

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİSK VE HALKA FORMUNDA EŞEKSENLİ 1-3
PIEZOKOMPOZİT DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN TASARIMI,
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

EVİRİM SANCAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. SEDAT ALKOY

TEMMUZ 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİSK VE HALKA FORMUNDA EŞEKSENLİ 1-3
PIEZOKOMPOZİT DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN TASARIMI,
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

EVİRİM SANCAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. SEDAT ALKOY

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DESIGN, FABRICATION, AND CHARACTERIZATION OF
COAXIAL 1-3 PIEZOELECTRIC COMPOSITE TRANSDUCERS
IN DISC AND RING GEOMETRIES**

EVİRİM SANCAK

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. SEDAT ALKOY

JULY 2025



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/06/2025 tarih ve 2025/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10/07/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Evrim SANCAK'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. DR. Sedat ALKOY

ÜYE

: Prof. Dr. Koray ÖZTÜRK

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yunus KAYA

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

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

İMZA/MÜHÜR



Aileme, eşıme
ve
biricik oğluma

ÖZET

Bu çalışmada, sonar sistemlerde hem algılayıcı hem de gönderici olarak işlev görebilen, 1-3-2 bağlantı notasyonuna sahip piezoelektrik kompozitlerin üretimi ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapılar, halka ve disk formunda tasarlanmış ve iç içe geçecek şekilde yapılandırılmıştır. Algılayıcı birim için yumuşak piezoelektrik karakterde PZT-5A, gönderici birim için ise sert piezoelektrik karakterde PZT-4 piezo seramikleri tercih edilmiştir. Farklı halka ve disk boyutları kullanılarak elde edilen numunelerin akustik ve elektriksel performansları karşılaştırılmıştır.

Numuneler, mekanik presleme yöntemiyle şekillendirilmiş, ardından sinterleme ve zımparalama işlemlerinden geçirilmiştir. Daha sonra elektrotlanarak kutuplanmış ve dilimleme işlemi ile 1-3-2 bağlantı yapısı oluşturulmuştur. Algılayıcı ve gönderici birimlerin etkileşimini önlemek amacıyla, akustik gürültü önleyici bir seramik taban üzerine yerleştirilmiş ve arka yansımalara karşı akustik yalıtım sağlanmıştır. Son olarak yapı, poliüretan kaplama ile tamamlanarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yapı, sonar sistemler için çift işlevli piezoelektrik uygulamalarında kullanılabilir potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik, Seramik, 1-3-2 Piezokompozit, Algılayıcı, Akustik

ABSTRACT

In this study, the fabrication and optimization of piezoelectric composites with a 1-3-2 connectivity notation, capable of functioning as both sensors and projectors in sonar systems, have been carried out. The composite structures were designed in ring and disc forms and configured to fit concentrically. PZT-5A ceramic was selected for the sensing element, while PZT-4 was used for the projectors element. Acoustic and electrical performances of the samples were compared using various ring and disc dimensions.

The samples were shaped using a mechanical pressing method, followed by sintering and surface grinding processes. Subsequently, electrodes were applied, and the samples were polarized. The 1-3-2 connectivity structure was then formed through precision dicing. To prevent interference between the sensing and actuating elements, each was mounted on a ceramic base that also served to reduce acoustic noise and back reflections. Finally, the composite structure was completed with a polyurethane coating. The resulting design holds promising potential for dual-function piezoelectric sensor applications in sonar systems.

Keywords: Piezoelectric, Ceramic, 1-3-2 Piezocomposite, Sensors, Acoustics

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi, deneyim ve rehberliğiyle sürece yön veren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Sedat Alkoy'a, akademik desteği, sabrı ve yol gösterici katkıları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmaların yürütülmesinde laboratuvar ortamında değerli destekleriyle sürece katkı sağlayan Muhammet Boz, Maral Kervancı, Emirhan Ersoy ve Burak Dağışan'a, göstermiş oldukları iş birliği ve emekleri için teşekkür ederim. Tez kapsamında ihtiyaç duyulan bazı malzemelerin temini ve teknik destek konularında katkı sunan ENS Piezoaygıtlar Ltd. firmasına da ayrıca teşekkür ederim.

Akademik sürecin her anında manevi desteğini hissettiren, sabırla yanımda olan değerli eşime, beni koşulsuz seven ve motivasyon kaynağım olan oğluma ve her daim destekleriyle güç veren kıymetli aileme teşekkürlerimi sunuyorum. Onların varlığı, bu çalışmanın tamamlanmasında en önemli ilham kaynağı olmuştur.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Piezoelektrik Özellik	3
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	5
2.3. Piezoelektrik Kompozit	6
2.4. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi	9
2.5. Piezokompozit Üretimi	10
2.6. Piezoseramiklerin Elektriksel Karakterizasyonu	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	12
3.1. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme	12
3.2. Presleme	12
3.3. Sinterleme	14
3.4. Zımparalama	16
3.5. Elektrotlama	16
3.6. Kutuplama	17
3.7. Elektriksel Karakterizasyon	18
3.8. Dilimleme	18
3.9. CNC İşleme ile Sintaktik Blok Hazırlığı	19
3.10. Poliüretan ile Kaplama	20
3.11. Su Altı Akustik Ölçümleri	23
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	25
4.1. Sonlu Elemanlar Analizi Değerlendirmesi	25
4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	28
4.3. Piezokompozitlerin Havada ve Su Altında Elektriksel Ölçümleri ile Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	35
5. GENEL SONUÇLAR	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ATILA	: Advanced Tools for the Implementation of Linear Application
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FFVS	: Free Field Voltage Sensitivity (Serbest Alan Voltaj Hassasiyeti)
PZT	: Lead Zirconate Titanate (Kurşun Zirkonat Titanat)
PZT-4	: Sert karakteristikli kurşun zirkonat titanat
PZT-5A	: Yumuşak karakteristikli kurşun zirkonat titanat
TVR	: Transmitting Voltage Response (İletim Voltaj Tepkisi)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Heckmann Diyagramı [3]	4
Şekil 2.2: Düz (a) ve Ters (b) Piezoelektrik Etki	4
Şekil 2.3: Piezokompozitlerin Seramik ve Polimer Bağlantı Notasyonları [16]	8
Şekil 3.1: a) Atmosfer Tozu, b) Altlık Tozu, c) Numune Yerleşimi-1,	15
Şekil 3.2: Elektrot Pişirme Sonrası Disk ve Halkalar	17
Şekil 3.3: Dilimleme ve Doldurma Tekniği	19
Şekil 3.4: Sintaktik Blok ve Alıcı-Verici Piezoseramik Birleşimi	20
Şekil 3.5: 1-3-2 Bağlantıları Arası Boşlukların Poliüretan ile Kaplanması	21
Şekil 3.6: Piezoseramik Yüzeylerinin Gümüş Epoksi Uygulaması	21
Şekil 3.7: Küçük Piezokompozit Sonar – Arka Görünümü	22
Şekil 3.8: Büyük Piezokompozit Sonar – Arka Görünümü	22
Şekil 3.9: Büyük, Küçük Piezokompozit Sonar – Yüzey Görünümü	23
Şekil 3.10: Su Altı Akustik Ölçümleri	24
Şekil 4.1: PZT-4 10mm Çap – 8mm kalınlıkta Disk Modelinin Çıktısı	25
Şekil 4.2: PZT-4 30mm Çap – 8mm kalınlıkta Disk Modelinin Çıktısı	26
Şekil 4.3: PZT-5A Küçük Halka 36-18-3 mm Modelinin Çıktısı	26
Şekil 4.4: PZT-5A Büyük Halka 49-37-3 mm Modelinin Çıktısı	26
Şekil 4.5: 10 mm PZT-4 Disk Numune-1 ve ATILA Analiz Sonuçları	27
Şekil 4.6: 30 mm PZT-4 Disk Numune-1 ve ATILA Analiz Sonuçları	27
Şekil 4.7: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1 ve ATILA Analiz	28
Şekil 4.8: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-1 ve ATILA Analiz	28
Şekil 4.9: 10 mm PZT-4 Disk Numune-1, 2 ve 3 Sonuçları	31
Şekil 4.10: 30 mm PZT-4 Disk Numune-2 ve 3 Sonuçları	31
Şekil 4.11: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1, 2 ve 3 Sonuçları	31
Şekil 4.12: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-2 ve 3 Sonuçları	32
Şekil 4.13: PZT-4 Çubuklarından Alınan Ölçüm Sonuçları	33
Şekil 4.14: PZT-5A Çubuklarından Alınan Ölçüm Sonuçları	34
Şekil 4.15: 10 mm PZT-4 Disk Kompozit Numune-1 Hava ve Suda Alının Ölçüm	36
Şekil 4.16: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1 Hava ve Suda Alının Ölçüm	36
Şekil 4.17: Num-1; 10 mm PZT-4 Disk TVR ve 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS	36
Şekil 4.18: 10 mm PZT-4 Disk Numune-2 Havada ve Suda Alının Ölçüm	37
Şekil 4.19: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-2 Hava ve Suda Alının Ölçüm	37
Şekil 4.20: Num-2; 10 mm PZT-4 Disk TVR ve 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS	38
Şekil 4.21: 10 mm PZT-4 Disk Numune-3 Hava ve Suda Alının Ölçümleri	38
Şekil 4.22: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-3 Hava ve Suda Alının Ölçüm	39
Şekil 4.23: Numune-3; 10 mm PZT-4 Disk TVR, 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS	39
Şekil 4.24: 30 mm PZT-4 Disk Numune-2 Havada ve Suda Alının Ölçüm	40
Şekil 4.25: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-2 Havada Suda Alının Ölçüm	40
Şekil 4.26: Numune-2; 30 mm PZT-4 Disk TVR, 49-37 mm PZT-5A Halka FFVS	41
Şekil 4.27: 30 mm PZT-4 Disk Numune-3 Havada ve Suda Alının Ölçümleri	41
Şekil 4.28: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-3 Havada ve Suda Alının Ölçüm	42
Şekil 4.29: Numune-3; 30 mm PZT-4 Disk TVR, 49-37 mm PZT-5A Halka FFVS	42

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1: Disk ve Halka Numune Bilgileri	13
Tablo 4.1: PZT-5A Büyük Halka 49-37mm d_{33} Sonuçları	29
Tablo 4.2: PZT-5A Küçük Halka 36-18mm d_{33} Sonuçları	29
Tablo 4.3: PZT-4 30mm Çap Disk d_{33} Sonuçları	29
Tablo 4.4: PZT-4 10mm Çap Disk d_{33} Sonuçları	30
Tablo 4.5: PZT-4 Çubuk d_{33} Sonuçları	32
Tablo 4.6: PZT-5A Çubuk d_{33} Sonuçları	33



1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler, uygulanan mekanik gerilme karşılığında elektrik yükü üreten ve tersine elektrik alan altında mekanik şekil değişimi (gerinim) sergileyen işlevsel malzemelerdir. Bu çift yönlü etkileşim, piezoelektrik etkinin temelini oluşturarak algılayıcı, üretici ve enerji dönüştürücü gibi birçok teknolojik uygulamada kullanılmalarını sağlar. Özellikle kurşun zirkonat titanat (PZT) temelli piezoseramikler, üstün piezoelektrik katsayıları, kararlı dielektrik davranışları ve mekanik dayanıklılıkları sayesinde öne çıkmaktadır.

Ancak geleneksel piezoelektrik seramikler, düşük esneklik, kırılganlık, yönsüz elektriksel-tepkisel karakteristikler gibi bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sebeple hem elektriksel hem de mekanik performansı artırmak amacıyla piezoseramiklerin polimer matrislerle bir araya getirildiği piezokompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu yapıların en verimli varyantlarından biri olan 1-3 bağlantılı piezokompozitler, seramik fazın yalnızca bir doğrultuda süreklilik göstermesi sayesinde hem yüksek yönlü hassasiyet hem de geniş frekans aralığı sunarak sonar, medikal ultrason ve akustik algılama uygulamaları için cazip hale gelmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı; 1-3 bağlantılı piezoelektrik kompozitlerin üretimini gerçekleştirmek, farklı seramik geometrileri ve kompozisyonları kullanarak elektriksel ve akustik performanslarını deneysel olarak karakterize etmek ve bu performansları sonlu elemanlar analizi (FEA) ile desteklemektir. Bu kapsamda:

Sert karakterli PZT-4 ve yumuşak karakterli PZT-5A seramikler, alıcı ve gönderici olarak bir arada tasarlanarak bir sonar prototipi oluşturulmuştur.

Seramikler, tek eksenli presleme, sinterleme, elektrotlama ve kutuplama adımları ile hazırlanmış, ardından dilimlenmiş ve son olarak polimer matris içine gömülerek piezokompozit yapıya dönüştürülmüştür.

Geliştirilen piezokompozit yapıların rezonans davranışı hem hava hem de su ortamında admitans-frekans, faz açısı-frekans, TVR (İletim Voltaj Tepkisi - TVR) ve FFVS (İletim Voltaj Tepkisi - TVR) değerleri üzerinden değerlendirilmiş; sayısal modelleme ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Bu bütüncül yaklaşım ile sonar uygulamaları için yüksek performanslı, güvenilir ve tekrar üretilabilir piezokompozit yapıların geliştirilmesi hedeflenmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

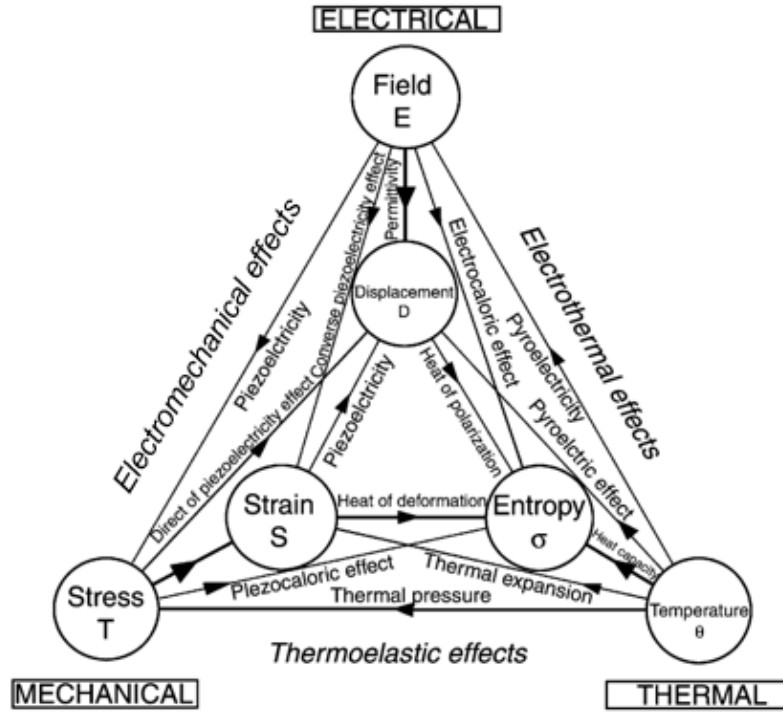
2.1. Piezoelektrik Özellik

Piezoelektrik özellik, malzemenin belirli bir mekanik gerilme altında elektriksel yükler oluşturmaya veya tam tersi elektrik alanına maruz kalması durumunda da gerinim oluşmasıdır. [1-3]

Piezoelektrik etkinin keşfi 19. yüzyıl sonlarında doğrudan kuvars kristaline uygulanan mekanik gerilme sonucu elektrik yükü oluştuğunun tespitiyle ilk defa Curie kardeşler tarafından yapılmıştır. Böylece öncelikli olarak düz piezoelektrik etki keşfedilmiştir. Ardından Gabriel Lippmann tersi bir etkinin mümkün olabileceğini belirtmiş ve Curie kardeşler deneysel çalışma ile ters piezoelektrik etkiyi doğrulamıştır. [4], [5]

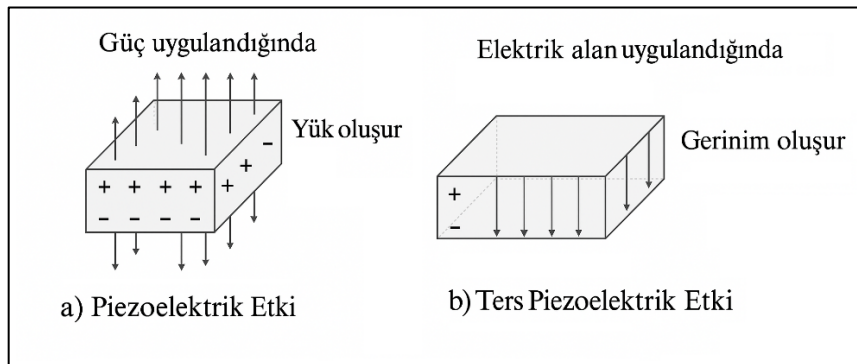
Malzemelerin elektriksel, mekanik ve termal etkiler altında gösterdikleri tepkileri Heckmann diyagramında özetlenmiştir. **Şekil 2.1**'de görüldüğü üzere elektrik alan, gerilme ve sıcaklık arasındaki etkileşimleri açıklayan bir modeldir. Şeklin temelini oluşturan dış köşeler bir malzemeye dışarıdan uygulanan kuvvetleri yani bağımsız değişkenleri ifade ederken, içerideki köşeler bunlara karşılık malzemenin verdiği tepkileri yani bağımlı değişkenleri ifade eder. İç ve dış üçgenin karşılık gelen noktaları arasındaki çizgiler, temel etkileşimleri yani temel fiziksel özellikleri, diğer çizgiler ise çapraz etkileşimleri (fiziksel özellikleri) ifade etmektedir. [1]

Heckmann diyagramı **Şekil 2.1**'de görülen piezoelektrik etkiyi ele aldığımızda; düz ve ters piezoelektrik etki dört değişkenle ifade edilir: gerilme T ve elektrik yer değiştirme D arasındaki ilişki düz piezoelektrik etkiyi ve gerinim S ve elektrik alan E arasındaki ilişki ise ters piezoelektrik etkiyi temsil eder. [3]



Şekil 2.1: Heckmann Diyagramı [3]

Altındaki şekilde ise düz ve ters piezoelektrik etki görülmektedir. Düz piezoelektrik etkide uygulanan kuvvet sonucunda polarizasyon oluşur. Ters piezoelektrik etkide ise elektrik alan uygulandığında gerinim meydana gelir. [3]



Şekil 2.2: Düz (a) ve Ters (b) Piezoelektrik Etki

2.2. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler üzerine mekanik bir gerilme yani basınç, kuvvet, ses veya titreşim gibi mekanik etkiler uygulandığında bu etkileri elektriksel bir sinyale dönüştüren veya bunun tersi olarak elektrik alan uygulandığında mekanik şekil değişimi, titreşim, ses gibi mekanik bir tepki veren malzemelerdir. Piezoelektrik seramiklerin performansını boyut, şekil ve malzeme özellikleri belirlemektedir. Genellikle bu seramikler dikdörtgen, silindirik veya halka gibi temel şekillerde üretilmektedir. Bu şekiller kuru presleme veya şerit döküm teknikleri ile üretilebilmektedir. [1], [6], [16], [17]

Tek kristal bir malzemenin piezoelektrik özellik gösterebilmesi için ise simetri merkezi olmayan bir kristal yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu tür kristallerde fiziksel bir kuvvet uygulandığında atomlar asimetric yer değişimine uğrayarak elektrik dipoller oluşur. Polikristalin ferroelektrik seramiklerde ise piezoelektrik etki, yüksek elektrik alan altında uygulanan elektriksel kutuplama işlemi sonrası malzemenin bünyesinde var olan kendiliğinden polarizasyonun yani elektriksel dipollerin elektrik alan doğrultusunda yeniden yönlendirilmesi sonrasında gözlemlenebilir.

Kurşun zirkonat titanat (PZT) seramikleri, yüksek piezoelektrik katsayıları ve iyi termal kararlılıkları sayesinde eyleyici (actuator), algılayıcı (sensor) ve dönüştürücü (transducer) gibi birçok uygulamada tercih edilmektedir. [7]

Ticari olarak en yaygın kullanılan PZT (Kurşun Zirkonat Titanat) türevleri, seramik piezoelektrik malzemeler içinde en çok tercih edilen grubu oluşturur. PZT'ler, formülasyonlarına ve katkı (doping) elementlerine göre sahip oldukları farklı elektriksel ve mekanik özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanırlar.

PZT-4, düşük dielektrik kayıplar ve yüksek rezonans frekansı gibi özelliklere sahip sert karakterli bir malzemedir. Bu nedenle yüksek güçlü uygulamalarda, özellikle ultrasonik verici elemanlarda, sonar sistemlerinde ve ultrasonik temizleyicilerde tercih edilmektedir. Düşük piezoelektrik sabitine sahip olması, enerjiyi mekanik olarak verimli aktarabilmesini sağlar. [8]

PZT-5A, orta sertlikte bir PZT türü olup, piezoelektrik sabitleri yüksek, dielektrik kayıpları ise kabul edilebilir seviyededir. Yüksek duyarlılığa ihtiyaç duyulan

uygulamalarda, örneğin alıcı algılayıcılar, darbeye duyarlı sistemler ve genel amaçlı piezoelektrik cihazlarda yaygın olarak kullanılır. Kutuplanabilirliği kolay olup, stabil performans sunar. [8]

PZT-5H, yumuşak karakterli PZT'ler arasında yer alır ve oldukça yüksek piezoelektrik sabitleri ile öne çıkar. Bu malzeme, düşük voltajla çalışması gereken hassas algılama uygulamalarında, medikal ultrasonik transdüserlerde ve hassas eyleyici sistemlerinde kullanılır. [8]

PZT-8 ise ekstra sert karakterde bir malzemedir ve oldukça yüksek mekanik kalite faktörüne sahiptir. Düşük piezoelektrik sabiti ve yüksek termal kararlılığı sayesinde yüksek güçlü ve yüksek frekanslı dönüştürücü sistemlerinde, titreşim motorlarında ve endüstriyel ultrasonik uygulamalarda kullanıma uygundur. [8]

Bu farklı PZT türleri, uygulamanın gerektirdiği elektriksel ve mekanik performansa göre seçilmekte olup, her biri piezoelektrik cihaz tasarımında belirli avantajlar sunmaktadır. [8]

PZT seramiklerde "yumuşak" (ör. PZT-5A, 5H) ve "sert" (ör. PZT-4, PZT-4D) türler arasındaki temel fark, katkı elementleriyle oluşturulan oksijen boşlukları ve bunların domain duvarları üzerindeki etkisidir. Sert PZT'lerde alıcı (acceptor) katkıların yol açtığı oksijen boşlukları domain duvarlarını sabitlerken, yumuşak PZT'lerde verici (donör) katkılar domain hareketliliğini artırarak daha yüksek piezoelektrik katsayıları (d_{33}) elde edilmesini sağlar. [7]

Bu çalışma kapsamında sonar uygulamaları için alıcı ve gönderici formlarının aynı kompozit içerisinde konumlanması nedeniyle sert karakterli PZT-4 ve yumuşak karakterli PZT-5A birlikte kullanılmıştır. Böylece alıcı ve verici hassasiyetlerinin maksimum seviyede olması hedeflenmiştir.

2.3. Piezoelektrik Kompozit

Piezoelektrik malzemelerin özelliklerini optimize etmek, mekanik olarak uyum ve esneklik kazandırmak veya belirli uygulamaya uygun hale getirmek amacıyla piezoelektrik malzemeler, polimerik bir matris ile bir araya getirilerek piezoelektrik

kompozitler oluşturulur. [1], [9] Piezoelektrik malzemelerin tek başına karşılayamayacağı spesifik gereksinimler kompozit oluşturulması ile karşılanabilmektedir. Örneğin kırılğan yapıdaki PZT piezoelektrik seramikleri polimer matris ile birleştirilerek daha dayanıklı ve esnek hale getirilir. 1-3, 2-2, 0-3 gibi farklı notasyonlara sahip piezoelektrik kompozitler malzeme bileşenlerinin avantajlı özelliklerini bir araya getirirken dezavantajlarını minimize ederek istenilen özellikleri sağlamak için tasarlanmıştır. [10], [11]

Geleneksel piezoelektrik seramikler, özellikle kurşun zirkonat titanat (PZT) türevleri, yüksek piezoelektrik katsayıları ve mekanik dayanımları nedeniyle algılayıcı ve eyleyici uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemeler bazı uygulama alanlarında sınırlı performans gösterebilmektedir. Özellikle hidrostatik ortamlarda (örneğin su altı akustik uygulamalarında), yönlü tepki gerektiren sistemlerde ve düşük empedanslı ortamlarda klasik piezoseramiklerin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. [12-14]

Hidrostatik koşullar altında performansın değerlendirilmesi amacıyla yani gerilmenin tüm eksenlerde eşit olarak uygulandığı durumlarda, d_h ve g_h tensör katsayıları kullanılır. Piezoelektrik elemanın algılama hassasiyetini değerlendirmek veya farklı hidrofön malzemelerini karşılaştırmak için, d_h ve g_h katsayılarının çarpımı sıkça mükemmellik ölçütü olarak değerlendirilir. Bu büyüklük, elektronik devrede sistemin kendi gürültüsünü aşmak için gerekli yükseltecin türünü belirlemede sayısal bir referans sağlar. [16]

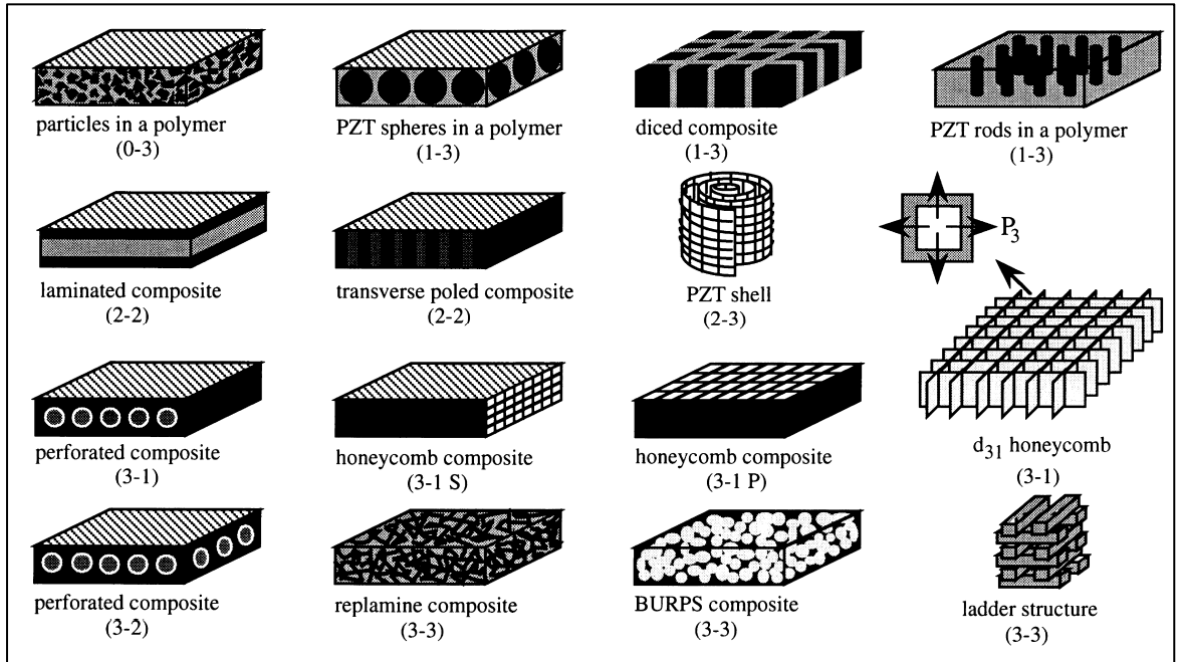
Bu dezavantajların üstesinden gelmek amacıyla geliştirilen piezokompozit malzemeler, piezoelektrik seramiklerin bir polimer matris içerisinde belirli yönelimlerle yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Özellikle 1-3 bağlantılı piezokompozitlerde, piezoseramik fazın sadece bir doğrultuda sürekli olması, hem piezoelektrik etkinliği artırmakta hem de mekanik esneklik ve yönlendirilebilirlik sağlamaktadır. Bu sayede hem algılayıcı hem de gönderici özelliklerinde performans artışı sağlanmakta, geniş frekans bandı ve uyumlu empedans karakteristikleri elde edilmektedir. [16]

Kompozit yapılar aynı zamanda hafiflik, geometrik çeşitlilik, düşük akustik empedans ve geniş bant çalışma olanağı gibi avantajlar da sunmaktadır. Bu özellikler özellikle su altı sonar sistemleri, tıbbi ultrason uygulamaları ve yapısal sağlık izleme sistemleri gibi alanlarda piezokompozitleri ön plana çıkarmaktadır. [16]

Piezoelektrik kompozitler, piezoelektrik seramik ve polimerin bir araya getirilmesi ile oluşur. Piezoelektrik kompozitler piezoseramiğin şekli ve polimerin kullanıldığı bölümler açısından farklı bağlantı notasyonlarında hazırlanabilmektedir.

Bu bağlantı tipleri iki farklı fazdan yani seramik ve polimerden oluşan kompozit yapıların üç boyuttaki sürekliliğini temel alarak sınıflandırılmaktadır ve **Şekil 2.3**'te verilen 1-3, 0-3 gibi şekilde görülen notasyonlar kullanılır. Kullanılan bu notasyon 1978'de R.E. Newnham, D.P. Skinner ve L.E. Cross tarafından geliştirilmiştir. Bu notasyonda ilk rakam seramik fazının yapı içerisinde kaç yönde sürekliliğe sahip olduğunu gösterir. İkinci rakam ise polimer matris fazının yapı içerisinde kaç yönde sürekliliğe sahip olduğunu gösterir. [16]

1-3 notasyonunu inceleyecek olursak seramik fazının tek yönde bağlantılı olarak uzandığını, polimer fazının ise x, y, z yani tüm yönlerde bağlantıya sahip olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 2.3: Piezokompozitlerin Seramik ve Polimer Bağlantı Notasyonları [16]

1-3 tipi piezoelektrik kompozit temel olarak üç boyutta sürekliliğe sahip bir polimer matris içerisine gömülü ve sadece bir boyutta sürekliliğe sahip seramik çubuklardan oluşmaktadır. 1-3 piezokompozit ile düşük akustik empedans, düşük dielektrik sabit, yüksek bant genişliği ve intrinsik özelliklerdeki anizotropi avantajlarına sahip piezoelektrik kompozit elde edilmesi amaçlanmaktadır. [1], [15]

2.4. Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi

Piezokompozit malzemelerin boyut ve geometrilerine göre elektriksel ve mekanik davranışları değişmektedir. Bu nedenle tasarımı yapılacak piezokompozit cihaz veya komponentlerin hedeflenen özelliklerinin belirlenmesinin ardından bu ihtiyaçları karşılayacak uygun malzeme, boyut, şekil ve miktarları belirleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yapılan sonlu elemanlar analizi ile planlanan malzeme, boyut ve şekillerin gerekli özellikleri yaklaşık olarak sağlayıp sağlamadığı kontrol edilebilmektedir. [18], [19] Deneysel çalışmalardan önce boyutlarda gerekli optimizasyon sağlanarak deneysel çalışma sürecini kısaltmak ve maliyet tasarrufu sağlamak mümkün olmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık yapıların belirli bir kuvvet altında nasıl davrandığını ortaya koymak üzere uygulanır. Örneğin sıcaklık, gerilme ve elektriksel alan gibi dış uyarıların malzemede yaratacağı tepkilerin iki veya üç boyutlu olarak matematiksel ifade edilerek hesaplanabilmesini sağlamaktadır. [20]

Adından da anlaşılacağı üzere, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), karmaşık yapıların daha küçük ve hesaplaması kolay alt birimlere, yani "sonlu elemanlara", ayrılması yoluyla analiz edilmesini sağlar. Yapı, üçgen veya dörtgen gibi geometrik şekillere sahip küçük elemanlara bölünerek modellenir. Malzemeye ait fiziksel özellikler sisteme tanımlanır. Yapıya uygulanan kuvvet, gerilme, elektrik potansiyeli ya da sabitlenmiş yüzey gibi sınır koşulları belirlenir. Bu koşullar altında oluşan diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülerek yapının fiziksel tepkisi hesaplanır. Analiz sonucunda gerilme dağılımı, yer değiştirme, rezonans frekansları ve elektrik alan gibi çıktılar elde edilir. [18], [19]

Piezokompozitlerde; rezonans frekansları, elektrik alan dağılımı, mekanik deformasyongibi elektromekanik tepkilerin öngörülmesi amacıyla kullanılır. Tez

çalışmasında PZT-4 diskler ve PZT-5A halkaların rezonans davranışlarının modellenmesi amacıyla kullanılmıştır.

2.5. Piezokompozit Üretimi

Piezokompozitler yukarıda da değindiğimiz üzere seramik esaslı bir aktif faz ve polimer esaslı pasif matris fazından oluşur. Bu nedenle kompozit elde edebilmek için öncelikle piezoseramik üretimi yapılır. Piezoseramik üretiminin ilk adımı seramik kompozisyonunun belirlenmesi ve bu seramik tozlarının elde edilmesidir. Bu çalışma kapsamında ticari PZT-4 ve PZT-5 tozları kullanılmıştır. Ardından seramik tozlarının ön şekillendirilmesi aşaması gelmektedir. Piezoelektrik seramiklerin performansını boyut, şekil ve malzeme özellikleri belirlemektedir. Genellikle bu seramikler dikdörtgen, silindirik veya halka gibi temel şekillerde üretilmektedir. Literatürde piezo seramik üretimi için asıltı döküm, alginate jelleşmesi ve mekanik presleme gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. [1], [18] Tez çalışmasında ticari PZT-4 ve PZT-5 tozları mekanik presleme metodu ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilen seramiklerin yoğunluğunun sağlanabilmesi için sinterleme işlemine tabi tutulur. Sinterlenen seramikler yüzeyde var olan pürüzlerin giderilmesi ve parlatılması amacıyla zımparalanır. Zımparalanıp parlatılan seramikler hedeflenen bağlantı notasyonuna uygun şekillendirme ihtiyacı varsa dilimleme, laminasyon gibi şekillendirme işlemleri uygulanır.

Piezokompozit uygulamada seçilen bağlantı notasyonuna uygun olarak polimer faz ile birleştirilir. Bağlantı notasyonlarının değişimi ile akustik empedans, dielektrik sabit, bant genişliği, intrinsik özelliklerdeki anizotropide avantaj sağlanır. Örneğin 1-3 bağlantı notasyonu yüksek yönlü hassasiyet ve düşük akustik empedans sayesinde su altı sonarlar için optimizasyon sağlarken, 2-2 notasyonları plakalı üretim sayesinde üretim kolaylığı sağlar fakat yönlü performansları 1-3 bağlantı notasyonuna göre daha düşüktür. [1], [21]

1-3 kompozitinin oluşturulması için öncelikle seçilen uygulamaya uygun üretilip sinterlenen seramik parçalar dilimlenerek seramik bünyede kanallar yaratılır ve sonrasında bu kanallar polimer bir matris fazı ile doldurulur. Bu sayede piezokompozit yapısı elde edilir. Sonrasında paralel geniş yüzeyleri elektrotlanan piezokompozit malzeme elektriksel ve akustik karakterizasyon için hazırlanmış olur.

2.6. Piezoseramiklerin Elektriksel Karakterizasyonu

Piezoseramikler üzerine yapılan çalışmalarda, performansı değerlendirmek amacıyla “admitans - frekans” ve “faz açısı - frekans” ölçümleri yapılmakta ve elde edilen bilgiler ile analiz edilen rezonans ve antirezonansı ile faz açısının, malzemenin içindeki elektromekanik davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir. Elektriksel karakterizasyon ölçümlerinde frekans yükseltildiğinde rezonans ve antirezonans frekansları arasındaki bölgede mekanik indüktans baskın olduğundan bu aralık, malzemenin çalıştığı frekans aralığı olarak kabul edilir. Bu bölgede ideal bir piezoelektrik malzeme, faz açısında toplam 180° 'lik bir değişim gösterir: düşük frekanslarda -90° 'lik kapasitif davranıştan rezonans civarında $+90^\circ$ 'lik indüktif davranışa, antirezonans üzerinde ise tekrar -90° 'lik kapasitif davranışa dönüşür. Faz açısındaki bu geniş değişim, malzemenin elektriksel alan ile mekanik deplasman arasındaki enerji dönüşümünün etkinliğini yansıtır. Ayrıca rezonans ve antirezonans frekansları arasındaki mesafe büyüdükçe elektromekanik bağlaşma faktörü artar, yani malzeme elektriği mekanik enerjiye daha verimli dönüştürür. Bu nedenle, faz açısı değişiminin büyüklüğü piezoseramiklerin ve piezokompozitlerin tasarımında kritik performans parametrelerini de belirleyen temel bir göstergedir. [22]

1-3-2 bağlantı notasyonuna sahip piezoseramiklerin ölçümü için de çubuk ölçümleri alındığı literatürde görülmektedir. Çubukların da “admitans - frekans” ve “faz açısı - frekans” değerleri alınarak performansları incelenmiştir. [23]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme

Bu çalışma kapsamında geliştirilen disk ve halka formundaki piezoseramik yapıların elektriksel karakteristikleri, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA - Finite Element Analysis) yöntemiyle modellenmiş ve elde edilen simülasyon çıktıları piezoseramiklerin laboratuvar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Modelleme çalışmaları, piezoseramik malzemelerin rezonans ve anti-rezonans frekanslarında sergilediği elektriksel tepkileri analiz etmek üzere özel olarak geliştirilmiş ticari ATILA® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak 2 boyutlu (2D) eksenel simetrik modelleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Hesaplama 1 kHz – 500 kHz aralığında 500 frekans için planlanmıştır. Çalışmada, gönderici olarak planlanan sert karakterli PZT-4 tozundan 10 mm ve 30 mm çaplarında ve 8 mm kalınlığında disk formunda üretilmesi planlanan seramik numuneler ile alıcı olarak kullanılması hedeflenen yumuşak karakterli PZT-5A tozundan dış ve iç çapları sırasıyla 36 mm -18 mm ve 49 mm - 37 mm olan ve 3 mm kalınlığa sahip halka seramikler modellenmiştir.

Her bir geometri ve malzeme kombinasyonu için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde, rezonans davranışları başta olmak üzere yapısal-elektromekanik yanıtlar incelenmiş; özellikle admitans büyüklüğü ile faz açısı frekansa bağlı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bu simülasyon sonuçları, deneysel ölçüm verileri ile karşılaştırılarak modellenen sistemin fiziksel doğruluğu ve kullanılabilirliği analiz edilmiştir.

3.2. Presleme

Bu çalışma kapsamında, ticari olarak temin edilen PZT-4 ve PZT-5A piezoelektrik seramik tozları (T&Partners Praha) kullanılarak, mekanik şekillendirme yöntemlerinden biri olan tek eksenli presleme yöntemiyle numuneler hazırlanmıştır. Presleme işlemi **Şekil 3.1**'de verilen tek eksenli pres ile yapılmıştır. Presleme işlemine başlamadan önce,

sinterleme süreci sırasında meydana gelecek hacimsel büzülme ( ekme) miktarları dikkate alınarak, kullanılacak kalıpların boyutları ve gerekli toz miktarları belirlenmiştir. PZT-4 ve PZT-5 için hedeflenen ya  (green body) yoğunluk, teorik yo unlu un yaklaşık %55-60'ı kadardır.

Numunelerin hedeflenen geometrik boyutlara ulaşması için uygulanması gereken basma kuvveti, ilgili numunenin yüzey alanı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda, hedef hacme ulaşmak amacıyla öncelikle istenen kompakt yoğunluk değerinde olabilmesi için yoğunluk formülünden faydalanılarak ihtiyaç duyulan toz kütlesi hesaplanmıştır. PZT-4 için 10,4 mm ve 35,7 mm çaplarında disk formunda; PZT-5A için ise küçük 41,7 mm dış çapa ve 20,90 mm iç çapa sahip halka ve büyük 58 mm iç çapa ve 43 mm dış çapa sahip halka formunda numuneler sinterleme öncesi ya  boyutlar için hedeflenmiştir.

Her bir numune için gereken basma kuvveti, kalıp yüzey alanı ve uygulanacak presleme basıncı (yaklaşık 100 MPa) temel alınarak hesaplanmıştır.

Uygulanacak 100 MPa kuvvete göre basıncın yüzey alanı ve kuvvet ilişkisi formülünden uygulanacak ağırlık hesaplanmıştır.

Üretilen numunelere ait geometri ve hesaplamalarla elde edilen verilere göre uygulanan ağırlık, kullanılan toz miktarları aşağıdaki **Tablo 3.1**'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Disk ve Halka Numune Bilgileri

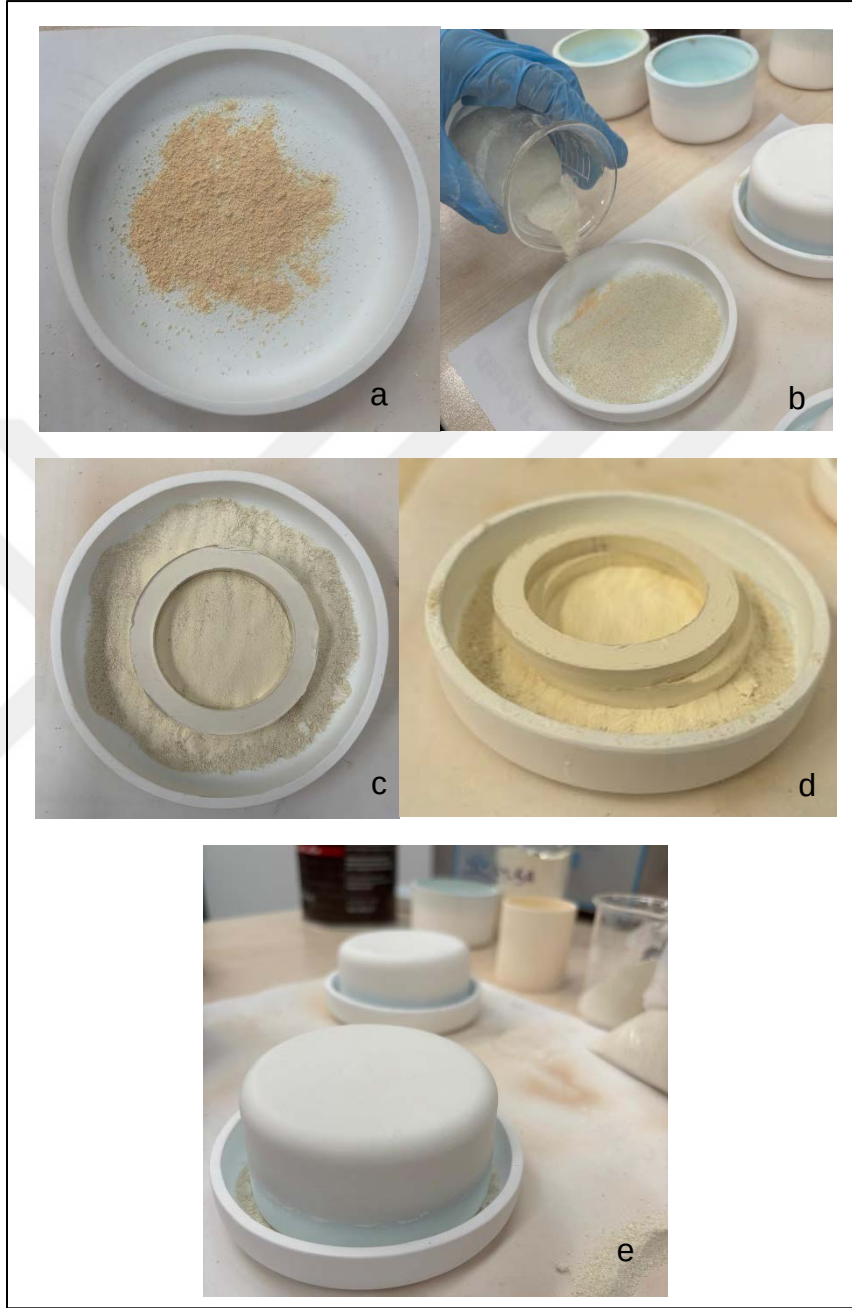
Numune Tipi	Yükseklik (h)	�ap	Uygulanan Ağırlık	Toz Miktarı	Adet
Küçük Disk PZT-4	8,5 mm	10,38 mm	1,2 ton	5,80 g	15
Büyük Disk PZT-4	9,52 mm	35,71 mm	10 ton	48 g	10
Küçük Halka PZT-5A	4,2 mm	Dış �ap 41,7 mm �� çap 20,90 mm	10,46 ton	26,6 g	10
Büyük Halka PZT-5A	4,7 mm	Dış �ap 58 mm �� çap 43 mm	11,7 ton	28 g	10

3.3. Sinterleme

Presleme ile hazırlanan numuneler yaklaşık bir gün oda şartlarında kurumaya bırakıldıktan sonra aşağıda **Şekil 3.2**'de görüldüğü üzere önce numune ağırlığının %20'si oranında atmosfer tozu (**Şekil 3.2, a**) ($\text{PbO}+\text{ZrO}_2$ toz karışımından oluşmaktadır) sonra altlık tozu kullanılarak (**Şekil 3.2, b**) katman oluşturulup numuneler üzerine (**Şekil 3.2, c**) yerleştirilmiştir. Numuneler arasına kendi tozundan eklenerek boyutlara göre üst üste iki adet veya üç adet olacak şekilde (**Şekil 3.2, d**) yerleştirilmiştir ve üzerlerine ters kapatılan alumina potanın kenarları alümina tozu ile sıkıca kapatılarak (**Şekil 3.2, e**) hazırlanmıştır. Altlık tozu, numunenin kendi bileşimindeki tozu ve alüminadan oluşan bir karışımı ifade etmektedir. Kullanılan kurşun içeren atmosfer tozu ve PZT tozu sayesinde sıcaklık ortamında numunelerin temas ettiği sinterleme atmosferi kurşunca zengin bir hale getirilerek numunelerin bileşiminde bulunan ve yüksek uçuculuğa sahip olan kurşunun korunması hedeflenmektedir. Atmosfer tozu numune ile doğrudan temas etmeden çevresine yerleştirilmesi gerekir bu nedenle altlık tozu ile birlikte kullanılmıştır. Altlık tozu olarak PZT-4 numuneler için PZT-4 tozu, PZT-5A numuneler için PZT-5A tozu kullanılmıştır. Atmosfer ve altlık tozu kullanılmaması durumunda kurşunun numune içerisinde tutulmaması nedeniyle aşağıdaki etkiler gözlemlenir.

- Numunede porozite artar.
- Faz ayrışması olabilir (örneğin PbO kaybı ile PbZrO_3 , ZrO_2 ayrışabilir).
- Dielektrik ve piezoelektrik özellikler bozulur.

Hazırlanan PZT-4 disk ve PZT-5A halka numuneleri fırına koyularak 1260°C 'de 4 saat olacak şekilde sinterlenmiştir.



Şekil 3.1: a) Atmosfer Tozu, b) Altlık Tozu, c) Numune Yerleşimi-1, d) Numune Yerleşimi-2, e) Numunelerin Alümina Pota ile Kapatılması

3.4. Zımparalama

Sinterleme işlemi sonrasında numuneler, hedeflenen geometrik toleranslara ve yüzey kalitesine ulaşmalarını sağlamak amacıyla zımparalama ve yüzey düzleme (lapping) işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu süreçte, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, düzlemselliğin ve ana yüzeyler arasında paralelliğin sağlanması ve istenen kalınlık değerlerine hassas biçimde ulaşılması hedeflenmiştir. Zımparalama ve yüzey düzleme işlemi otomatik Lapmaster Wolters, hassas yüzey işleme cihazı yardımı ile gerçekleştirilmiş ve elmas çözeltisi, yağ kullanılmıştır. Zamanlayıcı ve hız kontrolü özellikleri sayesinde hedeflenen geometriye kontrollü bir şekilde ulaşılmıştır.

3.5. Elektrotlama

Yüzey işlemleri tamamlanan numuneleri kutuplamaya hazırlamak amacıyla iletkenlik sağlayacak ve elektrik alan uygulanabilecek hale getirmek için yüzeyine ipek baskı yöntemiyle homojen bir dağılım sağlanacak şekilde gümüş pasta elektrot ile elektrotlama/kaplama işlemi uygulanmıştır. Kurutulan numunelerin yüzeyindeki elektrotun seramik bünye ile daha iyi bir tutunma sağlaması için 700°C'de 30 dk pişirilmiştir. Pişirilen numunelerden bir kısmı **Şekil 3.2'**de görülmektedir.



Şekil 3.2: Elektrot Pişirme Sonrası Disk ve Halkalar

3.6. Kutuplama

Kutuplama aşamasında; elektrotlanmış PZT-4 diskler ve PZT-5A halkalara kutuplama sisteminde yüksek bir doğru akım (DC) elektrik alan uygulanarak kutuplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kutuplama sistemi, bir ısıtmalı sirkülasyon banyosu (Labo) ve bir DC yüksek voltaj güç kaynağından (Spelmann) oluşmaktadır. Isıtmalı sirkülasyon banyosunun haznesindeki silikon yağı, yağ içerisindeki numune tutucuya bağlı numunelerin 120°C'ye ısıtılmasını sağlamaktadır. Kutuplama için numunelere DC gerilim uygulanmıştır. Bu uygulanan gerilim ile piezoseramiklerde rastgele yönelmiş dipoller belirli bir hizalanma oluşturarak piezoelektrik etkiyi aktif hale getirir.

PZT-5A halka seramikleri yumuşak karaktere sahip olmaları nedeni ile düşük voltajda kısa süreli kutuplanmıştır. Kalınlıkta bir milimetre başına 2 kV yani 2 kV/mm uygulanmıştır. Numuneler 2 kV/mm DC elektrik alan altında, 0.5 mA'de 120°C sıcaklıkta 10 dakika kutuplanmıştır. PZT-4 disk seramikleri sert karaktere sahip olmaları nedeni ile bu seramiklere 2.2 kV/mm DC elektrik alan uygulanmıştır.

Kutuplanan piezoseramiklerin elektriksel karakterizasyonu için ölçüm aşamasına geçilmiştir.

3.7. Elektriksel Karakterizasyon

Piezoseramiklerin ve piezokompozitlerin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan ölçüm ve analizler elektriksel karakterizasyon olarak nitelendirilmektedir. Ölçümler belirli frekans aralıklarında elektriksel tepkinin ölçülmesiyle yapılır. Çalışma kapsamında 1 V ile sürülerek frekansa bağlı admitans ve faz açısı ölçümleri LCR Metre (HIOKI 3532-50 LCR HiTester) cihazı ile yapılmıştır.

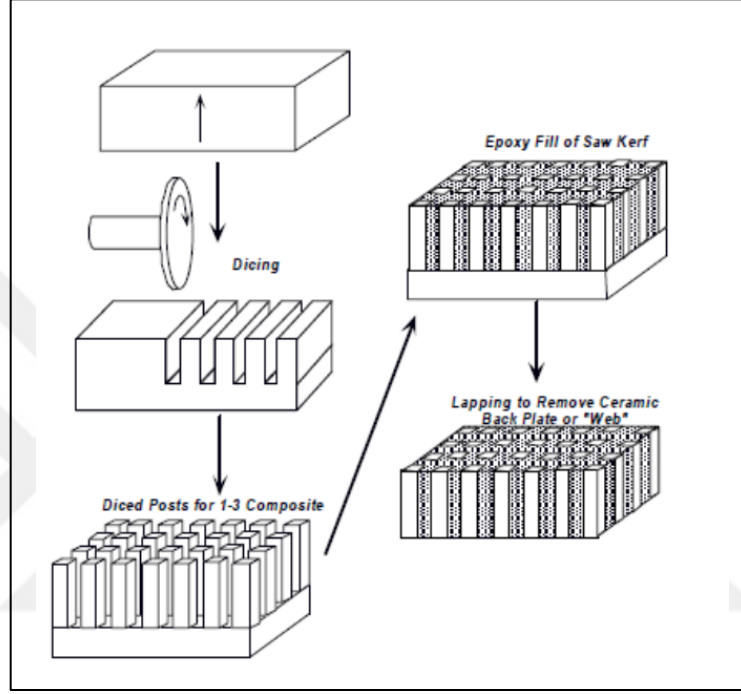
Ayrıca d_{33} ölçümleri yapılarak piezoseramiklerin yarı-statik düz piezoelektrik yük katsayısı (d_{33}) belirlenmiştir. Ölçümler Piezo d_{33} Metre (APC International YE2730A) cihazı ile yapılmış olup, sonuçlar (pC/N) biriminden elde edilmiştir. Bu ölçüm sayesinde numunelerin kutuplama yönleri de belirlenmiştir.

3.8. Dilimleme

Dilimleme ve doldurma tekniği, 1-3 bağlantı notasyonu hedeflenen ultrasonik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik blok üzerinde derin oluklar kesilir, polimer bu olukların içine dökülür, sonuçta elde edilen kompozit diskin seramik tabanı dilimlenebilir. Dilimleme işleminin aşamaları **Şekil 3.3**'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında seramik taban dilimlenmeden 1-3-2 bağlantı notasyonunda çalışmalara devam edilmiştir.

Kutuplama ardından elektriksel özellikleri ölçülen halka ve diskler piezokompozit üretimi için hazırlanmak üzere su ile soğutma sağlayan hassas dilimleme cihazı yardımıyla,

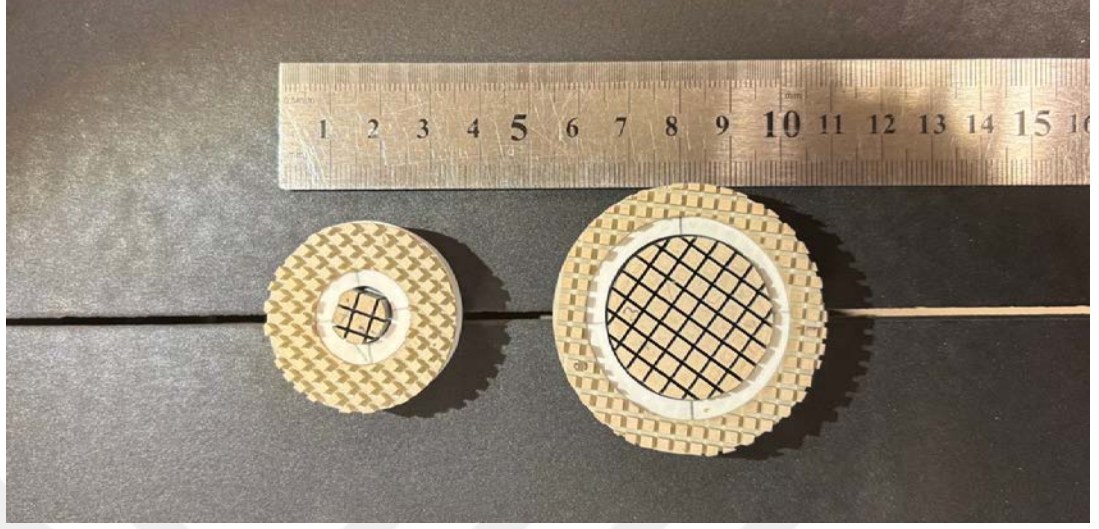
diskler 0,65 mm oluk aralığına sahip olacak şekilde 3x3 mm boyutlarında, halkalar 1 mm oluk aralığına sahip olacak şekilde 2x2 mm boyutlarında dilimlenmiştir.



Şekil 3.3: Dilimleme ve Doldurma Tekniği

3.9. CNC İşleme ile Sintaktik Blok Hazırlığı

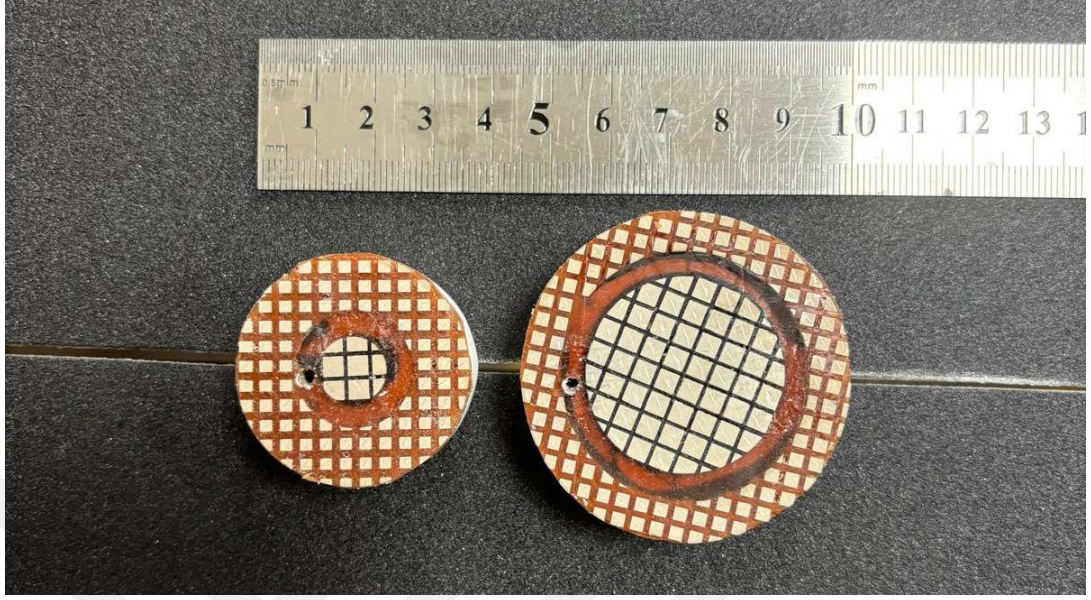
Piezokompozit dönüştürücülerin tasarımında, arka kısımdan akustik yansımaların ve gürültünün engellenmesi ve piezoelektrik malzemede yaratılan akustik titreşimlerin sadece ileriye doğru yayınmasını sağlamak amacıyla akustik sönümleyici bir malzemenin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla kullanılacak olan sintaktik blok CNC ile işlenerek halka ve disk formunda piezoseramiklerin yerleştirileceği yuvalar oluşturulmuş ve hedeflenen kompozit boyutlarında kesim işlemi yapılmıştır. Dilimlenmiş disk ve halkaların sintaktik blok üzerine yerleştirilmiş halinin fotoğrafı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Sintaktik Blok ve Alıcı-Verici Piezoseramik Birleşimi

3.10. Poliüretan ile Kaplama

Piezokompozitlerin alt yüzeyinde kalacak kabloların lehimleme işlemleri yapıldıktan sonra dilimleme ile ortaya çıkan kanallar ve gönderici PZT-4 diskler ile alıcı PZT-5A halkaların arasında kalan boşluklar, çubukların yüzeyleri açıkta kalacak şekilde Biresin U1406 poliüretan ile doldurulmuştur. Dolgu işlemi yapılmış piezokompozitlerin görseli **Şekil 3.5**'te verilmiştir. Bu işlemi takiben çubukların yüzeyine iletkenliğin sağlanması için gümüş epoksi uygulaması yapılmıştır. Ardından piezoseramik elemanların yüzeylerine kablo lehimleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yüzeyleri gümüş epoksi ile kaplanmış dönüştürücülerin fotoğrafı **Şekil 3.6**'da gösterilmiştir.

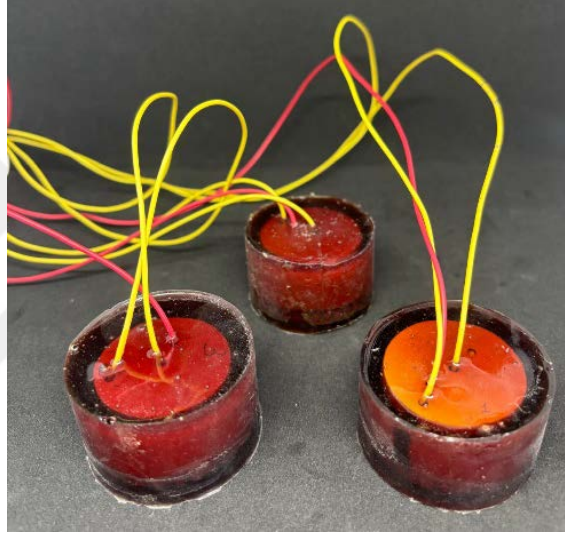


Şekil 3.5: 1-3-2 Bağlantıları Arası Boşlukların Poliüretan ile Kaplanması

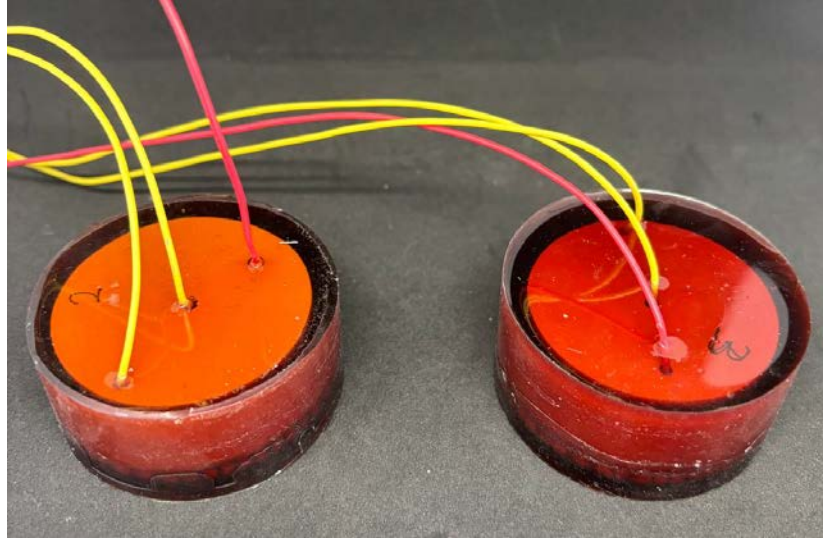


Şekil 3.6: Piezoseramik Yüzeylerinin Gümüş Epoksi Uygulaması

Son aşamada, kompozit bütünlüğünü sağlamak, mekanik sağlamlık, çevresel koruma, elektriksel yalıtım ve kompozit dönüştürücünün su ortamı ile akustik uyumunu sağlamak amacıyla, tüm kompozit yapıyı içine alacak şekilde ikinci bir poliüretan kaplama döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece hem mekanik bütünlük korunmuş hem de kablo bağlantı noktaları ile yüzey elektrotları dış etkilere karşı yalıtılmıştır. Kaplama işlemi sonrası piezokompozit dönüştürücülerin görselleri **Şekil 3.7 – 3.9**'da verilmiştir.



Şekil 3.7: Küçük Piezokompozit Sonar – Arka Görünümü



Şekil 3.8: Büyük Piezokompozit Sonar – Arka Görünümü



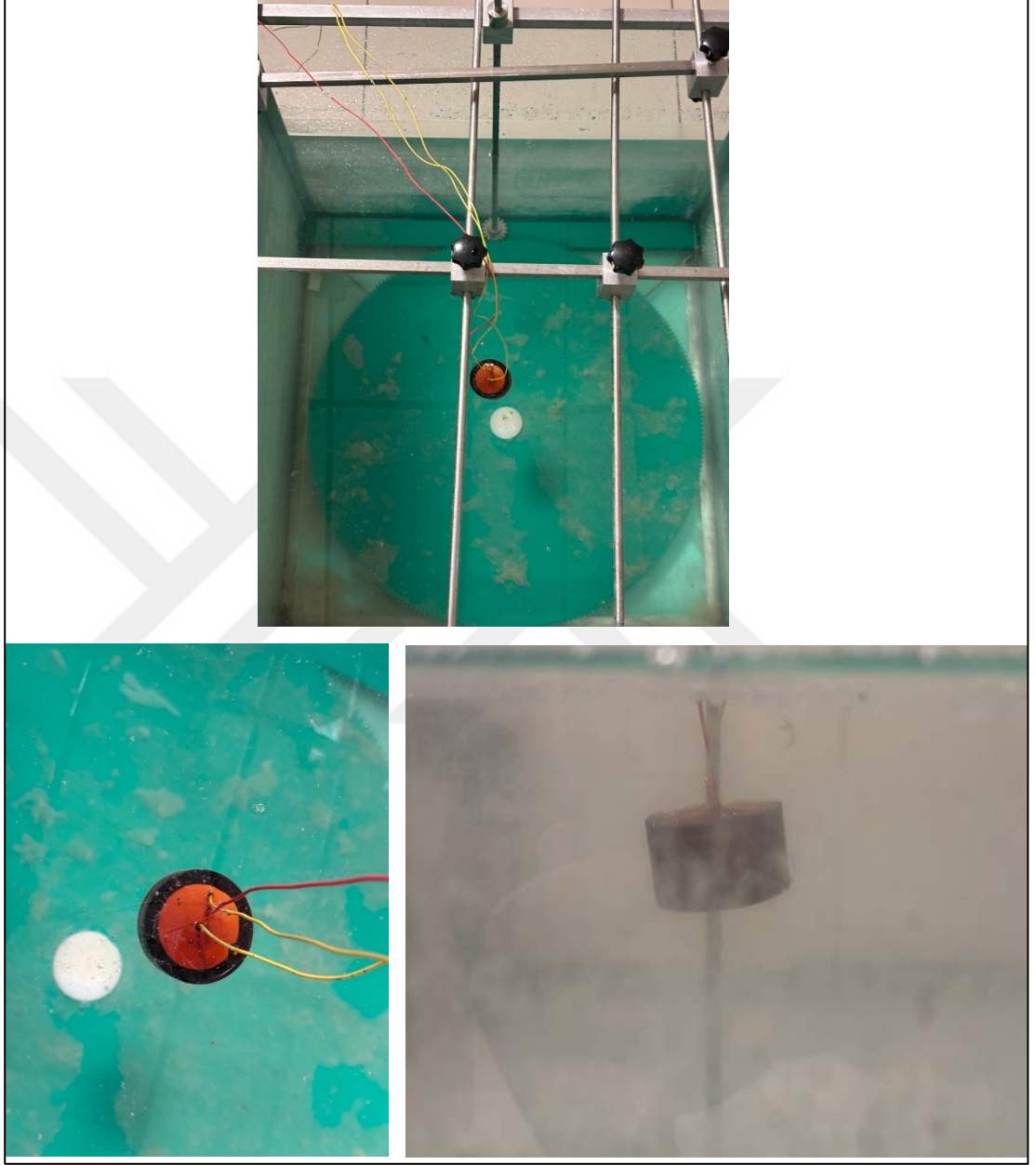
Şekil 3.9: Büyük, Küçük Piezokompozit Sonar – Yüzey Görünümü

3.11. Su Altı Akustik Ölçümleri

Poliüretan ile kaplanmış ve dış etkilere karşı daha korunaklı hale gelmiş olan piezokompozitlerin su tankı içerisinde su altı akustik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Piezokompozitlerin su altı akustik performanslarını değerlendirmek için İletim Voltaj Tepkisi - TVR (Transmitting Voltage Response) ve Serbest Alan Voltaj Hassasiyeti - FFVS (Free Field Voltage Sensitivity) değerleri kullanılır. Bu amaçla piezokompozitin su ortamlarındaki admitans ve faz açısı değerleri frekansa bağlı ölçülerek elde edilen verilerden formül 3.1'deki gibi TVR ve 3.2'deki gibi FFVS değerleri hesaplanmıştır. [13] Kullanılan test ortamı ve ölçümü alınan bir numune **Şekil 3.10'**da verilmiştir.

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

$$FFVS = TVR - 20 \log(|Y|) - 20 \log\left(\frac{f}{1000}\right) - 354. \quad (3.2)$$



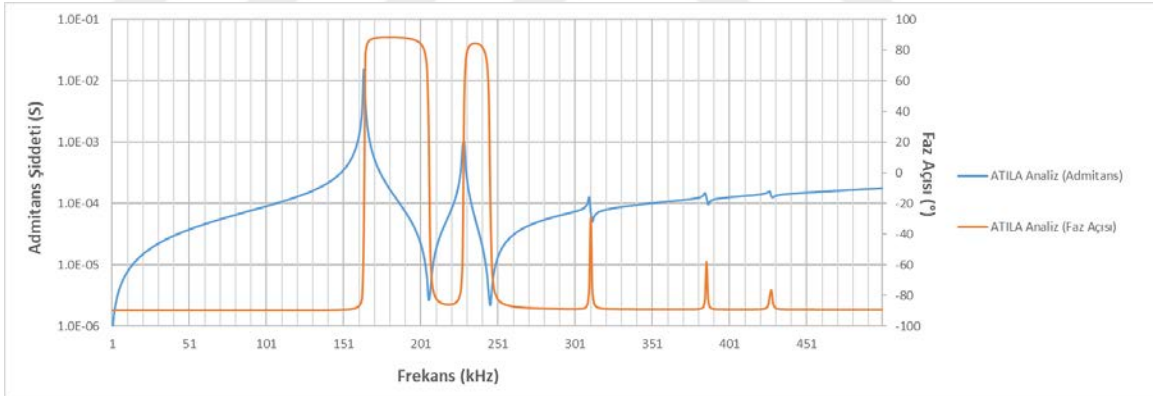
Şekil 3.10: Su Altı Akustik Ölçümleri

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

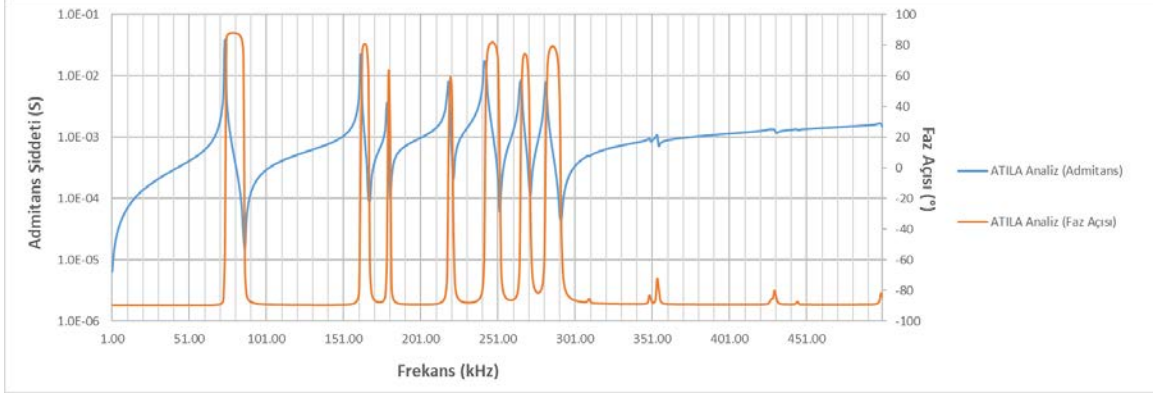
4.1. Sonlu Elemanlar Analizi Değerlendirmesi

Aşağıda, Şekil. 4.1, Şekil. 4.2, Şekil. 4.3 ve Şekil. 4.4'te hem gönderici hem de algılayıcı olarak planlanan piezoseramik yapıların ATILA® sonlu elemanlar analiz yazılımı kullanılarak elde edilen analiz çıktıları grafiksel olarak sunulmuştur.

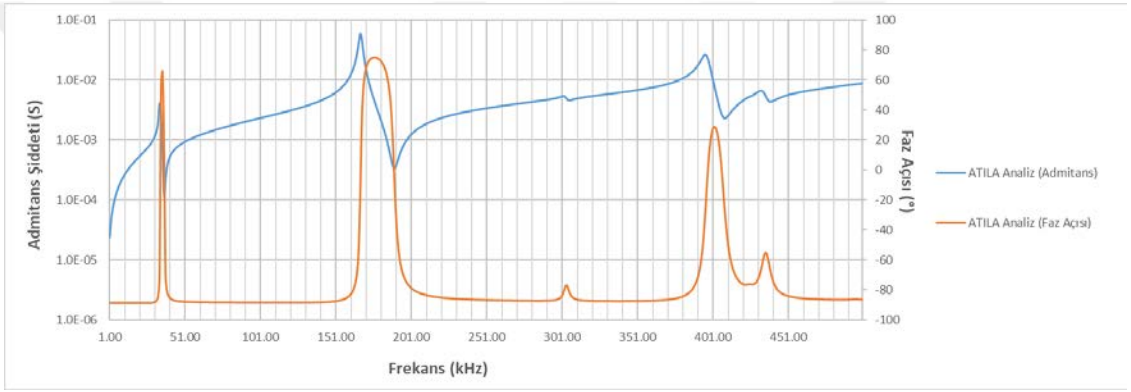
Modelleme sonucu ATILA® analiz sonuçlarından Frekans (kHz), Admitans Şiddeti (S), Faz Açısı (°), İletkenlik (S), Duygunluk (S) sonuçları elde edilmiştir. Boyut ve malzemelere göre elde edilen sonuçların Frekans (kHz) - Admitans Şiddeti (S) ve Frekans (kHz) - Faz Açısı (°) değerleri grafik olarak aşağıda verilmiştir.



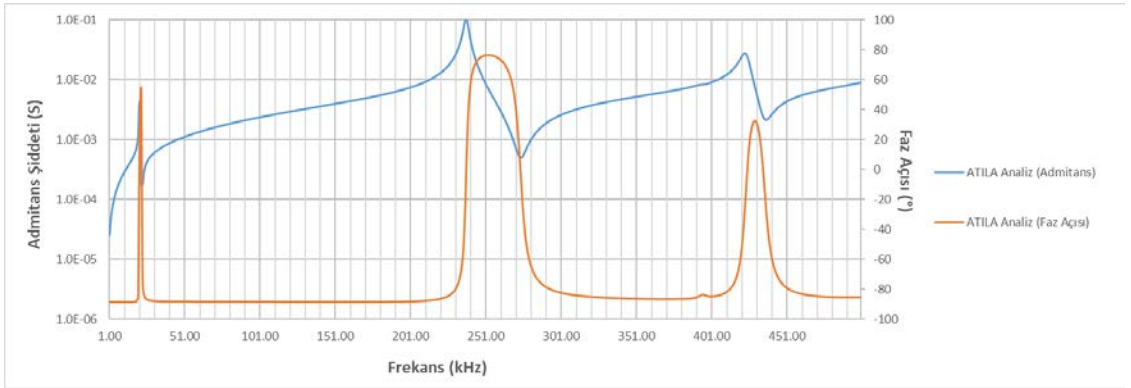
Şekil 4.1: PZT-4 10mm Çap – 8mm kalınlıkta Disk Modelinin Çıktısı



Şekil 4.2: PZT-4 30mm Çap – 8mm kalınlıkta Disk Modelinin Çıktısı



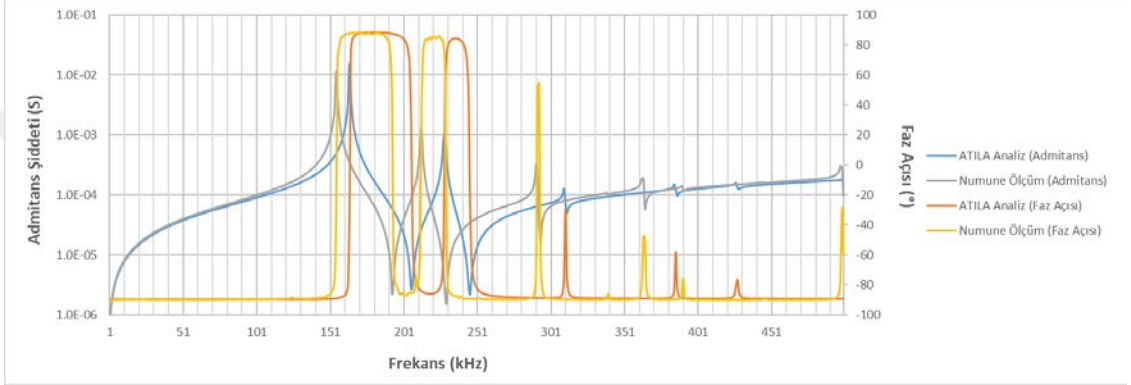
Şekil 4.3: PZT-5A Küçük Halka 36-18-3 mm Modelinin Çıktısı



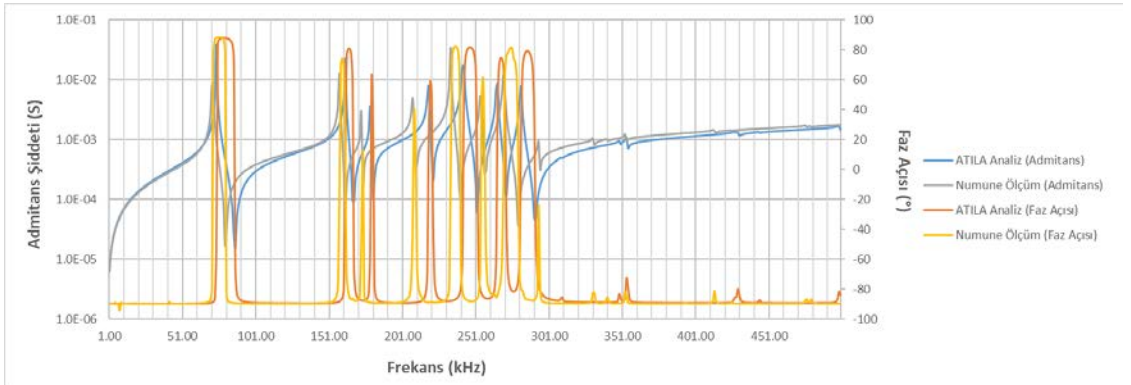
Şekil 4.4: PZT-5A Büyük Halka 49-37-3 mm Modelinin Çıktısı

ATILA® sonlu elemanlar analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modelleme çalışmaları ile laboratuvar ortamında üretilen numunelere ait ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de değerlendirilmiştir.

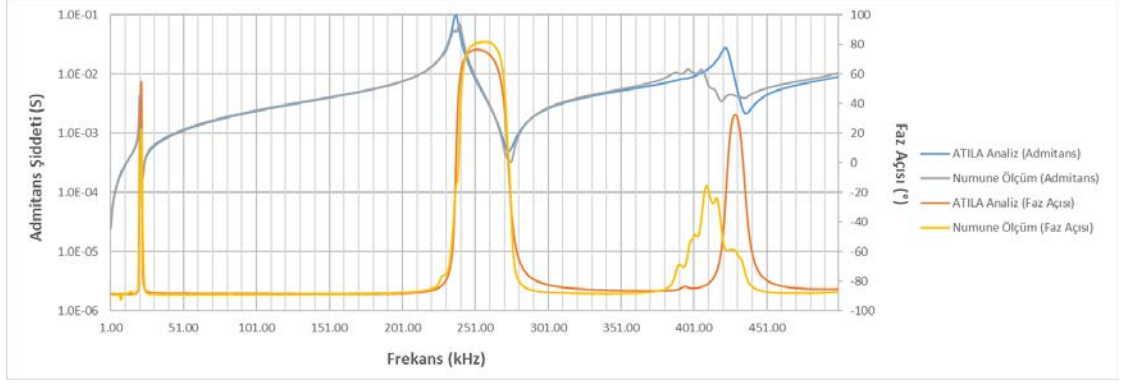
Elde edilen admitans ve faz açısı karakteristiklerinin benzerlik gösterdiği, özellikle rezonans ve anti-rezonans noktalarının frekans ekseninde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal modelleme sonuçları ile deneysel veriler arasında 10–40 kHz aralığında değişen sapmalar tespit edilmiş olup, bu sapmalar modelleme doğruluğu açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır.



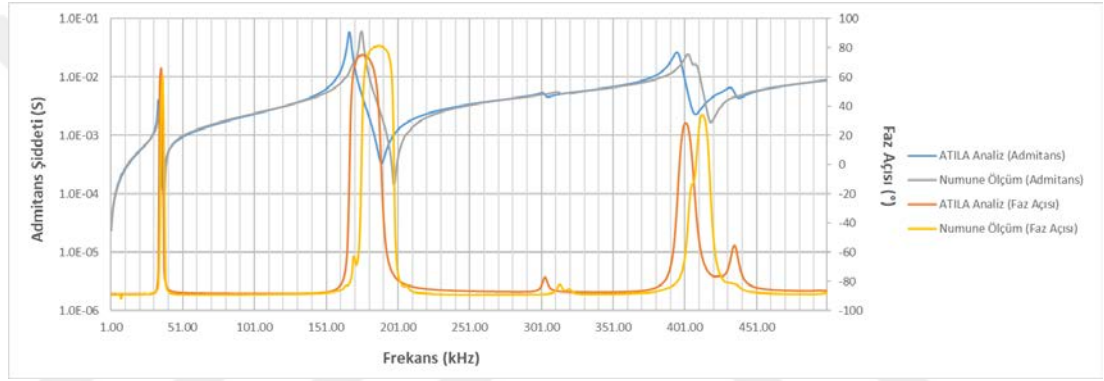
Şekil 4.5: 10 mm PZT-4 Disk Numune-1 ve ATILA Analiz Sonuçları



Şekil 4.6: 30 mm PZT-4 Disk Numune-1 ve ATILA Analiz Sonuçları



Şekil 4.7: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1 ve ATILA Analiz



Şekil 4.8: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-1 ve ATILA Analiz

4.2. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PZT-5A Büyük halka 49-37 mm, küçük halka 36-18 mm ve PZT-4 30 mm disk, 10 mm disk d_{33} sonuçları aşağıda sırasıyla **Tablo. 4.1**, **Tablo. 4.2**, **Tablo. 4.3** ve **Tablo. 4.4**'te verilmiştir. PZT-4 ve PZT-5A çubuklarının sonuçları sırayla **Tablo 4.5** ve **Tablo 4.6**'da verilmiştir.

PZT-5A 49-37mm büyük halka yumuşak karakterli numunelerin d_{33} sonuçları aşağıda verilmiştir. Ortalama d_{33} yaklaşık 425 pC/N'dir. Beklenen d_{33} değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.1: PZT-5A Büyük Halka 49-37mm d_{33} Sonuçları

Numune No	d_{33} (pC/N)
1	425
2	433
3	411
4	418
5	439
6	432
7	419

PZT-5A 36-18mm küçük halka yumuşak karakterli numunelerin d_{33} sonuçları aşağıda verilmiştir. Ortalama d_{33} yaklaşık 435 pC/N'dir. PZT-5A 49-37mm büyük halka yumuşak karakterli numuneler ile kıyaslandığında benzer verimlilik elde edilmiştir.

Tablo 4.2: PZT-5A Küçük Halka 36-18mm d_{33} Sonuçları

Numune No	d_{33} (pC/N)
1	427
2	432
3	424
4	429
5	401
6	446
7	476
8	480
9	422
10	421

PZT-4 30mm sert karakterli disk numunelerinin d_{33} sonuçları aşağıda verilmiştir. Ortalama d_{33} yaklaşık 258 pC/N'dir. Beklenen d_{33} değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.3: PZT-4 30mm Çap Disk d_{33} Sonuçları

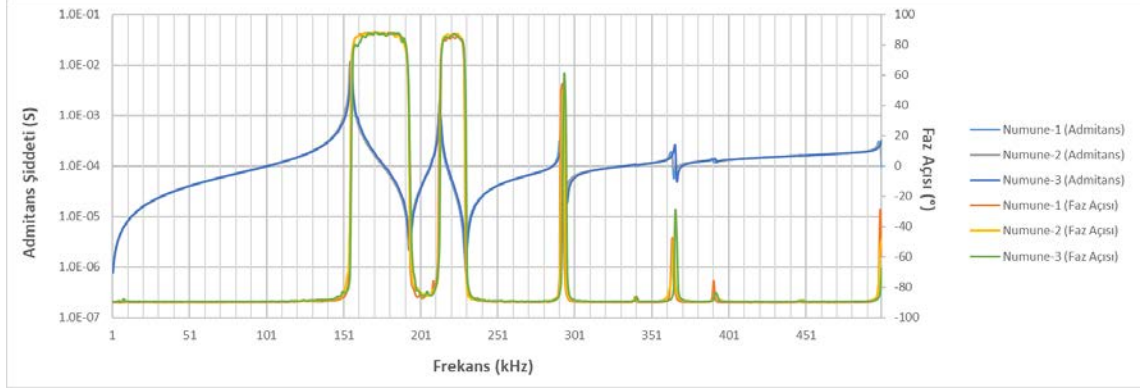
Numune No	d_{33} (pC/N)
1	255
2	265
3	264
4	266
5	253
6	248

PZT-4 10mm sert karakterli disk numunelerinin d_{33} sonuçları aşağıda verilmiştir. Ortalama d_{33} yaklaşık 309 pC/N'dir. PZT-4 30mm sert karakterli disk numuneleri ile kıyaslandığında daha yüksek d_{33} elde edilmesinin nedeni daha küçük çaplı numunenin sağlıklı bir ölçüm için daha doğru geometriye sahip olmasındandır.

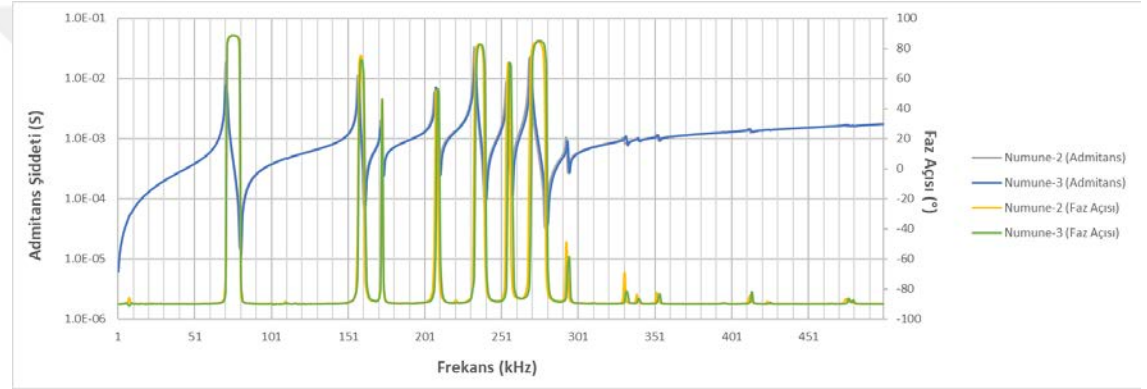
Tablo 4.4: PZT-4 10mm Çap Disk d_{33} Sonuçları

Numune No	d_{33} (pC/N)
1	311
2	307
3	312
4	307
5	311
6	301
7	310
8	309
9	314
10	313
11	305
12	307
13	305
14	311
15	312

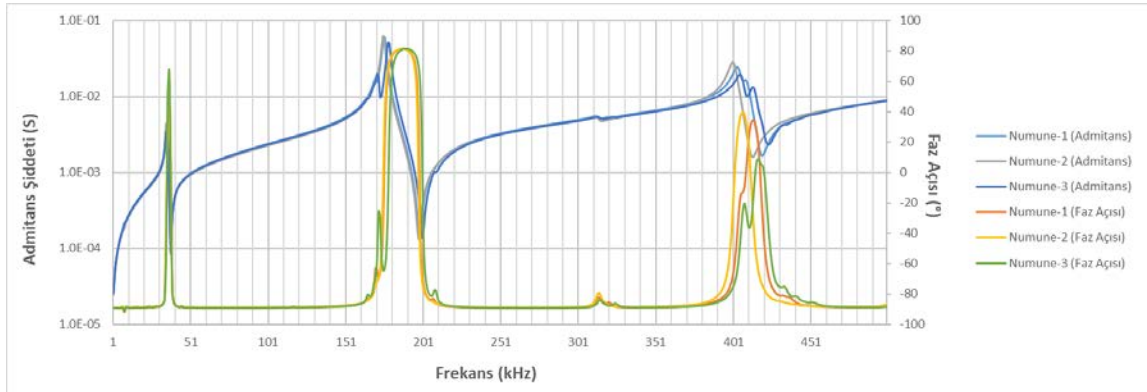
Piezokompozit üretiminde kullanılan halka ve disk numunelerinin elektriksel karakterizasyon sonuçları aşağıda verilmiştir. Üretilen 5 adet piezokompozit için kullanılan numunelerin “admitans - frekans” ve “faz açısı - frekans” sonuçları incelendiğinde aynı tip numunelerin birbiri arası tutarlılığın yüksek olduğu görülmektedir. **Şekil 4.9**'da 10 mm, 8 mm PZT-4, **Şekil 4.10**'da 30 mm, 8 mm diskleri verilmiştir. **Şekil 4.11**'de 36-18 mm, 3 mm PZT-5A ve **Şekil 4.12**'de 49-37 mm, 3mm PZT-5A halkaları verilmiştir.



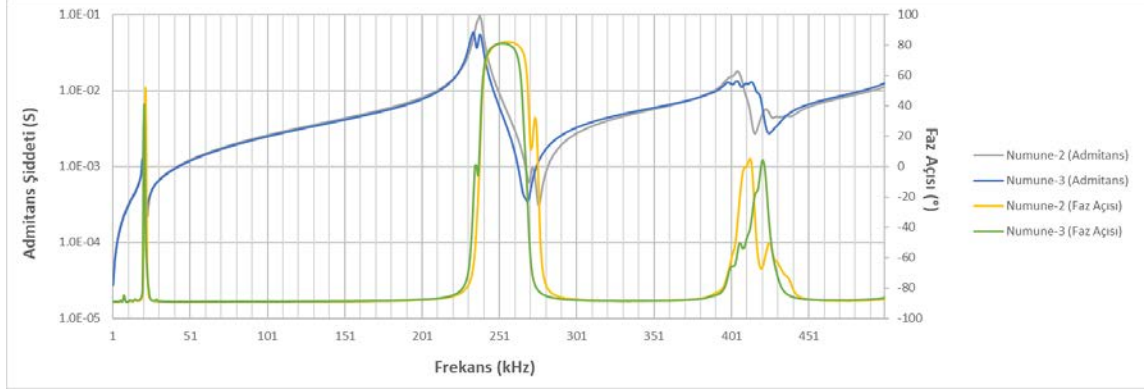
Şekil 4.9: 10 mm PZT-4 Disk Numune-1, 2 ve 3 Sonuçları



Şekil 4.10: 30 mm PZT-4 Disk Numune-2 ve 3 Sonuçları



Şekil 4.11: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1, 2 ve 3 Sonuçları

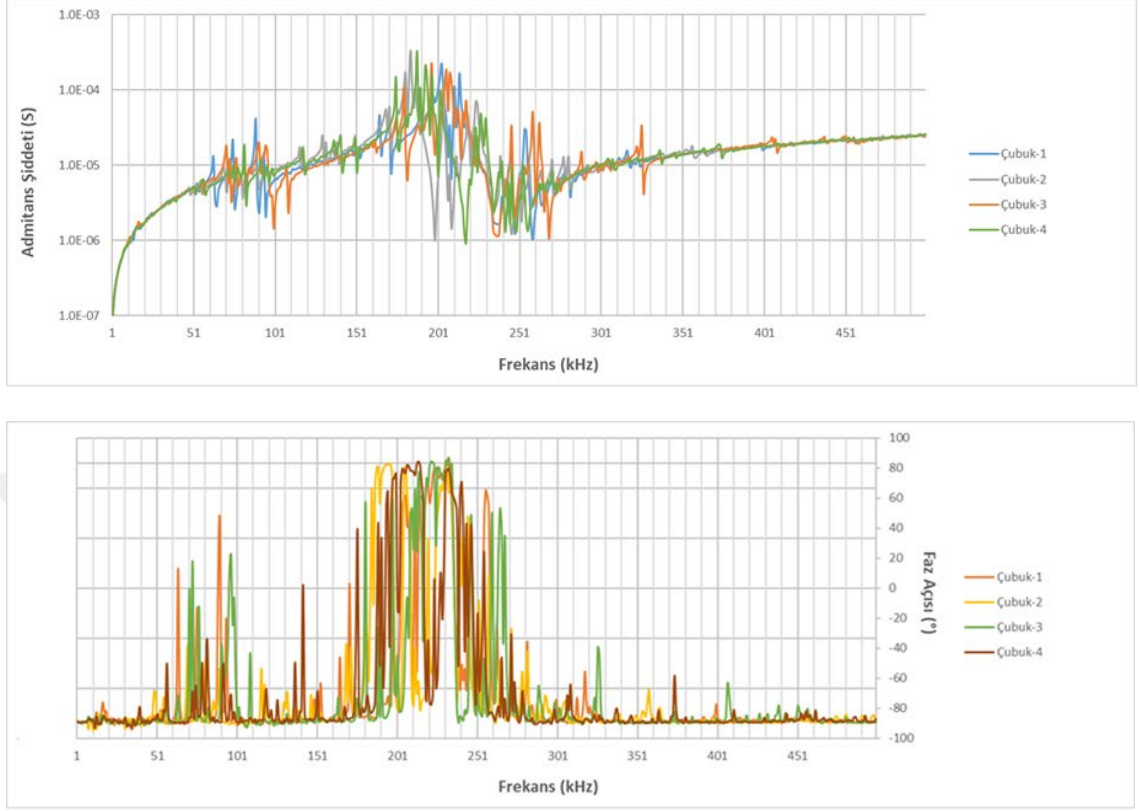


Şekil 4.12: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-2 ve 3 Sonuçları

PZT-4 10 mm çaplı disk numuneden dilimlenmiş 3-1-2 bağlantılı çubuklardan d_{33} ortalamaları 284 pC/N olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.13'te PZT-4 çubuklarından alınan admittans ve faz açısı grafikleri verilmiştir.

Tablo 4.5: PZT-4 Çubuk d_{33} Sonuçları

Numune No	d_{33} (pC/N)
1	281
2	288
3	278
4	289

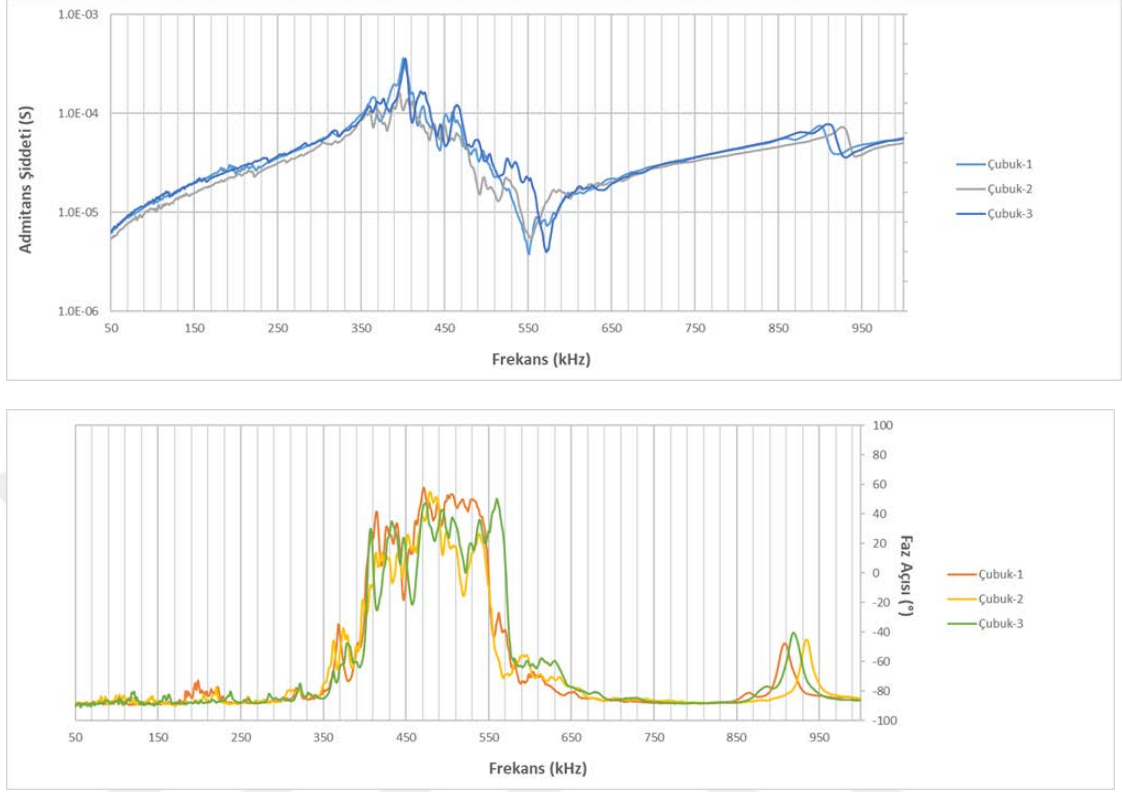


Şekil 4.13: PZT-4 Çubuklarından Alınan Ölçüm Sonuçları

PZT-5A 49-37 mm çaplı halka numuneden dilimlenmiş 3-1-2 bağlantılı çubuklardan çubuklarının d_{33} ortalamaları 409 pC/N olarak tespit edilmiştir. **Şekil 4.14**'te PZT-5A çubuklarından alınan admittans ve faz açısı grafikleri verilmiştir.

Tablo 4.6: PZT-5A Çubuk d_{33} Sonuçları

Numune No	d_{33} (pC/N)
1	397
2	417
3	413



Şekil 4.14: PZT-5A Çubuklarından Alınan Ölçüm Sonuçları

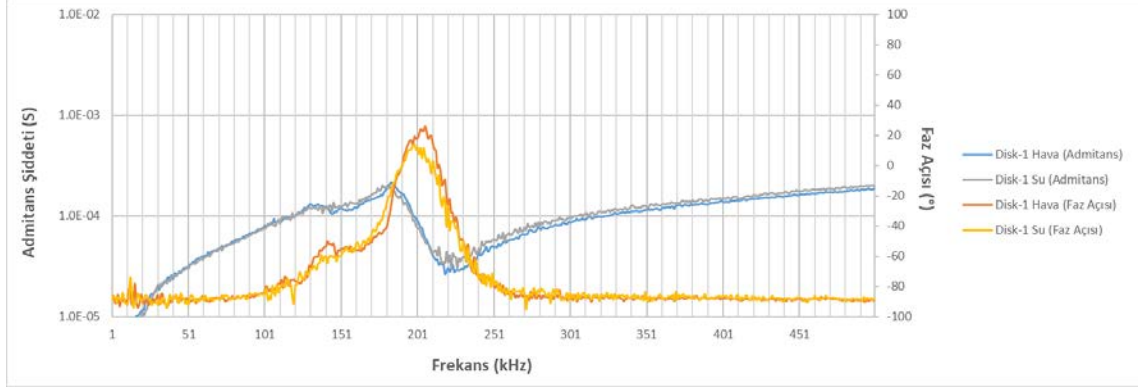
4.3. Piezokompozitlerin Havada ve Su Altında Elektriksel Ölçümleri ile Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, su altı akustik uygulamaları için toplamda beş adet piezokompozit numune hazırlanmıştır. Numunelerden üçü, 36 mm dış çap – 18 mm iç çap boyutlarındaki PZT-5A halka ve 10 mm çapındaki PZT-4 disk kullanılarak; kalan iki numune ise 49 mm dış çap – 37 mm iç çap boyutlarındaki PZT-5A halka ve 30 mm çapındaki PZT-4 disk ile oluşturulmuştur.

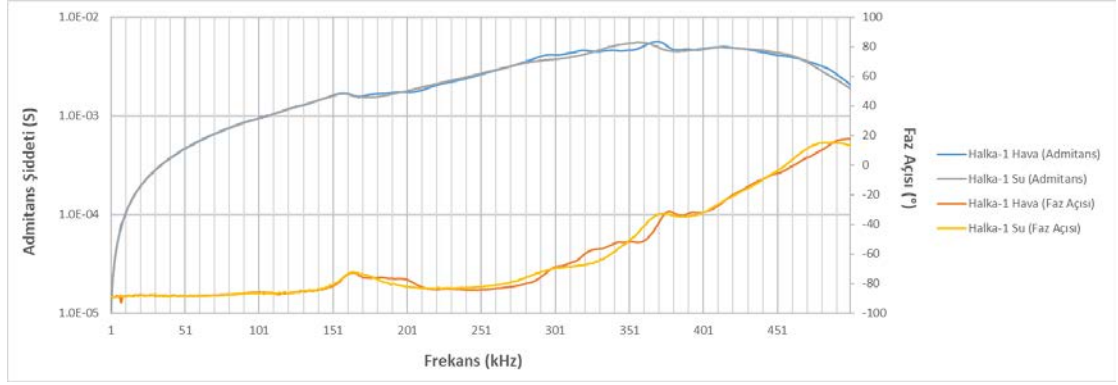
Küçük Boyutlu Kompozit Numuneler (36–18 mm PZT-5A halka ve 10 mm PZT-4 disk) Kompozit Numune-1 için elde edilen su altı TVR ve FFVS ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Numunelere ait admitans ve faz açısı ölçümleri hem hava hem de su ortamında yapılmış **Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22**'de verilmiştir ve karakteristiklerin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Su ortamında, suyun yarattığı kütleli yük nedeniyle faz açısında küçük bir azalma ve rezonanstaki admitans değerinde bir miktar baskılanma gözlenmiştir.
- Verici olarak kullanılan 10 mm çapındaki PZT-4 diskten elde edilen TVR değeri, yaklaşık 192 kHz frekansta 134 dB olarak ölçülmüştür. Alıcı olarak kullanılan 36–18 mm boyutlarındaki PZT-5A halkadan alınan FFVS değeri, yaklaşık 165 kHz frekansta –202 dB'dir. **Şekil 4.17, Şekil 4.20 ve Şekil 4.23**'te verilmiştir.

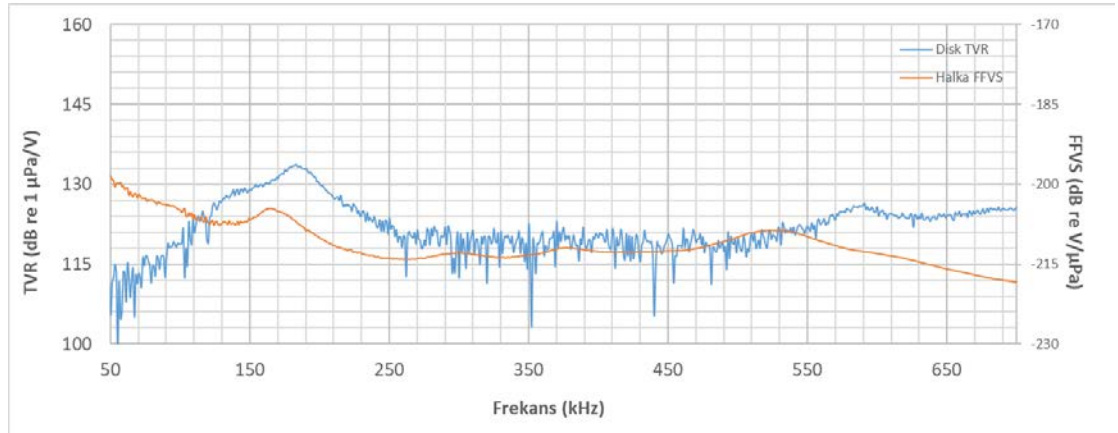
Kompozit Numune-2 ve Kompozit Numune-3, Numune-1 ile aynı geometrik ve malzeme özelliklerine sahip olacak şekilde üretilmiştir. Bu numunelerden elde edilen TVR, FFVS ve elektriksel karakterizasyon sonuçları da benzer eğilimler göstermiş, karakteristik davranışlar tekrar edilebilir biçimde elde edilmiştir.



Şekil 4.15: 10 mm PZT-4 Disk Kompozit Numune-1 Hava ve Suda Alının Ölçüm

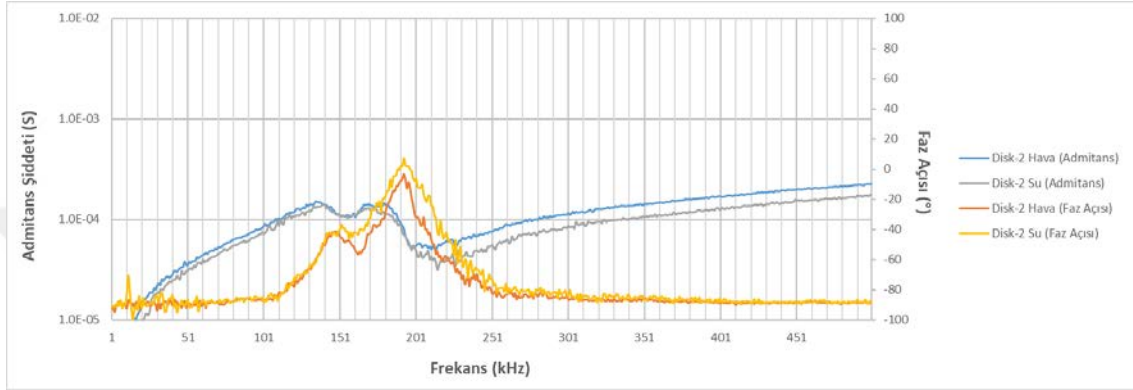


Şekil 4.16: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-1 Hava ve Suda Alının Ölçüm

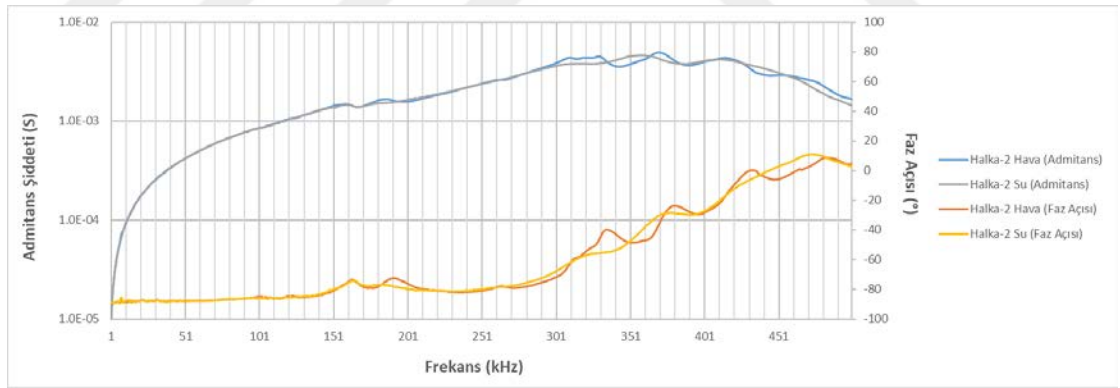


Şekil 4.17: Num-1; 10 mm PZT-4 Disk TVR ve 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS

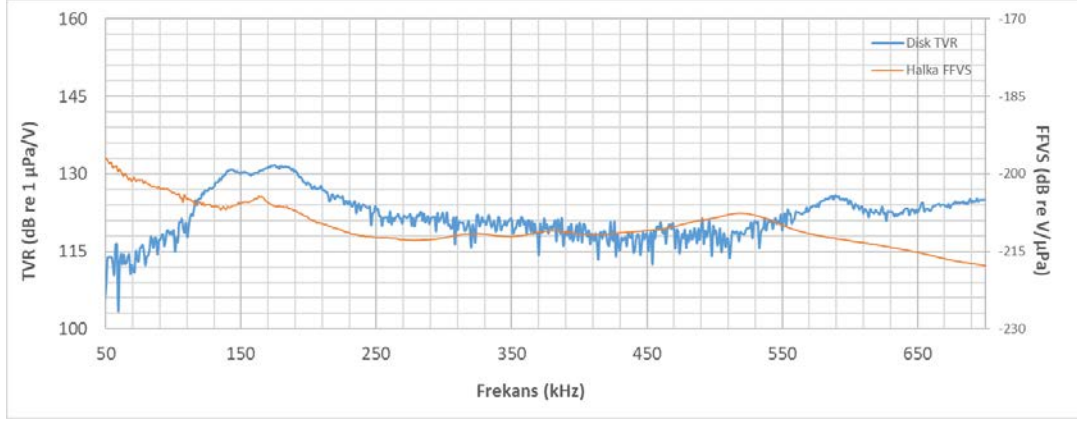
36-18 mm PZT-5A halka ve 10 mm PZT-4 disk ile hazırlanan 2 numaralı küçük kompozit numunesinin TVR ve FFVS ile hava ve su ortamlarında alınan elektriksel karakteristiklerinin sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.18: 10 mm PZT-4 Disk Numune-2 Hava ve Suda Alınım Ölçüm

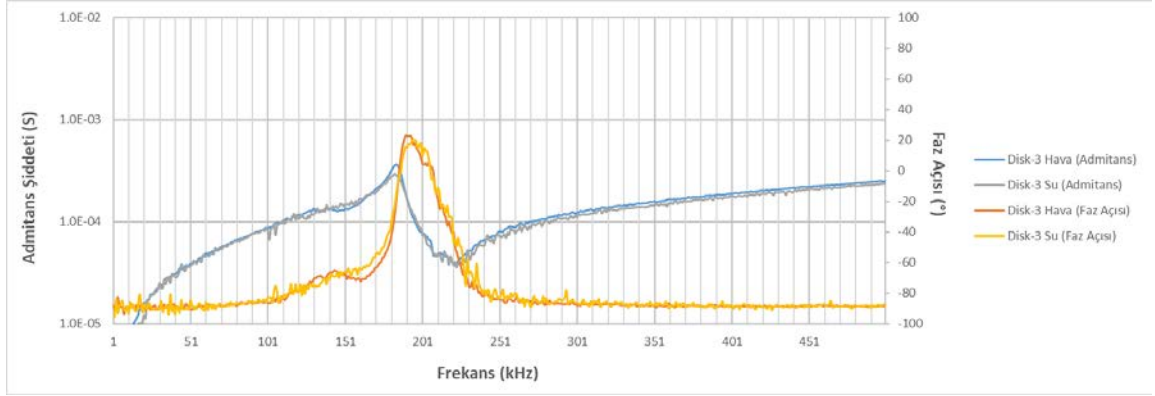


Şekil 4.19: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-2 Hava ve Suda Alınım Ölçüm



Şekil 4.20: Num-2; 10 mm PZT-4 Disk TVR ve 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS

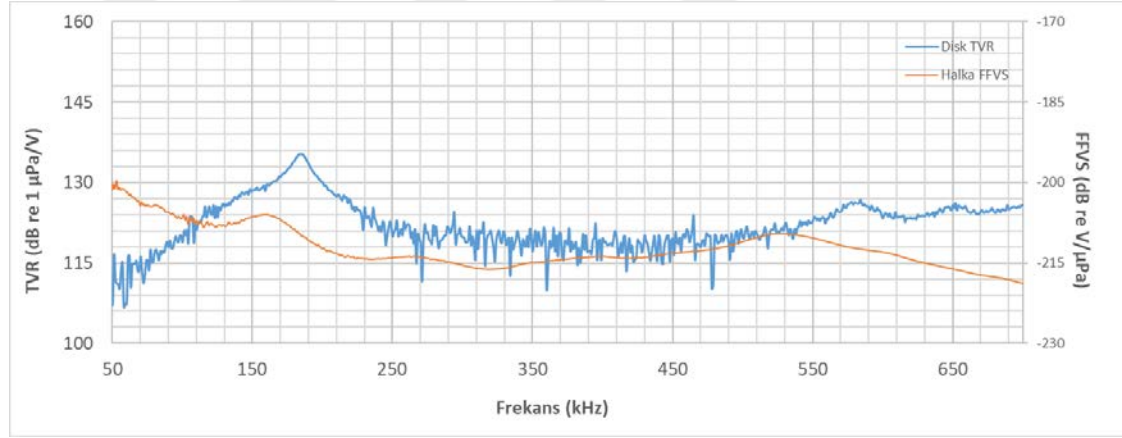
36-18 mm PZT-5A halka ve 10 mm PZT-4 disk ile hazırlanan 3 numaralı küçük kompozit numunesinin TVR ve FFVS ile hava ve su ortamlarında alınan elektriksel karakteristiklerinin sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.21: 10 mm PZT-4 Disk Numune-3 Hava ve Suda Alınan Ölçümleri



Şekil 4.22: 36-18 mm PZT-5A Halka Numune-3 Hava ve Suda Alının Ölçüm



Şekil 4.23: Numune-3; 10 mm PZT-4 Disk TVR, 36-18 mm PZT-5A Halka FFVS

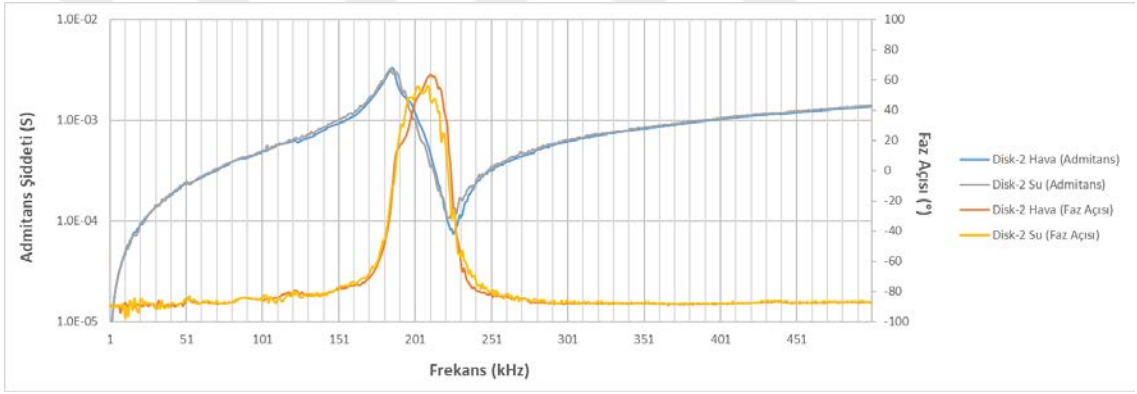
49-37 mm PZT-5A halka ve 30 mm PZT-4 disk ile hazırlanan 2 numaralı küçük kompozit numunesinin TVR ve FFVS ile hava ve su ortamlarında alınan elektriksel karakteristiklerinin sonuçları altta verilmiştir.

Büyük Boyutlu Kompozit Numuneler (49–37 mm PZT-5A halka ve 30 mm PZT-4 disk)
Kompozit Numune-1 için ölçülen değerler aşağıdaki şekildedir:

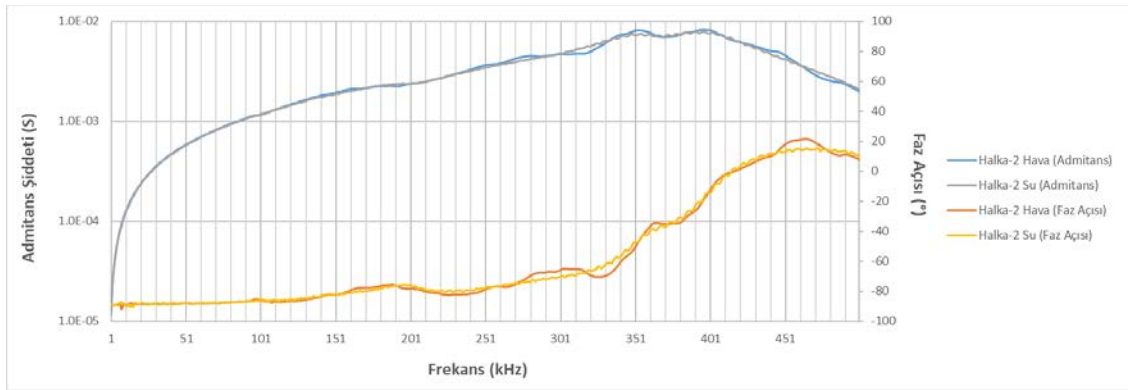
- Hava ve su ortamında gerçekleştirilen admitans ve faz açısı ölçümlerinde karakteristikler benzer bulunmuş; su ortamında faz açısında hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.

- Alıcı birim olan 49–37 mm boyutlarındaki PZT-5A halkadan alınan FFVS değeri ise yaklaşık 200 kHz frekansta –208 dB olarak belirlenmiştir. Gönderici birim olan 30 mm çapındaki PZT-4 diskten elde edilen TVR değeri, yaklaşık 192 kHz frekansta 147 dB’dir. **Şekil 4.26** ve **Şekil 4.29**’de verilmiştir.

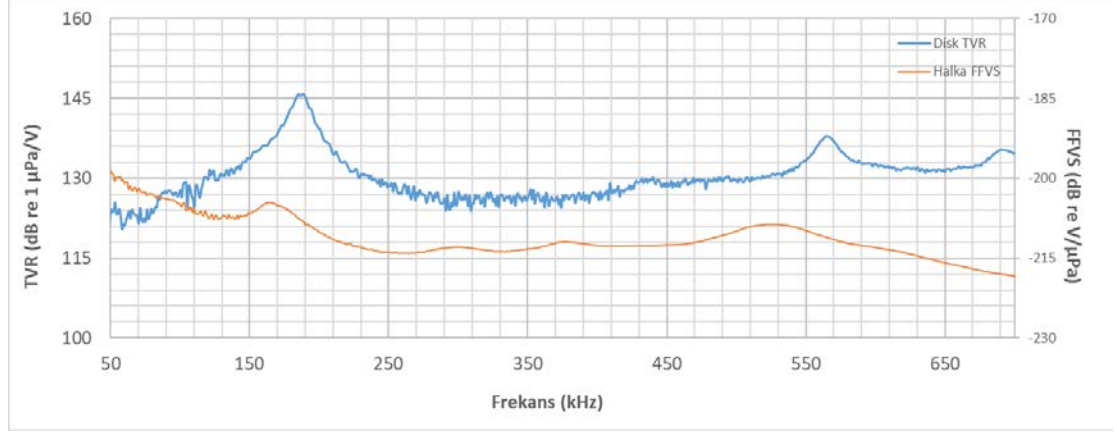
Kompozit Numune-2 de aynı boyut ve malzemelerle üretilmiş olup, ölçüm sonuçları Numune-1 ile tutarlıdır. TVR ve FFVS değerlerinin karşılaştırılabilir düzeyde olması, bu kompozit yapının da güvenilir ve tekrar edilebilir bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24: 30 mm PZT-4 Disk Numune-2 Havada ve Suda Alının Ölçüm

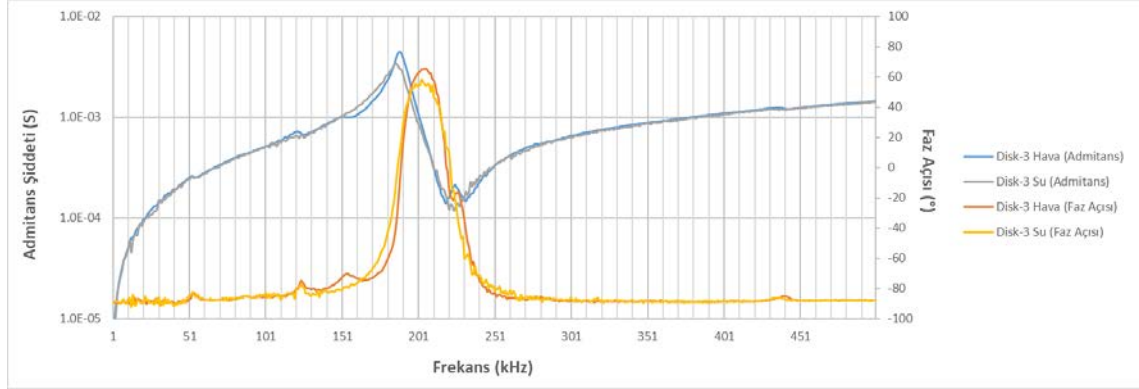


Şekil 4.25: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-2 Havada Suda Alının Ölçüm

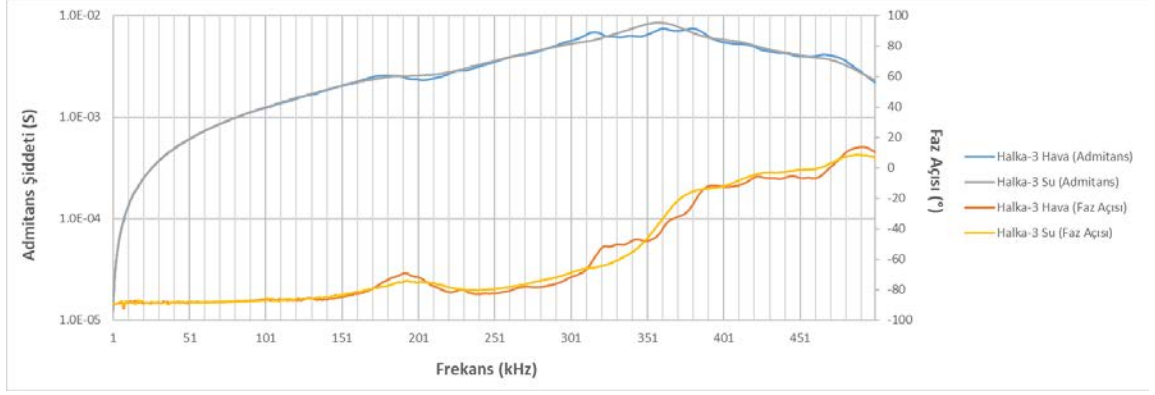


Şekil 4.26: Numune-2; 30 mm PZT-4 Disk TVR, 49-37 mm PZT-5A Halka FFVS

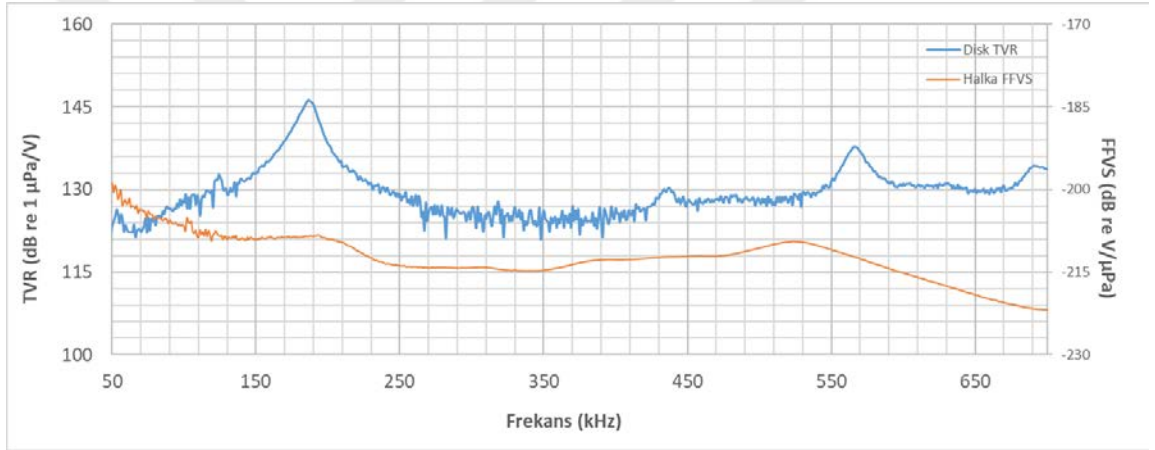
49-37 mm PZT-5A halka ve 30 mm PZT-4 disk ile hazırlanan 3 numaralı küçük kompozit numunesinin TVR ve FFVS ile hava ve su ortamlarında alınan elektriksel karakteristiklerinin sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.27: 30 mm PZT-4 Disk Numune-3 Havada ve Suda Alınan Ölçümleri



Şekil 4.28: 49-37 mm PZT-5A Halka Numune-3 Havada ve Suda Alının Ölçüm



Şekil 4.29: Numune-3; 30 mm PZT-4 Disk TVR, 49-37 mm PZT-5A Halka FFVS

5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, farklı karakteristiklere sahip yumuşak PZT-5A ve sert PZT-4 piezoseramik tozları kullanılarak 1-3 bağlantılı piezokompozit yapılar geliştirilmiş ve bu yapıların üretim süreçleri ile performansları detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, hem üretim sürecinin güvenilirliğini hem de malzeme kombinasyonlarının performansa etkisini ortaya koymuştur.

FEA (Sonlu Elemanlar Analizi) sonuçları ile deneysel bulgular arasında ± 10 –40 kHz aralığında sapma gözlemlenmiş, bu farklar akustik ortam koşulları ve üretimden kaynaklanan toleranslar çerçevesinde kabul edilebilir bulunmuştur.

Küçük boyutlu piezokompozit numuneler (36-18 mm, 3mm halka ve 10 mm, 8mm disk) için alınan ölçümlerde TVR değerleri yaklaşık olarak 192 kHz frekansında 134 dB civarında, FFVS değerleri ise 165 kHz civarında -202 dB olarak kaydedilmiştir. Bu küçük boyutlu üç numunede elde edilen sonuçlar birbirine yakın olup, tekrar edilebilirliğin sağlandığını göstermiştir. Admitans ve faz açısı ölçümleri de hava ve su ortamları arasında benzer karakteristik göstermiştir.

Büyük boyutlu numuneler (49-37 mm, 3mm halka ve 30 mm, 8mm disk) için yapılan testlerde ise TVR değeri 192 kHz civarında yaklaşık 147 dB olarak ölçülmüş, FFVS değeri ise 200 kHz civarında -208 dB olarak elde edilmiştir.

Büyük boyutlu numunelerin TVR (Transmitting Voltage Response) değeri yaklaşık 147 dB, küçük boyutlu numunelerin ise yaklaşık 134 dB olarak ölçülmüştür. Bu da büyük boyutlu numunelerin yaklaşık 13 dB daha yüksek çıkış gerilimi sunduğunu gösterir. Bununla birlikte FFVS (Free Field Voltage Sensitivity) açısından küçük boyutlu numuneler yaklaşık -202 dB, büyük boyutlu numuneler ise -208 dB civarında bir hassasiyet göstermiştir. Yani büyük boyutlu numunelerin alıcı hassasiyeti yaklaşık 6 dB daha düşüktür. Her iki tip numune de hedef uygulamalara uygun performans sergilemiş ve akustik empedans uyumu açısından başarılı sonuçlar vermiştir.

Bu veriler, büyük boyutlu numunelerin daha yüksek çıkış gerilimi (TVR) sunduğunu ancak alıcı hassasiyetinin (FFVS) küçük boyutlara göre biraz daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen piezokompozitlerin su altı akustik sistemlerinde gönderici ve alıcı olarak entegre edilebilir nitelikte olduğunu ortaya koymuştur.



KAYNAKLAR

- [1] Alkoy, S., “Elektroseramiklerin Mikro ve Makro Boyutta Mühendisliği”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKU J. Sci. Eng.) 2013, 14, 261–266.
- [2] Uchino, K., “Fundamentals of Piezoelectrics”, Encyclopedia of Smart Materials 2022, 4, 1–21.
- [3] Sun, B.; Wu, J.; Zhang, J.; Qian, M., “A new model describing physical effects in crystals: the diagrammatic and analytic methods for macro-phenomenological theory”, J. Mater. Process. Technol. 2003, 139, 444–447.
- [4] Yang, C.; Youcef-Toumi, K., “Principle, implementation, and applications of charge control for piezo-actuated nanopositioners: A comprehensive review”, Mech. Syst. Signal Process. 2022, 171, 1.
- [5] Sorrell, V. L., “Crystals Are Amazing!”, CASE: Cardiovascular Imaging Case Reports 2024, 8 (12), 515–517.
- [6] Bochenek, P.; Niemiec, P.; Szafraniak-Wiza, I.; Dercz, G., “Comparison of electrophysical properties of PZT-type ceramics obtained by conventional and mechanochemical methods”, Materials 2019, 12 (20), 3301.
- [7] Sun, H.; et al., “Relationships between structure and properties in commercial lead zirconate titanate ceramics”, J. Eur. Ceram. Soc. 2021, 41 (13), 6758–6768.
- [8] Guo, J.; Tong, B.; Jian, J.; Chen, J.; Zhou, T.; Shang, X.; Cheng, J., “Enhanced transduction coefficient in piezoelectric PZT ceramics by mixing powders calcined at different temperatures”, J. Eur. Ceram. Soc. 2020, 40 (10), 3348–3353.
- [9] Alkoy, S.; Yanik, H.; Yapar, B., “Fabrication of lead zirconate titanate ceramic fibers by gelation of sodium alginate”, Ceram. Int. 2007, 33 (3), 389.
- [10] Yalcin, E.; Gözüaık, N. K.; Alkoy, S.; Sarı, H. A.; Kaya, M. Y.; Öncel, Ç.; Mensur, E., “Characterization of 1–3 piezocomposites from PNN-PZT piezoceramics”, Sens. Actuators A Phys. 2023, 357, 1–5.
- [11] Mensur-Alkoy, E.; Kaya, M. Y.; Avdan, D.; Unver, M. U.; Alkoy, S., “Fabrication of piezoelectric ceramic hollow fibers with low sintering temperature and their characterization”, Proc. IEEE ISAF/IWATMD/PFM Joint Symp. 2014, 150–153.
- [12] Qin, H.; Lu, H.; Zhou, J.; Zhang, Y., “Effect of thickness on the performance parameters of modified 1–3 piezoelectric composites”, Ceram. Int. 2023, 49, 10928.

- [13] Kaya, M. Y.; Mensur-Alkoy, E.; Gürbüz, A.; Öner, M.; Alkoy, S., “Influence of compositional variation on the electrical properties of $[\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ – $[\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3]$ ceramics and their transducer application”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 2018, 65, 1268–1277.
- [14] Alkoy, S.; Tekdas, A. S.; Tekel, E.; Olukkent, R., “Drawing of piezoceramic fibers and ribbons using a novel alginate gelation method and properties of fiber and ribbon-based piezodevices”, *Adv. Mater. Res.* 2012, 445, 380–385.
- [15] Dursun, S.; Alkoy, S., “Electrical properties of 1–3 piezocomposites prepared from textured $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (KSN) ceramic fibers”, *Ferroelectrics* 2011, 420, 1–6.
- [16] Tressler, J. T.; Alkoy, S.; Newnham, R. E., “Piezoelectric sensors and sensor materials”, *J. Electroceram.* 1998, 2 (4), 257–272.
- [17] Zhang, Z.; Cheng, G.; Kan, J.; Zeng, P.; Wen, J., “Influence of multiple piezoelectric effects on piezoelectric coefficient of piezoelectric ceramics”, *Appl. Mech. Mater.* 2012, 101–102, 922–925.
- [18] Lerch, R., “Finite element analysis of piezoelectric transducers”, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.* 1988, 643–649.
- [19] Lerch, R., “Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 1990, 37 (3), 233–247.
- [20] Welch-Phillips, A.; Gibbons, D.; Ahern, D. P.; Butler, J. S., “What is finite element analysis?”, *Clin. Spine Surg.* 2020, 33 (8), 323–324.
- [21] Bain, A. K.; Chand, P., *Ferroelectrics Principles and Applications*, Wiley–VCH: Weinheim, Germany, 2017.
- [22] Hong, C.-H.; Kim, H.-P.; Choi, B.-Y.; Han, H.-S.; Son, J. S.; Ahn, C. W.; Jo, W., “Lead-free piezoceramics – Where to move on?”, *J. Materiomics* 2016, 2 (1), 1–24.
- [23] Wang, H.; Li, Y.; Hui, H.; Rong, T., “Analysis of electromechanical characteristics of the 1-3-2 piezoelectric composite and 1-3-2 modified structural material”, *Ceram. Int.* 2022, 48, 22323–22334.

ÖZGEÇMİŞ

Evrin SANCAK, 2013 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2014 yılında, çift anadal programı kapsamında Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden de mezun olarak iki ayrı lisans diploması almaya hak kazanmıştır.

Lisans eğitimi sonrasında özel sektörde çeşitli firmalarda mühendislik alanında çalışmaya devam etmiş ve halen özel sektörde profesyonel kariyerini sürdürmektedir. 2013 yılında başlamış olduğu yüksek lisans eğitimine kişisel sebeplerle ara vermek durumunda kalmıştır. Ancak, Yükseköğretim Kurulu'nun 5 Temmuz 2022 tarihli Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren ve kamuoyunda “öğrenci affı” olarak bilinen 7417 sayılı Kanun kapsamında yüksek lisans eğitimine yeniden başlamış ve bu tez çalışması ile yüksek lisans eğitimini başarıyla tamamlamıştır.