

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

**SİLİNDİRİK KABUK FORMUNDA PİEZOELEKTRİK SERAMİK  
DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN ASILTI DÖKÜMLE ÜRETİMİ,  
KARAKTERİZASYONU VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
ANALİZİ**

**MUHAMMET BOZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ**

**GEBZE**

**2021**

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

**SİLİNDİRİK KABUK FORMUNDA**  
**PIEZOELEKTRİK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN**  
**ASILTI DÖKÜMLE ÜRETİMİ,**  
**KARAKTERİZASYONU VE SONLU**  
**ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

**MUHAMMET BOZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ**

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

**GEBZE**

**2021**

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

**FABRICATION AND CHARACTERISATION  
OF PIEZOELECTRIC CERAMIC  
TRANSDUCERS WITH CYLINDRICAL  
SHELL FORM USING SLIP CASTING  
METHOD AND THEIR ANALYSIS BY  
FINITE ELEMENTS METHOD**

**MUHAMMET BOZ**

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. SEDAT ALKOY

**GEBZE**

**2021**



## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ .....Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından ...../...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan .....'ın tez çalışması .....Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

### ONAY

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

## ÖZET

Tez çalışması kapsamında silindirik formda dönüştürücülerin tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Parça geometrisinin rezonans frekansı üzerinde etkisi incelenmiş, ayrıca 70 kHz frekansta çalışan, halihazırda uygulaması olan su altı dönüştürücü uygulamalarına alternatif bir tasarım ortaya konmuştur. ATILA sonlu elemanlar analiz programı ile ön tasarımları yapılmış ve sonuçları hesaplanmıştır. Asıltı döküm yöntemi ile, PZT-4 piezoseramik tozu kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Öncelikle kararlı bir asıltı reçetesi ortaya koymak için toz ve dağıtıcı miktarının viskozite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra sedimentasyon testleri ile uygun toz ve dağıtıcı oranları belirlenmiştir. Zeta potansiyel ölçümü yapılarak asıltının kararlı olması için uygun pH değeri belirlenmiştir. Yapılan asıltı stabilizasyon çalışmaları neticesinde belirlenen reçeteye uygun olarak asıltı hazırlanıp dökümler gerçekleştirilmiştir. Dökümleri tamamlanan ham seramikler kurutulduktan sonra 1260°C'de 4 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerden SEM görüntüleri alınıp mikroyapıları incelenerek yeterince yoğunlaştığı görülmüştür. Numunelerin kenarlarını düzeltmek ve uygun boyutlara getirmek için zımparalama yapılmıştır. 29,4 mm çapa, 15mm, 19 mm ve 23 mm yüksekliklere sahip iki tarafı açık silindirler; 10 mm çapa ve 22 mm yüksekliğe sahip bir tarafı kapalı silindir olmak üzere 4 farklı geometride numune hazırlanmıştır. Ardından iç ve dış yüzeyleri gümüş elektrot kaplanarak 600°C'de 30 dakika süreyle gümüş pişirme işlemi yapılmıştır. İç ve dış elektrotlarına kablo bağlantıları yapıldıktan sonra 22 kV/cm elektrik alan altında radyal olarak kutuplanan numuneler, 24 saat süreyle bekletilip frekansa bağlı admitans ölçümleri alınmış, rezonans frekansları ve titreşim modları belirlenmiştir. Bir tarafı kapalı olarak üretilen silindirik numunelerden tekli ve yedili dizin halinde poliüretan kaplamaları yapılmış ve su altında ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik, silindirik, dönüştürücü, kurşun zirkonat titanat (PZT), asıltı döküm, sonlu eleman analizi.**

## SUMMARY

The design, production and characterization of cylindrical form transducers were carried out within the scope of the thesis study. The effect of the part geometry on the resonance frequency has been investigated, and an alternative design to the underwater transducer applications currently operating at a frequency of 70 kHz has been presented. Preliminary designs were made with ATILA finite element analysis program and the results were calculated. Production was carried out by using PZT-4 piezoceramic powder with the slip casting method. First of all, the effect of powder and dispersant amount on viscosity was investigated to produce a stable slip formula. Then, appropriate powder and dispersant ratios were determined by sedimentation tests. By measuring the zeta potential, the appropriate pH value was determined for the slip to be stable. As a result of the slip stabilization studies, the slip was prepared and castings were made in accordance with the formula determined. After casting and drying, the green ceramics were sintered at 1260°C for 4 hours. SEM images of the sintered samples were taken and their microstructures were examined, and it was observed that it has densified enough. The specimens are sanded to smooth their edges and bring them to proper size. Cylinders fabricated in 4 different geometries: One of them is closed by one side and has 10 mm diameter and 22 mm height. Three of them opened by both sides and each of them has 29,4 mm diameter and 15 mm, 19, mm, 23 mm heights. Then, the inner and outer surfaces were coated with silver electrodes and silver firing was carried out for 30 minutes at 600°C. After the cable connections were made to the inner and outer electrodes, the samples that were radially polarized under an electric field of 22 kV/cm were kept for 24 hours and frequency dependent admittance measurements were taken, and their resonance frequencies and vibration modes were determined. Single and seven element arrays by one side closed cylindrical samples were coated with polyurethane their performance was demonstrated by taking measurements under water.

**Key Words: Piezoelectric, cylindrical, transducer, lead zirconate titanate (PZT), slip casting, finite element analysis.**

## TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasında en büyük desteği veren saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Sedat Alkoy'a verdiği destek ve her türlü soru ve sorunumda sunduğu kapsayıcı anlatımı ve zmleri için teşekkür ediyorum. Ayrıca gerek laboratuvarda gerek derslerde bilimsel ve kişisel anlamda motive edici katkıları için Prof. Dr. Ebru Menşur Alkoy'a teşekkür ediyorum. Laboratuvar çalışmalarında her türlü desteği veren, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Dr. Öğr. y. Mustafa Yunus Kaya'ya teşekkür ediyorum.

Varlıklarıyla bu dünyadaki en büyük destekçilerim olan Anneme, Babama ve Abilerime bu günlere kadar gelmemde olan destekleri için teşekkür ediyorum.

Özellikle tezin yazım sürecinde yaşadığım zorluklarda beni motive eden, destekleyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Beni bu günlere eriştiren, umduğum şeyleri ummadığım yollarla bana nasip eden Allah'ıma sonsuz şkrlerle...

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	.xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ	.4
2.1. Piezoelektrik Özellik	4
2.2. Piezoelektrik Malzemeler	6
2.3. Piezoelektrik Dönüştürücüler	9
2.3.1. Tonpiliz Dönüştürücüler	10
2.3.2. Esnek Gerilmeli Dönüştürücüler	11
2.3.3. Bar, Disk, Küre ve Silindir Şeklindeki Dönüştürücüler	12
2.4. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi	13
2.5. Seramiklerin Üretilmesi	14
2.5.1. Asıltı Döküm Yöntemi	15
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	.19
3.1. Malzeme ve Yöntem	19
3.1.1. Asıltının Hazırlanması	19
3.1.2. Viskozite Ölçümü	21
3.1.3. Zeta Potansiyel Ölçümü	21
3.1.4. Sedimentasyon Ölçümü	21
3.1.5. Asıltı Döküm	22
3.1.6. Sinterleme	23
3.1.7. Elektrot Kaplama ve Kutuplama	23
3.1.8. Elektriksel Karakterizasyon	24
3.1.9. Poliüretan Kaplama	24

3.1.10. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme	25
3.1.11. Su Altı Akustik Ölçümleri	27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
4.1. Viskozite Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	28
4.2. Zeta Potansiyel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	30
4.3. Sedimentasyon Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	30
4.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntülerinin Değerlendirilmesi	33
4.5. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	35
4.6. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	39
4.7. Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	43
5. GENEL SONUÇLAR	45
KAYNAKÇA	46
ÖZGEÇMİŞ	48

# SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
$\epsilon_0$	: Vakumun geçirgenliği
$d_{33}$	: Piezoelektrik yük katsayısı
FEA	: Sonlu elemanlar analizi
FFS	: Serbest alan hassasiyeti
Hz	: Hertz
k	: Kilo
$k_p$	: Bağlaşma katsayısı
$K^T$	: Göreceli dielektrik sabit
M	: Mega
Pa	: Pascal
PZT	: Kurşun zirkonat titanat
s	: Saniye
$s^E$	: Esneklik
SONAR	: SOund Navigation And Ranging
TVR	: Voltaj iletici cevabı

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Düz ve ters piezoelektrik etkilerin şematik gösterimi.	4
2.2: Piezoelektrik dönüştürücülerin frekansa bağlı kullanım alanları.	5
2.3: (a)'da gösterilen x,y ve z eksenleri (b)'de sırasıyla 1,2 ve 3 olarak, bu eksenler etrafındaki kayma yönleri de 4,5 ve 6 olarak numaralandırılmıştır.	6
2.4: Perovskit kristal yapının şematik görünümü.	7
2.5: Kutuplama öncesi (a) ve kutuplama sonrası (b) elektrik alan etkisi ile domain yönlenmesi.	7
2.6: (a) PZT faz diyagramı ve (b) morfortropik faz sınırındaki (MPB) özellik değişimini gösteren grafik.	8
2.7: Tonpiliz dönüştürücünün ve bileşenlerinin şematik görünümü.	10
2.8: Temizleyici uygulamalar için geliştirilmiş bir tonpiliz dönüştürücü (Honda Electronics, Japan).	11
2.9: (a) moonie ve (b) cymbal tipi dönüştürücülerin kesit görüntüleri ve (c) cymbal dönüştürücünün 3 boyutlu görünümü.	11
2.10: Cymbal dönüştürücülerle hazırlanmış bir dizin.	12
2.11: İçi boş ince kabuk şeklinde üretilen silindirik ve küre şeklindeki seramiklerin farklı titreşim modları.	13
2.12: (a) Cymbal dönüştürücü tasarımı için hazırlanmış bir (b) sonlu eleman ağı yapısı.	14
2.13: Yaygın olarak kullanılan seramik üretim yöntemleri.	15
2.14: Asıltı döküm işleminin aşamaları.	16
2.15: Döküm işleminden sonra seramik gövdenin şematik mikroyapısı. (a) ıslak gövde, (b) kısmen kuru gövde, (c) tamamen kurumuş gövde.	16
2.16: Tipik bir zeta potansiyel grafiği.	18
3.1: Deneysel çalışma aşamalarının akış şeması.	20
3.2: SA kodlu numunelerin üretimi için hazırlanan alçı kalıp ve kapak.	22
3.3: SK-22 kodlu numune için hazırlanan alçı kalıp.	22
3.4: Sinterleme sonrası numunenin görüntüsü ve ölçüleri.	23
3.5: Elektrot kaplamaları ve kablo bağlantıları yapılan numuneler.	24
3.6: Yedili dizin için poliüretan kaplama aşamaları.	25

3.7:	SA-19 numunesinin 2 boyutlu modellenmesi.	25
3.8:	SA-19 numunesinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin su altı modellenmesi.	26
3.9:	SK-22 numunesinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin su altı modellenmesi.	26
3.10:	(a) SA-19 ve (b) SK-22 numunelerinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin kesit görüntüsü.	27
4.1:	Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıtların kesme oranına göre viskozite davranışı.	28
4.2:	Hacimce %32,5 katı içeren asıtların farklı kesme oranlarında dağıtıcı miktarına göre viskozite davranışı.	29
4.3:	Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıtların viskozitelerinin kesme oranına göre değişimi.	29
4.4:	Hazırlanan stok asıtlardan alınan pH değerine bağlı zeta potansiyel ölçüm sonuçları.	30
4.5:	Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıtların sedimentasyon davranışları.	31
4.6:	Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı içeren ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıtların sedimentasyon test sonuçları.	32
4.7:	Asıtların pH'ına bağlı sedimentasyon ölçüm sonuçları.	33
4.8:	Kırık yüzeyinden alınmış, farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri.	34
4.9:	Kırık yüzeyde parlatma ve ardından termal dağıtım yapıldıktan sonra alınmış SEM görüntüleri.	34
4.10:	SK-22 kodlu numunenin modelleme sonuçları.	35
4.11:	SK-22 kodlu numunenin uzunluk ve radyal titreşim modlarında meydana gelen deplasman şematikleri	36
4.12:	SK-22 kodlu numunenin poliüretan kaplama sonrası su altı modelleme sonuçları.	36
4.13:	SK-22 kodlu numunenin sonlu elemanlar analizi ile yapılan su altı modellenmesinin TVR ve FFS grafiği.	37
4.14:	SK-22 kodlu numunenin sonlu elemanlar analizi ile yapılan su altı modellenmesinde (a) 52 kHz ve (b) 147 kHz'de maksimum TVR değerlerindeki yönelim endeksleri.	37

4.15: SA-19 kodlu numunenin modelleme sonuçları.	38
4.16: SA-19 kodlu numunenin radyal ve uzunluk titreşim modlarında meydana gelen deplasman şematikleri.	38
4.17: SA-19 kodlu numunenin poliüretan kaplama sonrası su altı modelleme sonuçları.	39
4.18: SA-15 kodlu numunenin radyal (40 kHz) ve uzunluk (117 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.	40
4.19: SA-19 kodlu numunenin radyal (37 kHz) ve uzunluk (88 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.	40
4.20: SA-23 kodlu numunenin radyal (37 kHz) ve uzunluk (75 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.	41
4.21: SA-15, SA-19, SA-23 ve 19 mm'lik modelleme numunesinin frekansa bağlı admitans karşılaştırması.	41
4.22: SK-22 kodlu numunenin uzunluk (66 kHz) ve radyal (143 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.	42
4.23: SK-22 kodlu numunenin frekansa bağlı admitans ölçüm grafiğinin modelleme ile karşılaştırması.	42
4.24: Tekli olarak poliüretan kaplaması yapılan SK-22 kodlu numunenin su altı frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları.	43
4.25: Tekli olarak poliüretan kaplaması yapılan SK-22 kodlu numunenin TVR ve FFS hesaplama sonuçları.	43
4.26: Yedili olarak poliüretan kaplaması yapılan numunelerin su altı frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları.	44
4.27: Yedili olarak poliüretan kaplanan numunelerin TVR ve FFS hesaplama sonuçları.	44

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Bazı seramiklerin piezoelektrik özellikleri.	8
2.2: Yaygın kullanılan bazı piezoelektrik seramiklerin öne çıkan özellikleri ve uygulamaları.	9
4.1: Hazırlanan numunelerin titreşim modları.	39



# 1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler, keşfedildiği günden bu yana başta su altı görüntüleme sistemleri (SONAR) olmak üzere askeri ve sivil alanda birçok uygulamaya sahiptir. Günümüzde, basınç sensörü, ultrasonik temizleyici, hidrofön, ultrasonik projektör, sonograf gibi birçok aygıtta piezoelektrik seramikler kullanılmaktadır [1].

Piezoelektrik etki ilk olarak tek kristal kuvarsta gözlenmiş ve yapılan çalışmalar sonucunda birçok farklı seramik malzeme geliştirilmiştir. Kurşun zirkonat titanat (PZT) sahip olduğu üstün özellikler sebebiyle günümüzde piezoelektrik seramik üretiminde en yaygın kullanılan seramik malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır.

Piezoelektrik seramikler, su altı uygulamalarında 1 kHz ile 1 MHz aralığında kullanılmaktadır. Ancak bu frekans aralığında çalışacak tek bir seramik üretmek mümkün olmadığından, farklı frekans değerlerinde çalışacak farklı tasarımlar geliştirilmektedir. Disk, çubuk veya halka şeklinde kütleli seramikler, farklı kalınlıklarda üretildiğinde yaklaşık 100 kHz ile 1 MHz aralığında kullanılabilir. Fakat 100 kHz'in altında inmek istendiğinde kütleli seramikler uygun bir çözüm olmaktan uzaklaşmaktadır. Düşük frekanslarda çalışmak için üretilecek olan seramiklerin büyük kalınlıklarda olması gerektiğinden hem kutuplama için hem de parçanın çalıştırılması için gerekli elektriksel voltaj ihtiyacı çok yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu nedenle 100 kHz altı frekanslar için kütleli seramiklere alternatif çözümler geliştirilmektedir.

Langevin tipi dönüştürücüler veya esnek gerilmeli dönüştürücüler daha düşük frekanslarda düşük voltajda çalışan dönüştürücü ihtiyacı için geliştirilmiş tasarımlardır. Metal kütle veya kapaklarla birleştirilerek oluşturulan aygıtlar, bu tasarımlar sayesinde seramiklerin kütleli halde çalıştırıldığından daha düşük frekanslarda dalga üretebilmektedir. Ancak bu tasarımlarda da toplam aygıt boyutunun büyümesi veya uzun süreli kullanımlarda güvenilirlik sorunları gibi belli dezavantajlar bulunmaktadır [2].

## 1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, düşük frekanslarda, düşük voltajla çalışacak yekpare silindirik piezoelektrik seramikler üretilmiştir. Farklı çap ve uzunluklarda üretilen silindirik seramiklerin geometrilerine bağlı olarak oluşan rezonans frekansları incelenmiş, titreşim modları belirlenmiş ve ayrıca bir ucu kapalı olarak üretilen seramikler tekli ve çoklu dizin halinde poliüretan kaplanarak su altı ölçümleri alınmıştır.

Çalışmada silindirik formdaki dönüştürücülerde parça boyutunun dönüştürücünün rezonans frekansı üzerindeki etkileri araştırılmış ve su altında, 50-100 kHz frekansta insansız su altı araçlarında akustik başlık veya dalgıç tespit sonarı gibi uygulamalarda çalışacak bir dönüştürücünün geliştirilmesi ve prototip olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Dönüştürücüler üretilmeden önce ATILA sonlu eleman analiz programı ile tasarım çıktılarına bakılmış ve bu sonuçlara bağlı olarak malzeme tasarımı yapılmıştır. Üretim yöntemi olarak asıltı döküm yöntemi kullanılmıştır.

Benzer uygulamalar için farklı tasarımda dönüştürücüler kullanılabilir. Bu alternatiflerden birisi, halka şeklinde üretilen piezoelektrik seramiklerin üst üste dizilerek iki metal parça arasında sıkıştırılması ile oluşturulan tonpiliz tasarımıdır. Ancak 70 kHz'de çalıştırılacak bir tonpiliz üretimi için kullanılacak olan seramiklerin ve diğer parçaların boyutlarının çok küçük olması, montaj aşamasında zorluklara sebep olmaktadır. Bir diğer alternatifi ise içi dolu bir diskin kalınlık modunda çalıştırılmasıdır. Ancak bir piezoelektrik seramiğin kalınlık modunda çalıştırılması ancak 100 kHz ve üzeri frekanslarda akılcı bir tercih olmaktadır. Bir piezoelektrik seramiği 70 kHz'de kalınlık modunda çalıştırmak için uygulanması gereken voltaj çok yüksektir. Dolayısıyla bu alternatif de teoride var olsa da pratikte uygulanabilir değildir.

İçi boş silindirik kabuk formunda bir tasarımda üretilen seramikler, radyal titreşimlerle düzlemsel olarak her yönde yayılım yaparlar. Uzunluk modunda ise noktasal bir kaynak olarak simetri eksenini doğrultusunda çalışmaktadırlar. Çalışmada seramikler, 70 kHz'de uzunluk titreşim moduna sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu formda üretilen seramikler tekli olarak ve dizin halinde hazırlanmıştır. Dizin olarak hazırlanan seramikler su altında çalıştıklarında oluşturdukları dalgalar yapıcı girişim yaparak aygıt performansının artırılması amaçlanmıştır.

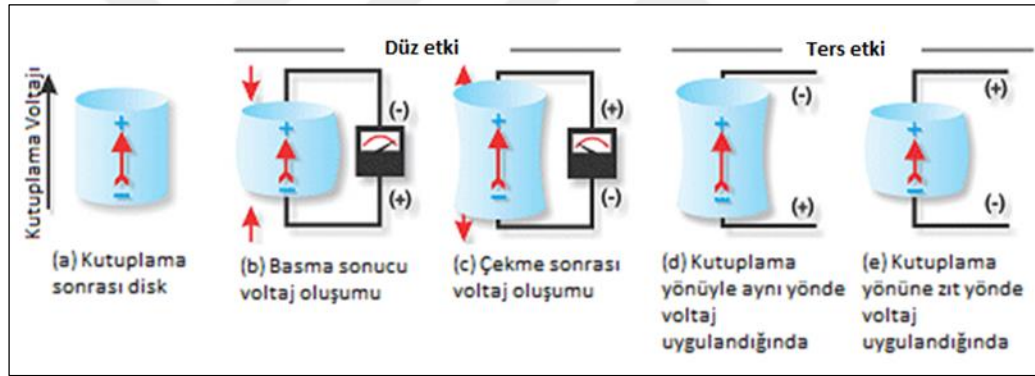
Hazırlanan tekli ve dizin halindeki seramiklerin, hava ortamı ve su altında ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur.



## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

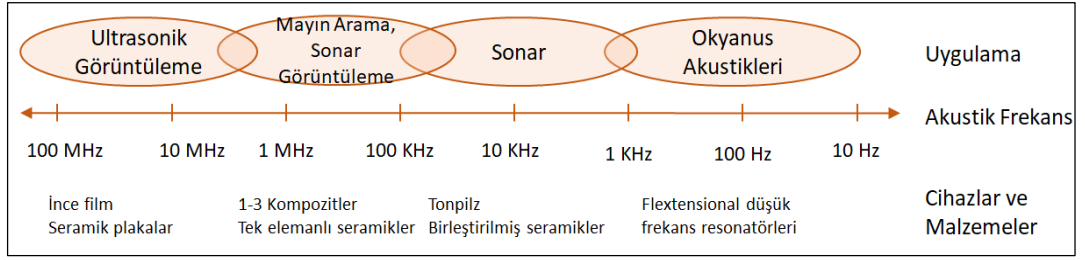
### 2.1. Piezoelektrik Özellik

Piezoelektrik özellik, ilk olarak 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşlerin bazı malzemelerin mekanik gerilme altında yüzeğinde elektrik yükleri oluşturduğunu keşfetmeleri ile ortaya çıkmıştır. Keşfedilen bu özellik düz piezoelektrik etki olarak adlandırılmıştır. Tersine, elektrik alan altında kalan bu malzemelerin mekanik gerinim oluşturmaları gerektiği de Curie kardeşler tarafından ortaya atılmıştır ve 1881 yılında Gabriel Lippmann yaptığı çalışmada bunu deneysel olarak ispatlamıştır. Böylece malzemenin elektrik alan altında mekanik gerinim oluşturmaya da ters piezoelektrik etki adı verilmiştir. Bu özellikleri gösteren malzemeler de piezoelektrik malzemeler olarak isimlendirilmiştir [3].



Şekil 2.1: Düz ve ters piezoelektrik etkilerin şematik gösterimi.

Piezoelektrik malzemelerin pratik uygulamaları, piezoelektrik özelliğin keşfedilmesinden uzunca bir süre sonra mümkün olmuştur. 1917 yılında Fransız matematik ve fizik bilim insanı Paul Langevin, su altında cisimleri tespit edebilen bir ultrasonik dönüştürücü geliştirmiştir. Çelik kütleler arasında kuvars plakalar yerleştirilerek malzemelerin tekil olarak ortaya koyduğu rezonans frekansından daha düşük rezonans frekansı olan bir aygıt elde etmiştir. Langevin'in icadından kısa bir süre sonra ilk piezoelektrik mikrofonlar, titreşim, kuvvet ve ivme ölçer cihazlar geliştirilmeye başlanmıştır [3]. Daha yakın zamanlarda ise sensör ve uyarıcı eleman olarak otomotiv, bilgisayar ve sağlık sektöründe birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır [5].



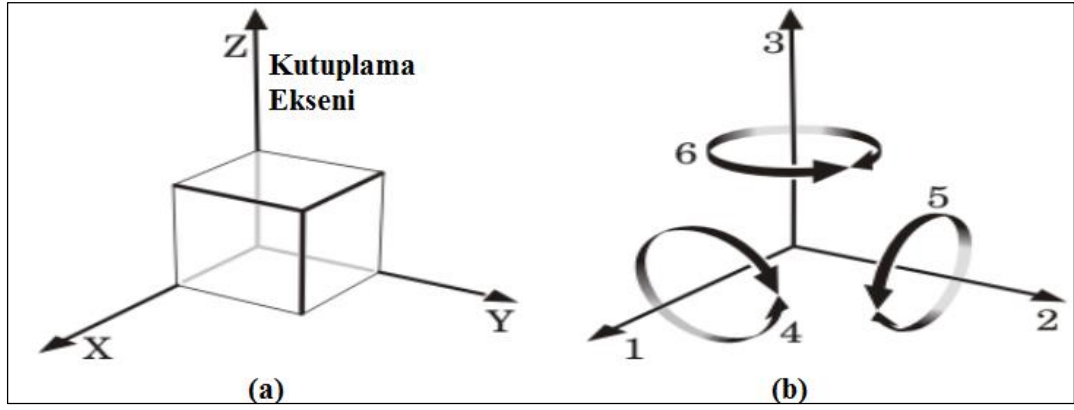
Şekil 2.2: Piezoelektrik dönüştürücülerin frekansa bağlı kullanım alanları.

Piezoelektrik seramiklerin kullanılmasında ve özelliklerinin değerlendirilmesinde ele alınan birkaç parametre vardır. Bunlar piezoelektrik yük katsayısı ( $d$ ), bağlaşma katsayısı ( $k_p$ ) ve dielektrik kayıp faktörüdür ( $\tan\delta$ ).

Piezoelektrik Yük Katsayısı ( $d$ ): Birim alana uygulanan kuvvetin ortaya çıkardığı elektrik yükünü ifade etmektedir. Birimi Coulomb/Newton'dur (C/N). Piezoelektrik yük katsayısı yöne bağlı olarak değişen bir özelliktir. Dolayısıyla kutuplama yönünün ve ölçüm alınan yönün belirtilmesi gerekmektedir.  $d_{ij}$  alt indisleri ile bu yönler ifade edilir. Birinci alt indis uygulanan kuvvetin yönünü, ikinci alt indis ise oluşan polarizasyonun yönünü ifade etmektedir. Şekil 2.3'te bu numaralandırmanın hangi esaslara göre yapıldığı gösterilmiştir. Piezoelektrik yük katsayısının formülü denklem 2.1'de verilmiştir [7].

$$d = k_p \sqrt{\epsilon_0 K^T s^E} \quad (2.1)$$

Denklemden  $d$ , piezoelektrik yük katsayısını;  $k_p$ , bağlaşma katsayısını;  $\epsilon_0$ , vakum geçirgenliğini;  $K^T$ , göreceli dielektrik sabiti;  $s^E$ , esnekliği ifade etmektedir.



Şekil 2.3: (a)'da gösterilen x,y ve z eksenleri (b)'de sırasıyla 1,2 ve 3 olarak, bu eksenler etrafındaki kayma yönleri de 4,5 ve 6 olarak numaralandırılmıştır.

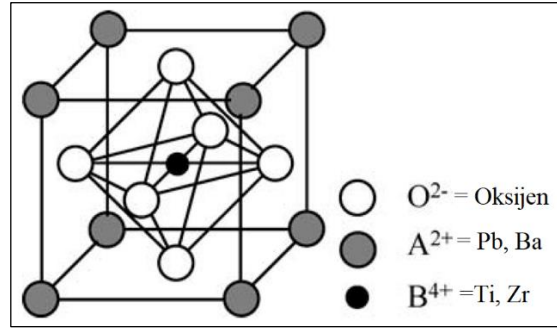
Bağlaşma Katsayısı ( $k_p$ ): Açığa çıkan mekanik enerjinin uygulanan elektriksel enerjiye oranını ifade etmektedir. Piezoelektrik yük katsayısında olduğu gibi yöne bağlı bir özelliktir. Bu yönlendirme  $k_{ij}$  alt indisleri ile belirtilir.

Dielektrik Kayıp Faktörü ( $\tan\delta$ ): Malzemelerdeki dielektrik kayıp açısının tanjantıdır. Etkin iletkenliğin etkin duygunluğa oranıyla hesaplanır. Dielektrik kayıp yüksek ise malzeme içerisinde akım geçiyor demektir [4].

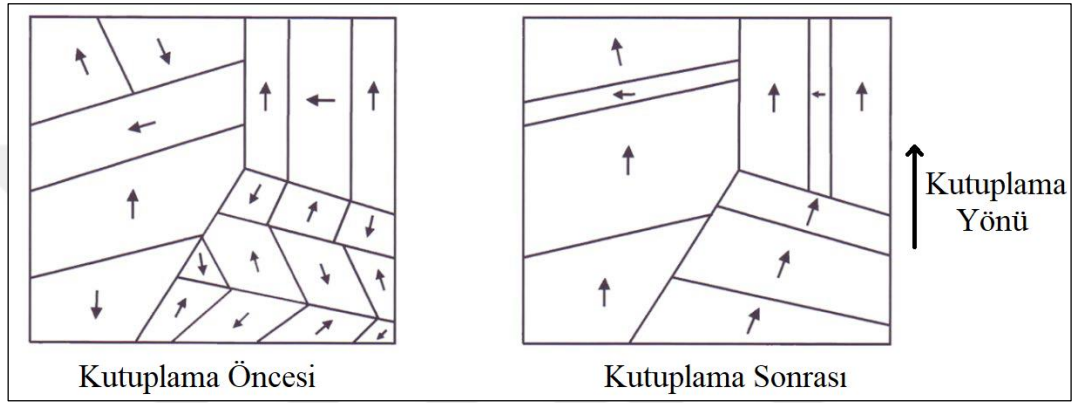
## 2.2. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik özellik ilk olarak tek kristal kuvarsta keşfedilmiştir. Uzun yıllar rochelle tuzu ile beraber piezoelektrik malzeme olarak kullanılmışlardır. Ancak tek kristal üretmenin zor bir proses olması nedeniyle yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi perovskit kristal yapıya sahip  $BaTiO_3$  (BT), 1942 yılında ABD'de ve 1944 yılında Japonya ve Rusya'da birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiştir. Ancak çok kristalli olarak üretilen BT, ilk üretildiği haliyle piezoelektrik özellik göstermemektedir. 1946 yılında R.B. Gray tarafından elektriksel kutuplama işlemi ile Şekil 2.5'te görüldüğü gibi malzeme içerisindeki domainlerin yeniden düzenlendiği ve bu sayede çok kristalli seramiklerin de piezoelektrik özellik sergileyebildiği keşfedilmiştir. Bu keşif, çok kristalli piezoelektrik seramiklerin geliştirilmesi konusunda yepyeni bir kapı açmıştır [8].



Şekil 2.4: Perovskit kristal yapının şematik görünümü.

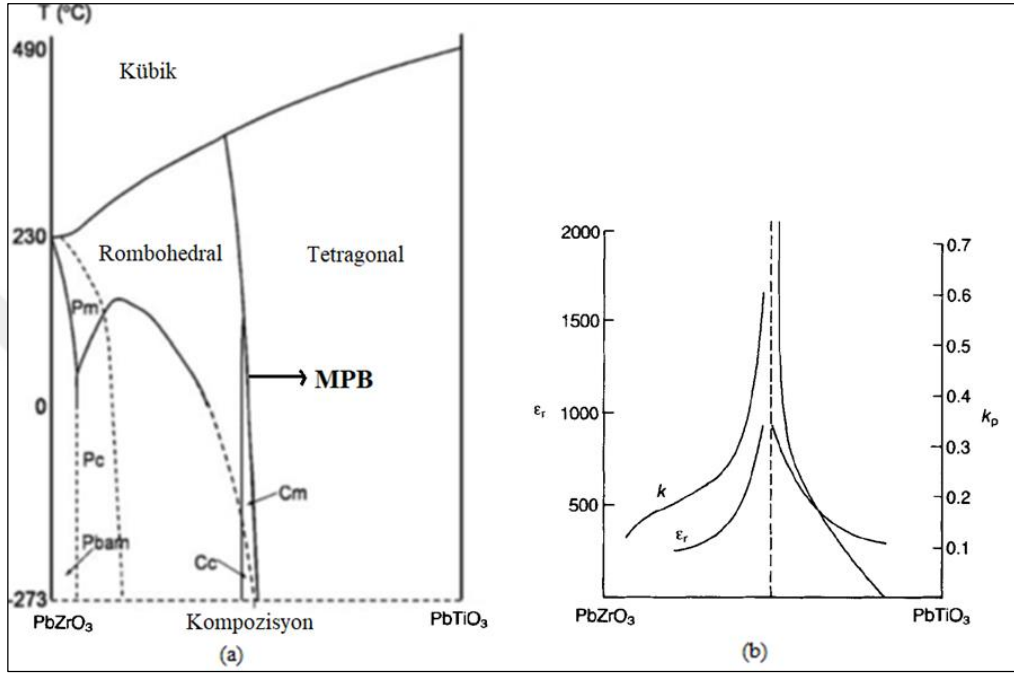


Şekil 2.5: Kutuplama öncesi (a) ve kutuplama sonrası (b) elektrik alan etkisi ile domain yönelmesi.

BT ile başlayan, çok kristalli seramiklere piezoelektrik özellik kazandırılması, bu seramiklerden dönüştürücü üretiminin önünü açan ve üzerinde ciddi sayıda çalışma yapılmasını sağlayan bir gelişme olmuştur. Ancak BT'nin (1) oda sıcaklığındaki ikincil faz dönüşümü (tetragonalden rombohedral) sebebiyle elektromekanik parametrelerdeki sıcaklık sabitinin yüksek olması ve (2) düşük Curie sıcaklığı sebebiyle yaşlanma etkisinin görülmesi bu seramik bileşimi için bir dezavantaj oluşturmaktaydı. İkincil faz dönüşümünü  $-20^{\circ}\text{C}$ 'nin altına ve Curie sıcaklığına  $120^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine çıkarmak için Pb ve Ca gibi iyon katkıları üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde yeni PZT sisteminin keşfinin yolu açılmıştır [8].

BT seramiğin geliştirilmesinde kullanılan yöntemlerin sayesinde  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{PbZrO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$  ve bunların katı çözeltileri üzerine ciddi sayıda çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Özellikle  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  (PZT) faz diyagramının tanımlanması, PZT seramiğinin geliştirilmesinde ve yaygın kullanımında önemli mesafeler katedilmesini sağlamıştır.

Şekil 2.6 (a)'da gösterilen PZT faz diyagramında morfortropik faz sınırı bölgesi piezoelektrik özellikler açısından önemli bir alanı oluşturmaktadır. Bu bölgede üretilen kompozisyonlar geniş bir sıcaklık aralığında 14 eş kutuplama yönüne sahiptir. Bu sayede, Şekil 2.6 (b)'de de gösterildiği gibi piezoelektrik özellikler bu bölgede daha yüksektir [9].



Şekil 2.6: (a) PZT faz diyagramı ve (b) morfortropik faz sınırındaki (MPB) özellik değişimini gösteren grafik.

Tablo 2.1: Bazı seramiklerin piezoelektrik özellikleri.

Seramik Bileşimi	$d_{33}$ (pC/N)	$k_{33}$	$T_c$ (°C)
BT	190	0.50	115
PZT-4	289	0.70	328
PZT-5A	374	0.705	365
PZT-8	225	0.64	300
$Pb(NbO_3)_2$	85	0.38	570
$NaK(NbO_3)_2$	127	0.605	420

PZT bileşimine yapılan katkılama işlemleri ile piezoelektrik özellikler üzerine farklı geliştirmeler yapılabilmektedir. Verici katkılar eklenerek kristal yapı içerisinde kation boşlukları oluşması, bu sayede domain yönlenmesinin geliştirilmesi ile piezoelektrik özelliklerde gelişme sağlanmaktadır. Verici katkılama işlemi ile elde edilen PZT seramiklere elektriksel yumuşak PZT (PZT-5A veya PZT-5H gibi) adı

verilmektedir. Yumuşak PZT seramikler, piezoelektrik katsayılarının, geçirgenliklerinin, elektriksel kayıpların, elektromekanik bağlaşma katsayılarının ve elektriksel dirençlerinin yüksek olması; mekanik kalite faktörlerinin ve koersif alan değerlerinin düşük olması özellikleri ile öne çıkarlar. Bununla beraber alıcı katkı elementleri ilavesi ile de kristal yapı içerisinde oksijen boşlukları oluşturularak domain duvarlarının kilitlemesi sağlanabilir. Böylece elektriksel sert PZT (PZT-4 veya PZT-8 gibi) seramik elde edilmektedir. Bunların öne çıkan özellikleri ise, düşük piezoelektrik katsayı, düşük geçirgenlik ve kayıplar, düşük elektriksel direnç ve yüksek kalite faktörü ile yüksek koersif alan değeridir. Ayrıca izovalent katkılarla da Curie sıcaklığı düşürülerek oda sıcaklığındaki geçirgenlik artırılmakta ve multivalent iyon katkıları ile de yaşlanma etkisi azaltılmaktadır [12].

Tablo 2.2: Yaygın kullanılan bazı piezoelektrik seramiklerin öne çıkan özellikleri ve uygulamaları.

Malzeme	Öne Çıkan Özellikleri	Uygulamaları
PZT-4	Yüksek sürücü özelliği, yüksek bağlaşma katsayısı	Sonar yansıtıcılar, ultrasonik dönüştürücüler, yüksek voltaj jeneratörleri
PZT-5A, PZT-5H	Yüksek geçirgenlik ve bağlaşma, düşük yaşlanma	Hidrofonlar, gramafon plakları, mikrofon ve hoparlör parçaları
PZT-8	Olağanüstü yüksek sürücü özelliği	Sonar yansıtıcılar, ultrasonik dönüştürücüler
BT	Sıcaklığa bağımlılık yüksek	Sonar yansıtıcılar, ultrasonik dönüştürücüler
Pb(NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Düşük mekanik kalite faktörü	Ultrasonik muayene cihazları
NaK(NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Düşük geçirgenlik, yüksek dalga hızı	Gecikme hattı dönüştürücüler

### 2.3. Piezoelektrik Dönüştürücüler

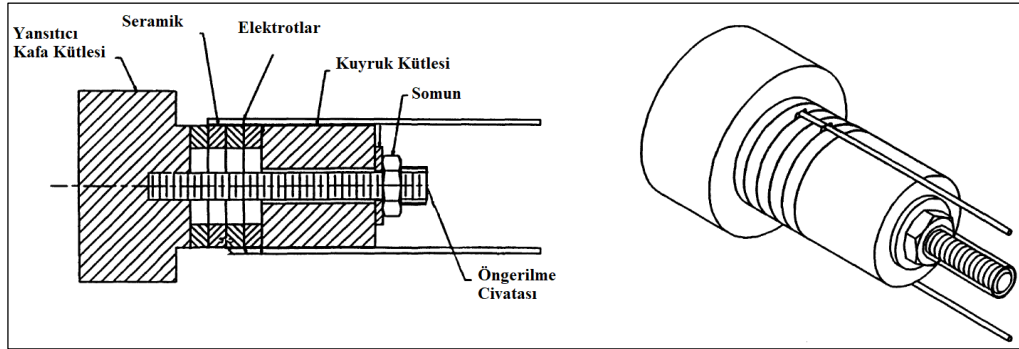
Piezoelektrik seramikler, belirli frekans aralıkları için kütleli olarak kullanılabilir. Bir piezoelektrik seramiği 100 kHz'in altındaki frekanslarda çalıştırmak için kalınlığının fazla olması gerekmektedir. Bu kalınlık PZT için 15 mm'nin üzerine kadar çıkmaktadır. Bu durumda bu kalınlıktaki bir seramiğin kutuplanması ve kutuplandıktan sonra da çalıştırılması için çok yüksek voltajlar gerekmektedir. Dolayısıyla farklı alternatifler kullanılmak durumundadır. Bu

arayışların sonucunda daha ince piezoelektrik seramik kullanarak düşük frekanslarda çalışan dönüştürücülerin üretilmesi yolu aranmıştır.

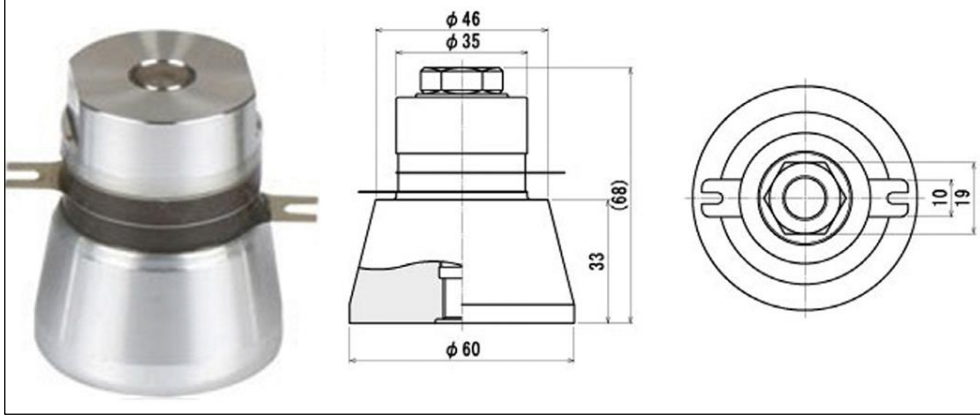
Piezoelektrik seramiklerden dönüştürücü üretimi, ilk defa su altı görüntüleme amacıyla Langevin (tonpiliz) tipi dönüştürücülerin geliştirilmesiyle başlamıştır. Günümüzde halen yaygın bir şekilde kullanılan tonpiliz dönüştürücülerin yanı sıra farklı uygulamalar için farklı tasarımlarda birçok dönüştürücü kullanılmaktadır.

### 2.3.1. Tonpiliz Dönüştürücüler

Tonpiliz dönüştürücüler, metal bir kuyruk ve kafa kütlesi arasında yerleştirilen halka şeklindeki piezoelektrik seramiklerin orta kısımdaki sıkıştırma vidası ile birbirine bağlanması ile oluşur. (bkz. Şekil 2.7) Belirli bir ön gerilme altında çalıştırılan seramiklerin oluşturdukları titreşim ile hasar almalarının önüne geçilmektedir. Kafa kütlesi yansıtıcı vazife görerek seramik bileşenlerin oluşturduğu titreşimi su ortamına aktarır. Burada aynı zamanda su ile seramik malzeme arasında akustik empedans eşleşmesini de sağlamaktadır. Dolayısıyla kafa kütlelerinin alüminyum, magnezyum gibi düşük yoğunluklu metallerden seçilmesi gerekmektedir [6].



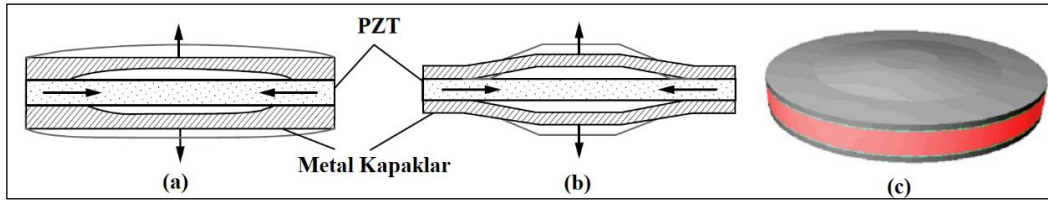
Şekil 2.7: Tonpiliz dönüştürücünün ve bileşenlerinin şematik görünümü.



Şekil 2.8: Temizleyici uygulamalar için geliştirilmiş bir tonpiz dönüştürücü (Honda Electronics, Japan).

### 2.3.2. Esnek Gerilmeli Dönüştürücüler

Esnek gerilmeli dönüştürücüler, su altı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan alternatif uygulamalardan birisidir. İki metal kapak arasına yerleştirilen piezoelektrik seramiğin titreşim hareketleri metal kapaklar tarafından yükseltilecek aygıt veriminin artırılması sağlanmaktadır. Şekil 2.9’da gösterilen moonie ve cymbal tipi dönüştürücüler esnek gerilmeli dönüştürücülere birer örnektir [8].



Şekil 2.9: (a) moonie ve (b) cymbal tipi dönüştürücülerin kesit görüntüleri ve (c) cymbal dönüştürücünün 3 boyutlu görünümü.

Küçük boyutları sebebiyle düşük deplasman değerlerine sahip olan moonie ve cymbal dönüştürücüler çoğunlukla dizin halinde kullanılmaktadırlar. Bu şekilde oluşturulan dalgaların birbiri ile yapıcı girişim oluşturarak daha büyük deplasmanlar oluşturması sağlanmaktadır. Şekil 2.10’da cymbal dönüştürücülerle hazırlanmış 9’lu bir dizinin fotoğrafı görülmektedir [8].

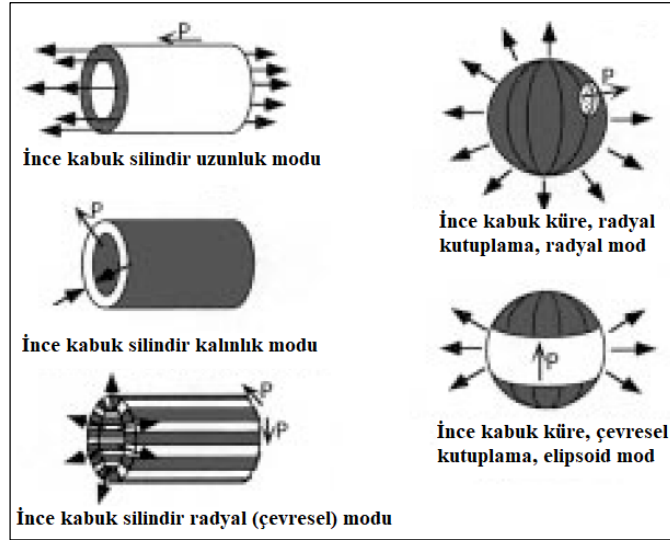


Şekil 2.10: Cymbal dönüştürücülerle hazırlanmış bir dizin.

### 2.3.3. Bar, Disk, Küre ve Silindir Şeklindeki Dönüştürücüler

Bar, disk ve silindir biçimindeki elektroakustik dönüştürücüler halihazırda uygulaması olan en basit dönüştürücü türlerindedir. Bu şekildeki dönüştürücülerin temel rezonans frekansları doğrudan boyutları ile ilişkilidir. 100 kHz üzeri frekanslarda kullanılacak olan piezoelektrik seramikler bu formlarda üretilmektedir. Ancak daha önce de bahsedildiği üzere 100 kHz'in altındaki frekanslara gidildiğinde kütleli seramiklerin çok büyük boyutlarda üretilmesi gerekmektedir. Metrelerce uzunlukta ve yüzlerce kilogram ağırlığa kadar ulaşan boyutları ile kullanılması imkansız hale gelmektedir [12].

Ancak içi boş ince kabuk şeklinde üretilen küresel veya silindirik seramikler, farklı titreşim modları ile düşük frekanslarda da kullanılabilir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi farklı yönlerde kutuplanarak farklı titreşim modları elde edilen ince kabuk seramikler makro mühendislik yaklaşımı ile rezonans frekansı üzerinde oynamalar yapılabilir [12].

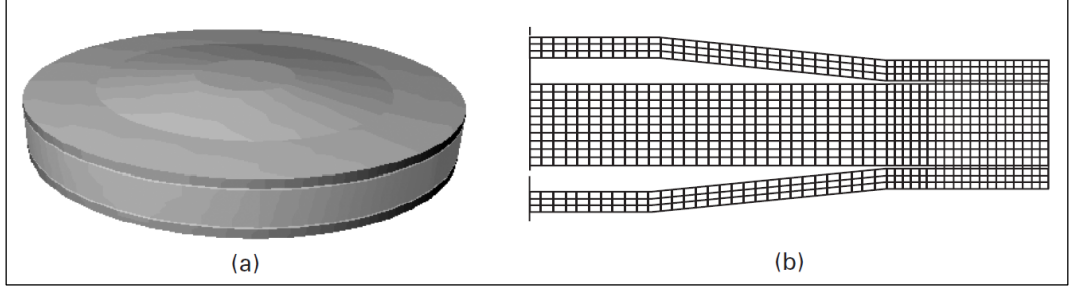


Şekil 2.11: İçi boş ince kabuk şeklinde üretilen silindirik ve küre şeklindeki seramiklerin farklı titreşim modları.

## 2.4. Sonlu Eleman Analiz Yöntemi

Sonlu eleman analiz yöntemi, üretimi yapılacak olan ürünlerin tasarım çıktılarını öngörebilmek amacıyla kullanılan, matematiksel temellere dayanan bir yöntemdir. Yöntemdeki temel fikir, karmaşık olan problemleri daha küçük ve basit olan parçalara ayırarak çözmektir. Bu basitleştirme işlemi neticesinde kesin sonuç elde edilemese de bir yaklaşım yapılmış ve gerçek üretimle yapılacak olan deneme-yanılma maliyetlerinin azaltılmasına ciddi katkı sağlanmış olur. Ayrıca sadece yapısal mekanik uygulamalarında değil ısı iletimi, akışkan dinamikleri, elektrik ve manyetik alan etkileri gibi birçok mühendislik problemlerinde çözüm ortaya koyulmaktadır [14].

Sonlu eleman analiz yönteminde, çözüm bölgesi sonlu sayıda alt bölgelere ayrılmıştır. Malzeme özellikleri ve sınır koşulları her bir alt bölgeye tanımlanmıştır. Bu bölgeler de noktalarla birbirine bağlanarak problem ağını oluşturmaktadır. Hesaplama yapılırken hem bu alt bölgelerin davranışları hem de birbiri ile etkileşimi göz önüne alınmaktadır. Şekil 2.12 (b)'de cymbal dönüştürücü için hazırlanmış bir modelin ağ yapısı görülmektedir [15].

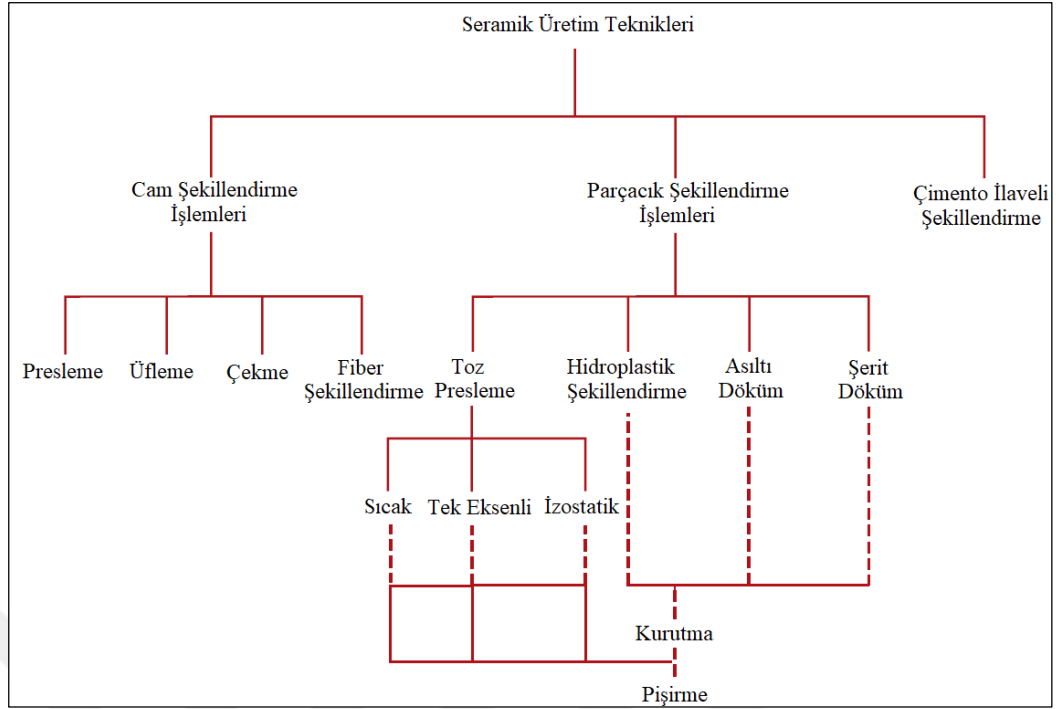


Şekil 2.12: (a) Cymbal dönüştürücü tasarımı için hazırlanmış bir (b) sonlu eleman ağı yapısı.

## 2.5. Seramiklerin Üretilmesi

Seramik malzemelerin uygulamasında dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan birisi de üretim yöntemleridir. Metallerle kıyaslandığında hem ergime sıcaklıkları hem de mekanik özellikleri sebebiyle döküm veya plastik şekillendirme yöntemleri ile üretilmesi mümkün değildir. Bu nedenle seramik malzemeler başlangıç hammaddesi toz olan ve belirli yöntemler suretiyle şekillendirildikten sonra pişirilerek yoğun hale getirilen bir proses sonucu üretirler. Şekil 2.13'te seramik malzemelerin üretim yöntemlerinden en yaygın kullanılanları sınıflandırılmıştır [5].

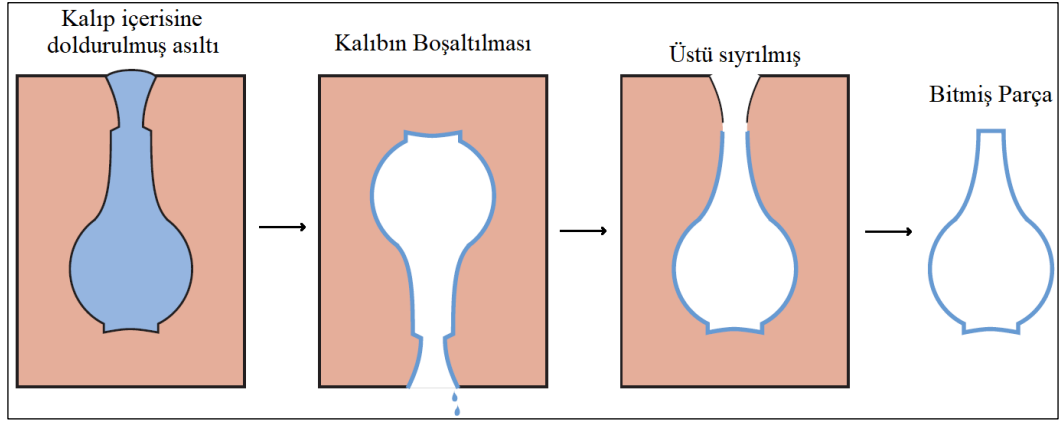
Bu tez çalışmasında içi boş, ince kabuk formunda silindirik geometride piezoelektrik seramik dönüştürücülerin geliştirilmesi ve üretilmesi hedeflendiğinden asıltı döküm en uygun yöntem olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 2.13: Yaygın olarak kullanılan seramik üretim yöntemleri.

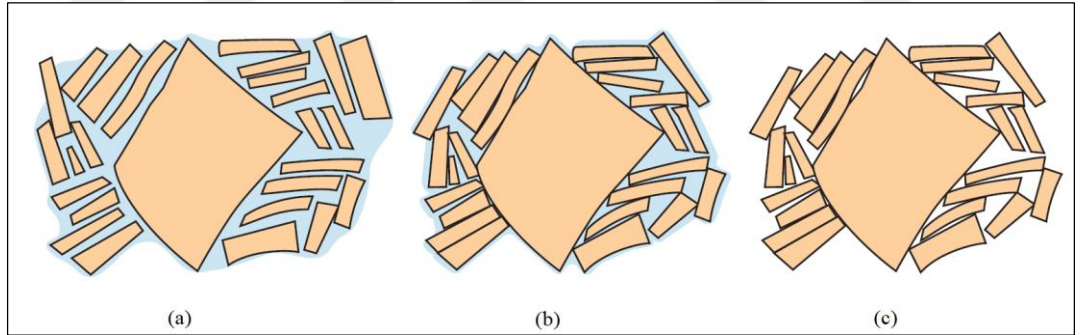
### 2.5.1. Asıltı Döküm Yöntemi

Asıltı döküm yöntemi yüzyıllardır geleneksel seramik ve teknik seramiklerin üretiminde kullanılan, kolay ve ekonomik oluşuyla tercih sebebi olan bir seramik üretim yöntemidir. Asıltı, kil veya plastik olmayan diğer malzemelerin içerisinde bulunduğu sulu bir süspansiyondur. Uygun şekil verilmiş gözenekli bir kalıba (çoğunlukla paris alçısı) dökülen asıltı içerisindeki su, kalıp tarafından emilerek kalıp duvarında katı faz birikimini sağlar. Böylece kalıp içerisi tamamen katılaşıncaya kadar bekleyerek içi dolu bir parça veya istenen kalınlığa ulaşıldığında içerideki asıltı boşaltılarak içi boş bir parça üretilmesi mümkündür. Döküm parçası kuruyunca hacimsel çekme sonucu kalıptan ayrılmaktadır. Böylece alçı kalıp içerisinden kolayca çıkarılabilmektedir [16].



Şekil 2.14: Asıltı döküm işleminin aşamaları.

Kalıptan çıkarılan parça kuruduktan sonra herhangi bir uygulama için yeterli mukavemete sahip değildir. Ayrıca parça içerisinde gözenek yoğunluğu da çok yüksek seviyededir. Şekil 2.15'te döküm sonrasındaki seramik gövdenin şematik mikroyapısı gösterilmiştir. Bu mukavemetsiz ve gözenekli yapı sebebiyle asıltı döküm ile üretilen seramiklerin yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi ile yoğunlaştırılması gerekmektedir [5].



Şekil 2.15: Döküm işleminden sonra seramik gövdenin şematik mikroyapısı. (a) ıslak gövde, (b) kısmen kuru gövde, (c) tamamen kurumuş gövde.

İyi bir asıltıdan beklenen özellikler şu şekildedir:

- Viskozite: Asıltı döküm ile şekillendirme işlemlerinde asıltının yüksek oranda katı (seramik tozu) içermesi ve viskozitesinin  $<1$  Pa.s değerinde olması tercih edilmektedir [17]. Asıltı kolayca kalıba dökülebilmeli ve kalıbın tüm detaylarını iyice doldurmalıdır. Herhangi bir gözenek veya hava hapsolmuş bölgenin kalmaması için asıltı viskozitesinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca döküm

tamamlandıktan sonra fazla asıltının boşaltılması esnasında parçanın kenar ve köşe kısımlarındaki keskinliğin ortaya çıkması için de düşük viskoziteli asıltı önemlidir.

- Çökelme oranı: Asıltı döküm işleminde parçanın kalınlık alması belirli bir zaman gerektirmektedir. Hedeflenen duvar kalınlığına, alçı kalıbın gözenek ve kuruluk durumuna ve asıltının reolojik karakteristiklerine bağlı olarak bu süre 60 dakikaya kadar ulaşmaktadır. Her süspansiyonda zamana bağlı olarak katı parçacıkların çökmesi kaçınılmazdır. Ancak dökümü yapılacak olan asıltının en azından döküm süresince kararlılığını koruması gerekmektedir. Aksi takdirde parçanın alt kısımlarına doğru kademeli bir kalınlık artışı oluşacaktır.
- Döküm sonrası yaş mukavemet: Döküm tamamlanıp kalıp içerisindeki parça kurutulduktan sonra pişirilene kadar kendini taşıyacak bir yaş mukavemete sahip olması gerekmektedir. Kalıptan çıkarılırken, fırına yerleştirilirken parçanın kırılmaması için bu gereklidir.
- Köpüklenme: Her ne kadar pişme sonrası parçada ciddi bir yoğunlaşma ve gözeneklerin yok olması söz konusu olsa da asıltının köpüksüz olması daha yoğun parçaların üretilmesi için önemlidir. Köpüklenmiş bir asıltı ile yapılan dökümde üretilen parça içerisinde gözenek miktarı ciddi miktarda artacaktır [18].

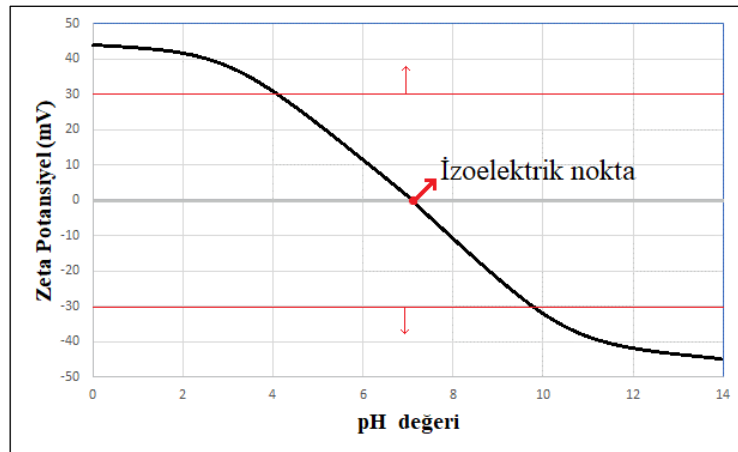
Tüm bu özelliklerin sağlanması için asıltı içerisine ilave edilen birtakım katkılar bulunmaktadır. Bunlar dağıtıcılar, plastikleştiriciler (bağlayıcı) ve köpük gidericiler olarak bilinmektedir.

Dağıtıcı olarak, asıltı içerisindeki parçacıkların yüzeylerine tutunarak parçacıklar arasında bir itme kuvveti etkisi oluşturan monovalent katyonlar ve küçük organik moleküller kullanılmaktadır. Ticari olarak kullanılan birçok dağıtıcı ajan bulunmaktadır. Darvan No.7 sodyum ve potasyum katyonları içeren, Darvan 821-A ve Darvan C ise amonyum poliakrilat içeren R.T Vanderbilt Co.'nun ürettiği yaygın olarak kullanılan dağıtıcı katkılardır. Ayrıca sodyum silikat, sodyum karbonat, amonyum tartarat ve sodyum oksalat gibi birçok kimyasal da dağıtıcı katkı elemanı olarak kullanılabilir [18].

Bağlayıcı katkıları ise asıltı dökümü sonrası parçanın ham mukavemetinin yüksek olması için kullanılan katkılarıdır. Seçilen bağlayıcının alçı kalıbın gözeneklerini tıkamamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Pişme sırasında yanarak yapıyı terk eden bağlayıcının çatlamaya veya kırılmaya sebep olmaması için miktarının çok fazla olmaması, yanmanın yavaşça gerçekleşmesi için de ısıtma hızının çok yüksek olmaması gerekmektedir. Asıltı döküm yönteminde gliserol, polivinil alkol, üre formaldehit reçine, karboksimetil selüloz, etil silikat gibi birçok bileşik bağlayıcı olarak kullanılmaktadır [18].

Bazı asıltılar köpüklenmeye yatkındır ve oktil alkol ilavesi ile bunun önüne geçilebilmektedir. Nopco Chemical Co.'nun Dow Corning Antifoam A gibi ticari köpük giderici katkıları da bulunmaktadır. Bunların fazla ilavesi ile daha kötü köpüklenme ortaya çıkabildiğinden kullanılan miktar konusunda dikkat edilmesi gerekmektedir [18].

Kararlı bir asıltının elde edilmesinde önemli olan bir diğer parametre ise parçacıkların zeta potansiyelidir. Zeta potansiyeli parçacıkların yüzey yük miktarını ifade eden bir değerdir. Doppler prensibi kullanılarak elektrik alan uygulanan parçacıkların hızının ölçümüne dayanır. pH değerine bağlı olarak değişen parçacık yüzey yük miktarı belirli bir değerin üzerine çıktığında oluşan itme kuvveti, parçacıkların van der Waals çekme kuvvetini yenerek net kuvvetin itme yönünde olmasını sağlamaktadır. Bu değer  $-30$  mV'un altı ve  $30$  mV'un üstüdür [19]. Şekil 2.16'da tipik bir zeta potansiyel eğrisi gösterilmiştir. Zeta potansiyel değerinin 0 olduğu noktaya izoelektrik nokta adı verilmektedir. Bu noktada parçacıklar arasında zeta potansiyele bağlı bir itme veya çekme kuvveti söz konusu değildir.



Şekil 2.16: Tipik bir zeta potansiyel grafiği.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 3.1. Malzeme ve Yöntem

Deneysel çalışmalarda öncelikle kararlı asıltı elde etmek için bir takım asıltı stabilizasyon çalışması yapılmıştır. Viskozite, sedimentasyon ve zeta potansiyel ölçümleri sonucu nihai asıltı reçetesi belirlenmiş ve bu doğrultuda asıltılar hazırlanarak seramiklerin üretimi ve sonraki süreçler gerçekleştirilmiştir. Bu adımların gösterildiği deneysel akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.

#### 3.1.1. Asıltının Hazırlanması

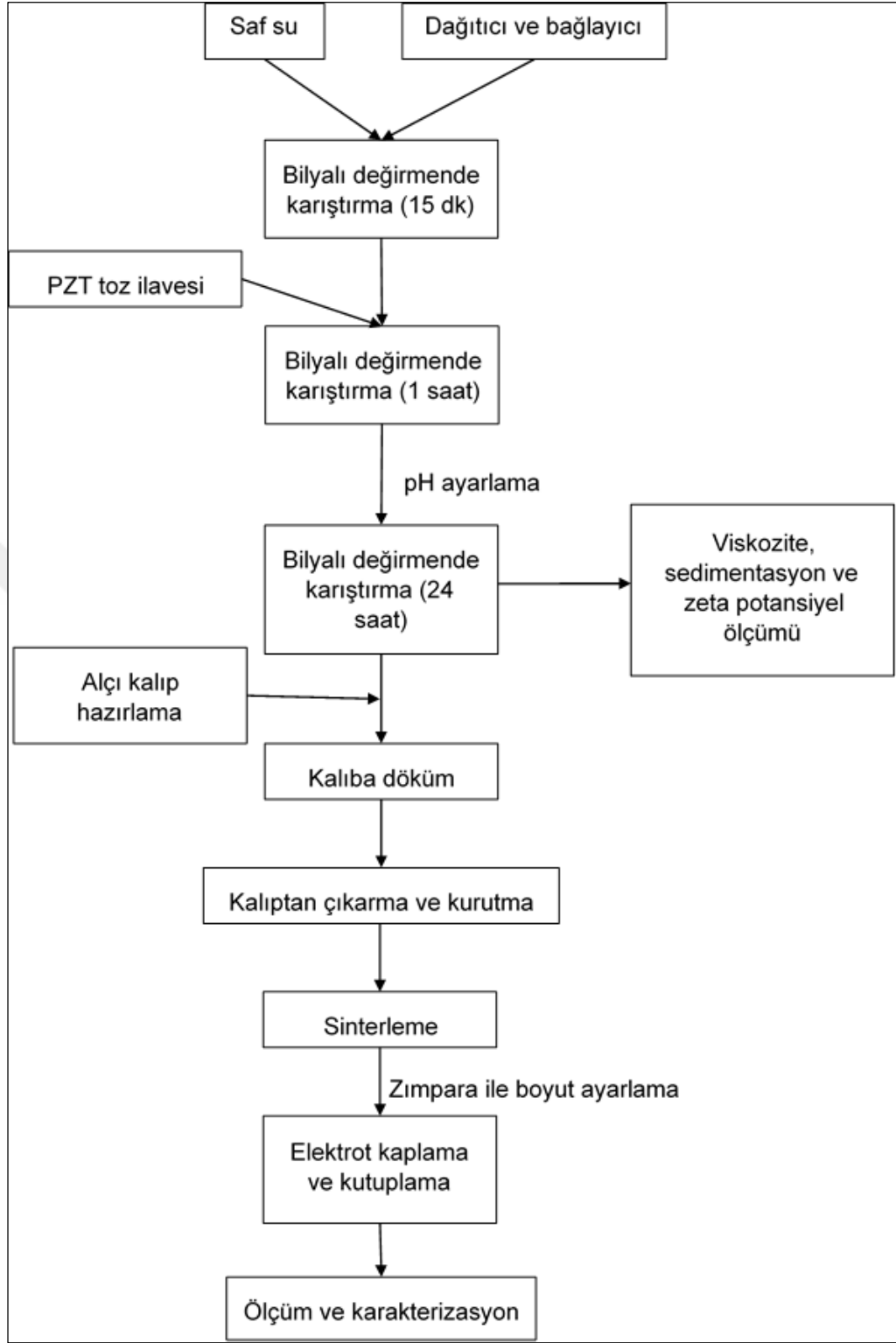
Çalışmada silindirik dönüştürücülerin üretimi asıltı döküm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Nihai asıltı reçetesine karar verilmeden önce farklı parametrelere bağlı olarak ölçümler alınmış ve değerlendirilmiştir. Bunlar; pH’a bağlı zeta potansiyel ölçümü, dağıtıcı miktarına bağlı sedimentasyon ve viskozite ölçümleri ve asıltı içerisindeki toz miktarına bağlı sedimentasyon ve viskozite ölçümleridir.

Asıltı hazırlanırken öncelikle sıvı bileşenler (saf su, gliserol ve darvan) 15 dk. bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Ardından seramik tozu sıvı faz üzerine ilave edilerek 1 saat karıştırılmış ve en son pH ayarlaması da yapıldıktan sonra 24 saat karışmaya bırakılmıştır. Karıştırma işlemlerinin tamamı bilyalı değirmende 160 rpm döndürme hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Tüm asıltı stabilizasyon çalışmaları neticesinde karar verilen asıltı reçetesi şu şekildedir:

- Toz/sıvı faz oranı hacimce %40,
- Toz miktarının ağırlıkça %2,5’i oranında dağıtıcı (Darvan 821A, Vanderbilt Chemicals, USA),
- Toz miktarının ağırlıkça %2,5’i oranında bağlayıcı (Gliserol, Merck KGaA, Germany),
- Asıltının pH’ı 10,5 olarak hazırlanacaktır.

Hazırlanan asıltılarda sert PZT olarak bilinen PZT-4 (T&Partners Praha, Czech Republic) seramik tozu kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Deneysel çalışma aşamalarının akış şeması.

### **3.1.2. Viskozite Ölçümü**

Viskozite, akışkanların akmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Döküm için hazırlanan asıltının içerisinde baloncuk tutmaması ve kalıp içerisine döküldüğünde tüm kalıp yüzeyini kusursuz bir şekilde ıslatması için düşük viskoziteye sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle asıltı döküm için hazırlanan süspansiyonlarda viskozite ölçümü önem arz etmektedir.

Yapılan çalışmalarda asıltı içerisindeki toz miktarına ve dağıtıcı oranına bağlı olarak viskozite ölçümleri alınmıştır. Numunelerin viskozite ölçümleri Brookfield RVT viskozimetre cihazının 21 numaralı spindel aparatı kullanılarak yapılmıştır.

Bu değişkenlere bağlı viskozite değerleri Sonuçlar bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

### **3.1.3. Zeta Potansiyel Ölçümü**

Asıltının kararlılığının pH'a bağlı olan değişimini gözlemlemek amacıyla zeta potansiyel ölçümü yapılmıştır. Ölçümler Zetasizer Nano-ZS & Zeta potansiyel ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Hacimce %32,5 toz/sıvı faz oranı ve toz ağırlığının %2'si kadar bağlayıcı ve dağıtıcı içeren asıltı ile ölçüm alınmıştır. Elde edilen sonuçların grafiği Sonuçlar bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

### **3.1.4. Sedimentasyon Ölçümü**

Asıltıyı kararlı hale getirmek için her ne kadar önlem alınsa da zamana bağlı olarak katı partiküllerin çökmesi kaçınılmazdır. Katı partiküllerin zaman bağlı olarak çökmesine sedimentasyon adı verilmektedir. Belirli aralıklarla kontrol edilen asıltının çökme seviyeleri takip edilerek asıltının kararlılığı hakkında fikir vermesi açısından bu ölçüm önemlidir.

Yapılan çalışmalarda asıltıdaki toz oranına, dağıtıcı miktarına ve pH'a bağlı olarak gerçekleşen çökelmelerin hızları takip edilmiştir. Buna bağlı olarak hangi oranlarda oluşturulan asıltının daha kararlı olduğu konusunda öngörü sağlanmıştır. Ölçümler, deney tüpleri içerisinde 50 mm seviyesine kadar asıltı doldurulup belirli aralıklarla çökme miktarı takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

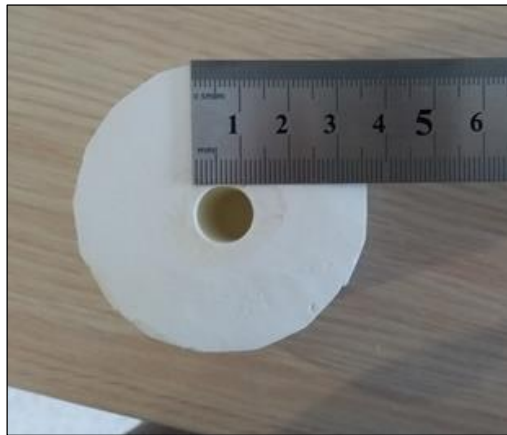
Her bir değişkene bağlı olarak elde edilen sedimentasyon grafikleri Sonuçlar bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

### 3.1.5. Asılı Döküm

İki farklı silindir tasarımı için iki ayrı formda kalıp üretilmiştir. Kalıplardan ilki iki tarafı da açık olan silindir için Şekil 3.2’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Kalıp lleri 34 mm çap ve 30 mm yükseklik şeklinindedir. Ayrıca bir tarafını kapatmak için cam plaka üzerine silikon dökülerek kapak hazırlanmıştır. Bir tarafı kapalı olarak üretilen seramiklerin kalıbı ise 12 mm çapa ve 27 mm yüksekliğe sahiptir. Kalıbın görünümü Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2: SA kodlu numunelerin üretimini için hazırlanan alçı kalıp ve kapak.

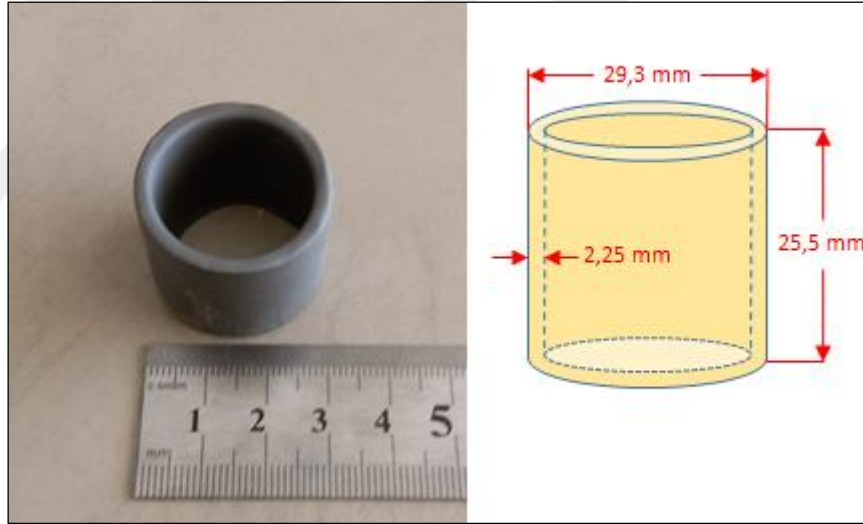


Şekil 3.3: SK-22 kodlu numune için hazırlanan alçı kalıp.

### 3.1.6. Sinterleme

Kalıptan çıkarıldıktan sonra 24 saat kurumaya bırakılan seramik parçalar, bu sürecin ardından parçaların yoğunlaştırılması amacıyla sinterleme işlemine geçilir. Sinterleme, alumina potaların içerisinde kapalı bir şekilde gerçekleştirilir. PZT içerisindeki kurşun bileşeni, yüksek sıcaklıklarda yapıyı terk etmekte, önlem alınmazsa seramik parçalarda kurşun kaybına sebep olmaktadır. Bu sebeple hazırlanan kapalı potalar içerisinde, PZT ağırlığının %20'si miktarında kurşun oksit içeren atmosfer tozu ( $1.8\text{PbO}\cdot\text{ZrO}_2$ ) koyularak yüksek sıcaklıktayken pota içerisinde kurşunca zengin bir atmosfer oluşturulmuştur. Bu sayede PZT içerisinden kurşun kaybı önlenmiştir.

Sinterleme işlemi  $1260^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Sinterlendikten sonra fırından çıkan numunenin görüntüsü ve ölçüleri Şekil 3.4'te verilmiştir.

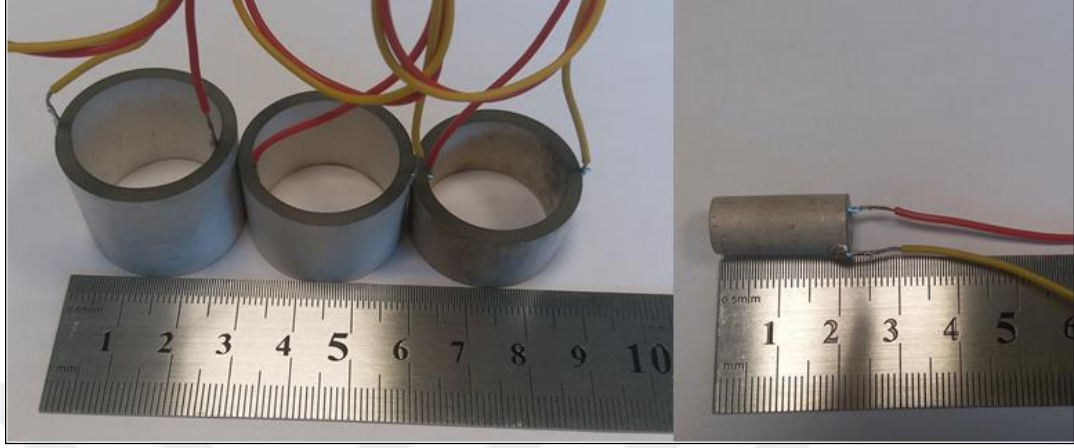


Şekil 3.4: Sinterleme sonrası numunenin görüntüsü ve ölçüleri.

### 3.1.7. Elektrot Kaplama ve Kutuplama

Sinterlendikten sonra köşelerini düzleştirme ve istenen uzunluğa getirmek için zımparalanan seramik parçaların iç ve dış yüzeylerine elektrik alan uygulamak için gümüş elektrot kaplaması yapılmıştır. Gümüş elektrotun seramik yüzeyine sağlam bir şekilde tutunması için  $600^\circ\text{C}$  'de 30 dakika süreyle pişirilmiştir.

Kutuplama işlemi, Julabo Innovative Technology marka yağ banyosunda silikon yağı içerisinde 120°C’de, 15 dakika süreyle 22 kV/cm elektrik alan altında gerçekleştirilmiştir. Elektrik alan Trek 610 Model yükseltici ile sağlanmıştır.



Şekil 3.5: Elektrot kaplamaları ve kablo bağlantıları yapılan numuneler.

### 3.1.8. Elektriksel Karakterizasyon

Kutuplandıktan sonra 24 saat bekletilen numunelerin frekansa bağlı admitans ölçümleri alınmıştır. Ölçümler, HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER cihazı ile yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde hangi titreşim modunun hangi frekansta görüldüğü belirlenmiştir.

### 3.1.9. Poliüretan Kaplama

Su altında çalıştırılacak olan dönüştürücüler, hem basınç ve darbelere karşı dayanımı artırmak hem de akustik empedansı birbirinden çok farklı olan su ile seramik parça arasında bir eşleşme malzemesi olarak poliüretan kaplaması uygulanmaktadır. Yapılan çalışmada, silindirik seramiklerden tekli ve yedili dizin halinde numuneler hazırlanarak bunların poliüretan kaplamaları yapılmıştır. Kaplaması yapılan numunelerin hem havada hem de su altında ölçümleri alınarak performansları ortaya konmuştur. Şekil 3.6’da poliüretan kaplamanın aşamaları gösterilmektedir.

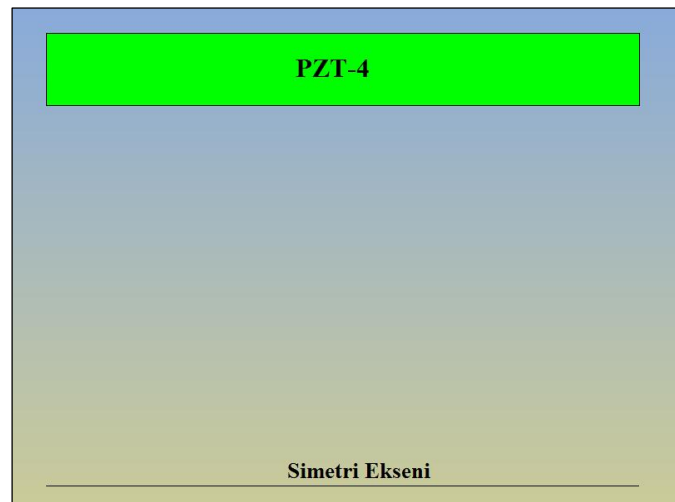


Şekil 3.6: Yedili dizin için poliüretan kaplama aşamaları.

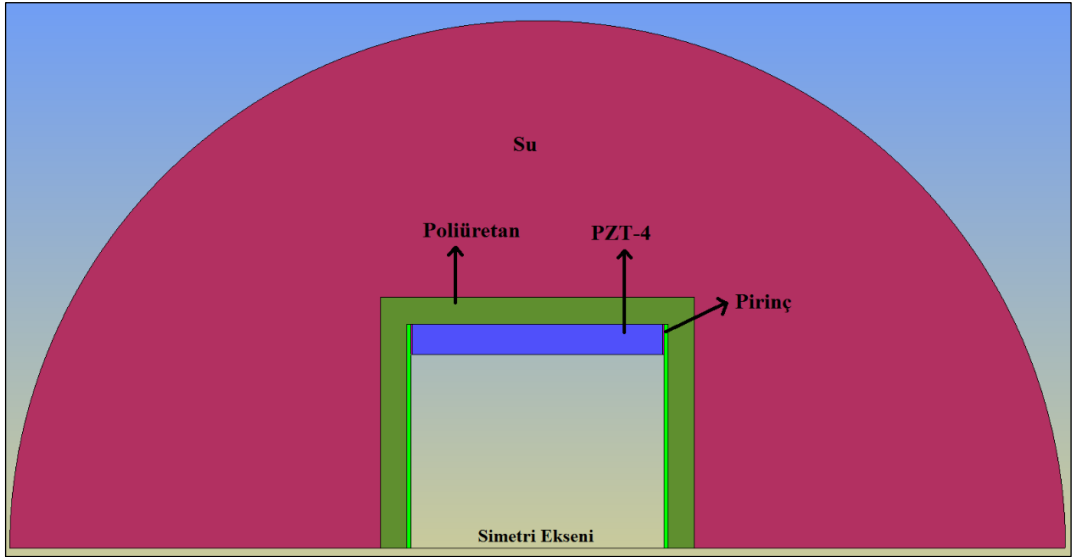
### 3.1.10. Sonlu Elemanlar Analizi ile Modelleme

ATILA FEA programı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analiz yönteminde iki farklı tasarım için de hem yalnızca seramik parçanın hava ortamındaki hem de poliüretan kaplanmış halde su altındaki davranışları modellenmiştir.

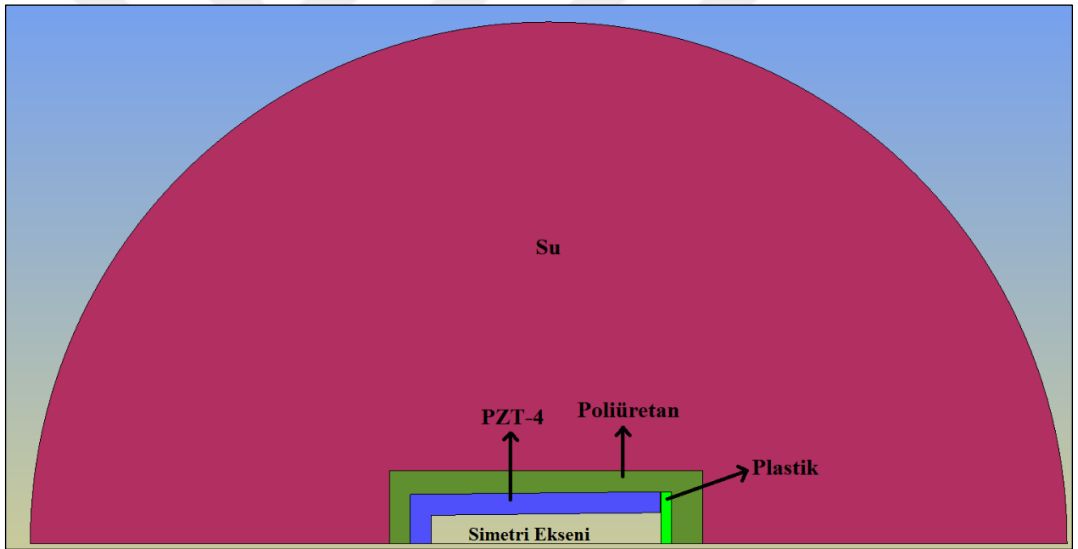
Hazırlanan tasarımlar eksenel simetriye sahip olduğundan programda yapılan çizimler 2 boyutta ve parça kesitinin yarısı olacak şekilde yapılmıştır. Program, oluşturulan 2 boyutlu çizimi simetri eksenini etrafında 360° döndürerek 3 boyutlu nihai tasarımı meydana getirmektedir. Bu sayede Şekil 3.7’de gösterilen çubuk şeklindeki çizim simetri eksenini etrafında 360° döndürüldüğünde içi boş ve her iki ucu da açık olan bir silindiri meydana getirmektedir. Aynı sonuç diğer şekillerde gösterilen çizimlerle de elde edilmektedir.



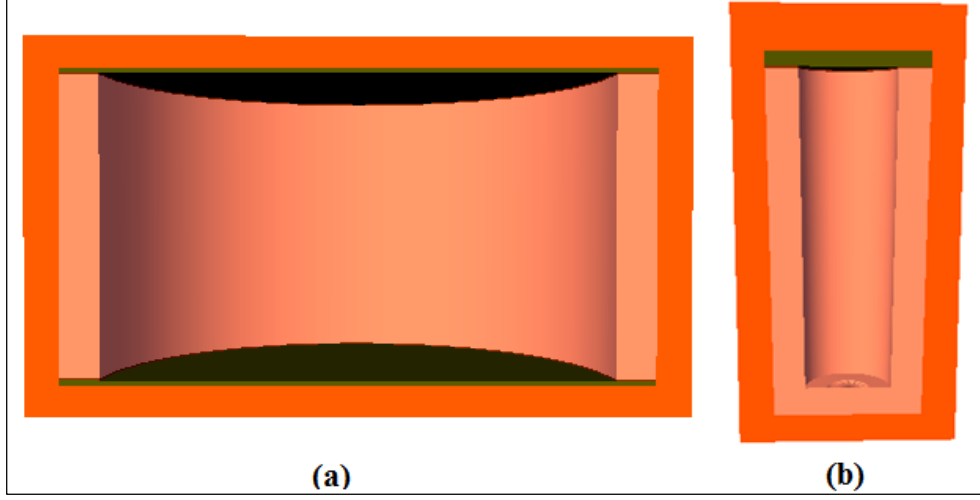
Şekil 3.7: SA-19 numunesinin 2 boyutlu modellemesi.



Şekil 3.8: SA-19 numunesinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin su altı modellemesi.



Şekil 3.9: SK-22 numunesinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin su altı modellemesi.



Şekil 3.10: (a) SA-19 ve (b) SK-22 numunelerinin kapaklı ve poliüretan kaplanmış halinin kesit görüntüsü.

### 3.1.11. Su Altı Akustik Ölçümleri

Su altı akustik ölçümleri, poliüretan kaplanmış numuneleri 1x1x0.5 m boyutlarındaki su tankı içerisine daldırılarak yapılmıştır.

Su içerisinde alınan admitans-frekans ölçümleriyle aşağıda verilen bağıntılardan yararlanılarak İletim Voltaj Tepkisi (Transmitting Voltage Response – TVR) ve Serbest Alan Voltaj Hassasiyeti (Free Field Voltage Sensitivity – FFVS) hesaplanmıştır [20].

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

$\text{re}\{Y\}$  ölçülen admitans değerinin gerçek kısmını; DI, dB cinsinden yönlülük indeksini;  $\eta$  ise dB cinsinden verimlilik sabitini ifade etmektedir. Verimlilik sabiti akustik gücün elektrik gücüne oranını ifade etmektedir ve 0 dB olarak kabul edilmiştir.

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

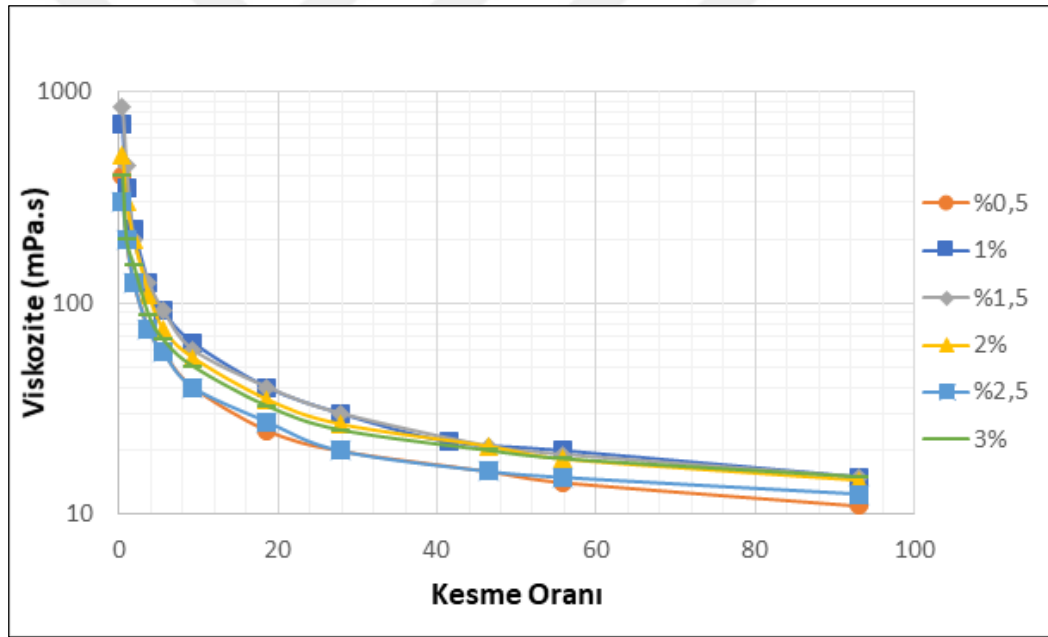
$|Y|$  ölçülen admitans şiddetini; f, Hz cinsinden frekansı ifade etmektedir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

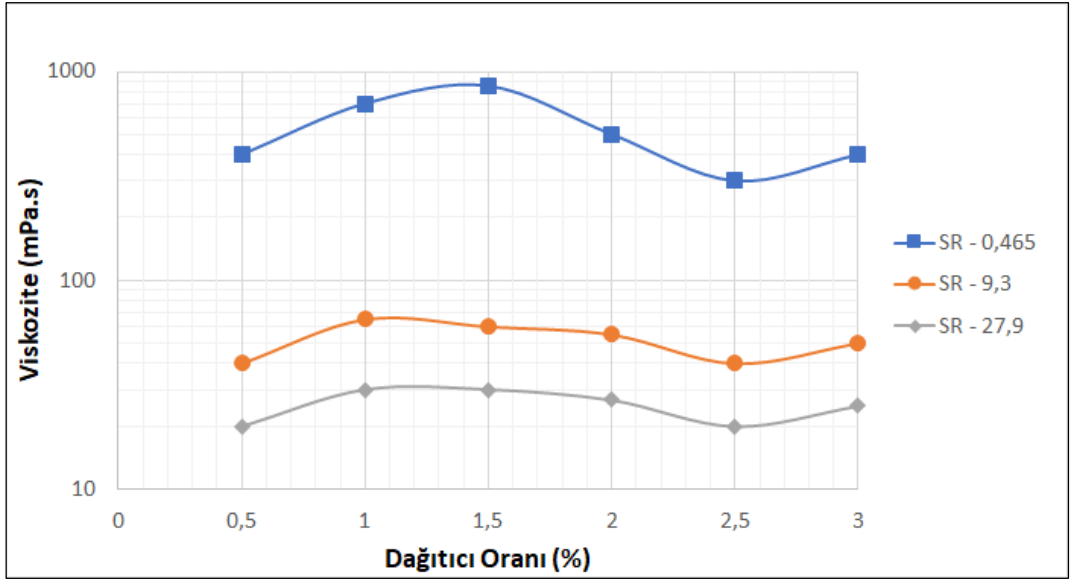
### 4.1. Viskozite Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Asıltıların viskozite ölçümleri Malzeme ve Yöntem bölümünde açıklandığı gibi gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçların grafiği Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Asıltı içerisinde farklı dağıtıcı oranlarına bağlı olarak alınan ölçümlerde en düşük değer, %0,5 ve %2,5 oranlarında elde edilmiştir. İleride açıklanacak olan sedimentasyon ölçümlerinde de bahsedileceği gibi %0,5 dağıtıcı miktarı asıltının kararlılığı açısından yetersiz bir oran olduğu için %2,5'lik dağıtıcı oranı ideal oran olarak kabul edilmiştir.

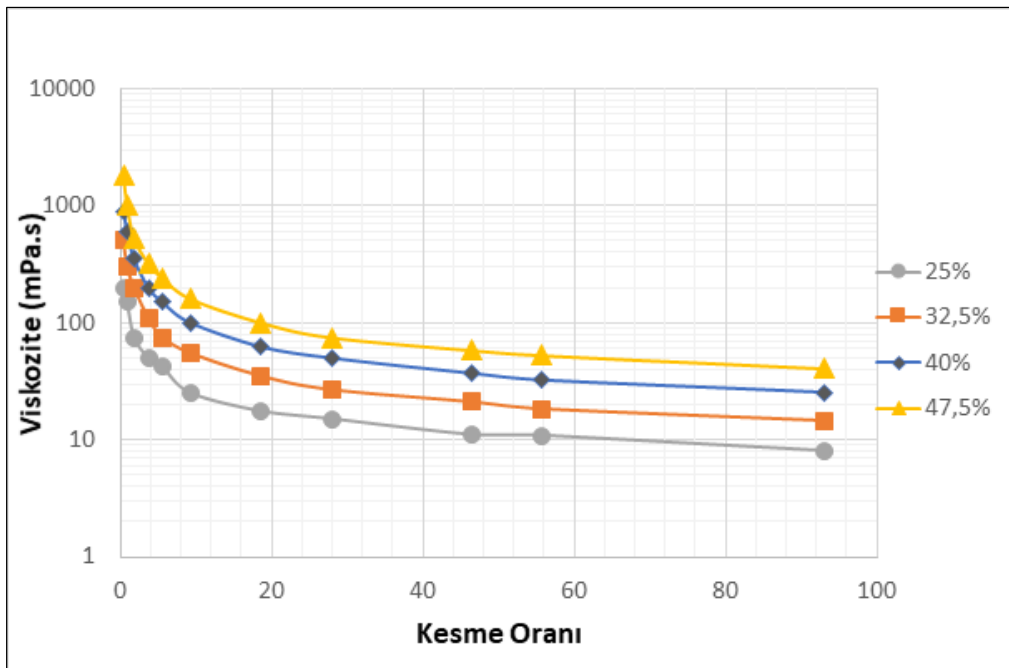


Şekil 4.1: Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıltıların kesme oranına göre viskozite davranışı.



Şekil 4.2: Hacimce %32,5 katı içeren asıltının farklı kesme oranlarında dağıtıcı miktarına göre viskozite davranışı.

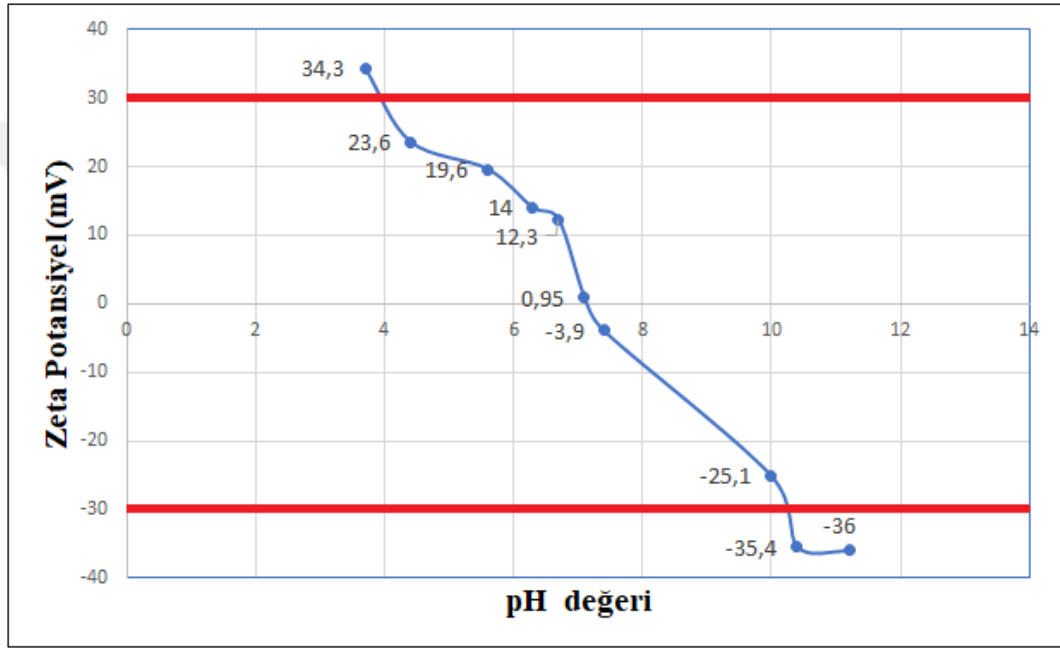
Toz oranına bağlı olarak alınan viskozite ölçümlerinde ise beklendiği üzere, asıltı içerisindeki toz miktarı arttıkça asıltı viskozitesi de yükselmektedir. Her ne kadar düşük viskoziteli asıltı hazırlamak istesek de yine asıltı stabilitesi ve sedimentasyon açısından değerlendirildiğinde %40 oranında toz içeren asıltının ideal oranda olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.3: Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıltıların viskozitelerinin kesme oranına göre değişimi.

## 4.2. Zeta Potansiyel Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zeta potansiyel ölçümleri Malzeme ve Yöntem bölümünde bahsedilen stok asıltı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. 30 ve -30 mV sınır değerleri kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Çalışmada bazik asıltı hazırlanacağından -30 mV değerinin altına inmek için pH'nın 10'un üzerinde olması gerektiği grafikte görülmektedir. Dolayısıyla nihai reçete için olması gereken pH değerine 10,5 olarak karar verilmiştir.

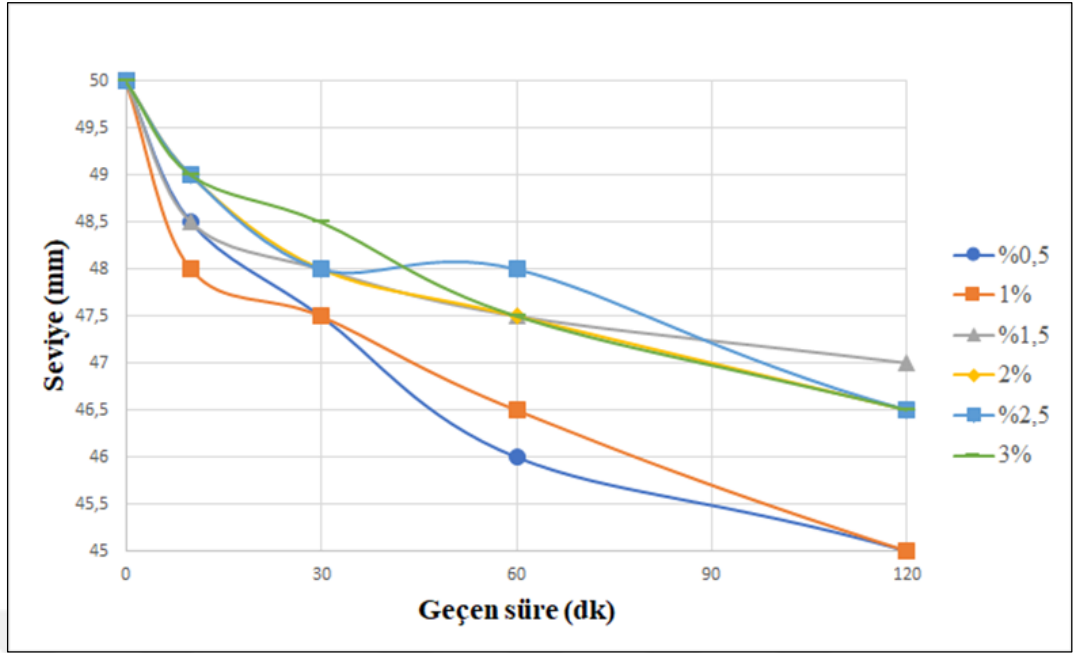


Şekil 4.4: Hazırlanan stok asıltıdan alınan pH değerine bağlı zeta potansiyel ölçüm sonuçları.

## 4.3. Sedimentasyon Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

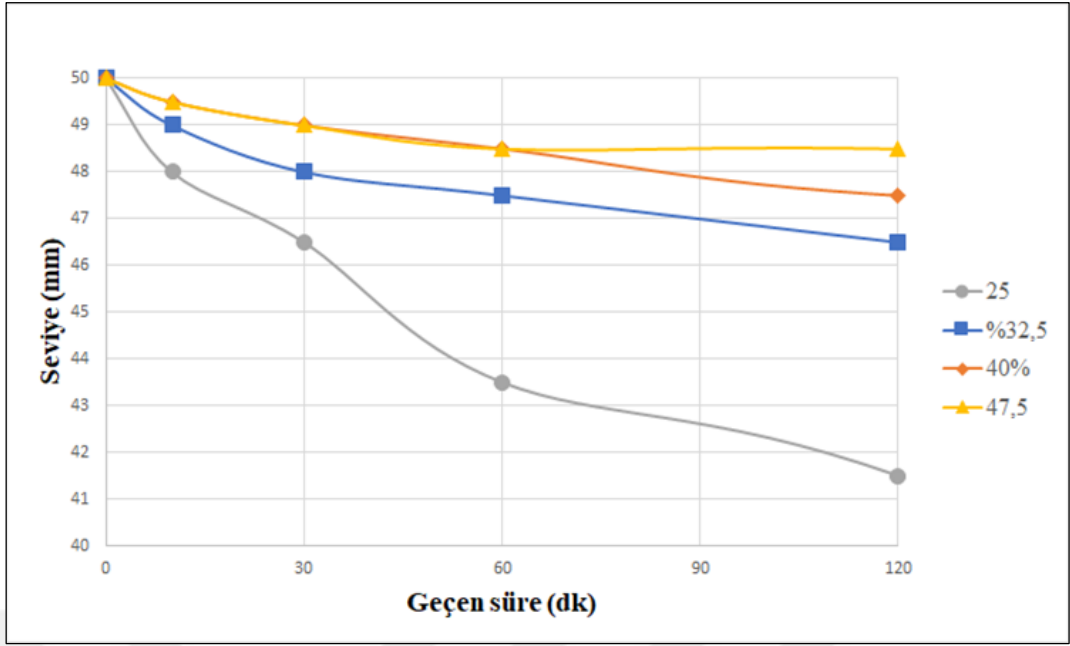
Asıltının dağıtıcı oranına, toz oranına ve pH değerine bağlı olarak 3 farklı sedimentasyon ölçümü alınmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Dağıtıcı oranına bağlı olarak yapılan ölçümler değerlendirildiğinde %2,5 oranında dağıtıcı içeren asıltının asıltı kararlılığı açısından ideal olduğu görülmektedir.



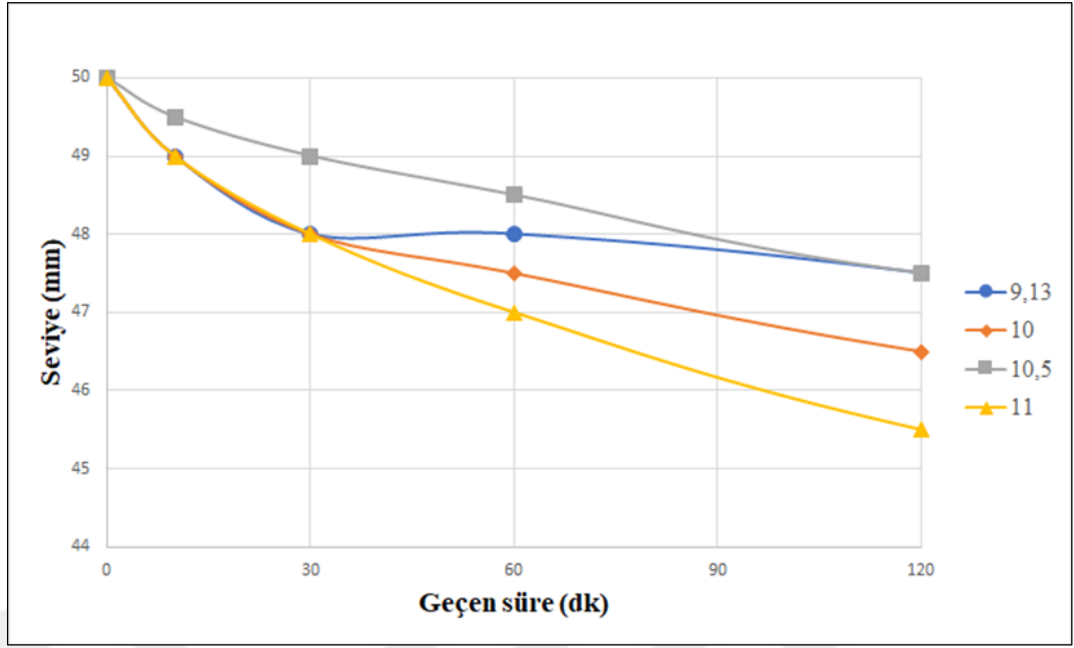
Şekil 4.5: Hacimce %32,5 katı ve farklı oranda dağıtıcı içeren asıtların sedimentasyon davranışları.

Farklı toz oranındaki asıtların sedimentasyon ölçümlerine bakıldığında, beklendiği üzere asıtlı içeriğindeki toz miktarı arttıkça çökme hızı yavaşlamaktadır. %47,5 toz oranı sedimentasyon açısından en kararlı oran olarak görülmektedir. Ancak asıtlının viskozite ölçümleriyle birlikte bir değerlendirme yapıldığında, %47,5 toz içeren asıtlının viskozite değerleri yüksek olduğundan dolayı nihai reçetede %40'lık toz oranı kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.6: Ağırlıkça %2,5 dağıtıcı içeren ve farklı miktarlarda seramik toz içeren asıtların sedimentasyon test sonuçları.

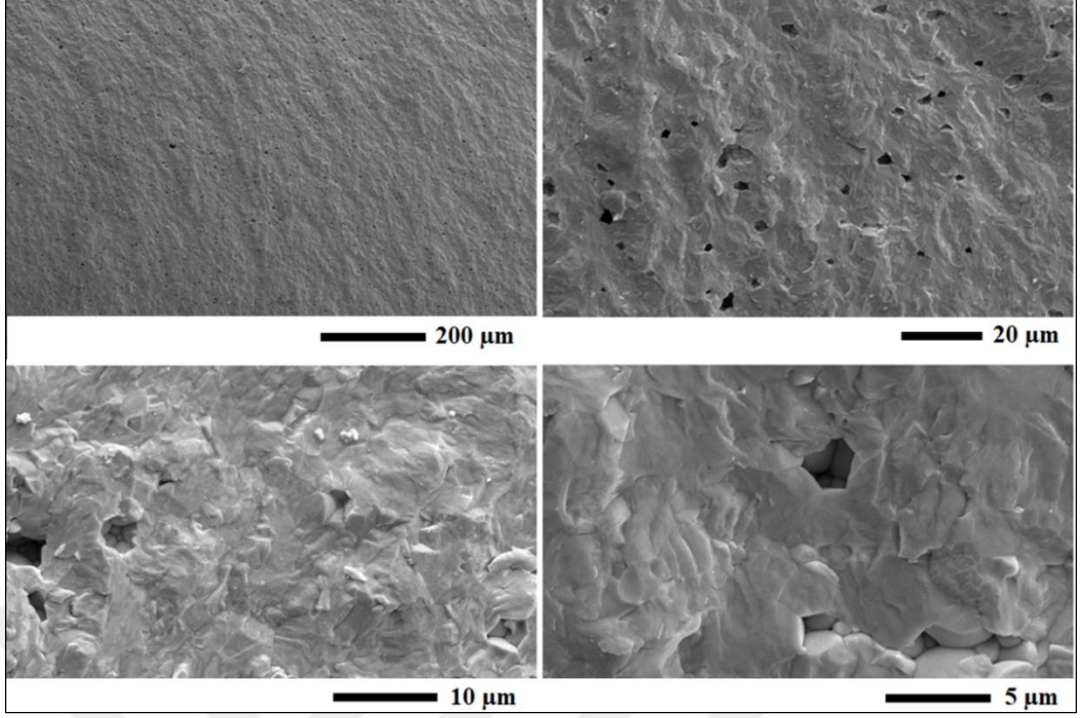
pH değerine bağlı ölçüm sonuçları zeta potansiyel ölçümündeki değerlendirmeleri doğrular nitelikte ortaya çıkmıştır. pH değerinin 10,5 olduğu durumda en kararlı asıtlı elde edilmiştir. pH'ın 11 olması halinde çökme miktarındaki ciddi artışın sebebi ise şu şekilde açıklanmıştır: pH değerini 10,5'tan 11'e çıkarmak için asıtlı içerisine çok fazla amonyak çözeltisi eklenmiştir. Eklenen bu amonyak çözeltisinin %25'i amonyak ve %75'i saf sudan oluşmaktadır. Dolayısıyla fazla miktarda eklenen amonyak çözeltisi asıtlının toz/sıvı oranında ciddi azalmaya sebebiyet verdiğinden sedimentasyon beklenenden fazla gerçekleşmiştir.



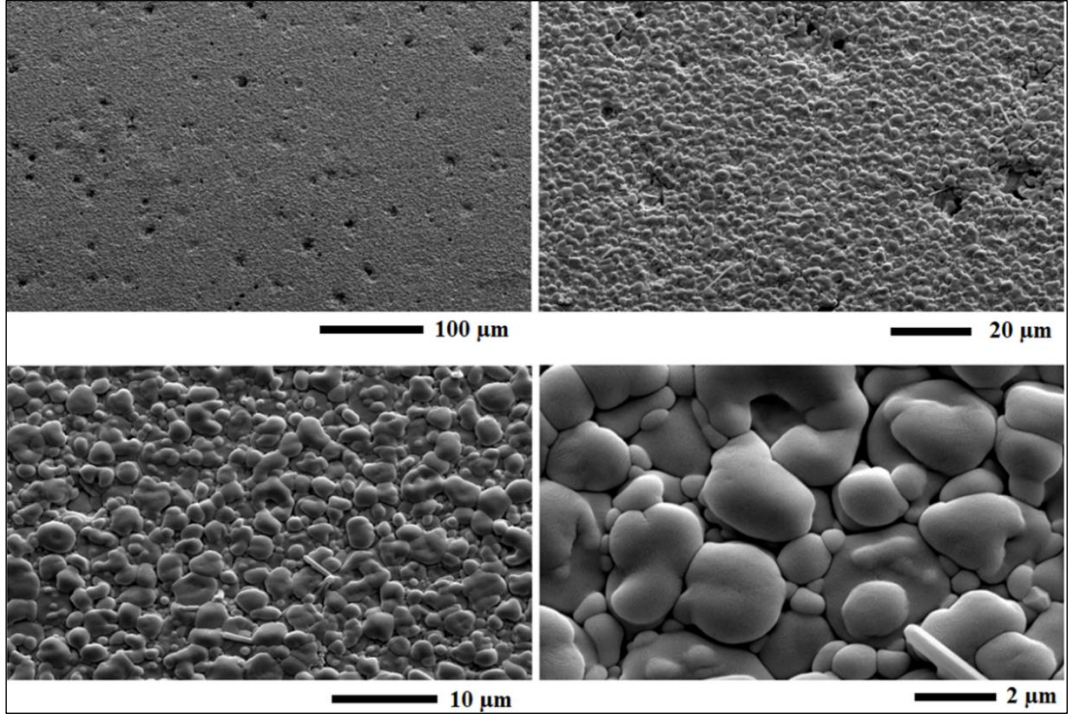
Şekil 4.7: Asıltının pH'ına bağlı sedimentasyon ölçüm sonuçları.

#### 4.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Sinterlenmiş numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.8'de herhangi bir işlem yapılmadan, doğrudan kırık yüzeyinden alınan görüntüler verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde, belirli miktarda gözenekliliğin oluşu asıltı döküm yönteminin doğasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Herhangi bir basınç uygulamadan yapılan üretimlerde bu seviyede gözenekliliğin olması beklenen bir durumdur. Mikroyapı görüntüsünde herhangi bir tane sınırı, tane çukuru veya tepeciği görülmediğinden kırılmanın tane içi kırılma olduğu, dolayısıyla sinterleme neticesinde partiküllerin birbiri ile sıkı bir bağ kurduğu anlaşılmıştır.



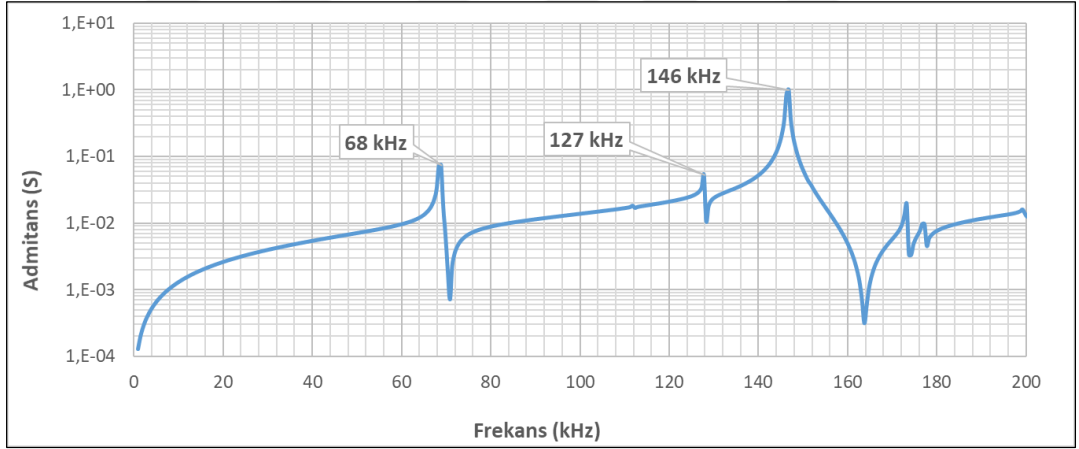
Şekil 4.8: Kırık yüzeyinden alınmış, farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.



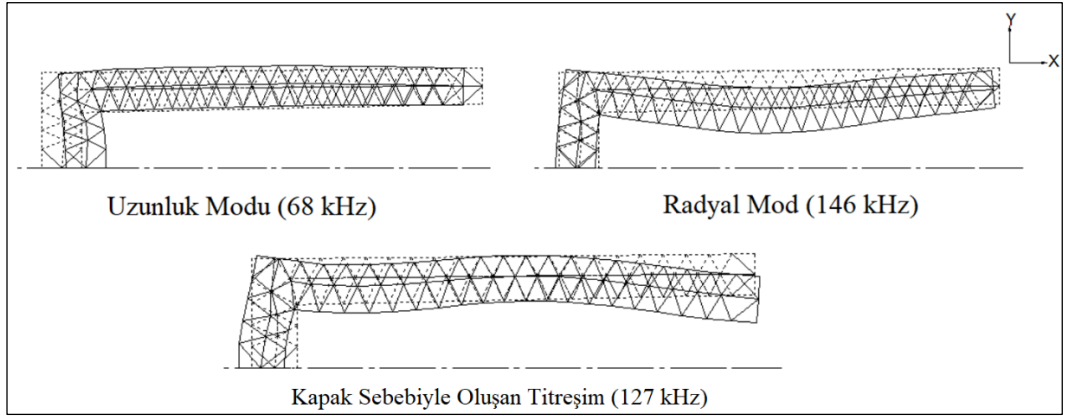
Şekil 4.9: Kırık yüzeyde parlatma ve ardından termal dağlama yapıldıktan sonra alınmış SEM görüntüleri.

## 4.5. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan modelleme sonucunda elde edilen frekansa bağlı admitans sonuçları aşağıda verilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi bir ucu kapalı silindirik kabuk formundaki dönüştürücülerin iki temel titreşim modu vardır. Bu modların ne tür bir şekil değişimine karşılık geldiği de yine sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve Şekil 4.11'de silindirik kesinin sadece yarısı üzerinden verilmiştir. Bu şekillerde kesikli olarak gösterilen numunenin statik durumunu, düz çizgilerle gösterilen ise numunenin rezonans frekansındaki en yüksek genlikte şekil değiştirmiş durumunu göstermektedir. Şekil 4.11'den de görüldüğü gibi düşük frekanstaki rezonans, silindirin boyuna uzama moduna aittir. Yüksek frekanstaki ikinci rezonansın ise radyal titreşim moduna, yani silindirin çapının artması ve azalmasına ait olduğu görülmektedir. Bu iki temel rezonansa ek olarak silindirin bir ucunun elektrotlanmamış ve kutuplanmamış, aktif olmayan bir seramik ile kapatılmış olması nedeniyle, daha düşük şiddette, daha düşük bağlaşmaya (coupling) sahip karışık titreşim modları da gözlenmiştir.

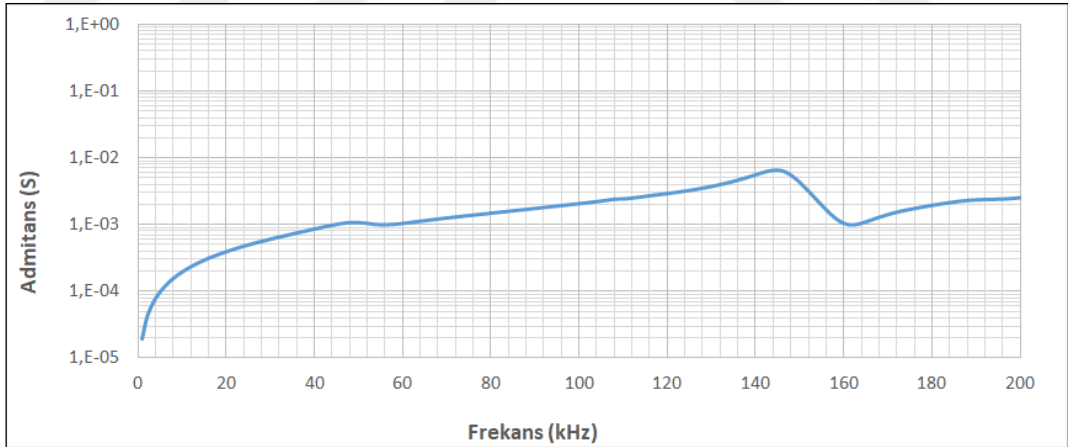


Şekil 4.10: SK-22 kodlu numunenin modelleme sonuçları.



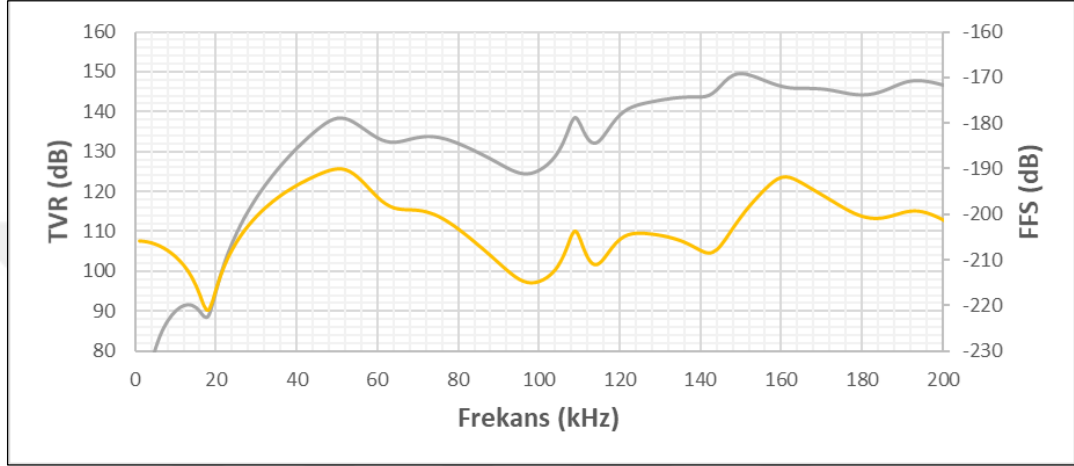
Şekil 4.11: SK-22 kodlu numunenin uzunluk ve radyal titreşim modlarında meydana gelen deplasman şematikleri

Şekil 4.12’de ise poliüretan kaplı bir ucu kapalı silindirik formdaki dönüştürücünün su içerisindeki admitans davranışının sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonucunu vermektedir. Burada da görüldüğü gibi temel titreşim modlarının rezonans pikleri poliüretan kaplamanın ve suyun yarattığı kütle yük ve yeni sınır koşulları nedeniyle kısmen baskılanmıştır. Karışık titreşim modları ise tümüyle kaybolmuştur.

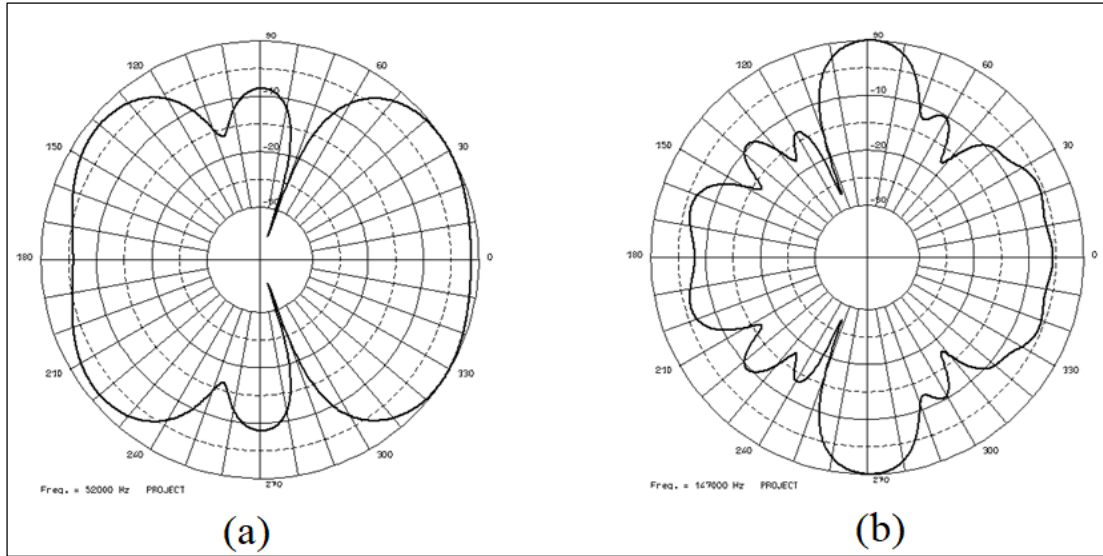


Şekil 4.12: SK-22 kodlu numunenin poliüretan kaplama sonrası su altı modelleme sonuçları.

Şekil 4.13'te SK-22 kodlu numunenin sonlu elemanlar analiz yöntemiyle su altı modellemesinin TVR ve FFS sonuçları verilmiştir. TVR değerinin 52 kHz ve 147 kHz frekans değerlerinde maksimum yaptığı görülmüştür. Bunlardan 52 kHz'deki maksimum, uzunluk yönündeki titreşime denk gelmektedir. 147 kHz'deki maksimum ise radyal yöndeki titreşime denk gelmektedir. Bu titreşimlerin yaptığı yayınımların yönelim endeksleri ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

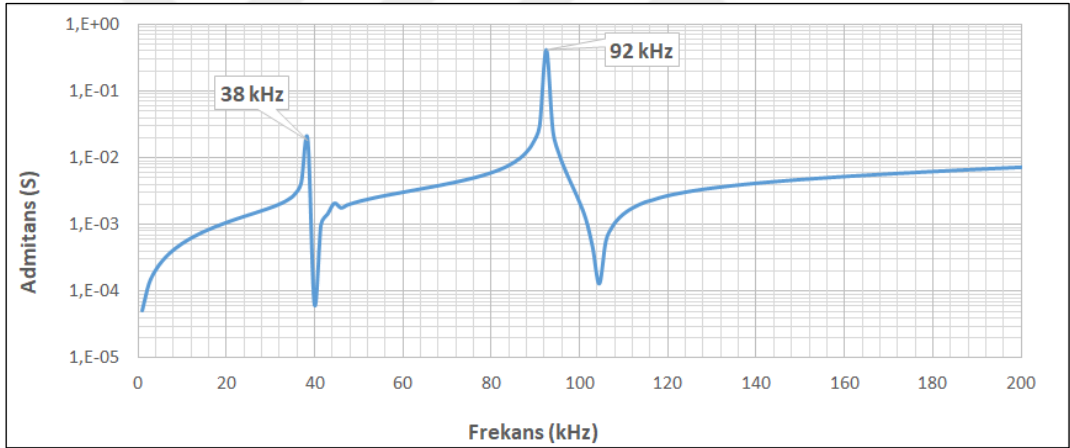


Şekil 4.13: SK-22 kodlu numunenin sonlu elemanlar analizi ile yapılan su altı modellemesinin TVR ve FFS grafiği.

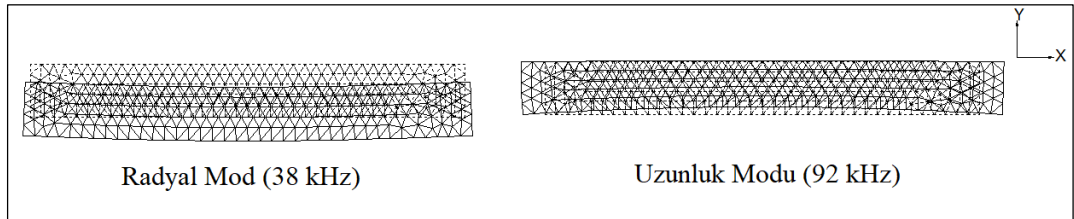


Şekil 4.14: SK-22 kodlu numunenin sonlu elemanlar analizi ile yapılan su altı modellemesinde (a) 52 kHz ve (b) 147 kHz'de maksimum TVR değerlerindeki yönelim endeksleri.

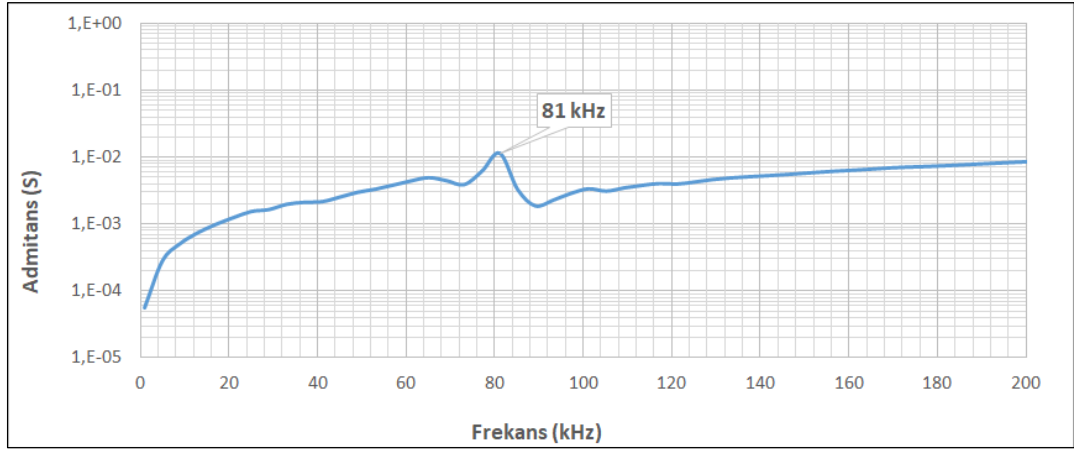
İki ucu açık silindirik formdaki dönüştürücülerin Şekil 4.15'te görüldüğü gibi iki temel titreşim modu vardır. Bu modların ne tür bir şekil değişimine karşılık geldiği de yine sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve Şekil 4.16'da silindirin kesitinin sadece yarısı üzerinden sonuçlar verilmiştir. Bu şekillerde kesikli olarak gösterilen numunenin statik durumunu, düz çizgiler ile gösterilen ise numunenin rezonans frekansındaki en yüksek genlikte şekil değiştirmiş durumunu göstermektedir. Düşük frekanstaki rezonansın radyal titreşim moduna, yani silindirin çapının artması ve azalmasına ait olduğu görülmektedir. Yüksek frekanstaki ikinci rezonansın ise silindirin boyunun uzama moduna ait olduğu görülmektedir. İki ucu açık silindirik dönüştürücünün poliüretan kaplama sonrası su içerisindeki admitans-frekans tepkisi de sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuç Şekil 4.17'de verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi radyal titreşim çok daha şiddetli bir şekilde baskılanırken boyuna uzama modu halen gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.15: SA-19 kodlu numunenin modelleme sonuçları.



Şekil 4.16: SA-19 kodlu numunenin radyal ve uzunluk titreşim modlarında meydana gelen deplasman şematikleri.



Şekil 4.17: SA-19 kodlu numunenin poliüretan kaplama sonrası su altı modelleme sonuçları.

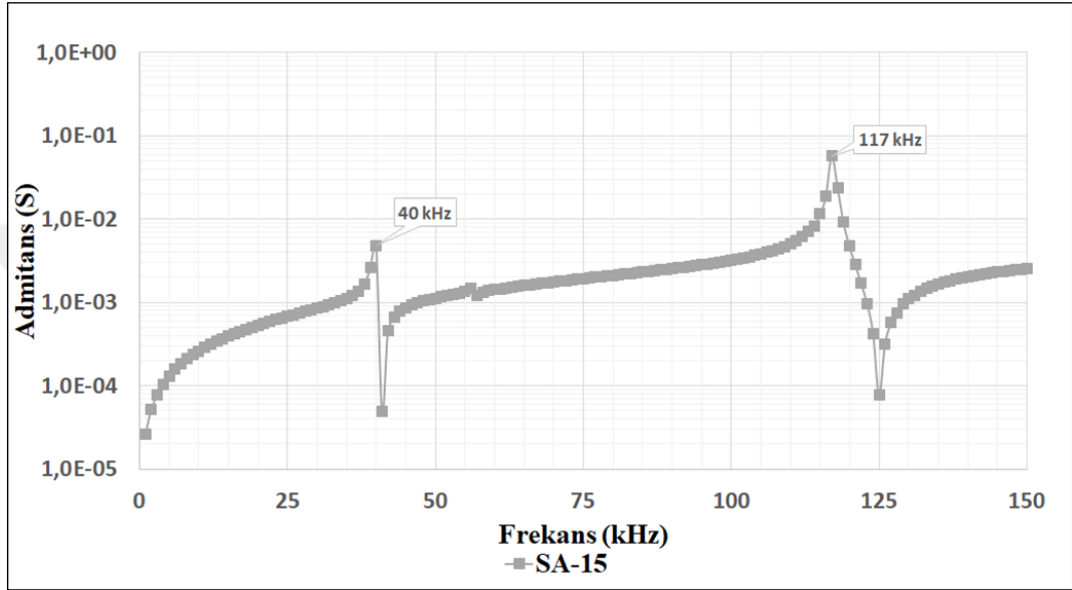
## 4.6. Elektriksel Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numunelerden iki tarafı da açık olacak şekilde üretilen silindirler SA-15, SA-19 ve SA-23 olarak kodlanmıştır. Bir tarafı kapalı olacak şekilde üretilen numune ise SK-22 olarak kodlanmıştır. Her bir numunenin radyal ve uzunluk titreşim modlarının görüldüğü frekans değerleri aşağıdaki Tablo 4.1’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları da tek tek ve karşılaştırmalı olacak şekilde aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Kıyaslama açısından sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen rezonans frekansları da verilmiştir.

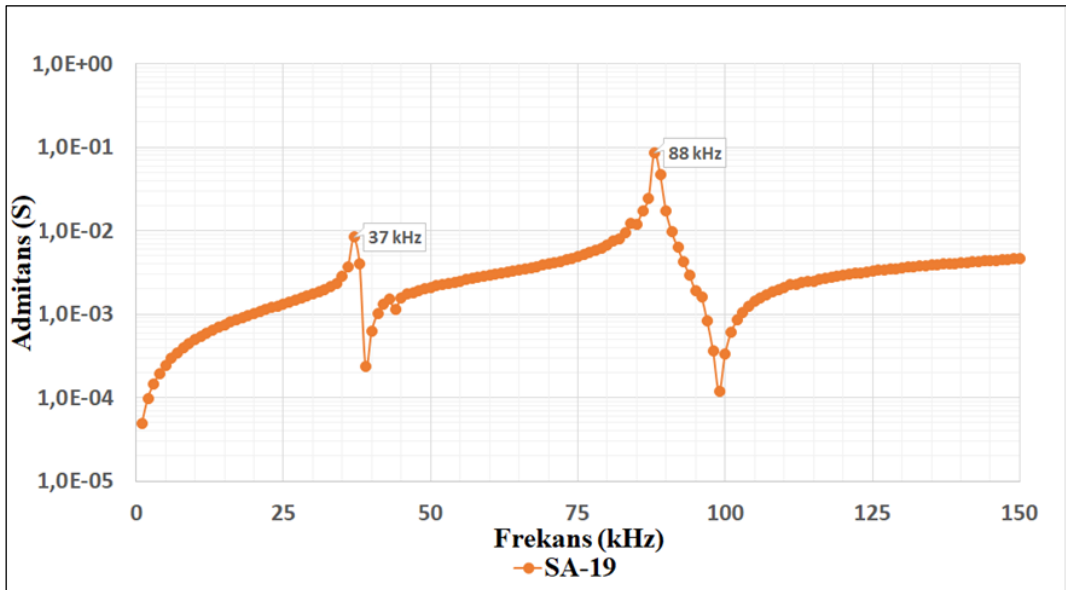
Tablo 4.1: Hazırlanan numunelerin titreşim modları.

Numune Kodu	Radyal Titreşim modu (kHz)	Uzunluk Titreşim Modu (kHz)
SA-15	40	117
SA-19	37	88
SA-23	37	75
SA-19 Model	38	92
SK-22	143	66
SK-22 Model	146	68

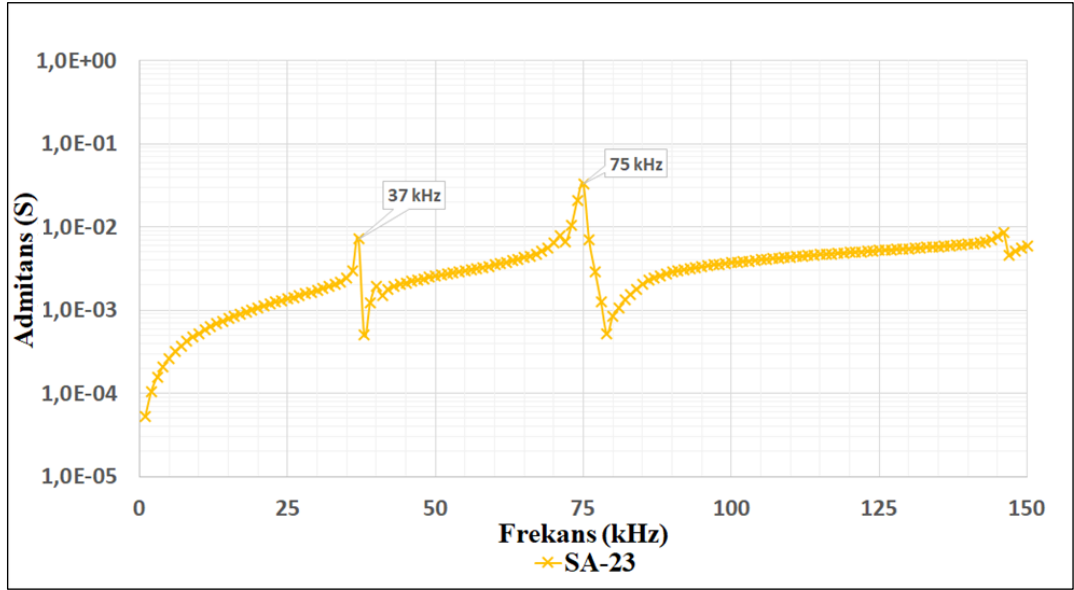
Sonuçlar değerlendirildiğinde, Tablo 4.1’de verildiği gibi iki ucu açık silindirik numunelerin çapı eşit olduğundan radyal titreşim modu 38 kHz’de gözlenmiştir. Numunenin uzunluğu azaldıkça boyuna uzama titreşim modu beklendiği şekilde yüksek frekanslara kaymıştır. 19 ve 23 mm uzunluktaki silindirik dönüştürücülerde boyuna uzama titreşim modunun rezonans frekansı, çalışmanın başında hedeflendiği şekilde 50-100 kHz aralığındaki değerlerde elde edilmiştir.



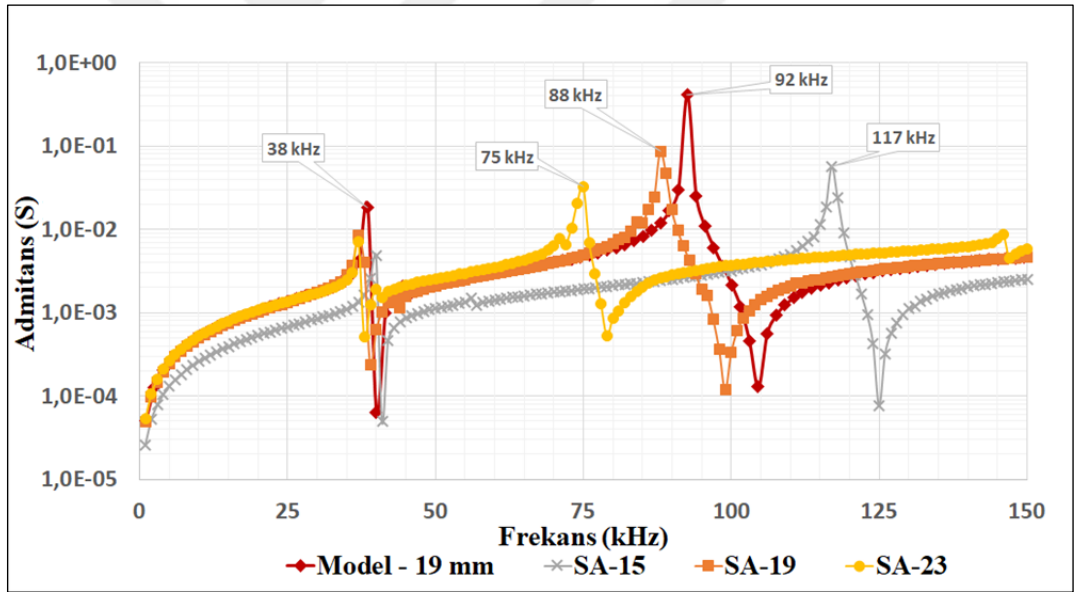
Şekil 4.18: SA-15 kodlu numunenin radyal (40 kHz) ve uzunluk (117 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.



Şekil 4.19: SA-19 kodlu numunenin radyal (37 kHz) ve uzunluk (88 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.

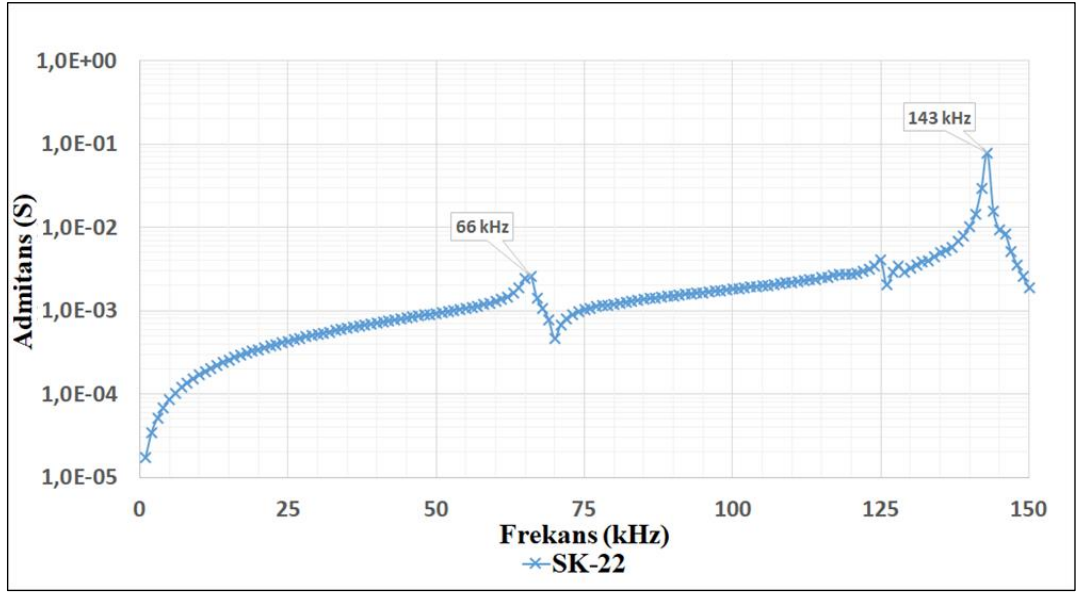


Şekil 4.20: SA-23 kodlu numunenin radyal (37 kHz) ve uzunluk (75 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.

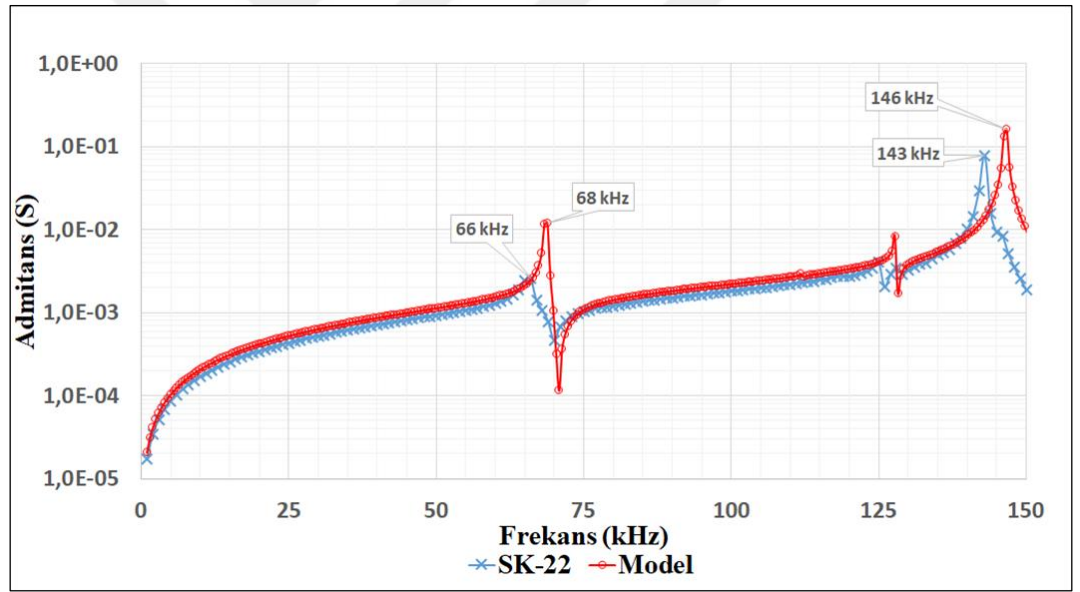


Şekil 4.21: SA-15, SA-19, SA-23 ve 19 mm'lik modelleme numunesinin frekansa bağlı admitans karşılaştırması.

DeneySEL sonuçlar ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar arasındaki küçük sapmalar beklenen bir sonuçtur. Asıltı döküm yöntemi basınçsız bir üretim yöntemidir ve sonlu elemanlar yönteminde ise veritabanı kuru preslenmiş numuneler üzerinden oluşturulur. Bu sapmaların sebebi budur [20]. Asıltı döküm yöntemi ile üretilen seramiklerin yoğunlukları ve dolayısıyla elektriksel özellikleri preslenmiş seramiklere göre daha düşüktür [2].



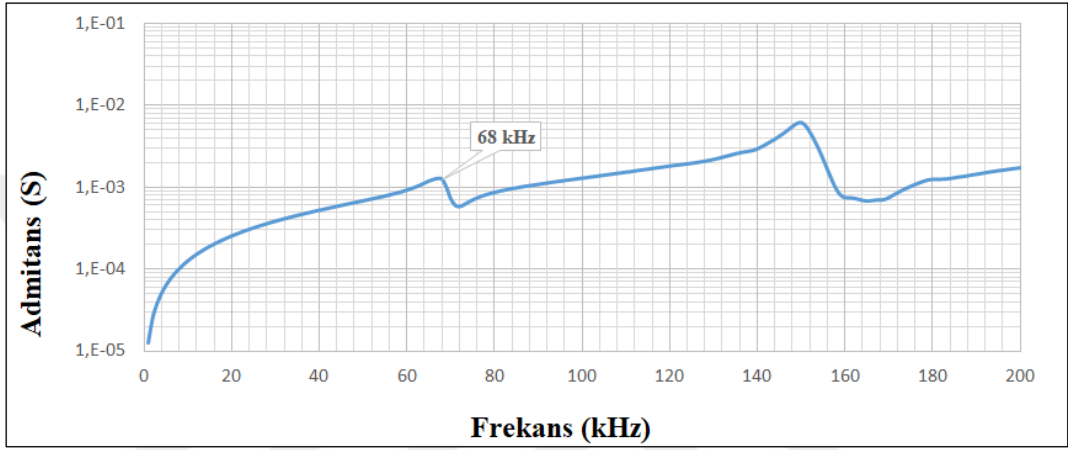
Şekil 4.22: SK-22 kodlu numunenin uzunluk (66 kHz) ve radyal (143 kHz) titreşim modu rezonans frekansları.



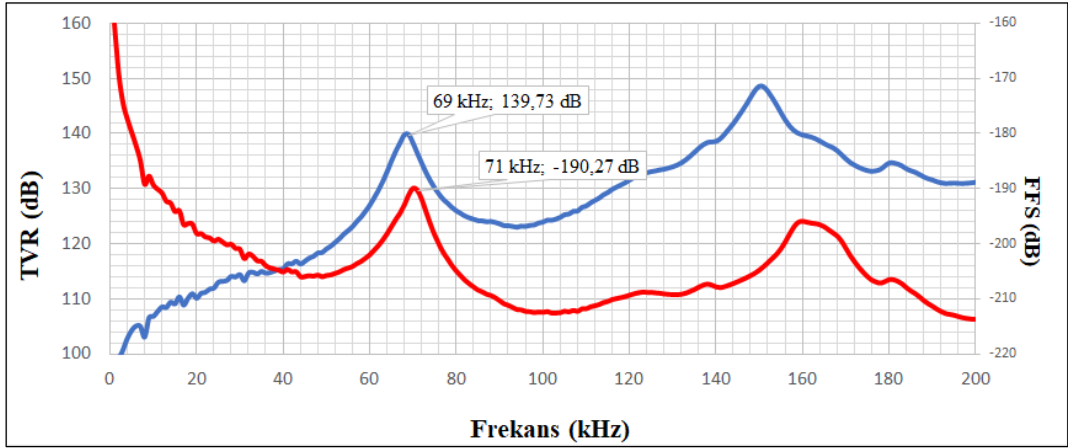
Şekil 4.23: SK-22 kodlu numunenin frekansa bağlı admitans ölçüm grafiğinin modelleme ile karşılaştırması.

## 4.7. Su Altı Akustik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

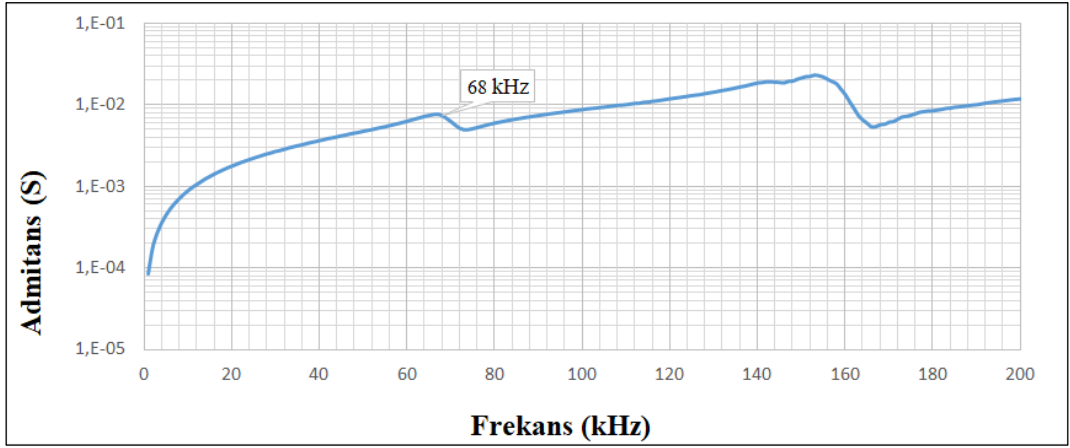
Şekil 4.24'te tekli poliüretan kaplaması yapılan numunenin su altında frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 4.25'te ise yapılan ölçümlere bağlı olarak hesaplanan TVR ve FFS değerlerinin grafiği verilmiştir. 69 kHz frekans değerinde TVR'ın maksimum yaptığı ve 71 kHz'de de FFS değerlerinin maksimum yaptığı görülmektedir.



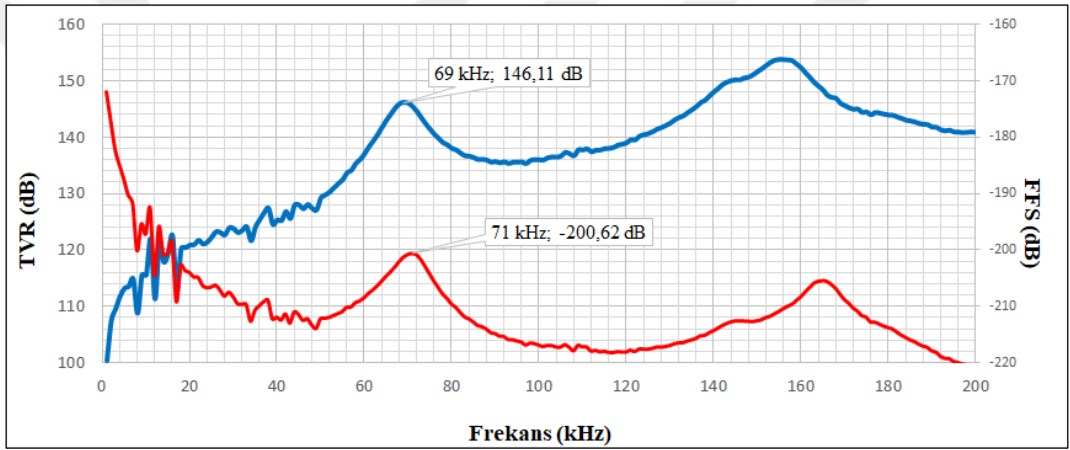
Şekil 4.24: Tekli olarak poliüretan kaplaması yapılan SK-22 kodlu numunenin su altı frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları.



Şekil 4.25: Tekli olarak poliüretan kaplaması yapılan SK-22 kodlu numunenin TVR ve FFS hesaplama sonuçları.



Şekil 4.26: Yedili olarak polüretan kaplaması yapılan numunelerin su altı frekansa bağlı admitans ölçüm sonuçları.



Şekil 4.27: Yedili olarak polüretan kaplanan numunelerin TVR ve FFS hesaplama sonuçları.

Bu sonuçların ışığında; birbirine elektriksel olarak paralel bağlı 7 adet silindirik dönüştürücünün TVR değerlerinin tek bir silindirik dönüştürücüye kıyasla 6-7 dB daha yüksek olduğu, FFVS değerlerinin ise tek silindirik dönüştürücüye kıyasla 9-10 dB daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar öngörülebilir ve beklenen sonuçlardır. Bir dönüştürücü dizininin su altında aktif olarak kullanılması planlanıyorsa, dizini oluşturan elemanların birbirine paralel bağlanması gerekmektedir. Pasif algılayıcı olarak kullanılması planlanıyorsa, bu durumda da birim elemanların birbirine seri bağlanması en uygun çözümdür.

## 5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada kurşun zirkonat titanat esaslı ticari piezoelektrik seramik kullanılarak silindirik formda dönüştürücüler üretilmiştir. Bu dönüştürücülerin geometrisinin rezonans frekansı üzerindeki etkisi incelenmiş, ayrıca 50-100 kHz frekansta çalışan su altı dönüştürücülere alternatif bir tasarım geliştirilmeye çalışılmıştır.

Asıltı döküm yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada öncelikle kararlı asıltı elde etmek amacıyla optimum toz, dağıtıcı ve pH oranı belirlenmiştir. Bu amaca yönelik olarak viskozite, sedimentasyon ve zeta potansiyel ölçümleri yapılmış ve uygun asıltı reçetesi belirlenmiştir. Buna göre hacimce %40 toz/saf su oranı, toz ağırlığının %2,5'i kadar dağıtıcı ve bağlayıcı ilavesi ve amonyak çözeltisi ile pH 10,5'e ayarlanmıştır. Ardından yapılan dökümler neticesinde içi boş ve iki tarafı açık, içi boş ve bir tarafı kapalı olmak üzere iki farklı silindirik geometride seramikler üretilmiştir.

Dökümleri yapılan seramikler kurutulduktan sonra 1260°C'de 4 saat süreyle sinterlenmiştir. Ardından zımpara ile boyut ayarlaması yapılan numunelerin iç ve dış yüzeyleri gümüş elektrot ile kaplanarak iletkenliği sağlanmıştır. 22 kV/cm elektrik alan altında 120°C'de 15 dk. süreyle kutuplanan numunelerin frekansa bağlı admitans ölçümleri alınmış ve titreşim modlarındaki rezonans frekansları belirlenmiştir. İki tarafı açık olan silindirler farklı yüksekliklerde üretilerek bunun rezonans frekansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Parça yüksekliği arttıkça uzunluk titreşim modundaki rezonans frekansının 117 kHz'ten 75 kHz'e kadar düşmeye başladığı, çapların her bir numunede aynı olması sebebiyle radyal titreşim modundaki rezonans frekansının 37 kHz civarında kalıp değişmediği görülmüştür.

Bir tarafı kapalı olarak üretilen seramiklerin radyal titreşim modunun 143 kHz'de, uzunluk titreşim modunun ise 66 kHz'de olduğu görülmüştür. Bu numuneler tekli ve yedili dizin halinde hazırlanarak poliüretan kaplamaları yapılmıştır. Su altında alınan ölçümler neticesinde 68 kHz'te bir rezonans olduğu görülmüştür. TVR ve FFS hesaplamaları neticesinde maksimum TVR ve FFS değerlerinin 69 kHz'te olduğu ve yedili dizinin 146 dB'lik TVR ile tatmin edici değerlere ulaştığı görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- [1] Vijaya M. S., (2012), "Piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences", 978-1-4398-8788-2, CRC press.
- [2] Alkoy S., (2007), "Fabrication and properties of thin-shell monolithic piezoelectric ceramic transducers", Journal of materials science, 42(16), 6742-6748.
- [3] Sharapov V, (2011), "Piezoceramic sensors", 978-3-642-15310-5, Springer Science & Business Media.
- [4] Olukkent R., (2013), "Yarımküre Formundaki Piezoelektrik Dönüştürücülerin Asıltı Döküm Yöntemiyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [5] Callister W. D., (2007), "Materials science and engineering an introduction", 978-0-470-41997-7, John Wiley.
- [6] Hughes W. J., (2003), "Transducers, underwater acoustic", Digital Encyclopedia of Applied Physics.
- [7] Web1, <https://sensortechcanada.com/technical-notes/piezoelectric-fundamentals/> (Erişim Tarihi: 26.12.2020).
- [8] Uchino K. (Ed.), (2017), "Advanced piezoelectric materials: Science and technology", 978-0-08-101255-0, Woodhead Publishing.
- [9] Moulson A. J., Herbert, J. M. (2003), "Electroceramics: materials, properties, applications", 0471 49748 7, John Wiley & Sons.
- [10] Izyumskaya N., Alivov Y. I., Cho S. J., Morkoç H., Lee H., Kang Y. S., (2007), "Processing, structure, properties, and applications of PZT thin films", Critical reviews in solid state and materials sciences, 32(3-4), 111-202.
- [11] Gallego-Juarez J. A., (1989), "Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers", Journal of Physics E: Scientific Instruments, 22(10), 804.
- [12] Tressler J. F., Alkoy S., Newnham R. E., (1998), "Piezoelectric sensors and sensor materials", Journal of electroceramics, 2(4), 257-272.
- [13] Mattiat O. E., (2013), "Ultrasonic transducer materials", 978-1-4757-0470-9, Springer Science & Business Media.
- [14] Rao S., (2017), "The finite element method in engineering", 978-0-12-811768-2, Butterworth-heinemann.

- [15] Uchino K., Debus J. C., (Eds.), (2013), "Applications of ATILA FEM software to smart materials: case studies in designing devices", 978-0-85709-631-9, Woodhead Publishing Limited.
- [16] Carter C. B., Norton G., (2007), "Ceramic Materials: Science and Engineering, 2nd Edition", 978-1-4614-3523-5, New York: Springer.
- [17] C.H. Schilling, "Colloid Casting" in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 1314-1319 (2001).
- [18] Wang F. F., (1976), "Treatise on Materials Science and Technology. vol, 9, Ceramic Fabrication Processes", 0-12-341809-7, Academic Press.
- [19] Joseph E., Singhvi G., (2019), "Multifunctional nanocrystals for cancer therapy: a potential nanocarrier", Nanomaterials for Drug Delivery and Therapy (pp. 91-116).
- [20] Kaya M. Y., Menşur-Alkoy E., Gürbüz A., Öner M., Alkoy S., (2018), "Influence of Compositional Variation on the Electrical Properties of [Pb (Zn 1/3 Nb2/3)O3]–[Pb (Zr, Ti)O3] Ceramics and Their Transducer Application", IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 65(7), 1268-1277.