojileri için kullanılan "SOund Navigation And Ranging" 'in kısaltmasıdır. Aktif ve pasif sonar olmak üzere iki tür sonar vardır. Aktif sonar sinyaller yayar ve nesneleri algılamak ve seyrüsefer için yankıları dinler; pasif sonar sadece suyun altındaki sesi dinler. Aktif ve pasif sonar sistemleri, cisimleri algılamak ve seyrüsefer için dönüştürücüler kullanır.

Dönüştürücü genel olarak, enerjiyi bir formdan diğerine dönüştüren tüm cihazlar için verilen isimdir. Sonar uygulamalarında dönüştürücüler, elektrik enerjisini akustik enerjiye veya tersine dönüştürmek için kullanılır. Ayrıca dönüştürücüler kullanımlarına göre projektör ve hidrofon olarak iki sınıfa ayrılırlar. Projektörler akustik çevreye sinyal yaymak için kullanılır; buna karşın, hidrofonlar ses dinler ve akustik sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştürürler. Bu şekilde, kabaca, hidrofonların su altındaki mikrofonlar olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, bazı dönüştürücüler hidrofonların yanı sıra projektör olarak da kullanılabilir.

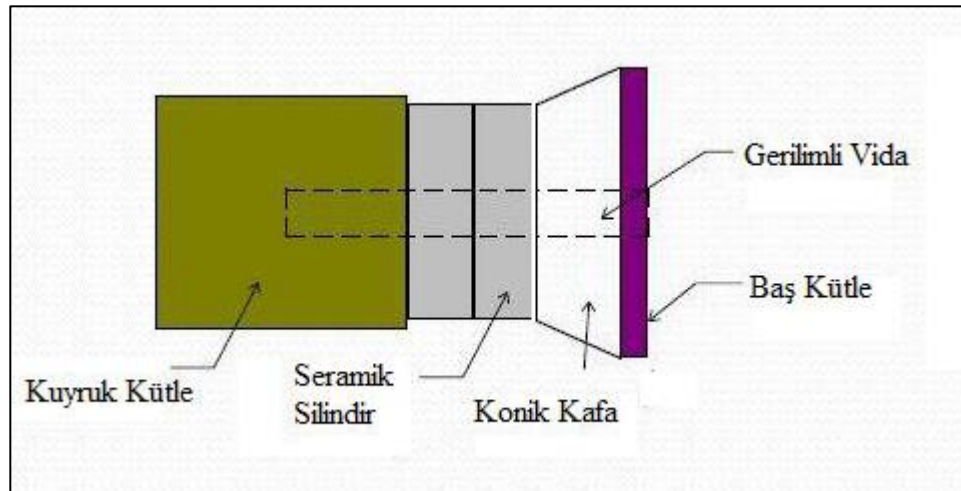
Dönüştürücüler ayrıca çevirici mekanizmalarına göre piezoelektrik dönüştürücüler, elektrostriktif dönüştürücüler, manyetostriktif dönüştürücüler, elektrostatik dönüştürücüler, değişken relüktans dönüştürücüler ve hareketli bobin dönüştürücüleri olarak sınıflandırılabilirler [Çiçek M., 2014].

### **2.7.2. Tonpiliz Tipi Dönüştürücüler Hakkında Genel Bilgi**

Tonpiliz tipi dönüştürücülerin ilk olarak atalarını iyileştirmek amacıyla 1959'da icat edilmiştir. Tonpiliz, bu tür dönüştürücülere ait mantar benzeri şekilden dolayı "ses mantarı" anlamına gelen Almanca bir kelimedir. İyi performansları, basitliği ve düşük maliyeti sebebiyle icat edildiğinden beri yaygın kullanım alanına sahipler.

Tonpilz tipi dönüştürücülerin diğer bir avantajı ise boyutlarının çeşitliliği ile geniş frekans aralıklarında kullanılabilme özelliğine sahip olmasıdır. Tonpilz dönüştürücüler Şekil 2.7’de görüldüğü gibi bir kafa kütlesi ve bir kuyruk kütlesi ile sıkıştırılmış 33 mod piezoseramik yığınının oluşur. Bu konfigürasyon sayesinde boyuna(longitudinal) rezonans frekansı 1-70 KHz arasında elde edilebilir ve uzun piezoseramik yığına gerek yoktur. Çoğu mekanik tasarımda, rezonans frekansların da en büyük yer değiştirmeler meydana gelmesinden dolayı rezonans frekansından kaçınılmaya çalışılmıştır [Sherman C. H., Butler J. L., 2007].

Tersine, dönüştürücünün tasarımında ki hedef rezonans frekansını elde etmektir, çünkü yüksek yer değiştirme akustik ortama aktarılan daha yüksek ses basınç seviyelerine yol açmaktadır.



Şekil 2.7: Tonpilz tipi dönüştürücülerin temsili gösterimi.

Piezoseramik yığını hareket oluşumundan sorumludur. Akustik ortama aktarılan akustik güç doğrudan seramik yığını tepkisi ile ilgilidir. Uygulanan alternatif voltaj ile mekanik olarak seri elektriksel olarak paralel bağlı silindirik seramik yığını genişler ve daralır sonucunda basınç dalgalanması yani diğer bir deyişle ses üretilir [Cochran J. C., 2014].

Baş kütlesi dönüştürücü tasarımında kritik öneme sahiptir. Baş kütlelerinin yüzeyi, enerjinin akustik ortama aktarıldığı yerdir. Bu yüzden baş kütleyle aktif yüzeyde denir. Aktif yüzeyin şekli çalıştırma amacına göre değişiklik gösterir. Daire şekli çok yaygındır, ancak dizi uygulamaları için çok kullanışlı değildir. Bunun yerine kare şekilli veya altıgen şekilli baş kütle tercih edilir. Akustik gücü en üst

düzeye çıkarmak için, kafa kütlesi en aza indirilirken aktif yüzey alanı en üst düzeye çıkarılmalıdır. Bununla birlikte, böyle bir kombinasyon kafa kütlesinin kalınlığının seyreltilmesine neden olur ve bu da eğilme rezonansında bir azalmaya neden olur. Eğilme rezonansından suyun düzensiz dalgalanmasına ve boş tepkiye neden olduğu için kaçınılmalıdır. Böylece akustik güç mümkün olduğunca artırılırken eğilme rezonansı önlenerek optimum bir çözüm gerekir.

Dönüştürücü tasarımı ile ilgili diğer önemli husus, baş kütlesi, kuyruk kütlesi ve piezoseramik yığınının bir arada tutan vida ve somun sistemidir. Piezoseramikler çekme gerilimi altında güven vermeyen bir davranış sergilediklerinden dolayı, genleşme modunda bile basma gerilimi altında çalışmalıdırlar. Çekme gerilmelerini önlemek için, uygulanan alternatif voltaj nedeniyle karşılaşılan maksimum gerilme değerinden daha yüksek bir basma gerilmesi olmalıdır. Buna ek olarak, tasarımda kullanılan vidanın sertliği önemlidir. Daha sert sertlik, akustik ortama aktarılan düşük enerjiyi ifade eder. Ayrıca, vida yüksek frekanslı alternatif basınca maruz kalmaktadır ve bu da yorulmaya neden olabilir. Malzeme seçimi, çok yüksek sertliği karşılamayan ve yorulmayı önleyen bir vida malzemesi bulmak için dikkatle ele alınmıştır.

Kuyruk kütlesi diğer dönüştürücü parçalarına kıyasla çok fazla önem taşımasada, dönüştürücülerin rezonans frekansını etkiler. Akustik gücü ve bant genişliğini artırmak için kuyruk kütlesi mümkün olduğu kadar ağır olması gerekir. Bununla birlikte dönüştürücülerin toplam ağırlığının artması genellikle istenmemektedir. Bu nedenle kuyruk kütlesinin kütlesi titizlikle kararlaştırılmalıdır. Dönüştürücünün bu temel bölümlerinin ötesinde, dönüştürücülerin pratik kullanımı için gereken diğer birçok parça vardır. Bu parçaların görevi çoğunlukla dönüştürücüyü suya, fiziksel hasara ve şoka karşı korumaktır. Örneğin, dönüştürücüyü fiziksel hasardan korumak için metal bir hazne tercih edilir. Hazne, kafa kütlesi haricinde dönüştürücünün her parçasını sudan izole eder. Dönüştürücünün performansında bir değişikliğe neden olmaması için kafa kütlesi basınç azaltıcı izolasyon malzemeleri ile korunur. Bu gibi malzemeler bile suya iletilen rezonans frekansını ve akustik enerjiyi etkileyebilir ancak bu etki uygun malzeme seçilerek asgariye indirilir [Çiçek M., 2014].

### 2.7.3. Dönüştürücülerin Temelleri

Dönüştürücünün özelliklerini ve performansını tanımlamak için kullanılan bazı kavramlar vardır. Dönüştürücüyü tanımlamak için temel özellik rezonans, diğer bir deyişle merkezi frekanstır. Bir dönüştürücünün rezonans frekansını ölçmenin en güvenilir yolu iletkenlik tepkisidir. İletkenliğin tepe değerine ulaştığı frekans dönüştürücünün rezonans frekansıdır.

İletkenlik Ohm Yasası ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = G + iB \quad (2.5)$$

Burada, I akım, V voltaj, Z empedans, Y Admitans(empedans evrik değeri), G iletkenlik, B süseptans(sanal geçiri) yi ifade etmektedir.

Yönlülük faktörü ve yönlülük indeksi de yaygın şekilde kullanılan tasarım parametreleridir. Akustik eksen, dönüştürücünün akustik tepkisinin maksimum değeri olduğu yöndür. Bu genellikle Tonpitz tipi dönüştürücülerin aktif yüzeyinin merkezinde ve aktif yüzey normundadır. Sonra, yönlenme faktörü, akustik eksenle iletilen akustik yoğunluğunun( $I_0$ ), aynı güce eşit olarak ölçülen her yöne eşit bir şekilde yayılmasından kaynaklanacak yoğunluğa( $I_{ref}$ ) oranı olarak tanımlanır. Yönlülük indeksi, sadece yönlenme faktörünün dB ölçeğinde temsilidir.

Dairesel aktif yüzeye sahip Tonpitz tipi dönüştürücüler için, yönlülük faktörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$D_f = \frac{(ka)^2}{[1 - J_1(2ka)/ka]} \quad (2.6)$$

Burada k dalga sayısı , a ise aktif yüzey yarıçapıdır. Bu formülden de Yönlenme faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$DI = 10 \log(D_f) \quad (2.7)$$

Dönüştürücünün performansını ifade etmek için, iki temel kavram sıklıkla birlikte kullanılır. Bunlar, iletim gerilim tepkisi (TVR) ve kaynak seviyesi (SL) 'dir. Her iki terim, 1  $\mu$ Pa basınç ile ideal düzlem dalgasının şiddetine göre akustik

eksende, dönüştürücünün aktif yüzeyinden 1 m uzaktaki bir noktadaki şiddeti(gürültüyü) temsil eder. Bununla birlikte, SL için böyle bir gereklilik olmazken, TVR için sisteme uygulanan alternatif voltaj 1 voltur. Dönüştürücünün tepkisi değişken sürme gerilimi altında doğrusal olduğu için, TVR'den SL elde edebilir.

TVR ve SL, yönlülük indeks açısından ifade edilebilir, verimlilik ve giriş elektrik gücü  $W_e$  :

$$TVR = 10 \log \left[ \frac{W_e}{1 W_{aat}} \right] + DI + 10 \log(\eta_{ea}) + 170.8 dB \quad (2.8)$$

Burada  $\eta_{ea}$  dönüştürücünün elektroakustik verimliliği, basit şekilde elektromekanik ve mekanoakustik verimliliğin çarpımıyla bulunur. TVR için,  $W_e$  1 voltluk sürüş voltajı için hesaplanmalıdır. SL, dönüştürücünün sürüş voltajını içeren TVR' den kolayca hesaplanabilir.

$$SL = TVR + 20 \log\left(\frac{V_d}{1 Volt}\right) \quad (2.9)$$

Dönüştürücülerin kullanımına göre tasarım kriterleri olarak kullanılan dönüştürücüler için bant genişliği ve hüzme genişliği diğer önemli kavramlardır. Bant genişliği genellikle SL veya TVR değerinin tepe değerinden 3 dB daha düşük olduğu noktalardaki mutlak frekans farkı olarak ifade edilir.

Hüzme genişliği, bir dönüştürücünün açısal tepkisinin dB ölçeğinde ölçülmesidir ve doğrudan, dönüştürücünün yönselliği ile ilgilidir. Hüzme genişliği, dönüştürücülerin tepkisinin maksimum tepki oluşma yönünden 3 dB daha az olduğu yönler arasındaki açı olarak da tanımlanabilir. Bu genellikle dönüştürücünün akustik eksenidir.

Dönüştürücülerin hüzme genişliği ve yönlülük indeksinin her ikisi de dönüştürücünün yönlülüğüyle alakalı olmasına rağmen, bu iki terim birbirinden tamamen farklıdır. Yüksek yönlülük indeksine sahip dönüştürücü dar bir hüzme genişliğine sahiptir, geniş hüzme genişliği de düşük yönlülük indeksi anlamına gelir [Çiçek M., 2014].

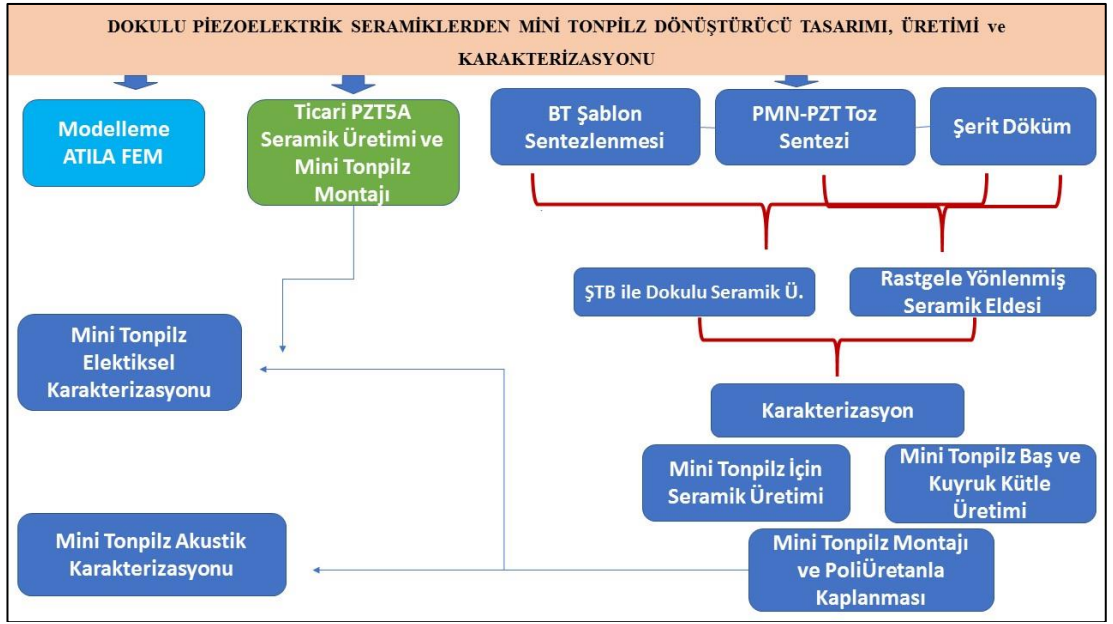
#### 2.7.4. Sonlu Elemanlar Modellemesi

Sonlu elemanlar modelleri, en doğru ve bu nedenle, dönüştürücü tasarım için ve diğer mekanik tasarım süreçleri için en güvenilir modelleme tekniğidir. Analitik yöntemler, basitleştirilmiş problemler ve basit geometrik özellikler ile çözümler sunabilir. Problemin küçük karmaşıklığı bile problemin çözümünde zorluklara neden olabilir. FE yöntemleri, problem alanının, analitik çözümlerin elde edileceği küçük elemanlara bölünmesiyle bu tür sorunların üstesinden gelir. Öte yandan, FE yöntemleri sadece yaklaşık çözümleri sunmaktadır. Çözümün doğruluğu, modelin eleman boyutuna dayanır. Büyük eleman sayıları, daha küçük elemanlara ve daha iyi bir sürekliliğe yol açar. Sonuç olarak, çözüm daha doğru hale gelir. Bununla birlikte, bir sınırlamanın ötesinde, artan eleman sayıları çözüm üzerinde etkili olmaz, ancak her eleman için hata birikimi nedeniyle büyük hatalara neden olur [Çepni K., 2011].

Buna ek olarak, malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması, FEM çözümünün doğruluğu üzerinde çok önemli bir öneme sahiptir. Gerekli malzeme sabitleri analiz türüne göre değişir. Bu çalışmada gerçekleştirilen piezoakustik dönüştürücülerin harmonik analizi için izotropik malzemeler, piezoseramikler ve akustik ortam tanımlanmalıdır. İzotropik malzemeler için, elastikiyet modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu olmak üzere üç malzeme özelliği yeterlidir. Öte yandan, piezoseramikler için kutuplama yönüne ve yoğunluğuna göre tanımlanmış rijitlik matrisi, piezoelektrik matris ve dielektrik matris gereklidir. Akustik ortamın tanımı ses hızı ve yoğunluk tanımıyla sınırlıdır. Piezoseramik dönüştürücüler için modelleme, teorik modelleme ile deney sonuçları arasında büyük bir eşleşme olması nedeniyle çoğunlukla Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılır. ANSYS, COMSOL, ATILA, PZFlex, GENSAM gibi ticari yazılımların başarıyla kullanıldığı gösterilmiştir [Çepni, K., 2011]. Bu tez çalışmasında ATILA marka modelleme programı kullanılmıştır.

### 3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında öncelikle baryum titanat şablonlar sentezlenmiştir. Daha sonra PMN-PZT tozu sentezlenmiş ve şerit döküm yöntemiyle dokulu seramikler elde edilmiştir. Baryum titanat şablon kullanılmadan yine şerit döküm yöntemiyle dokusuz seramikler üretilmiştir. Birbirleriyle aynı boyutlarda üretilen ticari PZT5A seramikler ile aynı zamanda ATILA sonlu elemanlar yazılımıyla modelleme yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda üretilmiş seramiklerin elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Seramiklerin montajda kullanıldığı tonpilz tipi dönüştürücülerin poliüretan kaplama öncesi ve poliüretan kaplama sonrası elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmaların yapıldığı tez akış şeması aşağıdaki Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1: Tez çalışmasının üretim aşamasını gösteren akış şeması.

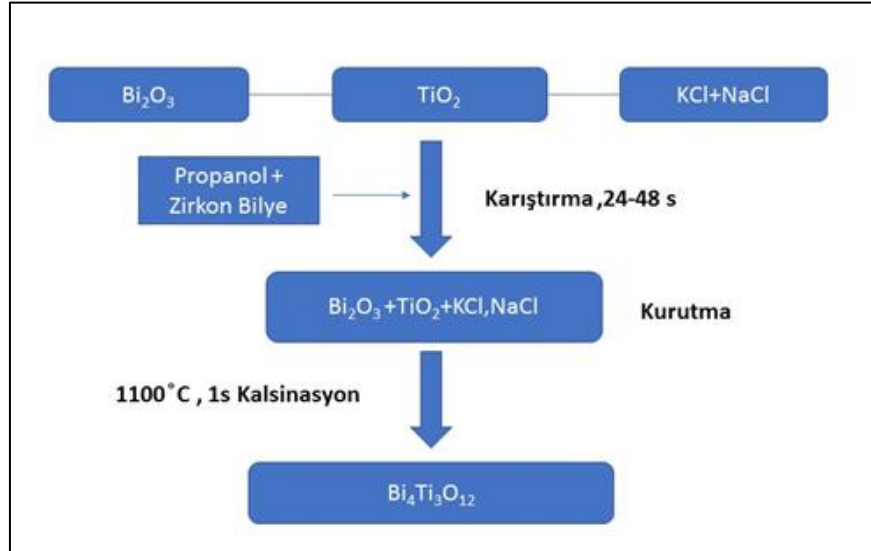
### 3.1.Plakasal BaTiO<sub>3</sub> (BT) Şablon Parçacıklarının Sentezlenmesi

Baryum titanat şablon parçacıkları 3 aşamada sentezlenmiştir. Birinci aşamada Tablo1’de belirtilen oranlarda tozları 125 ml Nalgine kaba zirkon bilye ve propanol ekleyerek 24-48 saat arasında değirmene karışması amacıyla konuldu. Daha sonra değirmenden alınan toz manyetik karıştırıcıda 80 °C de kurutmaya bırakıldı.

Tablo 3.1: Birinci aşama plakasal Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> sentezi için kullanılan reçete.

| Kullanılan Tozlar              | Ağırlık (%) |
|--------------------------------|-------------|
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40          |
| TiO <sub>2</sub>               | 10          |
| NaCl                           | 25          |
| KCl                            | 25          |

Kurutulan toz 1100 °C de 1 saat kalsine edildikten sonra sıcak su ile yıkayarak tuzlu bileşiklerden arındırıldıktan sonra ikinci aşamadaki BaBi<sub>4</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>15</sub> sentezi için öncül Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> tozu sentezlenmiştir. Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> tozunu üretim aşamaları Şekil 3.2 de verilmiştir.



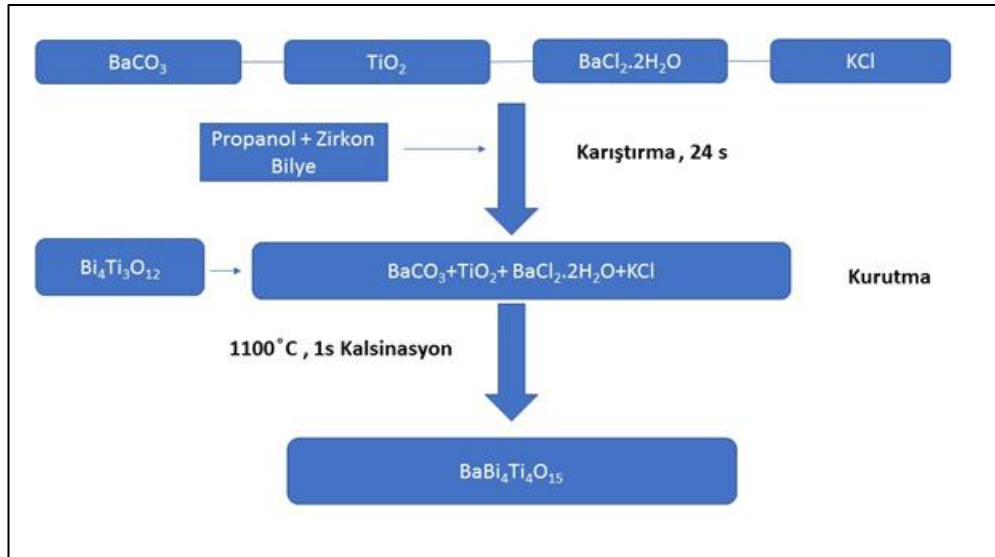
Şekil 3.2: Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> sentezi aşamaları.

Tablo 3.2’de belirtilen oranlarda tozları ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  hariç) 125 ml Nalgine kaba zirkon bilye ve propanol eklenmiş ve değirmene karışması amacıyla 24 saat süreyle konulmuştur. Daha sonra değirmenden alınan asıltı manyetik karıştırıcıda  $80^\circ\text{C}$  de kurutulurken birinci aşamada sentezlenen  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  tozu ekleyerek kurutulmuştur.

Tablo 3.2: İkinci aşama  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  sentezi için kullanılan reçete.

| Kullanılan Tozlar                         | Ağırlık (%) |
|-------------------------------------------|-------------|
| $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$     | -           |
| $\text{BaCO}_3$                           | 6.664       |
| $\text{TiO}_2$                            | 2.697       |
| $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 45.319      |
| KCl                                       | 45.319      |

$1100^\circ\text{C}$  de 1 saat kalsine edilen tozu sıcak su ile yıkayarak tuzlu bileşiklerden arındırılmış ve  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  tozu sentezlenmiştir. Sentezlenen  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  tozu üçüncü aşama olan topokimyasal mikrokristal dönüşüm aşamasında  $\text{BaTiO}_3$  (BT) şablon sentezi için kullanılmıştır. Şekil 3.3 de  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  tozunu üretim aşamaları verilmiştir.



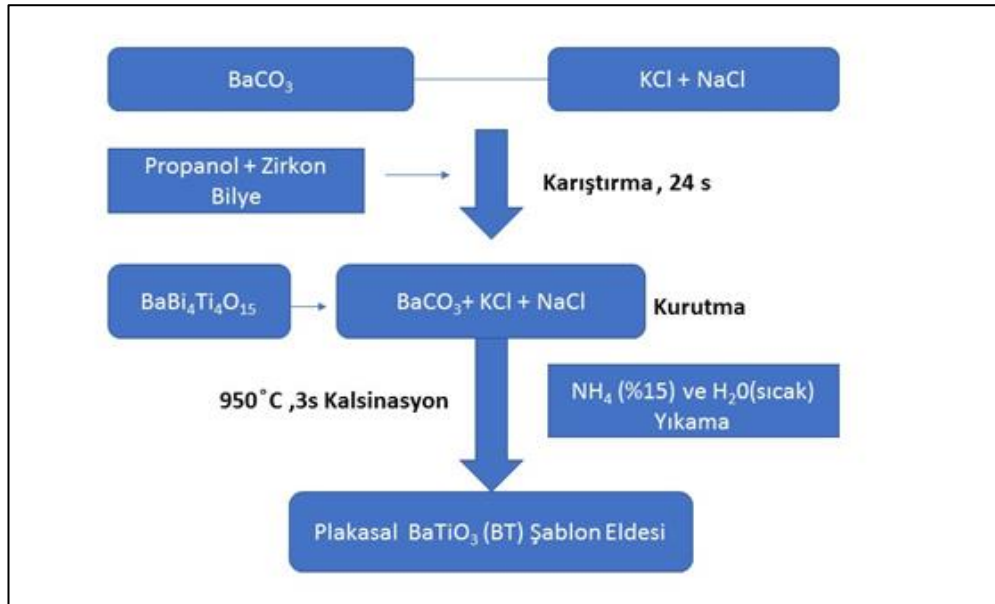
Şekil 3.3:  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  sentezi aşamaları.

Tablo 3.3’de belirtilen oranlarda tozları ( $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  hariç) 125 ml Nalgine kaba zirkon bilye ve propanol eklenerek değirmene karışması amacıyla 24 saat süreyle konulmuştur. Daha sonra değirmenden alınan asıltı manyetik karıştırıcıda  $80^\circ\text{C}$  de kurutulurken ikinci aşamada sentezlenen  $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  tozu ekleyerek kurutulmuştur.

Tablo 3.3: Üçüncü aşama  $\text{BaTiO}_3$  (BT) şablon sentezi için kullanılacak reçete.

| Kullanılacak Toz                        | Ağırlık (%) |
|-----------------------------------------|-------------|
| $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ | -           |
| $\text{BaCO}_3$                         | 18.97       |
| $\text{NaCl}$                           | 40.51       |
| $\text{KCl}$                            | 40.51       |

$950^\circ\text{C}$  de 3 saat kalsine edilen toz  $\text{NH}_4$  (%15 seyreltik Amonyum) ve sıcak su ile yıkayarak plakasal  $\text{BaTiO}_3$ (BT) şablon sentezlenmiştir. Plakasal  $\text{BaTiO}_3$  tozunun üretim aşamaları Şekil 3.4 de verilmiştir.



Şekil 3.4:  $\text{BaTiO}_3$  (BT) şablon sentezi aşamaları.

### 3.2.PMN-PZT Tozlarının Sentezlenmesi

Tablo 3.4’de yer alan tozlar 125 ml Nalgine kaba zirkon bilye ve propanol eklenerek değirmende 24 saat karışma işlemi için konulmuştur. 24 saat sonunda alınan asıltı kurutulduktan sonra 1000 °C de kalsine edilerek sentezlenmiştir. Kalsine edilen toz daha sonra kırma işlemi için tekrardan Nalgine kap içerisinde zirkon bilye ve propanol ile birlikte konulmuş 1 gün sonunda kurutulmuştur. X ışını kırınımı faz analizi yapılmış ve istenilen fazın oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3.4:  $MgNb_2O_6$  tozu sentezi için kullanılan reçete.

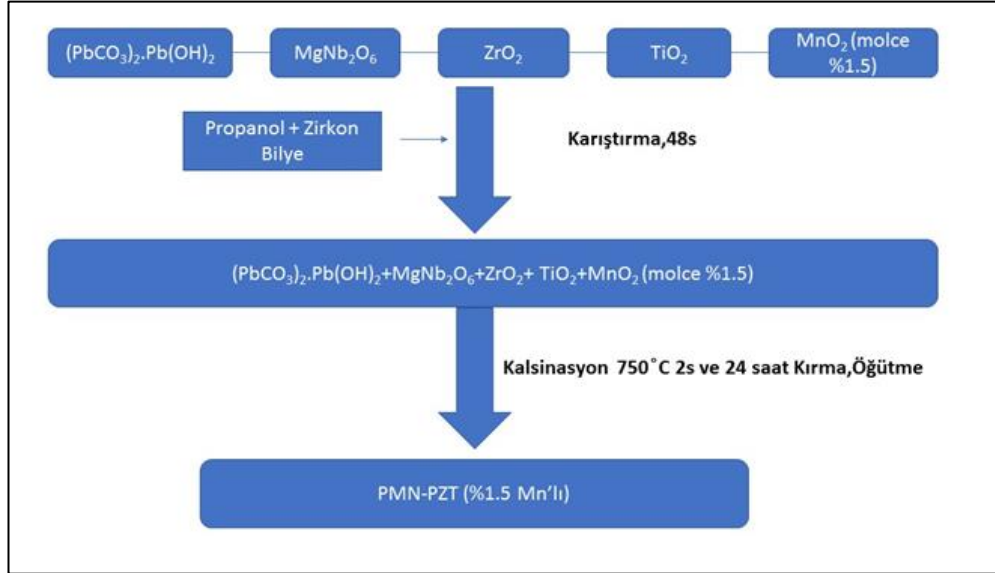
| Kullanılan Toz              | Marka                              | Ağırlık (%) |
|-----------------------------|------------------------------------|-------------|
| $Nb_2O_5$                   | Alfa Aesar, (%99, CAS: 1313-96-8)  | 73          |
| $Mg(CO_3)_4.Mg(OH)_2.5H_2O$ | Alfa Aesar, (%99, CAS: 56378-72-4) | 27          |

Tablo3.5’de belirtilen oranlarda başlangıç tozları tartılmış ve 125 mL Nalgine kaba konulmuş daha sonra propanol ve zirkon bilye eklenerek değirmene konulmuştur. 48 saat değirmende karıştırılan tozu kurutma amacı ile manyetik karıştırıcıda 80 °C ye ayarlanarak kurutulmuştur. Daha sonra %2 ağırlıkça PbO (ZAG, %99, CAS: 1317-36-8) eklenerek 750 °C de kalsinasyon yapılmış ve istenilen kompozisyondaki toz sentezlenmiştir. Kalsinasyon sonrası 24 saat değirmende kırma ve öğütme işlemi yapılmış ve elde edilen toza X-ışını kırınımı ile faz analizi yapılmış ve istenilen fazların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 3.5: PMN-PZT (Molce %1.5 Mn katkılı) kompozisyonunun reçetesi.

| Kullanılan Tozlar     | Marka                                                        | Ağırlık (%) |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-------------|
| $(PbCO_3)_2.Pb(OH)_2$ | Alfa Aesar, (%99, CAS: 1319-46-6)                            | 72,20       |
| $MgNb_2O_6$           | Öncül (Columbite) Toz Sentezleme                             | 11,40       |
| $ZrO_2$               | Alfa Aesar, (%99, CAS: 1314-23-4)                            | 8,60        |
| $TiO_2$               | Degussa(P25,Rutile:Anatase/85:15,%99,9 20nm, CAS:13463-67-7) | 7,80        |
| $MnO_2$               | Sigma Aldrich, %99, CAS: 1313-13-9)                          | (molce%1.5) |

Bu aşamada elde edilen  $0.4\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{-}0.25\text{PbZrO}_3\text{-}0.35\text{PbTiO}_3$  kompozisyondaki molce %1.5 Mn katkılı PMN-PZT tozunun üretim akım şeması Şekil 3.5 de verilmiştir.



Şekil 3.5: PMN-PZT (Molce %1.5 Mn Katkılı) kompozisyonunun hazırlanışı.

### 3.3.Şerit Döküm Yöntemiyle Tane Yönlenmesi ve Şekillendirme

Tablo 3.6 da belirtilen PMN-PZT (%1.5 Mn'lı) toza belirtilen oranda bağlayıcı eklenerek 25 mL Nalgine kapta zirkon bilye ve MEKET (Metil-Etil-Keton, Etanol karışımı) ile birlikte 24 saat değirmende karıştırılmıştır. Daha sonra manyetik karıştırıcıda 100 ml cam behere alınmıştır ve BT şablonu ultrasonik horn da MEKET ile homojen şekilde dağıtılmıştır. Daha önceden behere alınan seramik çamuruna eklenmiş ve viskozitesi istenilen değere geldiğinde bıçak genişliği 180 mikron olan ve hızı 10 cm/s olan Dr.Blade diye de adlandırılan şerit döküm cihazında cam üzerine döküm yapılmıştır. Bir gün cam üzerinde dökümün kuruması için bekletilmiştir. Sonrasında 11 mm ve 5 mm boyutlarındaki punch (yuvarlak basma kalıbı) halka şeklinde şeritler şekillendirilmiştir. Şekillendirilen her şerit tek eksenli pres kalıbında 2 mm kalınlığında (25 şerit) kalıba yerleştirilmiş ve 100 MPa basınç (0,27 ton) altında önce oda sıcaklığında 3 dakika daha sonra 80 °C de etüvde ısıtılarak 3 dakika preslenmiştir.

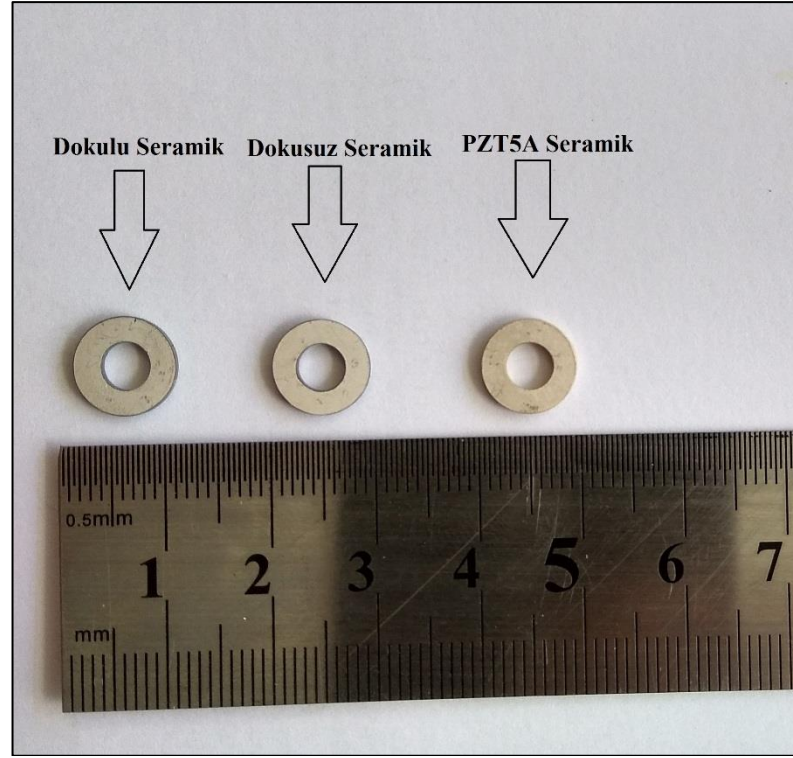
Tablo 3.6: Şerit döküm yöntemi için seramik çamur reçetesi.

| Kullanılan Malzemeler | Ağırlık (%)  |
|-----------------------|--------------|
| PMN-PZT (%1.5 Mn'lı)  | 75           |
| Bağlayıcı             | 25           |
| BT Şablon             | (%3 Hacimce) |
| MEKET                 | 75 mL        |

2 mm kalınlığında halka şeklindeki numuneler daha sonra maksimum yoğunluğa ulaştırmak amacıyla soğuk izostatik presde vakuma alınan numuneler 200 MPa'da preslenmiştir. Daha sonra 600 °C'de 1 saat bağlayıcı uzaklaştırma işlemi yapılmıştır. Bağlayıcı uzaklaştırma işleminden sonra tekrardan vakuma alınan numuneler 200 MPa basınç altında yeniden soğuk izotik pres de yoğunlaştırılmış ve sinterlemeye hazır hale getirilmiştir. Rastgele yönelmiş seramik üretim süreci de dokulu seramiklerle aynı olup tek farkı BT şablon kullanılmaması olmuştur.

### 3.4. Şablonlu Tane Büyütme Yöntemiyle Dokulu Seramiklerin Eldesi

Soğuk izostatik pres altında yoğunlaştırılan numuneler daha sonra alümina pota içerisinde yatak tozu olarak kendi tozu ve sinterleme işlemi boyunca yapıdaki kurşun kaybını minimum seviyeye indirmek için laboratuvar ortamında hazırlanan atmosfer tozu (1:1,5 oranında ZrO<sub>2</sub>: PbO oranlarında) pellet haline getirilmiş ve alümina pota içerisinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler fırın içerisine yerleştirildikten sonra 600 °C de 1 °C/dakika hız ile çıkılmıştır ve bu sıcaklıkta bağlayıcı uzaklaştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra bu sıcaklıktan 5 °C/dakika hız ile 1150 °C'ye çıkılmış ve bu sıcaklıkta epitaksiyel büyümenin gerçekleşmesi ve istenilen yoğunluğun elde edilmesi için 6 saat sinterleme işlemi yapılmıştır. Dokusuz seramikler içinde BT şablon eklenmeden aynı işlemler yapılmıştır. Fakat sinterleme sıcaklığı 1150 °C olmakla birlikte bu sıcaklıkta 2 saat bekleme süresi istenilen yoğunluğun elde edilmesinde yeterli görülmüştür. Bu işlem sonrası elde edilen seramikler Şekil 3.6 da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Üretilen seramiklerin gösterimi.

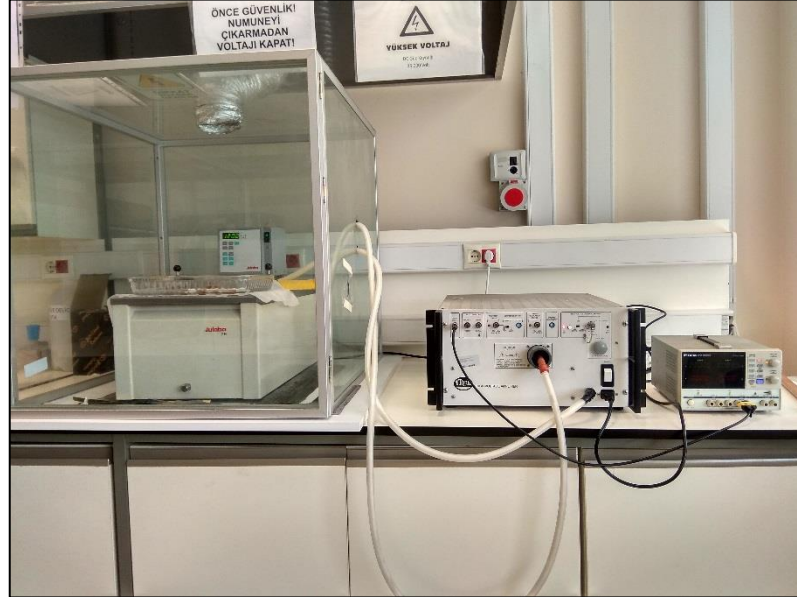
### 3.5. Yapısal Analizler

Sinterleme işlemi sonrası numunelere direk  $2\theta=20-70^\circ$  aralığında X ışını kırınımı cihazında faz analiz yapılmıştır. Mikroyapı tayini için ise numunelerin kırık yüzeyinden, termal dağlama yaptığımız yüzeyinden ve herhangi bir işleme maruz kalmayan yüzeyinden SEM analizi yapılmıştır.

### 3.6. Numune Hazırlama

Sinterleme sonrası yapısal analizleri yapılmış halka şeklindeki numuneleri istenilen kalınlığa getirilmesi ve paralel yüzeyleri elde edilmesi için 1000 numara zımpara kağıdıyla mekanik işleme tabii tutulmuştur. Daha sonra yüzey paralelliği sağlanan ve istenilen kalınlığa getirilen numunelerin gümüş (Ag) pasta ile her iki yüzeyi kaplanmıştır ve  $600^\circ\text{C}$  de 30 dakika pişirilmiştir. Pişirmeden önce numunelerin kenarlarının gümüşten aseton yardımıyla arındırılmış olmasına dikkat edilmiştir. Gümüş pişiminden sonra numuneler 30 kV/cm elektrik alan altında  $120^\circ\text{C}$ 'lik silikon yağı banyosunda 15 dakika boyunca Trek 610 D COR-A-TROL

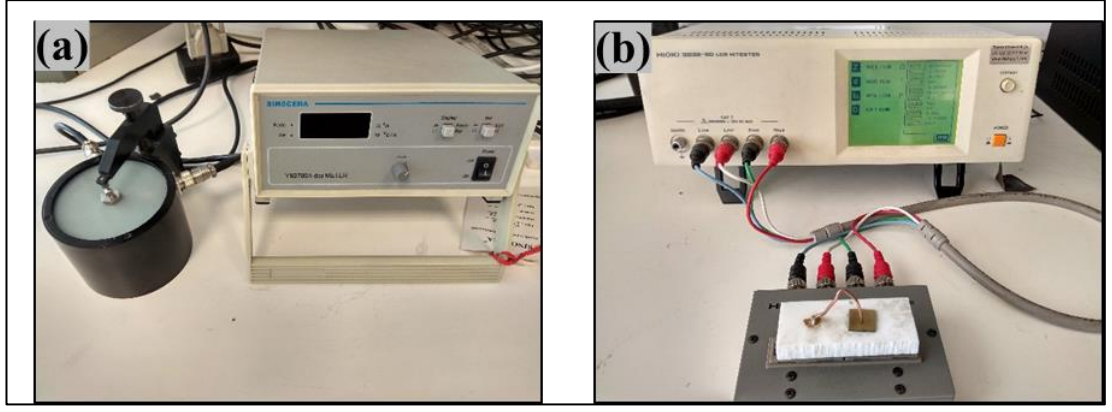
H.V. Supply Amplifier/controller cihazı ile uygulanan voltaj ile kutuplama işlemi yapılmıştır ve elektriksel olarak aktive edilmiştir. Kutuplama işleminin yapıldığı sistem Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Kutuplama işleminin yapıldığı Trek 610 D COR-A-TROL H.V. Supply Amplifier/controller cihazı.

### 3.7.Elektriksel Karakterizasyon

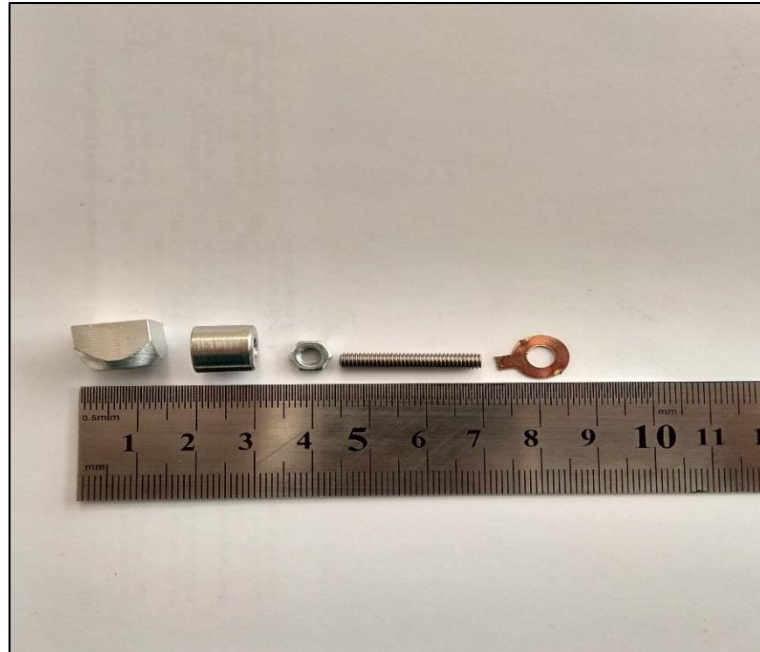
Kutuplama işlemi yapıldıktan 24 saat sonra numunelerin piezoelektrik yük katsayıları ( $d_{33}$ ) Berlincourt metodu ile ölçülmüştür. Daha sonra Hioki marka LCR metre ile frekansa bağlı admitans (Y) ölçümleri her bir seramik kompozisyonu için 120 kHz -200 kHz arasında lineer olarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Frekansa bağlı kapasitans (C) ve dielektrik kayıp (D) logaritmik olarak 1 kHz – 1MHz arasında oda sıcaklığında ölçülmüştür. Berlincourt piezoelektrik yük katsayısı ( $d_{33}$ ) ölçüm cihazı ve LCR metre aşağıdaki Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: a) Piezoelektrik Yük Katsayısını Ölçme Cihazı ( $d_{33}$  metre) b) Hioki LCR metre.

### 3.8.Tonpilz Tipi Dönüştürücünün Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemiyle Modellenmesi

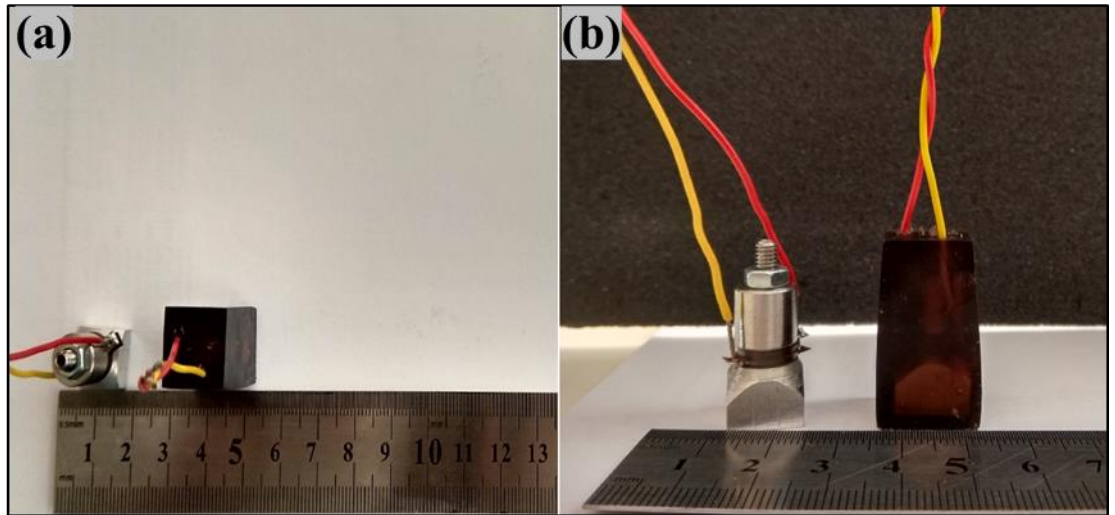
ATILA modelleme programından Mini-Tonpilz cihazımızın çalışma frekansına uygun tasarımı elde etmek için yararlanılmıştır. Öncelikle programda tasarımı başarılı bir şekilde yapabilmek için Tonpilz ölçülerini yaklaşık olarak belirlenmesi gerekmektedir ve bu bağlamda belirlenen yaklaşık ölçülerle tasarıma başlanmıştır.



Şekil 3.9: Montajda da kullanılan malzemelerin gösterimi.

### 3.9.Tonpilz Tipi Dönüştürücünün Montajı ve Polimer ile Kaplanması

ATILA modelleme programı yardımıyla uygun tasarım elde edildikten sonra CNC ile işlenen konik Alüminyum (12.5\*12.5 mm) baş kütle ile silindirik (10,5) 1040 çeliği üretilmiştir. Alüminyum kütleye metrik 4 vida yolu açılmış ve montaja uygun hale getirilmiştir. Daha sonra 25 mm uzunluğunda sonsuz vida alüminyum kütleye sabitlenmiştir. Her bir cihazda 2 adet seramik kullanılmıştır. Montaj sırasında bu seramiklerin kutuplama yönlerinin birbirine zıt olmasına dikkat edilmiştir. Bu seramikler elektriksel bağlantıların yapılabilmesi için aralarına seramik boyutlarında bakır folyo yerleştirilmiştir. Sistemdeki seramikler bakır folyoların aralarında kalacak şekilde sabitlenmiş ve bakır folyolara kablolar lehimlenmiştir. Daha sonra çelik kütle ile sıkıştırılarak montaj işlemi tamamlanmıştır. Montajda kullanılan malzemelere Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Montaj işlemi tamamlandıktan sonra dışı kalıp tasarlanmış ve cihazımız 2.5 mm et kalınlığında poliüretanla kaplanacak şekilde silikon kalıp yapılmıştır. Silikon kalıba yerleştirilen cihazlarımız PMC 790 kodlu birbiri ile 1:2 oranında karıştırılan iki bileşenli poliüretan hazırlanarak polimer kaplanması tamamlanmıştır. Montajı yapılmış ve poliüretan ile kaplanmış mini-tonpilz tipi dönüştürücülerimiz Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Polimer kaplama öncesi ve sonrası a) üstten b) yandan mini-tonpilz montaj gösterimi.

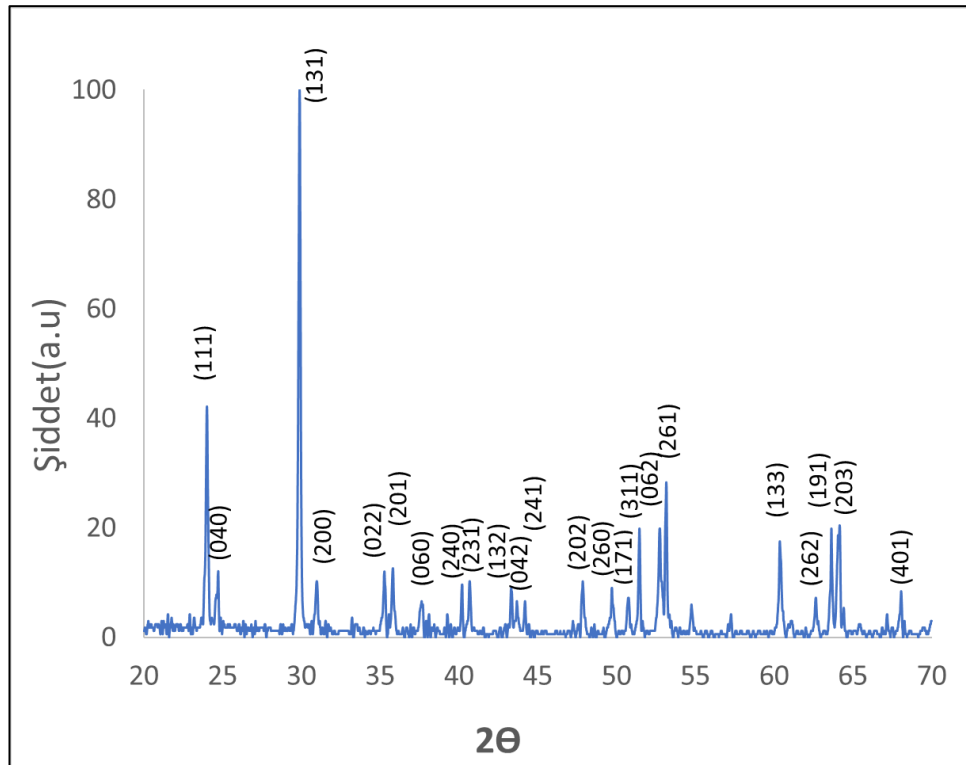
### **3.10.Tonpilz Tipi Dönüştürücünün Elektriksel Karakterizasyonu**

Poliüretan ile kaplanan 3 farklı kompozisyondan elde edilen mini-tonpilz tipi aygıtlar piezoelektrik seramiklerde olduğu gibi elektriksel frekansa bağlı admitans (Y) ölçümleri 60 kHz-100 kHz frekansları arasında Hioki LCR METER cihazında havada elektriksel ölçümleri yapılmıştır. Havada ki ölçümler sonrası KOÇ BİLGİ SAVUNMA A.Ş bünyesinde su altı akustik karakterizasyonu yapılmıştır.

## 4.SONUÇLAR

### 4.1. PMN-PZT Toz Sentezi ve Faz Analizi

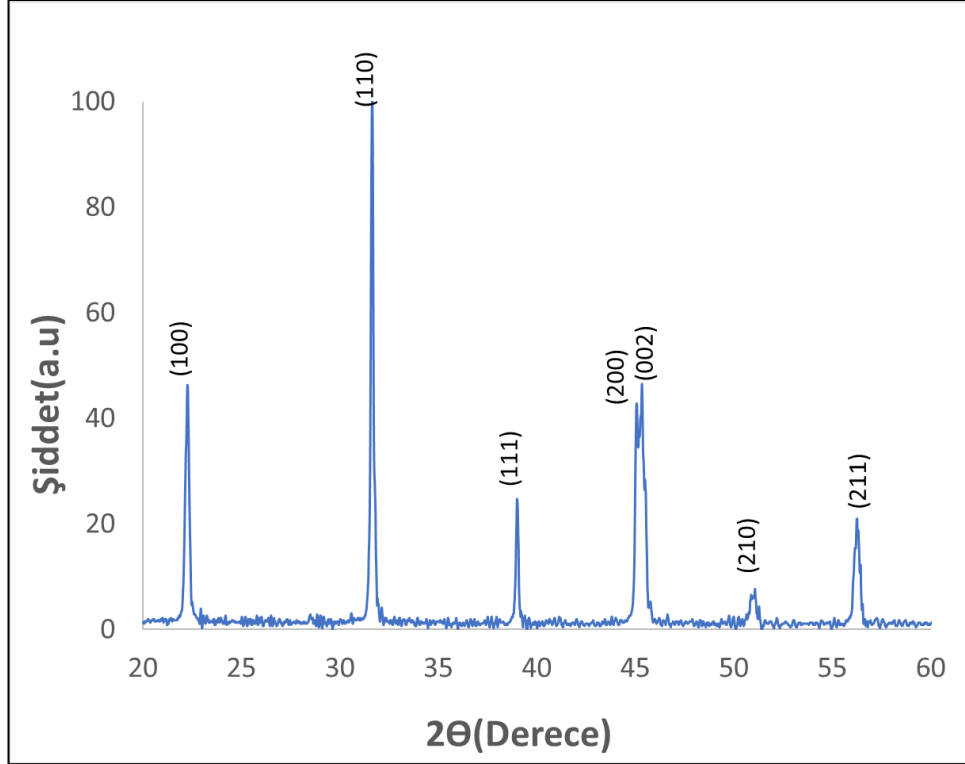
İlk olarak ana kompozisyon olan PMN-PZT kompozisyonunun elde edilmesi için öncül olarak sentezlenen, 1000 °C’de 6 saat kalsine edilerek elde edilen  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  tozu kullanılmıştır.  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  tozunun X- ışını kırınımı deseni aşağıdaki Şekil 4.1 de verilmiştir. X-ışını kırınımı deseni incelendiğinde herhangi bir safsızlığa rastlanmamış ve istenilen tek fazda  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  tozunun elde edildiği gözlemlenmiştir. Pikler indislendiğinde ortorombik kristal yapısında columbite fazının olduğu gözlemlenmiştir. Columbite  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  tozu PMN-PZT kompozisyonunun tek fazda üretilmesi ve pyroclor fazının oluşumunu engellemesinden dolayı son derece önemlidir.



Şekil 4.1: 1000 °C’de 6 saat kalsine edilen columbite  $\text{MgNb}_2\text{O}_6$  tozuna ait X-ışını kırınımı deseni.

Daha sonra molce %1.5  $\text{MnO}_2$  Katkılı 0.4PMN-0.25PZ-0.35PT (PMN-PZT) kompozisyonu deneysel çalışmalarda belirtilen şekilde sentezlenmiştir. Sentezlenen

bu kompozisyonun X-Işını Kırınımı Deseni Şekil 4.2 de verilmiştir. X-ışını kırınımı deseni indislendiğinde herhangi bir safsızlık görülmemiş ve istenilen fazların elde edildiği gözlemlenmiştir.

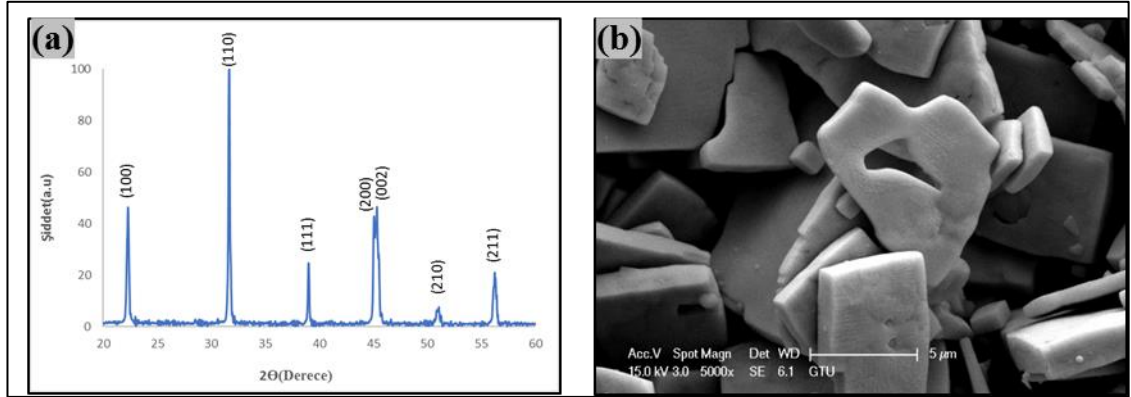


Şekil 4.2: 750 °C’de 2 saat kalsine edilen %1,5 Mn’lı 0.4PMN-0.25PZ-0.35PT (PMN-PZT) tozunun X-Işını kırınımı deseni.

#### 4.2. BT Şablon Üretimi, Faz Analizi ve Mikroyapı İncelenmesi

Plakasal morfolojiye sahip BaTiO<sub>3</sub>(BT) şablonlar PMN-PZT kompozisyonuna doku kazandırmak amacıyla kullanılmıştır. BT şablonların bu kompozisyonda kullanılmasının nedenlerinden biri kurşunlu sistemde çözünmeden yapısını ve morfolojisini koruyarak kararlılığa sahip olmasıdır. Bu sisteme doku kazandırabilmesi için BT şablonların plakasal morfolojiye sahip olması son derece önemlidir. Bu yüzden deneysel çalışmalarda da üzerinde durulduğu gibi 2 aşamalı ergiyik tuz sentezi metodunu takip eden topokimyasal mikrokristal dönüşüm yöntemi takip etmektedir. Deneysel çalışmalarda anlatıldığı gibi elde edilen BT şablonların XRD ve SEM görüntüleri Şekil 4.3 de yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi XRD desenine bakıldığında ilk iki aşamada görülen ikincil fazlar görülmemekte ve

SEM görüntülerinden de anlaşıldığı üzere plakasal anizometrik tek kristal BT şablon parçacıkları sentezlenmiştir.



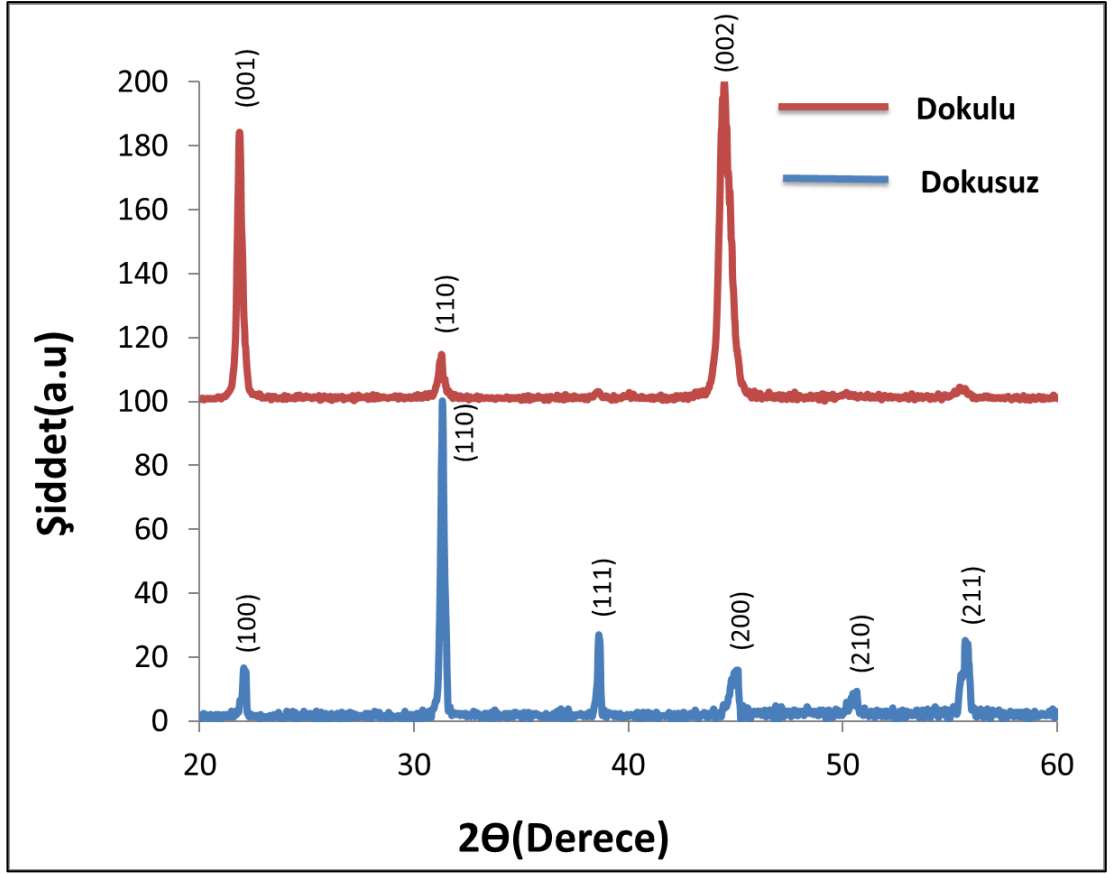
Şekil 4.3: Sentezlenen BT şablonların a)X-ışını kırınımı deseni b)SEM görüntüsü.

#### 4.3.PMN-PZT Kompozisyonuna Sahip Dokulu ve Dokusuz Seramiklerin Üretimi, Faz Analizi ve Mikroyapı İncelenmesi

Mn katkılı PMN-PZT kompozisyonunun elde edilmesinden sonra doku kazandırması amacıyla hacimce %3 BT şablon eklenerek şerit döküm (tape casting) çamuru hazırlanmıştır. Hazırlanan çamur istenilen viskoziteye geldiğinde döküm yapılmış ve 24 saat kurutulan şeritler istenilen boyutlarda kesilerek yaş seramikler elde edilmiştir. Yoğunluk kazandırılması amacıyla soğuk izostatik preste 200 MPa basınca maruz kalan seramikler 1150 °C’de 6 saat sinterleme işlemine tabii tutulmuş ve şerit dökümle yönlendirilen şablonlar sinterleme işlemi sırasında da epitaksiyel büyüme sayesinde doku oluşumu sağlamıştır.

Aynı kompozisyonda fakat dokusuz seramikleri üretmek için de tek fark BT şablon eklenmemesidir. Üretim tekniği ve yapılan bütün işlemler ısı işlem hariç aynıdır. 1150 °C’de 2 saat sinterleme sonucu dokusuz seramiklerde elde edilmiştir. Şekil 4.4 de dokulu ve dokusuz seramiklerin X-ışını kırınımı deseni üst üste çizdirilmiş ve Şekil 4.5 de SEM görüntüleri verilmiştir.

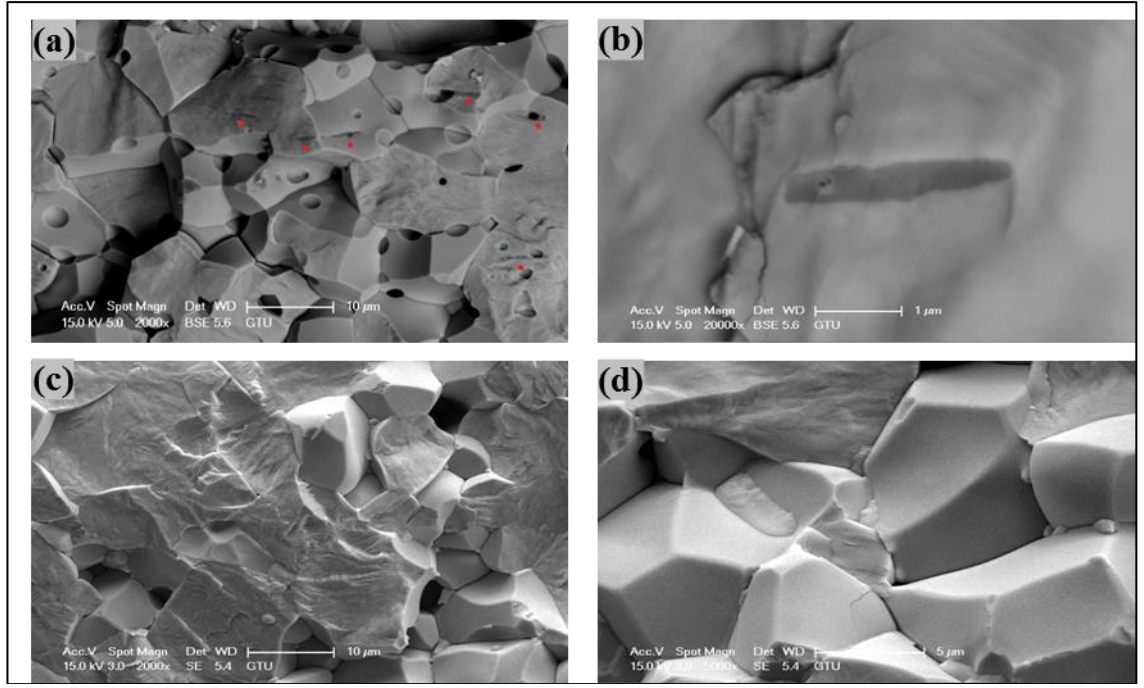
Şekilde 4.4 de görüldüğü gibi BT şablon eklenmiş seramiklerde yönlenme gözlemlenirken dokusuz seramiklerde herhangi bir yönlenme gözlemlenmemiştir. Ayrıca yönlenme derecesi Lotgering faktörü hesabıyla, en yüksek şiddetli pik değerinin diğer bütün piklerin toplamına bölümüyle 0 ile 1 değeri arasında yer alan değerler hesaplanmıştır.



Şekil 4.4: %1.5 Mn'lı PMN-PZT Seramiklerin X-Işını kırınımı deseni.

Şekil 4.5 de dokulu ve dokusuz seramiklere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Dokulu seramik görüntülerinde BT açıkça görülmektedir. Seramik matrisi ve BT şablon farklı bileşime sahip oldukları için renk konsantrasyon farkı da görülmektedir. Şekil 4.5 a)'da seramik matrisi içerisinde BT şablonların dağılımı gösterilmiştir ve Şekil 4.5. b)'de tek bir BT şablona odaklanılmış ve yaklaşık olarak SEM ölçeğinden de boyutunun 2 mikron olduğu görülmüştür. Ayrıca SEM görüntülerinden iyi bir yoğunluk kazandığı da görülmektedir.

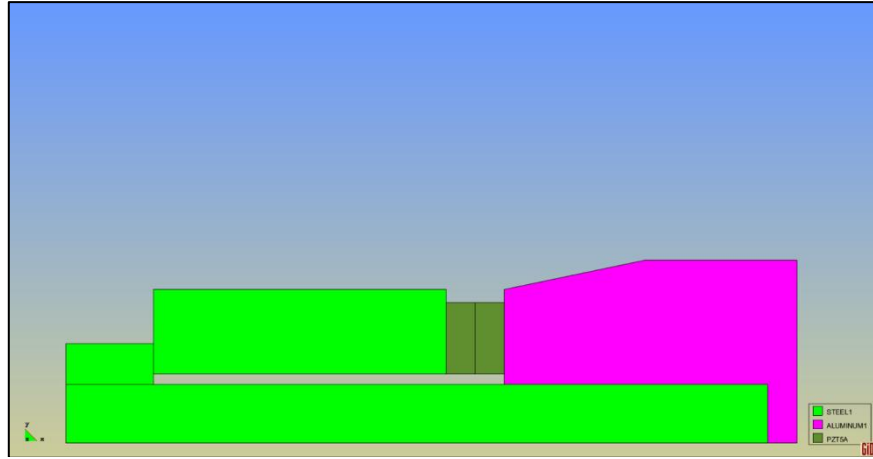
Şekil 4.5 c) ve d) dokusuz seramiğe ait olan SEM görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntüler ışığında dokusuz seramikte BT şablon yer almadığı için renk konsantrasyon farkı görülmemekte ve iyi bir yoğunluk kazandığı da anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5: PMN-PZT seramikleri SEM görüntüleri a) BT şablonların matris içindeki dağılımı, b) Matris içindeki tek BT şablon, c) ve d) Dokusuz seramik.

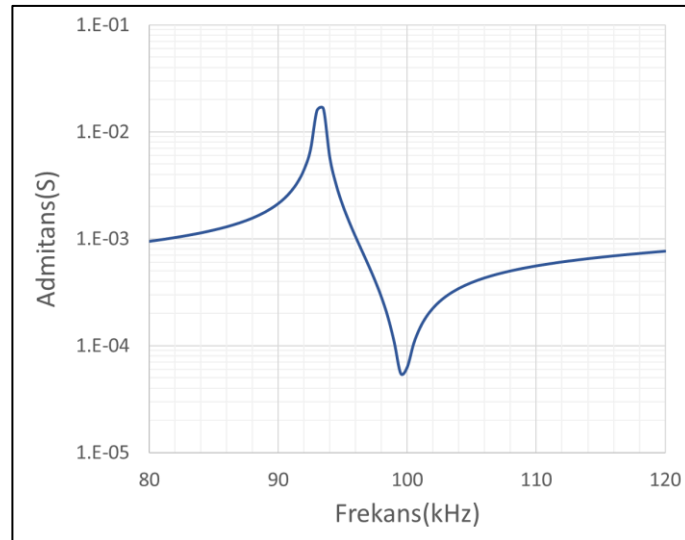
#### 4.4.Tonpilz Tipi Dönüştürücünün Sonlu Elemanlar Analizi

ATILA FEM yazılımında Mini-Tonpilz cihazda kullanılan alüminyum baş kütle 12,5mm\*12,5mm ölçülerde kare kesitli konik malzeme, 10,5 mm çap ve 10 mm yükseklikte 1040 çeliği ve 24 mm uzunluğunda metrik 4 vida ile buna uygun 3 mm yüksekliğindeki somun bu tasarım programında kullanılmak üzere belirlenmiştir. Birinci aşamada baş kütle olarak kare kesitli Alüminyum malzeme atanmıştır. Daha sonra tez çalışmasında da karşılaştırma amaçlı kullanılan ticari PZT5A kompozisyonuna sahip halka şeklinde piezoseramikler atanmış ve son olarak da kuyruk kütle ve sistemi basınç altında tutabilmek için vida olarak çelik malzemesi atanmıştır. Bu malzemeleri tanımladıktan sonra yazılımda sınır koşulları (boundary conditions) belirlenmiş ve rezonans davranışı analiz edilmiştir. Şekil 4.6'da ATILA da birinci aşamada atanan malzemeler baş kütle olan alüminyum pembe renk, PZT5A seramikler koyu yeşil renkte ve çelik malzeme olan vida ve kuyruk kütle açık yeşil renkte belirlenmiştir.



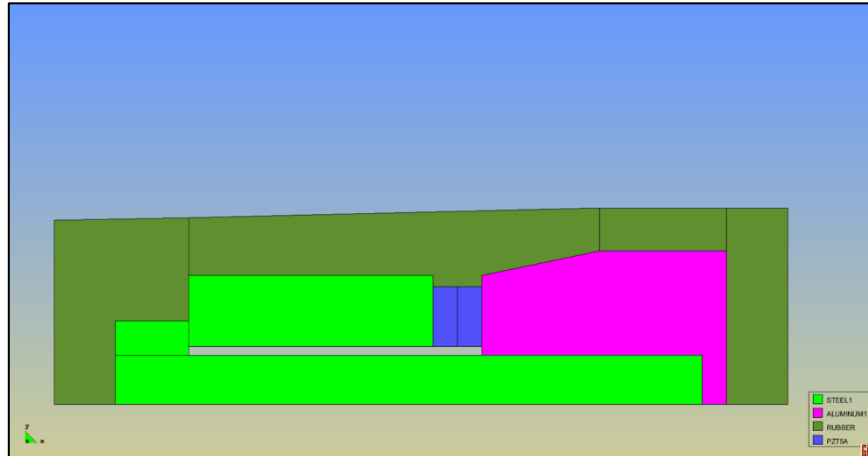
Şekil 4.6: ATILA modelleme 1. aşama (Ana malzemelerin atanması).

Şekil 4.7 de ATILA modelleme birinci aşamada rezonans frekansı( $f_r$ )=93500 Hz ve anti-rezonans frekansı( $f_a$ )=99500 Hz olup bant genişliği 6000 Hz olarak görülmüştür.



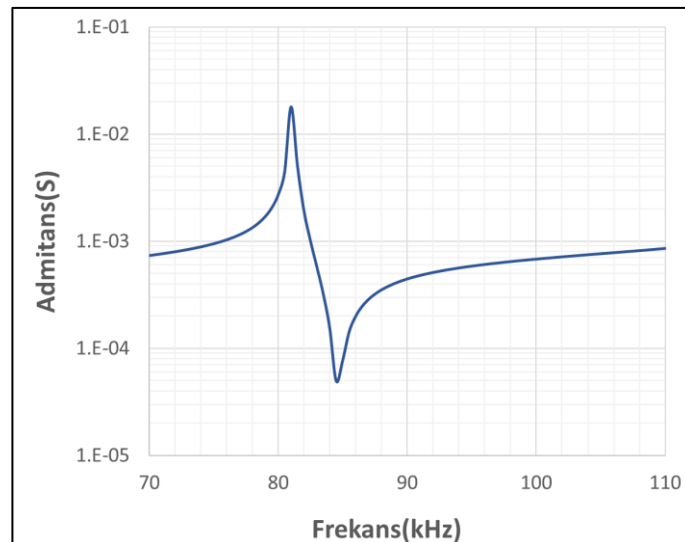
Şekil 4.7: ATILA modelleme birinci aşama rezonans spektrumu.

İkinci aşamada su ile uyumlu akustik empedansın sağlanması için birinci aşamada yapılan modellemenin üzerine belirlenen kalınlıkta ATILA da tanımlı olan polimerik malzeme kauçuk ile kaplanmıştır. Şekil 4.8’de ATILA da ikinci aşamada atanan malzemeler baş kütle olan alüminyum pembe renkte, PZT5A seramikler koyu mavi renkte, çelik kütle olan kuyruk ve vida açık yeşil renkte ve ikinci aşamada atanan kauçuk koyu yeşil renkte belirlenmiştir.



Şekil 4.8: ATILA modelleme ikinci aşama (Polimer kaplanması).

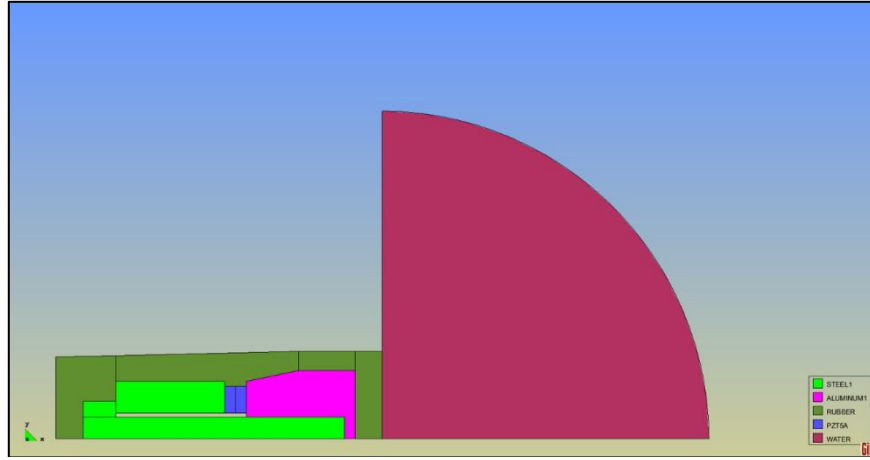
Şekil 4.9’da rezonans frekansı ( $f_r$ )=81000 Hz, anti-rezonans frekansı ( $f_a$ )=84500 Hz olup bant genişliği 3500 Hz olarak görülmüştür.



Şekil 4.9: ATILA modelleme ikinci aşama rezonans spektrumu.

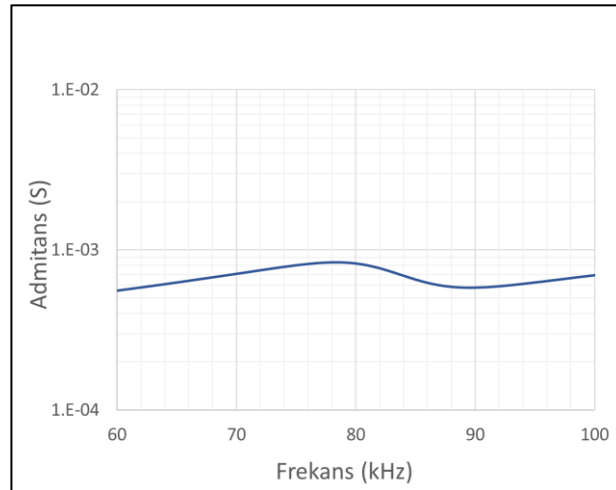
Nihai olarak ATILA da su altı performansını da karakterize edebilebilmesi için aktif yüzey olan baş kütleinin olduğu kısma deniz veya okyanus ortamını temsil eden sonsuz uzunlukta ortam atanmıştır. Şekil 4.10'da ATILA da üçüncü aşamada atanan malzemeler baş kütle olan alüminyum pembe renkte, PZT5A seramikler koyu mavi renkte, çelik kütle olan kuyruk ve vida açık yeşil renkte, ikinci aşamada atanan kauçuk koyu yeşil renkte son olarak atanan akustik ortam kırmızı renkte belirlenmiştir. Su altı karakterizasyonu da yapıldıktan sonra nihai amaç olan PMN-

PZT (Dokulu ve Dokusuz) ve ticari PZT5A seramiklerin üretimi yapılarak montaj işlemi yapıldı.



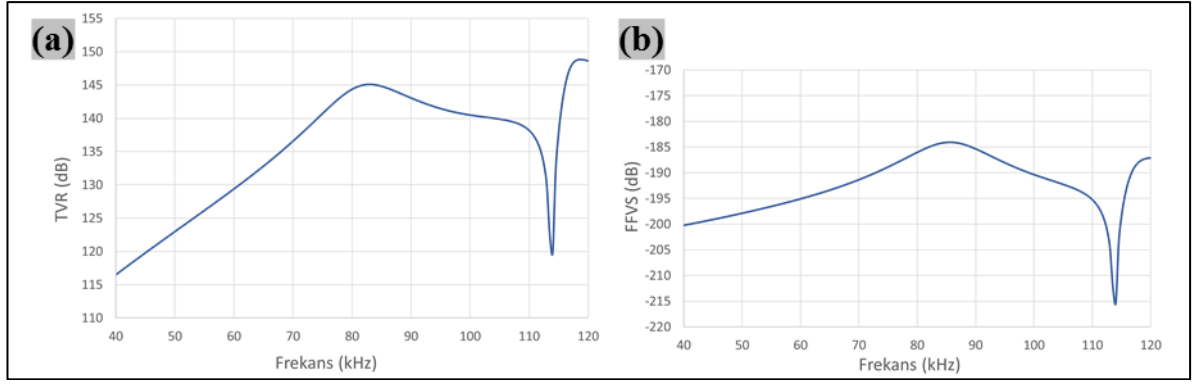
Şekil 4.10: ATILA modelleme üçüncü aşama (Akustik ortamının tanımlanması).

Şekil 4.11’de rezonans frekansı ( $f_r$ )=79500 Hz, anti-rezonans frekansı ( $f_a$ )=88500 Hz olup bant genişliği 9000 Hz olarak görülmüştür.



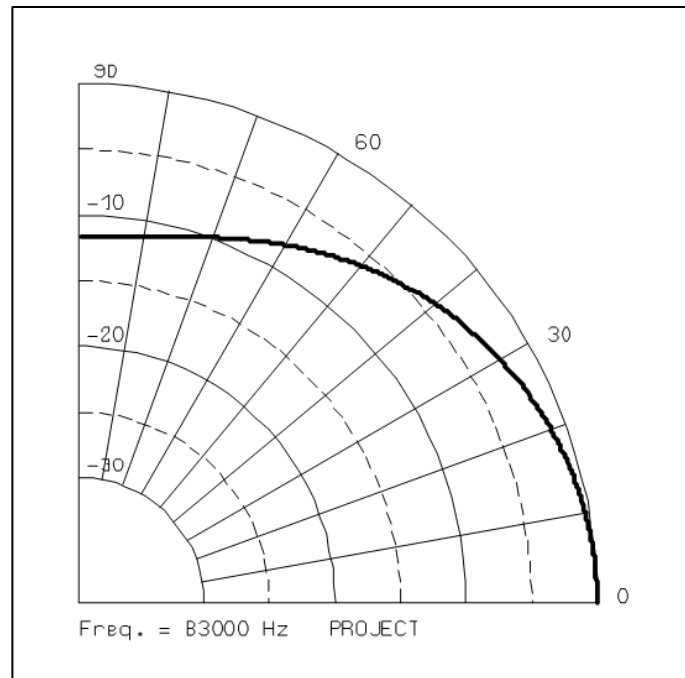
Şekil 4.11: ATILA modelleme üçüncü aşama rezonans spektrumu.

Şekil 4.12’de su altı karakteristikleri olarak FEM sonucunda İletim Gerilim Tepkisi(TVR) 83500 Hz de yani rezonans frekansında 145.08 dB olarak hesaplanmıştır. Serbest Alan Voltajı Hassasiyeti (FFVS) rezonans frekansında -186.05 dB olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.12: ATILA modelleme üçüncü aşama a) TVR, b) FFVS ölçümleri.

Şekil 4.13’de yönlülük indeksinde ki en önemli nokta -3 dB seviyesidir. -3 dB seviyesindeki yönlülük açısı dönüştürücünün açısıl tepkisini vermektedir. ATILA su altı karakterizasyon sonucu dönüştürücü açısıl tepkisi  $80^\circ$  olarak ölçülmüştür.



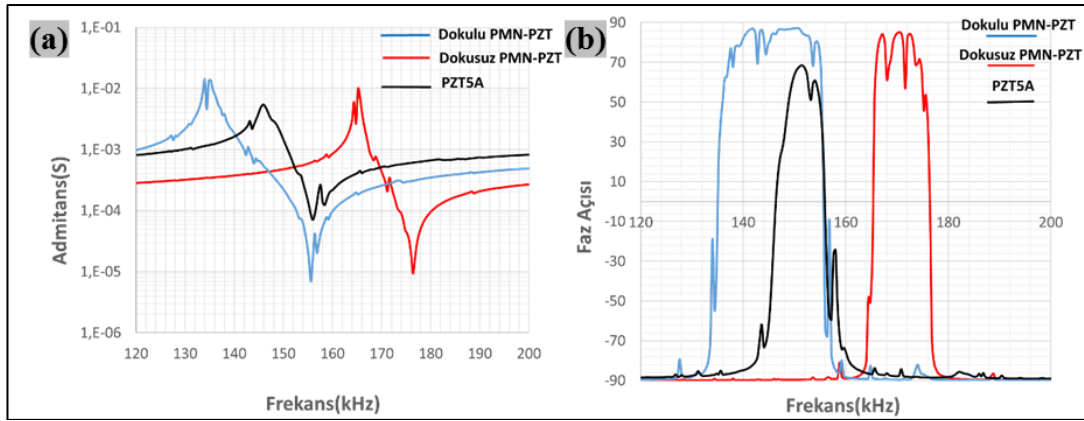
Şekil 4.13: ATILA modelleme üçüncü aşama yönlülük indeksi.

## 4.5. PMN-PZT ve PZT5A Seramiklerin Seramiklerin Karakterizasyonu

Dokulu ve Dokusuz şekilde üretilen PMN-PZT kompozisyonu ve ticari PZT5A tozundan elde edilen seramikler deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi üretilmiştir. PZT5A kompozisyonuna sahip seramik  $1260^\circ\text{C}$ 'de 4 saat sinterlenmesi sonucu elde

edilmiştir. Elde edilen seramikler mekanik işlemlerin ardından gümüş pasta ile elektrotlanıp 600° C’de gümüş pişimi yapılmıştır. Trek 610 D COR-A-TROL H.V.Supply Amplifier/controller cihazı ile uygulanan 30 kV/cm<sup>2</sup> elektrik alan uygulanarak kutuplama işlemi yapılmıştır ve elektriksel özellik kazandırılmıştır.

Şekil 4.14 a’da görüldüğü gibi Doku kazandırılmış PMN-PZT (%1.5 Mn, %3 BT) kompozisyonunda ki seramiklerimizin Dokusuz PMN-PZT (%1.5 Mn) ve ticari PZT5A kompozisyonuna göre admitans değeri daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Admitans değerinin maksimum olduğu yer rezonans frekansını( $f_r$ ), en düşük olduğu yer de antirezonans frekansını( $f_a$ ) ifade eder. Bu ikisinin farkına ise bant genişliği denir. Bant genişliği dokulu seramiklerde ( $f_r=134$  kHz,  $f_a=155$  kHz) 21 kHz’dir. PZT5A kompozisyonunda ( $f_r=146$  kHz,  $f_a=156$  kHz) 10 kHz’dir. Dokusuz seramiklerde ise ( $f_r=165$  kHz,  $f_a=176$  kHz) 11 kHz’dir. Bant genişliği fazla olan dokulu seramiklerin mini-tonpilz uygulamasında daha üstün özellik göstermesi beklenmektedir. Şekil 4.14 b’de görüldüğü gibi dokulu ve dokusuz seramiklerimizin kutuplama işlemi PZT5A kompozisyonuna göre daha başarılı olmuştur. Faz açısı 90’a ne kadar yakın ise kutuplama işlemi o kadar başarılı olmuş demektir ve seramiklerin elektriksel özellikleri de bu bağlamda daha üstün çıkmıştır.



Şekil 4.14: Üretilen seramiklerin a) Admitans-Frekans, b) Faz açısı- Frekans Grafiği.

Tablo 4.1 de PMN-PZT kompozisyonuna sahip dokulu ve dokusuz piezoelektrik seramiklerin  $d_{33}$ ,  $k_p$ ,  $Q_m$ ,  $\tan\delta$ ,  $\epsilon_r$ , değerleri hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 4.1: PMN-PZT (dokulu ve dokusuz) ve PZT5A özellikleri.

| Kompozisyon/Özellik | $d_{33}(\text{pC/N})$ | $k_p$ | $Q_m$ | $\% \tan \delta (1 \text{ kHz})$ | $\epsilon_r$ |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|----------------------------------|--------------|
| PZT5A               | 450                   | 0.63  | 100   | 1.2                              | 1850         |
| PMN-PZT(Dokulu)     | 610                   | 0.78  | 550   | 0.3                              | 1320         |
| PMN-PZT(Dokusuz)    | 210                   | 0.53  | 550   | 0.45                             | 750          |

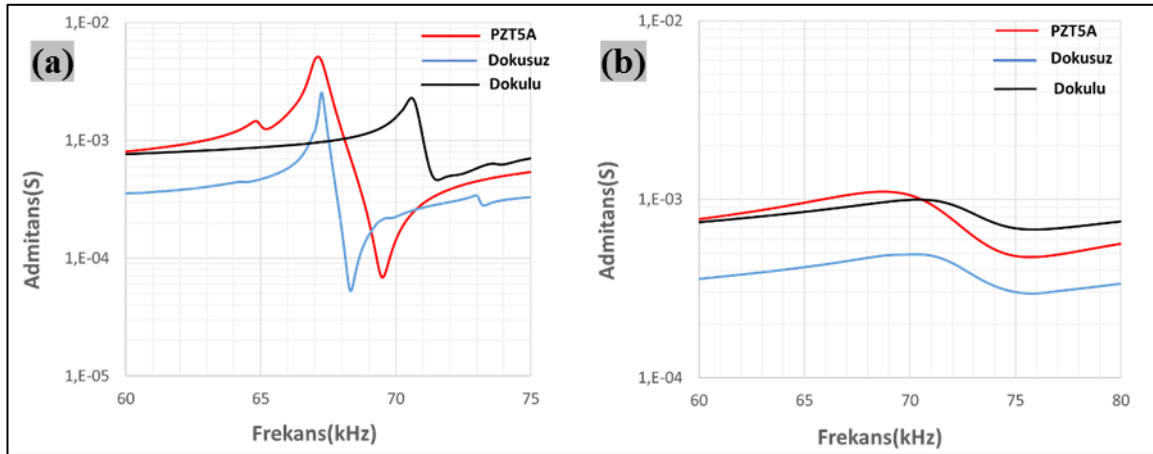
## 4.6. Mini-Tonpilz Dönüştürücülerin Elektriksel Karakterizasyonu

### 4.6.1. Havadaki Karakterizasyonu

Montaj sonrası her kompozisyonadaki mini-tonpilz aygıtların admitans- frekans ve faz açısı- frekans grafikleri poliüretan kaplama öncesi ve kaplama sonrası Hioki marka LCR metre ile ölçülmüştür. Şekil 4.15 deki poliüretan kaplama öncesi PZT5A seramiklerden montajı yapılan cihazın  $f_r=67200 \text{ Hz}$ ,  $f_a=69550 \text{ Hz}$  ve bant genişliği  $2350 \text{ Hz}$ 'dir. Ayrıca en büyük admitans değeri bu cihazdadır. Dokusuz seramiklerde bu değerler  $f_r=67300 \text{ Hz}$ ,  $f_a=68350 \text{ Hz}$  olup bant genişliği  $1050 \text{ Hz}$ 'dir. Dokulu seramikler de ise  $f_r=70700 \text{ Hz}$ ,  $f_a=71550 \text{ Hz}$  ve bant genişliği de  $950 \text{ Hz}$ 'dir. Dokulu ve dokusuz seramiklerden montajı yapılan cihazların admitans değeri PZT5A'dan yapılan cihazdan daha düşük olup yaklaşık olarak aynı değerdedir. Bu ölçümler cihaz montajı yapıldıktan sonraki 1.ölçümünden yaklaşık 2 ay sonraki elektriksel ölçümlerdir. Bu bölümde aşağıda montaj sonrası elektriksel ölçümlerin periyodik olarak Mini-Tonpilzlerde ki değişimi kıyaslanacaktır.

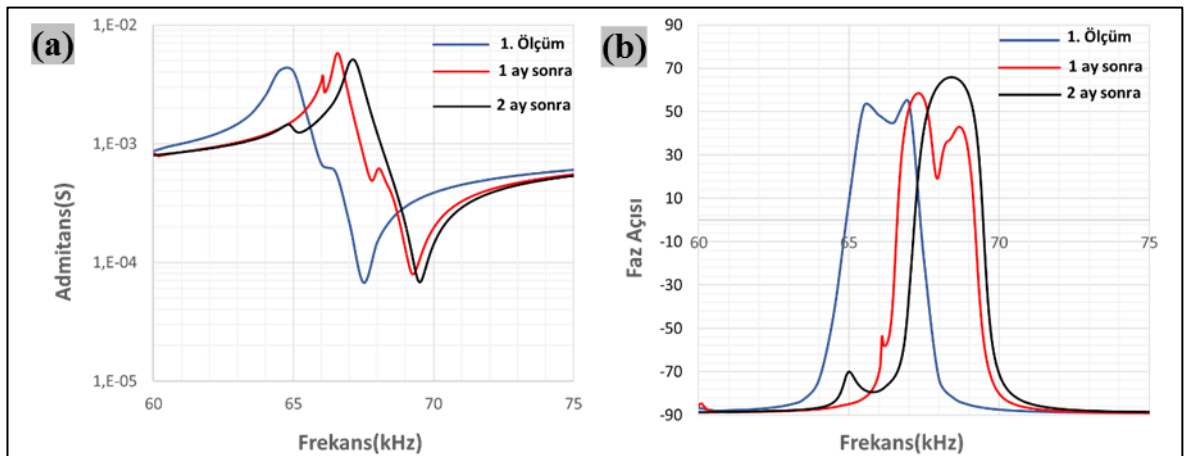
Şekil 4.15 de poliüretan kaplama sonrası alınan ölçümlerde daha yayvan pikler gözlemlenmektedir. Bu, mini-tonpilz aygıtın su altında daha efektif performans göstermesi ve elektriksel bağlantıların sudan korunması amacıyla kullanılması son derece önemlidir. Poliüretan kaplama sonrası PZT5A seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilz cihazın  $f_r=70100 \text{ Hz}$ ,  $f_a=74700 \text{ Hz}$  olup bant genişliği  $3600 \text{ Hz}$  dir. Dokusuz seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilz'in  $f_r=71600 \text{ Hz}$ ,  $f_a=74700 \text{ Hz}$  olup bant genişliği  $3100 \text{ Hz}$ 'dir. Dokulu seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilz de ise  $f_r=71450 \text{ Hz}$ ,  $f_a=74800 \text{ Hz}$  olup bant genişliği  $3350 \text{ Hz}$ 'dir. Admitans değerlerine bakıldığında PZT5A seramiklerinin kullanıldığı aygıt en büyük değeri gösterirken dokulu

seramiklerin kullanıldığı cihaz da dokusuz seramiklerin kullanıldığı cihaza göre daha yüksek değer sergilemiştir.



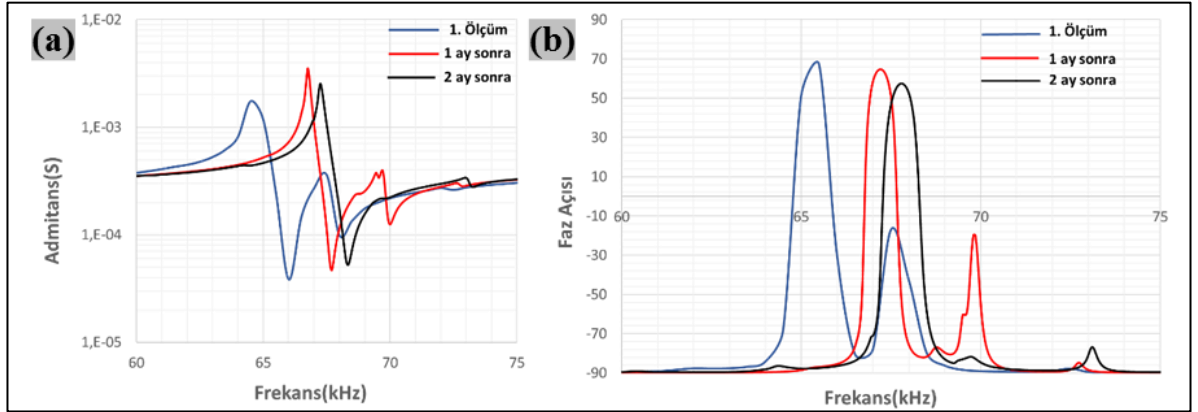
Şekil 4.15: Mini-tonpilz elektriksel karakterizasyonu, a) Poliüretan kaplama öncesi Admitans-Frekans, b) Poliüretan kaplama sonrası Admitans-Frekans grafiği.

Şekil 4.16 da PZT5A seramiklerin kullanıldığı poliüretan kaplama öncesi mini-tonpilz aygıtın periyodik olarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmadaki amaç mekanik gerilme altında zamanla admitans-frekans grafiğindeki değişimi gözlemlemek ve su altı uygulamaları için cihaz performansını tahmin etmektir. Mekanik gerilme altındaki cihazın genel eğilimi Şekil 4.16’da görüldüğü gibi sağa doğru kaymasıdır. Sırasıyla rezonans frekansları( $f_r$ ) 65000,66650,67250 Hz ve antirezonans frekansları( $f_a$ ) da 67500,69400,69550 Hz olup bant genişlikleri 2500,2750,2300 Hz olarak görülmüştür.



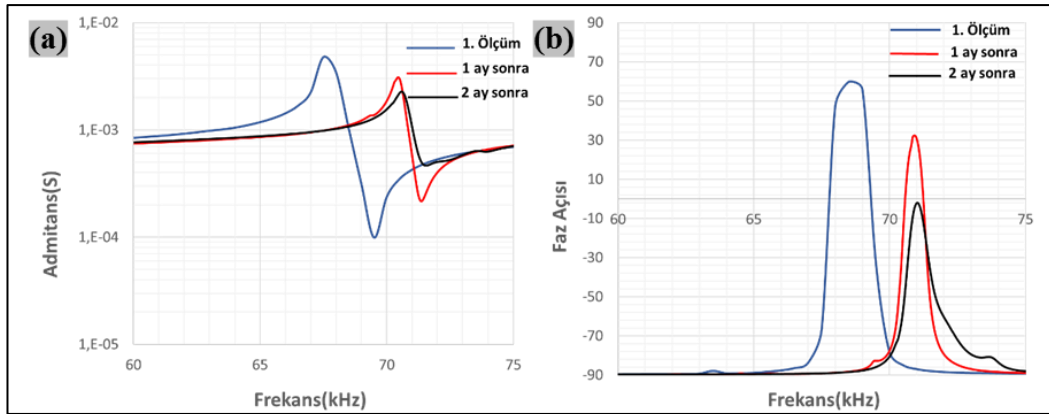
Şekil 4.16: Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpilz (PZT5A) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.

Şekil 4.17 de dokusuz seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilz aygıtın periyodik olarak elektriksel ölçümleri yer almaktadır. Buradaki genel eğilim de mekanik gerilme altında rezonans frekansının sağa doğru kayması şeklinde olmuştur. Sırasıyla rezonans frekansı( $f_r$ ) 64500,66800,67300 Hz ve anti-rezonans frekansı( $f_a$ ) 66000,67700,68350 Hz olup bant genişlikleri 1500,900,1050 Hz olarak görülmüştür.



Şekil 4.17: Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpilz (Dokusuz) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.

Şekil 4.18 de Dokulu seramiklerin kullanıldığı Mini-Tonpilz cihazın periyodik olarak elektriksel ölçümleri yer almaktadır. Mekanik gerilim altındaki eğilimi bu kompozisyondaki cihazda rezonans frekansının sağa doğru kayması şeklinde olmuştur. Sırasıyla rezonans frekansı( $f_r$ ) 67000,70500,70650 Hz ve anti-rezonans frekansı( $f_a$ ) 69500,71450,71550 Hz olup bant genişlikleri 2500, 950,900 Hz'dir.

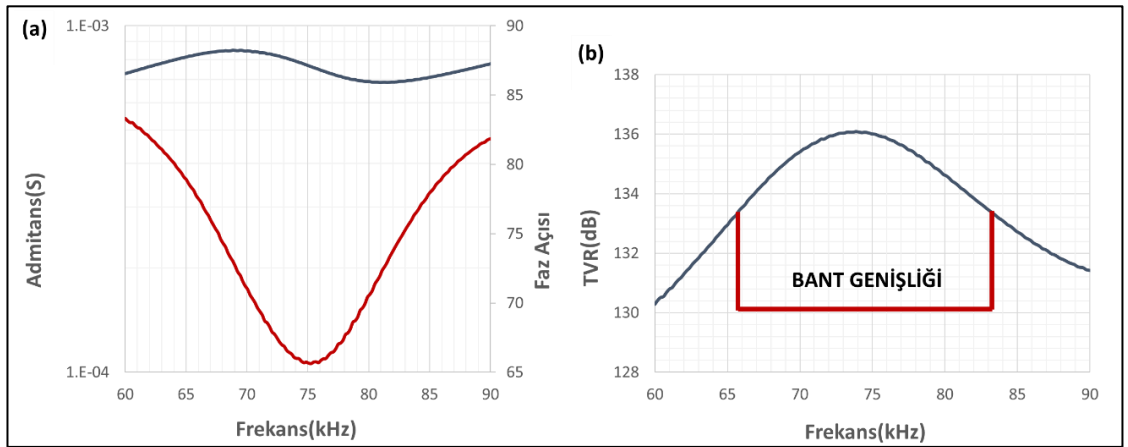


Şekil 4.18: Poliüretan kaplama öncesi periyodik mini-tonpilz (dokulu) elektriksel ölçümleri a) admitans -frekans b) faz açısı-frekans grafikleri.

#### 4.6.2.Akustik Karakterizasyonu

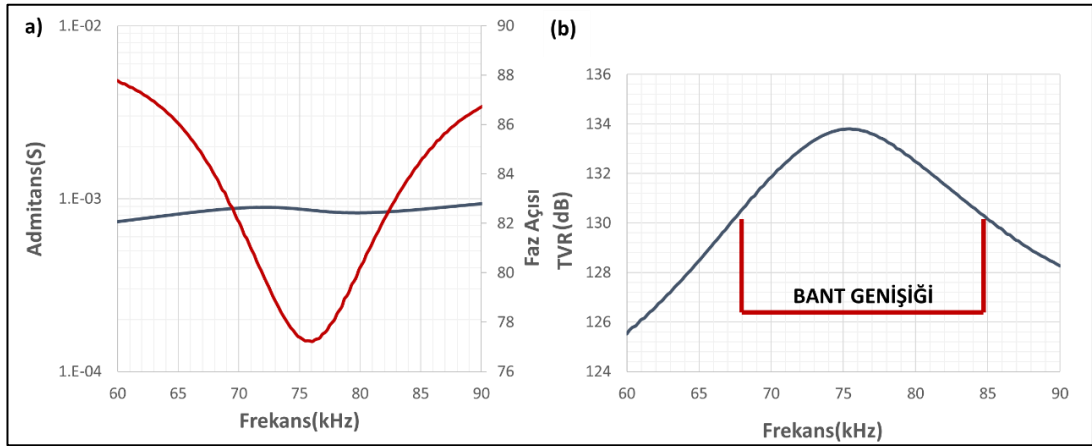
Mini tonpilz dönüştürücülerin akustik karakterizasyonu KOÇ Bilgi Savunmaları A.Ş bünyesinde bulunan akustik havuzda yapılmıştır. Akustik havuz içerisinde montajı yapılan ve poliüretanla kaplanan mini tonpilz dönüştürücülerin frekansa bağlı olarak admitans ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlere bağlı olarak ta TVR değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonrasında çizilen grafikler eşliğinde mini tonpilz dönüştürücülerin akustik performansları hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Şekil 4.19 a) da PZT5A seramik halkaların montajında kullanıldığı mini tonpilz dönüştürücünün su altındaki frekansa bağlı admitans ölçümü verilmiştir. PZT5A seramiklerin kullanıldığı dönüştürücünün rezonans frekansı ( $f_r$ )=66000 Hz antirezonans frekansı ( $f_a$ )=83500 Hz olup bant genişliği 17500 Hz'dir. Admitans değeri dokulu seramikle aynı değerde görülmüştür. Faz açısı ise 66° dir. Şekil 4.19 b) de iletim gerilim tepkisi (TVR) grafiği verilmiştir. TVR grafiği bize PZT5A seramiklerinin kullanıldığı mini tonpilz dönüştürücünün 1 metre uzaklıktaki oluşturduğu gürültüyü desibel (dB) ölçeğinde bize göstermiştir. Yaklaşık olarak 136 dB lik bir gürültü oluşturmuştur. Bu iki grafikten de yola çıkarak bant genişliği hesaplanabilmektedir. Maksimum TVR değerinden -3 dB altında ki mutlak frekans aralığına denk gelmektedir ve yaklaşık olarak 66000 Hz ile 83500 Hz arasında grafik üzerinden okunmuştur. Bant aralığını hesaplamak için frekansa bağlı admitans grafiği ve TVR grafiği birbiriyle büyük ölçüde örtüşmüştür.



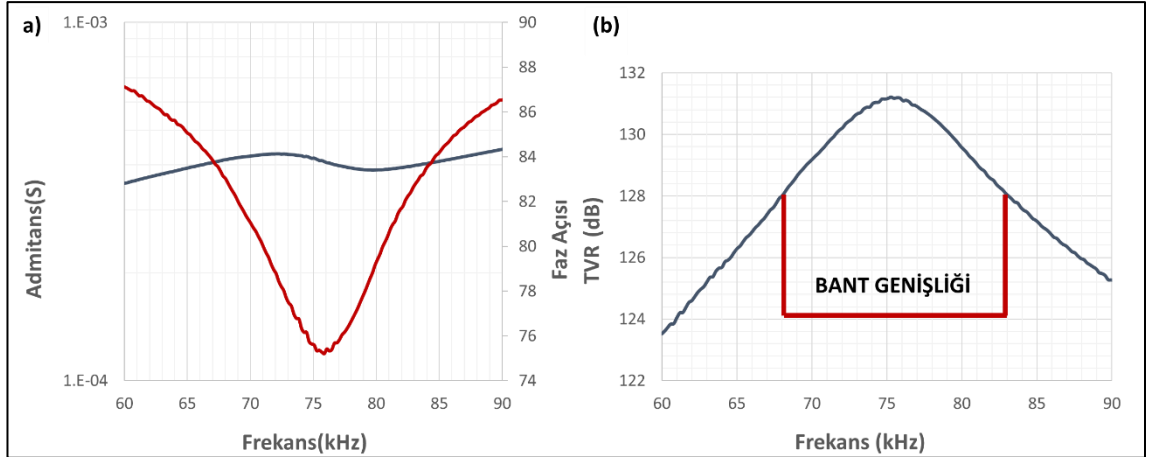
Şekil 4.19: Mini tonpilz (PZT5A) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans-frekans, b) TVR ölçümleri.

Şekil 4.20 a) da Dokulu seramik halkaların montajında kullanıldığı mini tonpilz dönüştürücünün su altındaki frekansa bağlı admitans ölçümü verilmiştir. Dokulu seramiklerin kullanıldığı dönüştürücünün rezonans frekansı ( $f_r$ )=67500 Hz antirezonans frekansı ( $f_a$ )=84500 Hz olup bant genişliği 17000 Hz'dir. Admitans değeri yaklaşık olarak PZT5A ile aynı değerde görülmüştür. Faz açısı ise  $-77^\circ$  dir. Şekil 4.20 b) de iletim gerilim tepkisi (TVR) grafiği verilmiştir. Yaklaşık olarak 134 dB lik bir gürültü oluşturmuştur. Bu iki grafikten de yola çıkarak bant genişliği hesaplanabilmiştir. Maksimum TVR değerinden -3 dB altında ki mutlak frekans aralığına denk gelmektedir ve yaklaşık olarak 67500 Hz ile 84500 Hz arasında grafik üzerinden okunmuştur. Bant aralığını hesaplamak için frekansa bağlı admitans grafiği ve TVR grafiği birbiriyle büyük ölçüde örtüşmüştür.



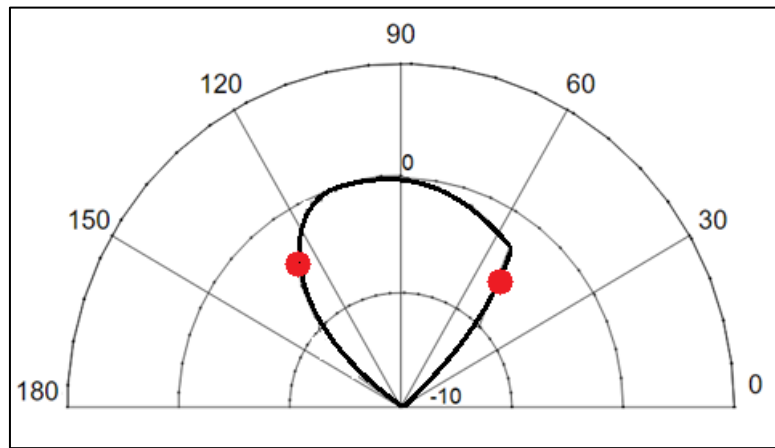
Şekil 4.20: Mini tonpilz (Dokulu) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans, faz açısı-frekans, b) TVR ölçümleri.

Şekil 4.21 a) da Dokusuz seramik halkaların montajında kullanıldığı mini tonpilz dönüştürücünün su altındaki frekansa bağlı admitans ölçümü verilmiştir. Dokulu seramiklerin kullanıldığı dönüştürücünün rezonans frekansı ( $f_r$ )=68000 Hz antirezonans frekansı ( $f_a$ )=83000 Hz olup bant genişliği 15000 Hz'dir. Admitans değeri PZT5A ve dokulu seramiklerin kullanıldığı cihazlara kıyasla daha düşük görülmüştür. Faz açısı ise  $75^\circ$  dir. Şekil 4.20 b) de iletim gerilim tepkisi (TVR) grafiği verilmiştir. Yaklaşık olarak 131 dB lik bir gürültü oluşturmuştur. Bu iki grafikten de yola çıkarak bant genişliği hesaplanabilmiştir. Maksimum TVR değerinden -3 dB altında ki mutlak frekans aralığına denk gelmektedir ve yaklaşık olarak 68000 Hz ile 83000 Hz arasında grafik üzerinden okunmuştur. Bant aralığını hesaplamak için frekansa bağlı admitans grafiği ve TVR grafiği birbiriyle büyük ölçüde örtüşmüştür.



Şekil 4.21: Mini tonpiliz (Dokusuz) dönüştürücünün akustik ortamda a) admitans-frekans, b) TVR ölçümleri.

Şekil 4.22 de dokulu seramiklerden montajı yapılan mini-tonpiliz dönüştürücünün yönlülüğü akustik havuzda yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Yönlülük indeksi dönüştürücünün kaç derecelik açı ile dalga frekansı yaydığı tayin edilir. ATILA modelleme programında olduğu gibi dokulu seramik kullanılan mini-tonpiliz dönüştürücüde gerçek yapılan ölçümlerde aynı sonuç elde edilmiştir. Yönlülük dönüştürücü içerisindeki kullanılan malzemeden çok montajda kullanılan boyutlarla alakalıdır. Ölçümü yapılan dönüştürücüye bakıldığında -3 dB seviyesi noktalarla belirtilmiştir. Bu noktalar arasında yaklaşık olarak 80° lik bir açıya sahip yönlülüğe sahip olduğu gözlenmiştir.

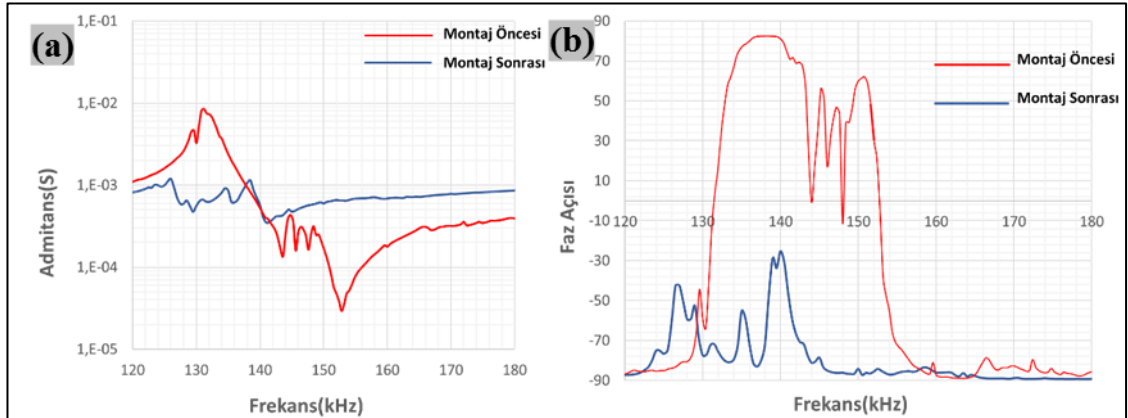


Şekil 4.22: Mini tonpiliz (dokulu) dönüştürücünün yönlülük indeksi.

#### 4.7.Mekanik Gerilimin Seramiklerin Özelliklerine Etkisi

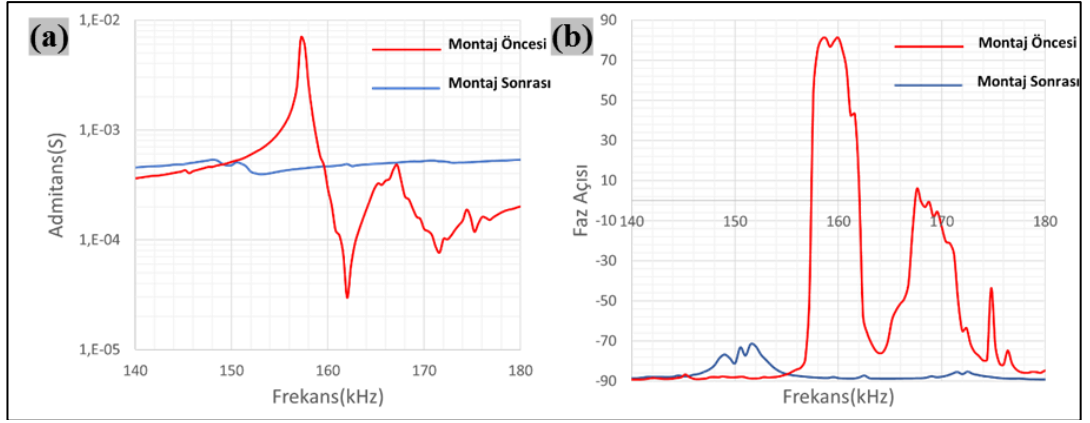
Piezoelektrik seramiklerin piezoelektrik özelliklerinde 3 şekilde düşüş gerçekleşir. Bunlardan birincisi yaşlanma(aging) dediğimiz zamanla piezoelektrik özelliklerde ki düşüş, ikincisi ısı işlem gördüğünde yani curie sıcaklığının üzerine çıktığında depolarize olmasıyla, üçüncüsü de mekanik gerilim altında özelliklerin düşmesi olarak söylenebilir.

Şekil 4.23 de montaj öncesi dokulu piezoseramiklerin  $f_r=132000$  Hz,  $f_a=152000$  Hz olup bant genişliği 20000 Hz olarak görülmüştür. Faz açısı  $85^\circ$  olarak ölçülmüştür. Fakat montajda kullanılmış bu seramik 3 ay mekanik gerilim altında kaldıktan sonra montaj parçalara ayrılarak seramiğin özellikleri tekrardan incelenmiştir. Montaj sonrası yapılan ölçümlerde bant genişliği oldukça daralmış ve faz açısında da büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca montaj öncesi dokulu seramik  $d_{33}$  değeri 590 pC/N olarak ölçülmüş fakat montaj sonrası  $d_{33}$  değeri 150 pC/N seviyelerine düşmüştür.



Şekil 4.23: Dokulu PMN-PZT seramiklerin montaj öncesi ve montaj sonrası (mekanik gerilimden sonra) a) Admitans-Frekans, b) Faz Açısı-Frekans grafiği.

Şekil 4.24 de dokulu seramiklerde gözlenen durum dokusuz seramiklerde de gözlemlenmiştir. Dokusuz seramiklerin  $d_{33}$  değeri 210 pC/N seviyelerinden 50 pC/N seviyelerine düştüğü belirlenmiştir. Bant genişliği 10000 Hz seviyesinden 2000 Hz seviyelerine düştüğü de görülmüştür.



Şekil 4.24: Dokusuz PMN-PZT seramiklerin montaj öncesi ve montaj sonrası (mekanik gerilimden sonra) a) Admittans-Frekans, b) Faz Açısı-Frekans grafiği.

## 5.GENEL SONUÇLAR VE YORUMLANMASI

0.4PMN-0.25PZ-0.35PT kompozisyona ait toz molce %1.5  $MnO_2$  dopantı yapılarak elde edilmiştir. Ergiyik tuz senteziyle  $BaTiO_3$  tek kristal plakasal şablonlar başarılı bir şekilde sentezlendi. PMN-PZT kompozisyonuna BT şablonlar eklenerek şerit döküm yöntemiyle ve hemen sonrasında ki sinterleme işlemiyle başarılı bir şekilde halka şeklinde dokulu PMN-PZT seramikler elde edildi. BT şablon eklemeyen PMN-PZT kompozisyonunda şerit döküm yöntemiyle ve hemen sonrasında sinterleme işlemi ile dokusuz PMN-PZT seramikler elde edildi. Dokulu ve dokusuz PMN-PZT seramikleri kıyaslama amaçlı olarak halka şeklinde ticari PZT5A tozundan tek eksenli presleme aynı boyutlarda seramikler başarılı bir şekilde üretildi ve bu üç kompozisyondaki seramikler elektriksel olarak karakterize edildi. Elektriksel özellikleri kıyaslandığında beklenildiği gibi dokulu PMN-PZT kompozisyondaki seramikler diğer kompozisyonlara göre daha üstün özellik sergilemiştir. Bu doğrultuda aygıt uygulamasında da aynı performansı sergilemesi beklenildi. Üç farklı kompozisyondaki seramiklerden başarılı bir şekilde mini-tonpilz dönüştürücü montajı yapıldı. Montajı yapılan aygıtlarda beklenildiği gibi dokulu PMN-PZT seramiklerden montajı yapılan mini-tonpilz dönüştürücünün hemen montaj sonrası yapılan elektriksel ölçümlerinde daha üstün özellik sergiledi. Piezoelektrik seramiklerin özelliklerinin zamanla yaşlanma (aging) düştüğü bilinmekte olduğu için montajı yapılan dönüştürücüler bir ay ve iki ay sonra tekrar ölçümleri alınmak üzere bekletildi. Bir ay sonraki ölçümlerde dokulu seramiklerin bulunduğu mini-tonpilz dönüştürücünün özellikleri bariz bir şekilde düşüş gözlenirken dokusuz ve ticari PZT5A seramiklerinden montajı yapılan mini-tonpilz dönüştürücüler de göz ardı edilebilir bir düşüş gözlenmiştir. Daha sonra poliüretanla kaplandı ve elektriksel ölçümler tekrardan yapıldı. Poliüretanla kaplı mini-tonpilz dönüştürücülerde de aynı durum gözlemlendi. Akustik ölçümleri yapıldıktan sonra PZT5A seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilz dönüştürücünün en üstün özellik sergilediği gözlemlendi. Dokulu seramikler PZT5A seramiklerin kullanıldığı mini-tonpilze yakın özellikler sergilemiştir. Dokusuz seramiğe göre daha üstün özellik sergilemiştir. Fakat beklenen performans gözlemlenememiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda dokulu PMN-PZT seramiklerin mekanik basınç altında zamana bağlı olarak depolarize olduğu demonte edilen mini-tonpilz dönüştürücünden alınan

seramikler ile gösterildi. Sonuç olarak dokulu PMN-PZT seramikler üretildiğinde dokusuz ve ticari PZT5A seramiklerine göre elektriksel olarak üstün özellik sergilerken mekanik gerilim altındaki aygıt uygulamasında pek avantajlı görülmemektedir. Mekanik gerilim altındaki özelliklerinin düşme sebebi yeni bir araştırma konusu açmış ve dokulu seramiklerdeki doku oluşumunun incelenmesi önem kazanmıştır.

## KAYNAKLAR

Alkoy E.M, Papila M., (2010), "Microstructural Features and Electrical Properties of Copper Oxide Added Potassium Sodium Niobate Ceramics", Ceramic International, 36, 1921-1927.

Bjorno L., (2002), "Features of Underwater Acoustics from Aristotle to Our Time", Acoustical Physics, 49(1), 24-30.

Carter C.B, Norton M.G., (2007), "Ceramic Materials: Science and Engineering", 1st Edition, Springer Science & Business Media.

Cochran, J.C., (2014), "Elements of Sonar Transducer Design", 1st Edition Applied Technology Institute Course Notes.

Çepni, K., (2011), "A Methodology for Designing Tonpilz-Type Transducers", The Degree of Master of Science, Middle East Technical University.

Çiçek M., (2014), "Optimization of Design Parameters for Tonpilz Type Transducers", The Degree of Master of Science, Middle East Technical University.

Dan L., Yongke Y., Heping Z., (2007), "Synthesis of Micron-Scale Platelet BaTiO<sub>3</sub>", Journal American Ceramic Society., 90, 1323–1326.

Dursun S., (2017), "Kristalografik Dokuya Sahip Piezoseramiklerin Ultrasonik Motor Uygulamaları" Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

George A.S., (2005), "Relaxor Properties of Compositionally Disorderes Perovskites: Ba and Bi Substituted Pb(Zr<sub>1-x</sub> Ti<sub>x</sub>)O<sub>3</sub>" American Physical Society, B 71, 224108.

Gonzalo J.A., Jimenez B., (2005), "Ferroelectricity", 1st Edition, Wiley VCH Verlag & Co. KGaA.

Haertling G.H., (1999), "Ferroelectric Ceramics: History and Technology", Journal American Ceramic Society, 82, 797- 818.

Hunt F. V., (1954), "Electroacoustics", 1st Edition, Harvard University Press.

Kao K.C., (2004), "Dielectric Phenomena in Solids: With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes", 1st Edition, Elsevier Academic Press.

Kimura T., (2011), "Molten Salt Synthesis of Ceramic Powders", Keio University.

Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlman D.R., (1976), "Introduction to Ceramics", 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd.

Kong L.B., Zhang T.S., Ma J., Boey F., (2008), ‘‘Progress in Synthesis of Ferroelectric Ceramic Materials via High-Energy Mechanochemical Technique’’, *Progress in Materials Science*, 53, 207–322.

Messing G.L., McKinstry S.T., Sabolsky E. M., Duran C., Kwon S., Brahmaroutu B., Park P., Yilmaz H., Rehrig P.W., Eitel K. B., Suvaci E., Seabaugh M., Oh K. S., (2004), ‘‘Templated Grain Growth of Textured Piezoelectric Ceramics’’, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29, 45–96.

Moetakef P., Nemati Z.A., (2009), ‘‘Study of microstructure and dielectric properties of PMN–PZT ceramics via a mixed powder method including sol–gel precursor’’, *Journal of Alloys and Compounds*, 476, 791–796.

Moulson A., Herbert J., (2003), ‘‘Electroceramics: Materials, Properties, Applications’’, 2nd Edition, John Wiley and Sons Ltd.

Newnham R.E., (2005), ‘‘Properties of Materials Anisotropy, Symmetry and Structure’’, 1st Edition, Oxford University Press.

Park S.E., Shrout T.R., (1997), ‘‘Ultrahigh Strain and Piezoelectrics Behavior in Relaxor Based Ferroelectric Single Crystals’’, *Journal of Applied Physics*, 82, 1804–1811.

Safari A., Akdoğan E.K., (2008), ‘‘Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducers Applications’’, 1st Edition, Springer Science & Business Media.

Sherman C.H., Butler J.L., (2007), ‘‘Transducers and Arrays for Underwater Sound’’, 3rd Edition, Springer Science and Business Media.

Sossity A.S., (2000), ‘‘Dielectric and Electromechanical Properties of Ba and Zr, Co Doped Sodium Bismuth Titanate’’, Doctor of Philosophy Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Stansfield D., (1991), ‘‘Underwater Electroacoustic Transducers’’, 1st Edition, Peninsula Publishing.

Tswen L.H., Van Aken D.C., Huebner W., (1996), ‘‘Structural Origin of Relaxor Ferroelectrics-Revisited’’, *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 57, 1525– 36.

Uchino K., (2000), ‘‘Ferroelectric Devices’’, 2nd Edition, Taylor & Francis Group.

Urlick, R. J., (1983), ‘‘Principles of Underwater Acoustics’’, 3rd Edition, Peninsula Publishing.

Vijaya M.S., (2013), ‘‘Piezoelectric Materials and Devices’’, 1st Edition, Taylor and Francis Group.

Yan Y., Cho K.H., Priya S., (2011), ‘‘Role of Secondary Phase in High Power Piezoelectric PMN-PZT Ceramics’’, Journal of the American Ceramic Society, 94, 4138–4141.

Web 1, (2018), <http://www.dosits.org/people/history/pre1800/> (Eriřim Tarihi: 03/03/2018).

## ÖZGEÇMİŞ

Kadir KOÇAK, 1 Nisan 1992’de Gebze’de doğdu. Lise öğrenimini İstanbul’da Necip Fazıl Kısakürek Lisesinde 2010 yılında tamamladı ve aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünü 2015 yılında bitirip aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansına ve ENS Piezoaygıtlar Ltd. şirketinde Ar-ge Mühendisi olarak çalışmaya başladı.