

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PIEZOELEKTRİK SERAMİK YIĞIN AKTÜATÖRLERİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

HÜLYA NUR YAKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİM LEVENT AKTUĞ

EKİM 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PİEZOELEKTRİK SERAMİK YIĞIN
AKTÜATÖRLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU

HÜLYA NUR YAKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİM LEVENT AKTUĞ
II. DANIŞMAN: DR. YUSUF ÖZTÜRK

EKİM 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF
PIEZOELECTRIC CERAMIC STACK ACTUATORS**

HÜLYA NUR YAKAR

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND
ENGINEERING

ADVISOR: ASSIST. PROF. DR. SALİM LEVENT AKTUĞ
Co-ADVISOR: DR. YUSUF ÖZTÜRK

OCTOBER 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/06/2025 tarih ve 2025/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16/10/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hülya Nur YAKAR'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Salim Levent AKTUĞ

ÜYE

: Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇAVUŞLU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

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

İMZA/MÜHÜR



Aileme

ÖZET

Bu tez çalışmasında, PZT-5H ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) esaslı piezoelektrik seramikler kullanılarak yığın tipi piezoelektrik aktüatörlerin üretimi, entegrasyonu ve performans karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, seramik kalınlığı, ön stres seviyesi, yapışkan ve entegrasyon tipinin aktüatörün elektromekanik tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmak ve optimum çalışma koşullarını belirlemektir.

Üretim süreci, PZT-5H tozlarının kalıplanması, bağlayıcı giderme, sinterleme, elektrotlama, kutuplama ve entegrasyon aşamalarını kapsamaktadır. Bağlayıcı giderme işleminde organik fazın kontrollü şekilde uzaklaştırılması sağlanmış, sinterleme sonrasında yoğun ve homojen mikroyapı elde edilmiştir. XRD analizleri, perovskit fazın korunduğunu; SEM incelemeleri, iyi sinterlenmiş, taneler arası boşluğu düşük ve homojen yapı oluştuğunu göstermiştir. d_{33} katsayısı ($\approx 666 \text{ pC/N}$), PZT-5H seramiğinin yüksek piezoelektrik etkinliğini doğrulamıştır.

Kutuplanan seramikler, vidalı entegrasyon yöntemiyle birleştirilmiş, silikon enkapsülasyon uygulanarak elektriksel ark oluşumu ve mekanik çatlama önlenmiştir. Ön stres deneyleri (5, 10, 15 N) sonucunda, 10 N ön yükün optimum olduğu belirlenmiş; daha düşük yüklerde gevşeme, daha yüksek yüklerde ise kırılma gözlenmiştir.

Farklı kalınlıklardaki (1 mm, 2 mm, 3 mm) aktüatörler, toplam aktif kalınlığı sabit (12 mm) olacak şekilde üretilmiştir. Deplasman ve blokaj kuvveti testleri, uygulanan voltaj ile her iki parametre arasında doğrusal ancak ters orantılı bir ilişki olduğunu göstermiştir. 1 mm kalınlığındaki aktüatör, düşük voltajda yüksek hassasiyet sergilemiş; 2 mm kalınlığı, kuvvet-deplasman dengesi açısından en kararlı sonuçları vermiştir. 3 mm kalınlığındaki yapı, 2800 V'a kadar dayanım göstermiş, yaklaşık 13 μm deplasman ve 92 N blokaj kuvveti ile en yüksek performansa ulaşmıştır.

Sonuç olarak, seramik kalınlığının, ön stres seviyesinin ve entegrasyon yönteminin piezoelektrik aktüatör performansında belirleyici parametreler olduğu ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, geliştirilen yapıların hassas konumlandırma, titreşim kontrolü, enerji dönüştürücü sistemler ve mikro-mekanik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik Seramik, PZT-5H, Yığın Aktüatör, Deplasman, Blokaj Kuvveti, Ön stres.

ABSTRACT

In this study, stack-type piezoelectric actuators were fabricated, integrated, and characterized using PZT-5H ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$)-based piezoelectric ceramics. The main objective of this research was to investigate the effects of ceramic layer thickness, preload level, bonding and integration type on the electromechanical performance of the actuators and to determine the optimum operating conditions.

The fabrication process included powder pressing, binder burnout, sintering, electrode coating, poling, and mechanical integration. The binder removal step ensured the controlled elimination of organic residues, while sintering resulted in a dense and homogeneous microstructure. XRD analyses confirmed the formation of a single perovskite phase, and SEM observations revealed well-sintered, fine-grained ceramics with minimal porosity. The measured d_{33} coefficient (~ 666 pC/N) verified the high piezoelectric activity typical of soft PZT-5H compositions.

After poling, the ceramic rings were assembled using a screw-based integration technique, and silicone encapsulation was applied to prevent electrical arcing and mechanical cracking. Preload experiments (5, 10, and 15 N) revealed that a 10 N preload provided the best mechanical stability—lower values led to relaxation, while higher stresses caused ceramic fracture.

Stack actuators with different ceramic thicknesses (1 mm, 2 mm, and 3 mm) were fabricated while keeping the total active thickness constant at 12 mm. The displacement and blocking force measurements showed a linear yet inversely proportional relationship between these two parameters. The 1 mm-thick actuator demonstrated high sensitivity under low voltage, while the 2 mm actuator exhibited the most balanced electromechanical response. The 3 mm-thick actuator achieved the best overall performance, sustaining voltages up to 2800 V and generating a maximum displacement of ~ 13 μm and a blocking force of ~ 92 N.

In conclusion, the study demonstrates that ceramic thickness, preload level, and integration design are key parameters determining the mechanical and electrical behavior of piezoelectric stack actuators. The findings highlight the potential of the developed PZT-5H-based actuators for precision positioning, vibration control, energy conversion, and micro-mechanical systems in advanced engineering applications.

Keywords: Piezoelectric Ceramic, PZT-5H, Stack Actuator, Displacement, Blocking Force, Preload.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya başladığım ilk günden bugüne kadar bilgi, tecrübe ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Salim Levent AKTUĞ'a ve fikir ve önerilerinden büyük fayda gördüğüm, kendimi geliştirmemde büyük katkısı olan değerli eş danışmanım Dr. Yusuf ÖZTÜRK'e göstermiş oldukları ilgi ve desteklerinden dolayı en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan, yardım eden, Kıdemli Uzman Araştırmacı Aydın Süleyman GÜZEL'e anlayışını ve desteğini esirgemediği için içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarında bana destek olan, yol gösteren, tecrübelerini aktaran, manevi desteğini hissettiren Baş Teknisyen Bilal ALCAN'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları boyunca bana hep destek olan, en çok güldüren, enerjisinden güç aldığım, çalışmalarında değerli katkıları olan sevgili arkadaşım Hilal ÇETİN'e gönülden teşekkür ederim.

Sakinliği ile her anımda desteğini hiç esirgemeyen, her zaman sevgisiyle yanımda olan, güler yüzünden güç aldığım annem Uzm. Ayşe YAKAR'a, ideallerime ulaşmamda beni hep destekleyen, sevgi ve ilgisini daima yanımda hissettiğim, beni çiçeği olarak gören babam Prof. Dr. Coşkun YAKAR'a, bana mükemmel bir abi olmanın yanında en yakın arkadaşım da olabilen, neşe kaynağım abim Fatih Selim YAKAR'a, tanıdığım ilk günden bu yana beni en çok düşünen, sevgisini kalpten hissettiğim, kız kardeşim olan Nevra GÜRSES YAKAR'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 1004- Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı kapsamında yürütülen 20AG018 numaralı “Yüksek Frekanslı Fren Gürültüsü Problemi için Aktif Gürültü Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi” başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir. Destekleri için teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
2.1. Piezoelektrik Özellik	3
2.2. PZT Tabanlı Piezoelektrik Malzemeler	5
2.3. Aktüatör Kavramı ve Tarihçesi	6
2.3.1. Aktüatörlerin Genel Tanımı	6
2.3.2. Aktüatörlerin Endüstriyel Gelişimi ve Uygulamaları	7
2.3.3. Akıllı Malzeme Temelli Aktüatörler	9
2.3.4. Aktüatörlerin Gelecek Perspektifi	9
2.4. Piezoelektrik Aktüatör Çeşitleri	11
2.4.1. Disk ve Halka Tipi Aktüatörler	11
2.4.2. Bimorf ve Monomorf Yapılar	13
2.4.3. Yüzey Dalga Aktüatörleri	14
2.4.4. Yığın Tipi (Stack) Piezoelektrik Aktüatörler	16
2.5. Yığın Tipi (Stack) Piezoelektrik Aktüatörler	17
2.5.1. Yapı ve Çalışma Prensibi	18
2.5.2. Avantaj ve Dezavantajlar	19
2.5.3. Malzeme Seçimi	19
2.5.4. Tipik Uygulama Alanları	20
2.6. Piezoelektrik Yığın Aktüatörlerin Tasarım İlkeleri	21
2.6.1. Aktüatör Geometrisinin Performansa Etkisi	22
2.6.2. Elektrot Dizilimi ve Polarizasyon Yönelimi	22
2.6.3. Yapısal Gömülülük ve Kompozit Yapılar	23
3. ÇALIŞMANIN AMACI	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
4.1. Halka Şeklindeki Piezoelektrik Seramiklerin Üretimi	26
4.2. Piezoelektrik Yığın Aktüatör Üretimi	32
4.3. Deplasman (Yer değiştirme) Ölçümü	35
4.4. Blokaj Kuvveti Ölçümü	36
5. SONUÇLAR	38
5.1. Piezoelektrik Seramiklerin Yapısal Karakterizasyonu	38
5.1.1. X-Işınları Kırınımı (XRD) Analizi	38
5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	39
5.2. Entegrasyon Koşullarının Optimizasyonu	41
5.2.1. Piezoelektrik Seramiklerin Geometrisi	41
5.2.2. Enkapsülasyon (Silikon Uygulaması)	46
5.2.3. Entegrasyon Tipi (Vidalı/Vidasız)	48

5.2.4. Yapışkan (İletken Yapıştırıcı) Kullanımı	51
5.2.5. Ön Stres Uygulamasının Etkisi	54
5.3. Aktüatör Performansının Değerlendirilmesi	58
5.3.1. Deplasman Analizi	61
5.3.2. Blokaj Kuvveti Analizi	70
5.3.3. Seramik Kalınlığının Aktüatör Performansına Etkisi – Genel Değerlendirme	80
5.3.4. Deplasman–Blokaj Kuvveti İlişkisi ve Kalınlığa Bağlı Karşılaştırma	81
6. GENEL SONUÇLAR	86
7. UYGULAMA ALANLARI VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	95
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	96

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
d_{33}	: Piezoelektrik katsayısı
E	: Elektrik alan
EAP	: Elektroaktif polimerler
F_r	: Rezonans frekansı
F_z	: Antirezonans frekansı
g	: Gram
IDT	: İnterdigital transdüser elektrotları
kHz	: Kilohertz
KNN	: Potasyum sodyum niyobat
K_{33}^T	: Dielektrik katsayısı
kV	: Kilovolt
L_o	: Başlangıç uzunluğu
MEMS	: Mikro elektro mekanik sistemler
mm	: Milimetre
MPB	: Morfotropik faz sınırı
N	: Newton
nF	: Nanofarad
P	: Kutuplanma yönü
$PbTiO_3$	: Kurşun titanat
$PbZrO_3$	: Kurşun zirkonat
pC	: Pikocoulomb
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PZT	: Kurşun zirkonat titanat
Q_m	: Mekanik kalite faktörü
SAW	: Yüzey akustik dalga
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMA	: Şekil hafızalı alaşımlar
Ti	: Titanyum
V	: Volt
XRD	: X-Işını Kırınımı
Zr:	: Zirkonyum
°	: Derece
°C	: Santigrat derece
ΔL	: Uzama (deplasman)
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Domain hareketlerinin gösterimi: (a) Kutuplama öncesi, (b) Kutuplama, (c) Kutuplama sonrası.	4
Şekil 2.2: Akıllı aktüatör sistemlerinde sensör verileri kullanılarak arıza tahmini için tipik veri akış şeması.	8
Şekil 2.3: Disk/halka tipi piezoelektrik aktüatör yapısının şematik gösterimi: (a) elektrodlu seramik disk, (b) lineer genleşme/yayılma modu, (c) bükülme modları.	12
Şekil 2.4: Unimorf (tek katmanlı) ve bimorf (çift katmanlı) piezoelektrik aktüatör yapılarına ait şematik gösterim.	14
Şekil 2.5: IDT tabanlı bir yüzey akustik dalga (SAW) aktüatörünün temel yapısı ve dalga yayılım prensibi.	15
Şekil 2.6: (a) Boyuna Yığın (Longitudinal Stack) Aktüatör, (b) Kesme Yığın (Shear Stack) Aktüatör, (c) Kare Kesitli Piezo Yığın Aktüatör, (d) Dairesel Kesitli Piezo Yığın Aktüatör, (e) Halka Tipi Piezo Yığın Aktüatör ve (f) Paralel Ön Gerilmeli Piezo Yığın Aktüatör (PPA) yapılarına ait şematik gösterimler.	17
Şekil 2.7: Piezo yığın tasarımı.	18
Şekil 2.8: Yığın tipi piezoelektrik aktüatörün kompozit gövde içine gömülü temel tasarımı (şematik).	24
Şekil 4.1: Aktüatör tasarımı akış şeması.	26
Şekil 4.2: Piezoelektrik seramik üretim akış şeması.	26
Şekil 4.3: Piezoelektrik seramik malzeme üretiminde kullanılan metal kalıp.	27
Şekil 4.4: Piezoelektrik seramik malzeme üretiminde kullanılan pres.	27
Şekil 4.5: Presleme sonucu elde edilen numune örnekleri.	28
Şekil 4.6: Sinterlenmiş numuneler.	29
Şekil 4.7: Çift taraflı laplama cihazı.	29
Şekil 4.8: Serigraf baskı.	30
Şekil 4.9: Kutuplama düzeneği.	30
Şekil 4.10: d_{33} ölçüm düzeneği.	31
Şekil 4.11: Piezoelektrik aktüatör üretim aşamaları.	33
Şekil 4.12: Farklı kalınlıklarda seramikler kullanılarak oluşturulan aktüatör tasarımları: a) 1 mm b) 2 mm c) 3 mm.	35
Şekil 4.13: Deplasman ölçüm düzeneği.	35
Şekil 4.14: Blokaj kuvveti ölçüm düzeneği.	37
Şekil 5.1: Ticari yumuşak PZT-5H tozu XRD paterni.	39
Şekil 5.2: (Yumuşak matris) piezoelektrik seramik SEM kırık yüzey görüntüleri: a) x1000 b) x2500	40
Şekil 5.3: Piezoelektrik aktüatör tasarım entegrasyonu.	41
Şekil 5.4: Farklı piezoelektrik aktüatör tasarım entegrasyonları: a) 7 katmanlı, 3 mm katman kalınlığı b) 10 katmanlı, 2 mm katman kalınlığı.	42
Şekil 5.5: Kare formda aktüatör oluşturmak için kullanılan kalıp.	42
Şekil 5.6: Piezoelektrik seramik ve aktüatör yapıların deplasman ölçüm öncesi ve sonrası rezonans, antirezonans, empedans ve kapasitans değerleri.	43

Şekil 5.7:	Piezoelektrik aktüatör yapılarının elektriksel voltaja bağlı deplasman ölçüm sonuçları (a) A-7-10-3-Cu _{0,5} -P aktüatör numunesi, (b) A-10-10-2-Cu _{0,5} -P aktüatör numunesi ve (c) İki aktüatör yapısının birlikte gösterimi.	44
Şekil 5.8:	Silindirik formda aktüatör oluşturmak için kullanılan sistem.	45
Şekil 5.9:	Empedans Kazanç Faz Analizörü.	46
Şekil 5.10:	Silikon enkapsülasyonu uygulanmış çok katmanlı halka tip aktüatör.	48
Şekil 5.11:	Vidalı (a) ve vidasız (b) entegrasyon yöntemleriyle üretilen çok katmanlı halka tip piezoelektrik aktüatörlerin görünümü.	50
Şekil 5.12:	(a) Yapıştırıcı uygulanarak hazırlanmış çok katmanlı halka tip piezoelektrik aktüatörün üretim aşaması, (b) silikon enkapsülasyon sonrası tamamlanmış son hali.	53
Şekil 5.13:	(a) 25 N (b) 20 N ön yük uygulanmış aktüatörlerde gözlenen seramik kırıkları (kırmızı dairelerle gösterilmiştir).	57
Şekil 5.14:	1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.	62
Şekil 5.15:	2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.	65
Şekil 5.16:	3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.	69
Şekil 5.17:	1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti eğrileri.	72
Şekil 5.18:	2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti eğrileri.	75
Şekil 5.19:	3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti eğrileri.	79
Şekil 5.20:	1 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.	82
Şekil 5.21:	2 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.	83
Şekil 5.22:	3 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.	83

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Aktüatör gelişiminde öne çıkan gelecek eğilimleri.	10
Tablo 4.1: Seramiklerin piezoelektrik özellikleri.	32
Tablo 5.1: Silikon enkapsülasyonu uygulanmış ve uygulanmamış halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması: AR4-6-2-15 enkapsülasyonsuz; AR12-6-2-15-S silikon enkapsülasyonlu aktüatör.	47
Tablo 5.2: Vidalı (AR4-6-2-15) ve vidasız (AR5-6-2-Y-15-VZ) entegrasyon yöntemiyle üretilen halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.	49
Tablo 5.3: Yapışkanlı (AR13-6-2-15-Y-S) ve yapışkansı (AR12-6-2-15-S) halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.	52
Tablo 5.4: Farklı ön stres seviyelerine sahip halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.	56
Tablo 5.5: 10 N ön yük altında farklı seramik kalınlıklarına sahip halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.	59
Tablo 5.6: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.	61
Tablo 5.7: 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.	63
Tablo 5.8: 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.	67
Tablo 5.9: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.	70
Tablo 5.10: 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.	73
Tablo 5.11: 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.	76
Tablo 5.12: Blokaj kuvveti ve deplasman sonuçları.	80

1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler, elektriksel enerjiyi mekanik harekete yüksek verimlilikle dönüştürebilme yetenekleri sayesinde, modern akıllı sistemlerin ve hassas aktüatör teknolojilerinin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Hızlı tepki süreleri, yüksek kuvvet yoğunluğu, nanometre düzeyinde konumlandırma hassasiyeti ve elektromanyetik alanlara karşı direnç gibi üstün özellikleri, bu malzemeleri robotik, optik, medikal cihazlar ve otomotiv gibi birçok ileri teknoloji alanında vazgeçilmez kılmaktadır [Mohith vd., 2020].

Tek katmanlı piezoelektrik elemanların üretebildiği deplasman, genellikle birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla, çok sayıda ince piezoelektrik seramik katmanın mekanik olarak seri ve elektriksel olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulan çok katmanlı yığın aktüatörler (multilayer stack actuators) geliştirilmiştir. Bu tasarımda, her bir katmanın ürettiği küçük deformasyonlar birikerek toplanmakta, bu sayede hem mikron düzeyinde geniş bir yer değiştirme aralığı hem de yüzlerce Newton'a varan yüksek blokaj (engelleme) kuvvetleri elde edilebilmektedir [Zhang vd., 2017], [Wang vd., 2019].

Ancak, bu aktüatörlerin nihai performansı, kullanılan seramiğin yapısal özelliklerinden, katman kalınlığı, geometri, uygulanan ön gerilme (pre-stress) ve entegrasyon yöntemi gibi çok sayıda tasarım ve üretim parametresine kritik düzeyde bağlı olmaktadır. Bu parametrelerin optimize edilmemesi, aktüatörün potansiyel performansının altında kalmasına, kararsız çalışmasına veya düşük enerji verimliliğine sahip olmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, bu parametrelerin performans üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesi ve anlaşılması, güvenilir ve yüksek verimli aktüatörlerin geliştirilmesi için temel bir gereklilik olarak görülmektedir.

Bu tezin temel amacı, PZT-5H sınıfı piezoelektrik tozlar kullanılarak seramiklerin üretimini sağlamak, bu seramikler ile çok katmanlı yığın aktüatörler geliştirmek ve bu aktüatörlerin performansını sistematik bir yaklaşımla karakterize ederek iyileştirmektir. Bu amaca ulaşmak doğrultusunda, çalışmanın kapsamı şu şekilde belirlenmiştir:

Öncelikle, kullanılan PZT seramiklerin kristal, mikroyapısal özellikleri (XRD, SEM) ve piezoelektriksel özellikleri incelenerek malzeme ve üretim kalitesi doğrulanmıştır.

Ardından, aktüatör performansını etkileyen kritik entegrasyon koşulları çalışılmıştır. Bu kapsamda seramik geometrisi, enkapsülasyon, entegrasyon tipi (vidalı/vidasız), yapıştırıcı kullanımı ve ön gerilme seviyesi gibi parametreler sistematik olarak incelenmiş ve optimize edilmiştir.

Son olarak, geliştirilen aktüatörlerin temel performans metrikleri olan deplasman ve blokaj kuvveti detaylı olarak analiz edilmiş ve tasarım parametrelerinin bu çıktılar üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Bu çalışma ile daha düşük sürüş voltajlarında yüksek enerji verimliliği ve performans sunan optimize edilmiş aktüatör tasarımlarının ortaya konulması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

2.1 Piezoelektrik Özellik

Piezoelektrik özellik, merkezi simetriye sahip olmayan kristallerde ortaya çıkan bir özelliktir. Bu özellikteki kristaller, mekanik gerilmeye ya da titreşime maruz kaldıklarında elektriksel gerilim oluştururlar. Bu durum “doğrudan piezoelektrik etki” olarak bilinir. Bunun tersine, piezoelektrik malzemeler kendilerine uygulanan bir elektrik alan sonucunda boyutlarında uzama veya kısalma gibi değişimler meydana gelebilir. Bu da “dolaylı piezoelektrik etki” olarak adlandırılır [Ergun vd., 2006].

Kristal yapıdaki 32 gruptan 21’inde piezoelektrik özellik bulunur. Bu gruba giren malzemelere oksitler, sülfatlar, fosfatlar örnek verilebilir. Bu 21 yapının 10’u birim kafes yapılarında dipol içerir (çift kutupluluk) ve ısı değişimleri yüzeylerinde elektrik yükü oluşturabilirler. Bu tür malzemeler piezoelektrik malzemeler olarak adlandırılır [Tressler vd., 1995], [Ergun vd., 2006].

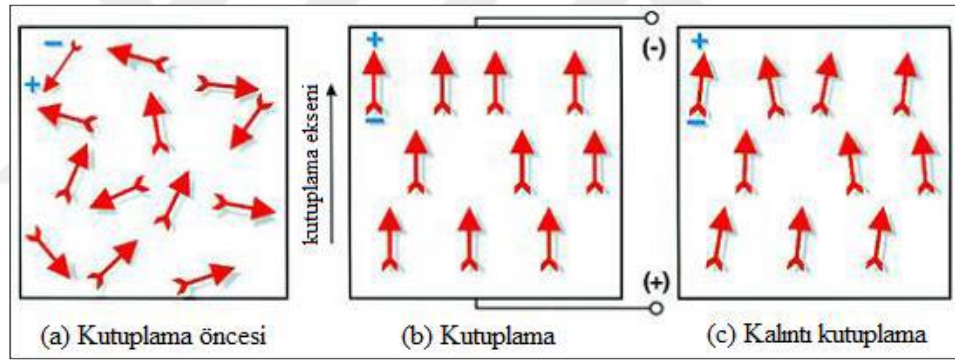
Elektrik alanın etkisinde bulunmayan katı maddelerde pozitif ve negatif yükler sayıca birbirine eşit olup, bu durum elektriksel olarak nötr bir denge hali oluşturur. Teorikte, bu dengenin bozulması yapıda meydana gelen boyutsal şekil değişimi ile mümkün olur ve malzeme yüzeylerinde elektriksel yükler oluşur. Elektrik yüklerinin oluşumunda en önemli faktörlerden biri kristal simetrisidir. Piezoelektrik malzemelerde kristal yönelme ile uygulanan gerilme sonucu ortaya çıkan şekil değişiminin yönü arasındaki açılar piezoelektrik malzemelerin elektriksel yanıtını doğrudan etkiler. Yani birim şekil değişimi tensörel büyüklük olarak ifade edilip zıt yönlerde aynı değere sahiptir ($\epsilon_{12} = \epsilon_{21}$). Öte yandan, piezoelektrik malzemelerde meydana gelen elektriksel kutuplama ve elektrik alanı vektörel büyüklüklerdir. Dolayısıyla değerleri yöne bağlıdır ve kristal yapı ile değişir. Bu nedenle malzemelerin ayırt edici özelliklerindendir. Yani aynı gerilme değerinin farklı malzemelere uygulanması durumunda malzemenin kristal yapısına bağlı olarak farklı kutuplanmalar meydana gelir [Tressler vd., 1995], [Ergun vd., 2006].

İzotropik malzemelerde, elektrik alan gerilmeye ya da deformasyona neden olup zıt yönlerde birbirlerine eşit değerdedirler. İzotropik olmayan malzemelerde bu durum

farklılık gösterir. Bu özellik yalnızca dielektrik sabiti yüksek olan ferroelektrik malzemelerde gözlemlenir [Tressler vd., 1995], [Ergun vd., 2006].

Yüksek elektrik alanına maruz kaldığında kristal yapısı ani şekilde kutuplanabilen malzemelere ferroelektrik malzemeler denir. Bu malzemeler piezoelektrik malzemelerin bir alt grubudur. Piezoelektrik malzemelerin yüksek elektrik alan altında çok hızlı şekilde kutuplanabilmesine ferroelektrik özellik denir. Yani bazı piezoelektrik malzemeler aynı zamanda ferroelektriktir.

Ferroelektrik seramikler, toplam elastik enerjilerini en aza indirecek şekilde, her tane içerisinde dipollerinin rastgele yönlendiği polarize domainler (bölgeler) içerir (Şekil 2.1a). Bu rastgele dizilim sebebiyle ferroelektrik seramikler direkt olarak piezoelektrik özellik sergilemezler. Bu malzemelere, Küri sıcaklığının altında ve belli bir eşik değerinin üzerinde elektrik alan uygulandığında yani kutuplama gerçekleştiğinde malzemeler piezoelektrik özellik sergileyebilir.



Şekil 2.1: Domain hareketlerinin gösterimi: (a) Kutuplama öncesi, (b) Kutuplama, (c) Kutuplama sonrası [APC International, 2002].

Piezoelektrik seramiklerin kutuplanma işlemi, yüzeylerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla uygulanan doğru akım sayesinde malzeme içinde güçlü bir elektrik alan oluşturulmasıyla gerçekleştirilir. Bu alan, iç yapıda bulunan dipollerin belirli bir doğrultuda hizalanmasına neden olur (Şekil 2.1b). Kutuplama süreci boyunca malzemenin mikroyapısındaki domain (bölge) yapıları yön değiştirerek izotropik özelliklerini yitirir ve anizotropik bir düzene geçer. Elektrik alan kaldırıldığında, bazı bölgeler orijinal konumuna dönebilse de büyük bir kısmı kutuplanmış konumda kalmaya devam eder. Bu kalıcı yönelim durumu "kalıntı kutuplama" olarak tanımlanır (Şekil 2.1c). Dolayısıyla, piezoelektrik özellik gösterebilmesi için seramik malzemenin başlangıçtaki izotropik yapısının elektriksel olarak yönlendirilmiş bir

düzene dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sonucunda, çok sayıda kristal taneciğin oluşturduğu yapı genelinde belirli bir yönelime sahip net dipol momenti meydana gelir [APC International, 2002].

2.2. PZT Tabanlı Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik seramikler arasında özellikle kurşun zirkonat titanat (PZT) sıklıkla tercih edilir. Endüstriyel uygulamalarda en iyi şekilde karakterize edilmiş bir malzeme olan PZT, perovskit kristal yapısına sahip bir katı çözüldür. Temel bileşenleri kurşun zirkonat (PbZrO_3) ve kurşun titanat (PbTiO_3) olan bu malzeme, bu iki bileşenin oranına bağlı olarak farklı piezoelektrik özellikler gösterir. Zirkonyum (Zr) ve titanyum (Ti) oranındaki farklılıklar, PZT'nin piezoelektrik yük sabiti, dielektrik geçirgenliği, mekanik kalite faktörü ve Curie sıcaklığı gibi temel fiziksel özelliklerini önemli boyutta etkiler. Bu nedenle PZT, uygulamaya göre özelleştirilebilen bir malzeme olup piezoelektrik aktüatör teknolojisinde önemli bir rol oynar [Kumar vd., 2024].

PZT malzemelerin en yaygın türlerinden olan PZT-4, PZT-5H ve PZT-8, mekanik dayanım, piezoelektrik hassasiyet ve frekans tepki özellikleri bakımından farklı karakterlere sahiptir. Örneğin, PZT-5H, yüksek piezo katsayısı ve dielektrik sabiti nedeniyle yüksek hassasiyetli mikro-konumlandırma uygulamalarında kullanılır. PZT-4 ve PZT-8, yüksek güç aktarımı gereken transdüser sistemlerinde, ultrasonik uygulamalarda veya dayanıklılığın ön planda olduğu durumlarda tercih edilmektedir [Xue vd., 2025], [Liu vd., 2024].

Bu malzemelerin seçiminde sadece piezoelektrik katsayılar değil; ısıl kararlılık, yorulma ömrü ve çevresel koşullara duyarlılık da belirleyici olmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, örneğin PZT-8'in yüksek mekanik kalite faktörü sayesinde yüksek frekanslı ve rezonanslı uygulamalarda performansını daha uzun süre koruyabildiği belirtilmiştir. Diğer yandan, PZT-5H gibi yumuşak seramikler yüksek hassasiyet sağlasa da ısıl bozulmalara karşı daha yatkın olduğu görülmektedir [Kumar vd., 2024].

PZT tipi piezoelektrik malzeme seçimi, sadece teorik değerlerle yapılmamalıdır. Seçilecek malzeme; ortamın sıcaklığı, nemi, ne kadar süre çalışacağı gibi koşullara, onu sürececek elektronik devreye ve uzun vadeli kararlılığına göre belirlenmelidir. Bu

değerlendirme yapıldığında, piezoelektrik aktüatör tasarım sürecinde hem malzeme doğru seçilmiş olur hem de sistemin verimliliği daha yüksek olur.

2.3. Aktüatör Kavramı ve Tarihçesi

2.3.1. Aktüatörlerin Genel Tanımı

Aktüatörler, dışarıdan uygulanan bir kontrol sinyali yardımıyla farklı türdeki enerjileri (elektrik, hidrolik, pnömatik vb.) mekanik enerjiye çeviren ve bu sayede belirli bir hareket veya kuvvet oluşturan elektromekanik bileşenlerdir. Mekanik bir sistemin kontrollü biçimde hareket etmesi için gerekli olan fiziksel çıktıyı sağlayan aktüatörler, modern mühendislik sistemlerinin en temel yapı taşlarından biridir. Temel olarak bir aktüatör, üç ana bileşenden oluşur: (1) enerji kaynağı, (2) kontrol birimi ve (3) hareketli eleman ya da kuvvet çıkışı sağlayan yapı.

Aktüatör sistemleri, komut verilen bir hedefe göre lineer veya dairesel hareket gerçekleştirebilirler. Günümüzde en çok kullanılan aktüatör türleri arasında elektrik motorları, solenoidler, pnömatik pistonlar, hidrolik silindirler ve piezoelektrik aktüatörler yer almaktadır. Özellikle mikro ölçekte hassas hareket gerektiren uygulamalarda, piezoelektrik aktüatörler öne çıkmaktadır. Bu tür aktüatörler, uygulanan elektriksel potansiyele karşılık olarak kristal yapılarının deformasyonu ile yüksek hassasiyette (nanometre ölçeğinde) yer değiştirme üretirler [Lee vd., 2023].

Aktüatörlerin sınıflandırılması genellikle enerji türüne göre yapılmakla birlikte, kontrol dinamiklerine ve uygulama alanına göre de çeşitlilik gösterir. Örneğin, yüksek hız ve düşük hassasiyet gerektiren endüstriyel uygulamalarda pnömatik ve hidrolik sistemler tercih edilirken; yüksek hassasiyet ve kısa strok (yer değiştirme) mesafesi gerektiren optik hizalama, mikro enjeksiyon veya biyomedikal sistemlerde piezoelektrik temelli aktüatörler tercih edilmektedir [Kühn ve Henning, 2022].

Ayrıca aktüatörlerin dinamik performansları; tepkime süresi, frekans cevabı, enerji tüketimi, geri bildirim (feedback) kapasitesi ve konumlama hassasiyeti gibi faktörlerle değerlendirilir. Özellikle “akıllı sistemler” bağlamında, sensör ve kontrol algoritmaları ile entegre edilen aktüatörler, sadece hareket üretmekle kalmayıp, sistemin durumunu da algılayarak geri bildirimli kontrol imkânı sunmaktadır [Zhou vd., 2024].

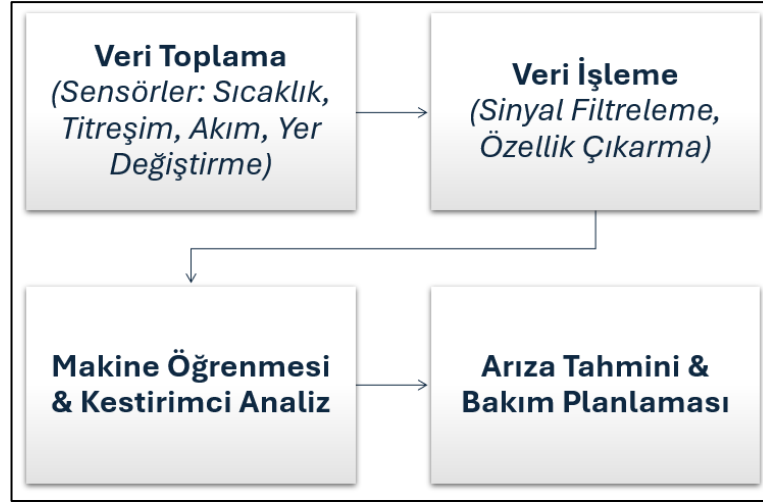
Son yıllarda geliştirilen akıllı malzeme temelli aktüatörler, klasik sistemlerin ötesine geçerek çok daha küçük hacimde daha yüksek hassasiyet ve işlevsellik sağlamaktadır. Bu kapsamda piezoelektrik, manyeto-striktif, elektrostriktif ve termoaktif aktüatör teknolojileri geleceğin mekatronik sistemleri için temel bileşenler haline gelmiştir **[Park ve Yamamoto, 2023]**.

2.3.2. Aktüatörlerin Endüstriyel Gelişimi ve Uygulamaları

Aktüatör teknolojilerinin endüstriyel gelişimi, 20. yüzyılın başından itibaren otomasyon sistemlerinin evrimiyle paralel ilerlemiştir. İlk uygulamalarda, özellikle pnömatik ve hidrolik aktüatörler üretim hatlarında basit mekanik hareketleri sağlamak için kullanılmıştır. Elektrikli aktüatörlerin devreye girmesiyle birlikte sistemler daha kontrollü, daha hızlı ve daha hassas hale gelmiştir **[Kühn ve Henning, 2015]**.

1980’li yıllardan itibaren, robotik ve mekatronik sistemlerin yükselişiyle birlikte, yüksek hassasiyetli lineer ve dönel aktüatörlere olan ihtiyaç artmış; bu da piezoelektrik, elektrostatik ve manyetostriktif gibi ileri teknolojiye sahip aktüatörlerin sanayide kullanılmasını mümkün kılmıştır. Özellikle CNC makineleri, optik hizalama sistemleri, mikroişleme teknolojileri ve medikal cihazlar gibi alanlarda piezoelektrik aktüatörler öne çıkmıştır **[Park ve Yamamoto, 2023]**.

Son yıllarda, Endüstri 4.0 kavramı ile birlikte aktüatör sistemleri sadece mekanik hareket sağlayan elemanlar olmaktan çıkarak; veri toplayan, analiz eden ve otonom kararlar verebilen akıllı sistem bileşenleri hâline gelmiştir. Bu bağlamda sensör ve kontrol algoritmalarıyla entegre çalışan “akıllı aktüatör” sistemleri, üretim hatlarında enerji verimliliğini artırmakta ve durum izleme sayesinde beklenmeyen arızaları önceden tahmin edebilmektedir **[Zhou vd., 2024]**, **[Li vd., 2023]**. Bu tür sistemlerde gömülü sensörler, aktüatörün sıcaklık, titreşim, akım ve yer değiştirme verilerini sürekli izleyerek anormal davranışları tespit eder. Bu veriler, makine öğrenmesi veya kestirimci bakım algoritmalarıyla analiz edilerek aşınma, gevşeme veya elektriksel arıza gibi olası hatalar erkenden belirlenir ve bakım planlaması optimize edilir **[Li vd., 2023]**. Böylece üretim süreçlerinde plansız duruş süreleri azalırken, işletme maliyetleri de düşmektedir.



Şekil 2.2: Akıllı aktüatör sistemlerinde sensör verileri kullanılarak arıza tahmini için tipik veri akış şeması [Zhou vd., 2024], [Li vd., 2023].

Akıllı aktüatörlerde arıza tahmini süreci, Şekil 2.2’de şematik olarak gösterildiği üzere, sensör tabanlı veri toplama, sinyal işleme, makine öğrenmesi tabanlı analiz ve kestirimci bakım adımlarından oluşur. İlk aşamada gömülü sensörler, aktüatörün sıcaklık, titreşim, akım ve yer değiştirme gibi çalışma parametrelerini sürekli izler. Bu veriler, sinyal filtreleme ve özellik çıkarımı yöntemleriyle işlenerek makine öğrenmesi algoritmalarına uygun veri setleri hâline getirilir. Ardından, denetimli veya denetimsiz öğrenme tabanlı kestirimci analizler kullanılarak aşınma, gevşeme veya dielektrik arıza gibi olası bozulmalar erkenden tespit edilir. Böylece bakım planlaması optimize edilirken, sistemin plansız duruş süreleri minimuma indirilir ve işletme verimliliği artırılır [Zhou vd., 2024], [Li vd., 2023].

Özellikle uzay, biyomedikal ve mikromekanik uygulamalarda, çok katmanlı (multilayer) piezoelektrik aktüatörler ön plana çıkmaktadır. Bu aktüatörler, düşük enerji tüketimi, yüksek kuvvet üretimi ve mikron-altı hassasiyetleriyle ileri teknoloji sistemlerin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir [Lee vd., 2024].

Bu doğrultuda, geleneksel mekanik aktüatörlerin yerini, aktif malzeme özelliklerinden yararlanan akıllı sistemler almaya başlamıştır. Piezoelektrik seramikler, şekil bellekli alaşımlar, elektroaktif polimerler ve manyetoreolojik sıvılar gibi akıllı malzemeler, hareket üretimini malzemenin iç yapısından elde ederek sistem verimliliğini artırmaktadır. Bu bölümde, akıllı malzeme temelli aktüatörlerin temel ilkeleri ve endüstriyel kullanım örnekleri ele alınacaktır.

2.3.3. Akıllı Malzeme Temelli Aktüatörler

Akıllı malzemeler, çevresel bir uyarana (örneğin sıcaklık, elektrik alan, manyetik alan veya gerinim) tepki vererek yapısal veya fonksiyonel özelliklerini değiştirebilen malzemelerdir. Bu tür malzemelerden üretilen aktüatörler, yalnızca mekanik hareket üretmekle kalmaz, aynı zamanda çevrelerinden gelen sinyalleri algılayabilir, bu nedenle “akıllı sistemlerin” temel bileşenleri olarak kabul edilir [Park ve Yamamoto, 2023].

Akıllı malzeme temelli aktüatörlerde en sık kullanılan yapılar; piezoelektrik seramikler (PZT, KNN), elektroaktif polimerler (EAP), şekil hafızalı alaşımlar (SMA), ve manyetostriktif malzemelerdir. Bu malzemeler, klasik elektromekanik sistemlerin aksine daha kompakt yapılarla daha hızlı tepki süreleri ve daha yüksek çözünürlük sunabilirler [Zhou vd., 2024].

Özellikle piezoelektrik aktüatörler hem uyarı hem de algılama işlevlerini bir arada gerçekleştirebilme yeteneği sayesinde “self-sensing actuator” olarak tanımlanır. Bu yapı, harici sensörlere ihtiyaç duymadan sistemin konum, kuvvet ya da gerinimini doğrudan ölçebilir [Lee vd., 2024]. Bu durum, özellikle mikro robotik, hassas pozisyonlama, medikal cihazlar ve akıllı yapı teknolojilerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Bununla birlikte, çevresel farkındalık kazandırılmış bu aktüatörlerin en önemli avantajları arasında düşük enerji tüketimi, geniş frekans yanıtı ve sistemle kolay entegrasyon bulunmaktadır. Örneğin, manyetostriktif malzemeler titreşim kontrolü ve enerji geri kazanımı gibi alanlarda kullanılabilirken, elektroaktif polimerler yumuşak robotik uygulamalarda yaygınlık kazanmaktadır [Kühn ve Henning, 2015].

2.3.4. Aktüatörlerin Gelecek Perspektifi

Piezoelektrik yığın aktüatörlerin gelişiminde malzeme bilimi, üretim teknolojileri ve kontrol algoritmalarındaki yenilikler belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle kurşunsuz piezoelektrik seramikler (ör. alkali niyobyum bazlı bileşikler) çevre düzenlemeleri ve RoHS uyumluluğu açısından öne çıkmakta, PZT temelli seramiklere alternatif arayışlarını hızlandırmaktadır [Kumar vd., 2024]. Buna ek olarak, piezoelektrik

özelliklerin kararlılığını koruyan nano boyutlu dolgu malzemeleri ve fonksiyonel katkılar da karma malzeme çözümlerini çeşitlendirmektedir.

Üretim teknikleri açısından, 3D baskı tabanlı seramik imalatı ve çok katmanlı sinterleme yöntemleri, karmaşık şekilli ve ince film yapılı yığın aktüatörlerin maliyet-etkin ve hassas üretimini mümkün kılmaktadır. Bu sayede, mikro/nano ölçekli hareket gerektiren biyomedikal cihazlardan optik hizalama sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesi hedeflenmektedir [Zhou vd., 2024].

Bir diğer odak noktası ise histerezis ve kayma (creep) davranışlarının daha doğru modellenmesi ve kompanzasyonu için makine öğrenmesi destekli veri tabanlı kontrol algoritmalarının geliştirilmesidir. Gelişmiş sinir ağları veya hibrit model yaklaşımları sayesinde, piezoelektrik aktüatörlerin doğrusal olmayan davranışlarının gerçek zamanlı düzeltilmesi mümkün hâle gelmektedir [Li vd., 2023]. Bu gelişmeler, hassas konumlandırmada doğruluk sapmalarını minimuma indirme potansiyeli taşımaktadır.

Ayrıca, Endüstri 4.0 odaklı üretim hatlarında aktüatörlerin IoT entegrasyonu, sensör verileriyle desteklenen durum izleme sistemleri ve kestirimci bakım altyapıları, arıza tahmini süreçlerini daha etkin kılmaktadır. Bu sayede plansız duruş süreleri azaltılarak enerji verimliliği artmakta ve bakım maliyetleri optimize edilmektedir [Zhou vd., 2024].

Tablo 2.1: Aktüatör Gelişiminde Öne Çıkan Gelecek Eğilimleri.

Gelecek Eğilimi	Açıklama
Kurşunsuz Piezoelektrikler	Çevre dostu, RoHS uyumlu yeni malzeme arayışları
Nano-Dolgu & Hibrit Kompozitler	Nano katkılarla iyileştirilmiş piezo özellikler ve mekanik dayanım
İleri Üretim Teknikleri	3D baskı, çok katmanlı sinterleme, karmaşık mikro yapıların hassas üretimi
Veri Tabanlı Akıllı Kontrol	Histerezis/creep için makine öğrenmesi destekli kompanzasyon
IoT & Kestirimci Bakım	Durum izleme, arıza tahmini, sensör füzyonu, otonom bakım planlaması
Sürdürülebilirlik & Enerji Verimi	Malzeme optimizasyonu, düşük kayıp, geri dönüşüm odaklı tasarım

Bu doğrultuda piezoelektrik yığın aktüatörlerin geleceğini şekillendiren ana eğilimler **Tablo 2.1**'de derlenerek sunulmuştur. Söz konusu tablo; literatürde öne çıkan malzeme inovasyonu, ileri üretim teknikleri, akıllı kontrol stratejileri ve Endüstri 4.0 uyumlu entegrasyon gibi kritik başlıkları bir arada ele almakta, her eğilimi destekleyen güncel çalışmalara atıfla pekiştirmektedir. Böylelikle yeni nesil aktüatör tasarımlarında disiplinler arası yaklaşımın önemi ve bu alanda var olan araştırma boşlukları net bir şekilde ortaya konmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek performans, çevre dostu malzeme kullanımı, akıllı kontrol, üretimde dijitalleşme ve enerji verimliliği gibi odaklar, piezoelektrik yığın aktüatörlerin geleceğinde çok disiplinli bir yaklaşımın önemini göstermektedir.

2.4. Piezoelektrik Aktüatör Çeşitleri

Piezoelektrik aktüatörler, uygulanan elektrik alanla piezoelektrik malzemelerin şekil değiştirmesi prensibine dayanır ve yüksek hassasiyet, hızlı tepki süresi, düşük enerji tüketimi gibi avantajları sayesinde birçok teknolojik alanda kullanılmaktadır. Bu aktüatörler; geometrik yapılarına, deformasyon yönlerine ve uygulama alanlarına göre farklı tiplere ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan çeşitler arasında disk ve halka tipi aktüatörler, bimorf ve monomorf yapılar, yüzey dalga (ultrasonik) motorlar, yığın tipi (stack) aktüatörler, amplified (flextensional) sistemler ve inchworm (yürüme tipi) adımli aktüatörler yer alır. Her bir yapı, farklı strok mesafeleri, kuvvet üretimi ve frekans tepkisi sağlayacak şekilde tasarlanır ve belirli uygulamalara özel avantajlar sunar. Örneğin, yığın tipi aktüatörler yüksek kuvvet ve mikron altı konumlama sağlarken, ultrasonik motorlar sessiz ve hızlı odaklama sistemleri için uygundur [Uchino, 2008], [Uchino, 2015].

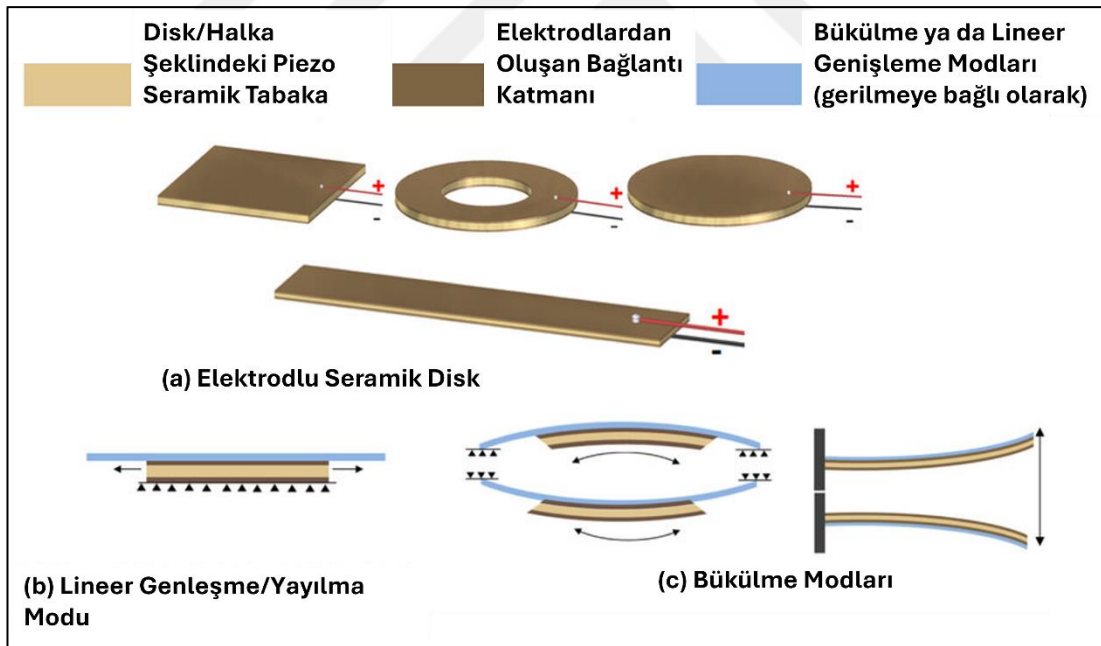
2.4.1. Disk ve Halka Tipi Aktüatörler

Disk ve halka tipi piezoelektrik aktüatörler, piezoseramiklerin dairesel veya halka formunda şekillendirilerek uygulanan elektrik alanla eksenel ve/veya radyal yönlerde deformasyon oluşturan sistemlerdir. Bu yapıların temel avantajı, yüksek frekanslı çalışmalarda düşük enerji tüketimiyle yüksek verim elde edebilmeleridir. Piezo diskler genellikle eksenel (out-of-plane) titreşim üretmek için kullanılırken, halka formundaki

aktüatörler daha çok mikropompalar, valf sistemleri ve mikroakışkan uygulamalarda tercih edilmektedir [Zhou vd., 2024].

Bu aktüatörlerin işleyişi, piezoseramik levhanın bir diyaframa yapıştırılmasıyla başlar; elektrik alan uygulandığında oluşan deformasyon, bu diyafram üzerinden sıvı ya da gazın hareketini sağlar. Bu prensip, özellikle kompakt tasarıma sahip mikropompa sistemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca halka tipi piezoelektrik yapılar, lokal rezonans üretme kabiliyetiyle hassas titreşimli sistemlerde etkin şekilde kullanılabilir [Huang ve Lu, 2021].

Disk ve halka tipi yapılar, kompaktlıkları, düşük elektromanyetik parazit üretmeleri, hızlı yanıt süreleri ve kolay entegre edilebilir olmaları sayesinde otomotiv, biyomedikal ve mikro mekatronik sistemlerde yaygınlaşmıştır. Ayrıca modern uygulamalarda bu yapılar, geniş frekans aralıklarında kararlı çalışma performansı göstermektedir [Doğan vd., 2025].



Şekil 2.3: Disk/halka tipi piezoelektrik aktüatör yapısının şematik gösterimi: (a) elektrodlu seramik disk, (b) lineer genişleme/yayılma modu, (c) bükülme modları [Sherrit vd., 2009].

Disk veya halka tipi piezoelektrik aktüatörler, genellikle dairesel bir piezo seramik tabakanın her iki yüzüne yerleştirilen elektrotlar yardımıyla çalışır. Bu yapıda, uygulanan elektrik alan, piezoelektrik tabakanın radyal veya eksenel yönde

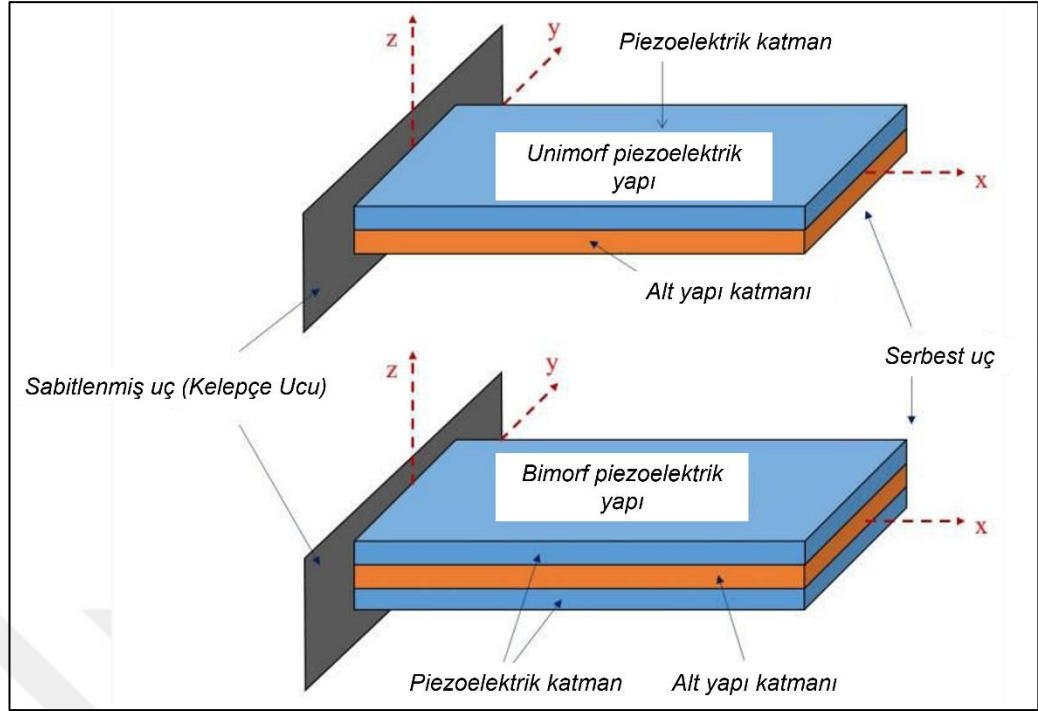
genişlemesine veya bükülmesine neden olarak istenen mekanik hareketi üretir. Halka formu, özellikle iç ve dış çap boyunca deformasyonun kontrollü bir şekilde yayılmasına olanak tanır. Bu tür yapıların en önemli avantajı, yüksek frekanslı titreşimlerin elde edilebilmesi ve düşük profil tasarımıyla kompakt alanlarda kolayca entegre edilebilmesidir [Sherrit vd., 2009]. Şekil 2.3'te bir unimorf piezo disk aktüatörün temel konfigürasyonu, aktüasyon modları ve elektrolama düzeni şematik olarak gösterilmektedir.

2.4.2. Bimorf ve Monomorf Yapılar

Bimorf ve monomorf piezoelektrik aktüatörler, piezoelektrik malzemelerin tek ya da çok katmanlı yapılandırmalarla bükülme (fleksiyonel) hareket oluşturmaya dayanır. Monomorf (unimorph) yapılar, bir aktif piezoelektrik katmanın pasif bir taşıyıcı tabaka üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulur. Elektrik alan uygulandığında piezo katman genişler veya büzülürken, pasif tabaka bu deformasyonu yönlendirerek bükülme üretir. Bu tip yapılar genellikle daha küçük yer değiştirme, ancak düşük enerji tüketimi ve basit yapı avantajı sunar [Liang Lou vd., 2016].

Buna karşılık, bimorf yapılar, birbirine simetrik yerleştirilmiş iki piezo katmandan oluşur ve bu katmanlara zıt elektrik alan uygulandığında biri genişirken diğeri büzülerek daha büyük bir eğilme etkisi elde edilir. Bu çift yönlü çalışmanın sonucu olarak, unimorph yapılara kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla uç deplasmanı sağlanabilir [Liang Lou vd., 2016]. Bu tür yapılar, mikro elektro mekanik sistemler (MEMS), deformasyon kontrollü optik sistemler ve mikro titreşimli cihazlarda tercih edilmektedir.

Ayrıca, dairesel bimorf yapıların dinamik özellikleri matematiksel olarak modellenmiş ve düşük frekanslı deformasyon kontrolü için başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Wang, Hu ve Li (2016), bu tür yapılar için teorik ve deneysel modal analiz gerçekleştirmiş, bimorf konfigürasyonların yüksek hassasiyetli konumlandırma uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir.



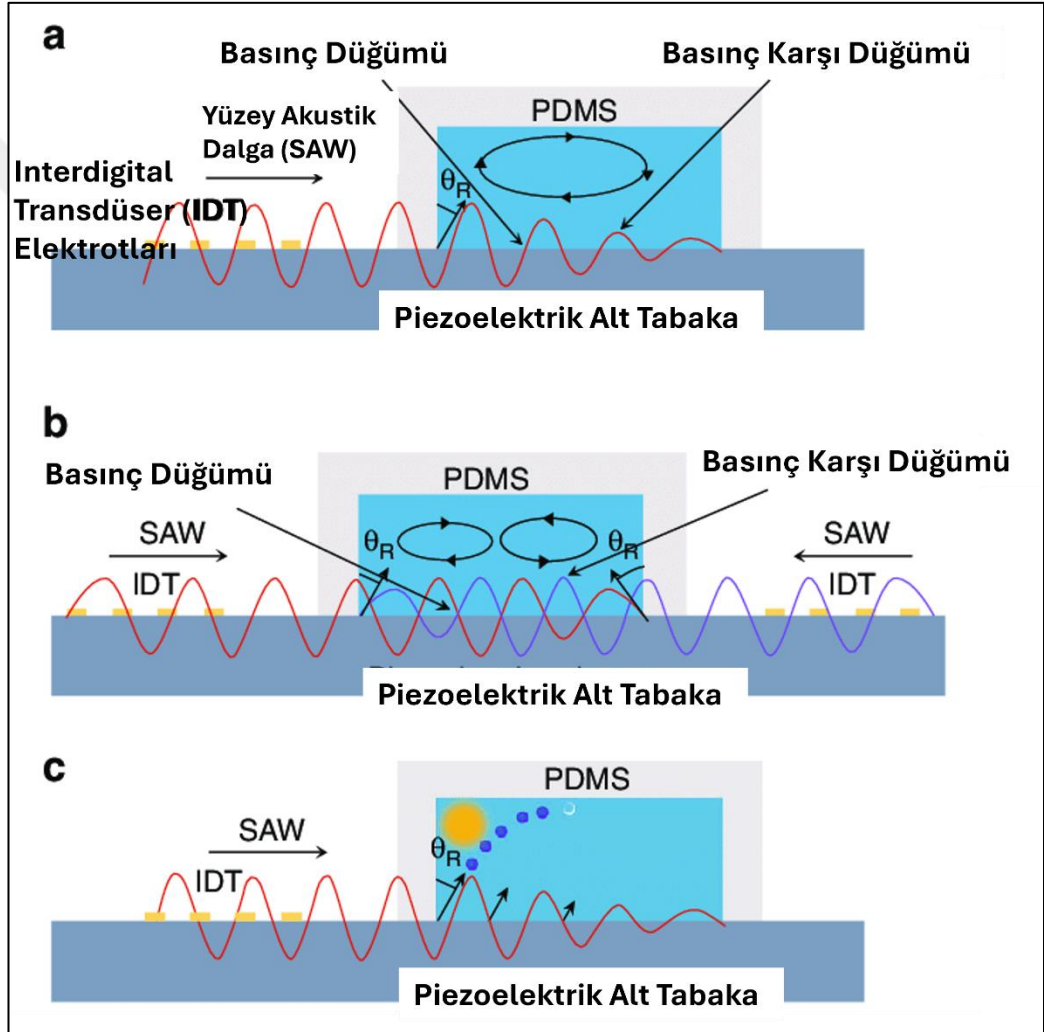
Şekil 2.4: Unimorf (tek katmanlı) ve bimorf (çift katmanlı) piezoelektrik aktüatör yapılarına ait şematik gösterim [Yaakub vd., 2017].

Şekil 2.4'te, piezoelektrik unimorf (monomorf) ve bimorf yapıların temel konfigürasyonları şematik olarak gösterilmektedir. Monomorf (unimorf) yapı, aktif bir piezoelektrik katmanın pasif bir alt yapı katmanı (substrate) ile birleştirilmesiyle oluşur ve genellikle serbest ucu bükülerek yer değiştirme sağlar. Buna karşılık bimorf yapı, iki piezoelektrik katmanın bir alt yapı katmanı arasında yer almasıyla elde edilir. Böylece, uygulanan elektrik alan etkisiyle bir katman sıkışırken diğeri genişler ve bu şekilde daha büyük bükülme veya deplasman üretilir. Bu konfigürasyon, mikro pozisyonlama, titreşim kontrolü ve enerji hasadı gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [Yaakub vd., 2017].

2.4.3. Yüzey Dalga Aktüatörleri

Yüzey dalga aktüatörleri, piezoelektrik kristaller üzerine yerleştirilmiş interdiijital elektrotlar aracılığıyla yüzey boyunca yayılan akustik dalgaları üretir ve bu dalgalar sayesinde mikro düzeyde nesne hareketi veya titreşim sağlanır. Bu sistemlerde, elektrik sinyali bir piezo malzemeye uygulandığında, yüzey boyunca ilerleyen yüksek frekanslı elastik dalgalar oluşturulur. Bu dalgalar, mikro sıvı manipülasyonu, hücre taşıma, partikül sürüklenme gibi alanlarda kontrollü hareket üretir [Li vd., 2022].

Özellikle son yıllarda, çift elektrotlu yapılar ve yansımali dalga amplifikasyon teknikleri sayesinde yüzey dalga motorlarının çözünürlüğü ve kontrol hassasiyeti önemli ölçüde artmıştır. Duan et al. (2023), geliştirdikleri yüzey dalga motorunda, reflektif amplifikasyon ile mikrometre-altı konumlama başarımı sağlandığını göstermiştir. Bu yapıların kompakt olması, elektromekanik gürültü üretmemesi ve mikrosistemlerle entegre çalışabilmesi nedeniyle biyomedikal, optik ve mikro robotik sistemlerde kullanım alanı genişlemektedir.



Şekil 2.5: IDT tabanlı bir yüzey akustik dalga (SAW) aktüatörünün temel yapısı ve dalga yayılım prensibi [Campbell, 1998].

Şekil 2.5, PDMS tabakası entegre edilmiş tipik bir SAW aktüatörün şematik yapısını göstermektedir. Piezoelektrik alt tabaka üzerine yerleştirilen interdigital transdüser (IDT) elektrotları, alternatif akım uygulandığında yüzey akustik dalga (SAW)

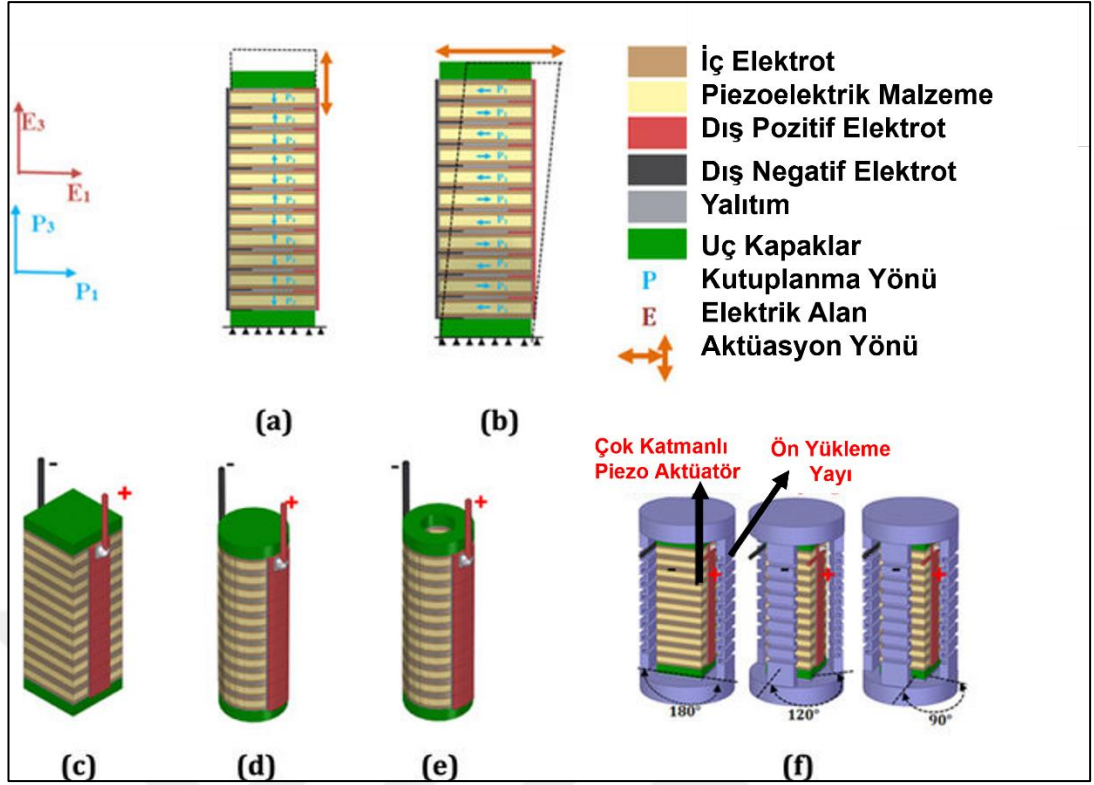
oluşturarak dalgaının PDMS tabakası içindeki mikroakışkan kanal boyunca yayılmasını sağlar. Bu yayılım sırasında basınç düğümleri (*node*) ve karşı düğümler (*antinode*) oluşur; bu bölgeler, partikül veya damla manipülasyonunda temel hareket mekanizmasını oluşturur. Bu özellikleri sayesinde SAW aktüatörleri, özellikle mikroakışkan sistemler, damla manipülasyonu ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [Campbell, 1998].

2.4.4. Yığın Tipi (Stack) Piezoelektrik Aktüatörler

Yığın tipi piezoelektrik aktüatörler (stack actuators), ince piezoelektrik seramik katmanların üst üste dizilerek aralarına elektrotlar yerleştirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılardır. Her bir katmanın elektrik alanla oluşturduğu küçük boyutlu deformasyon, yığındaki diğer katmanlarla birlikte toplanarak makroskopik düzeyde yer değiştirme elde edilmesini sağlar. Bu yapı sayesinde, sınırlı fiziksel boyutlara rağmen yüksek kuvvet ve hassas hareket üretilebilir [Zhang vd., 2025].

Yığın tipi yapılar, mikrometre-altı çözünürlükte konumlandırma, hızlı tepki süresi ve düşük enerji tüketimi gibi özellikleri nedeniyle ileri hassasiyet gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kompakt yapıları ve güvenilirlikleri sayesinde geleneksel elektromekanik sistemlerin yerine tercih edilmektedir. Tipik uygulama alanları arasında hassas pozisyonlama sistemleri, mikropompalar, optik hizalama mekanizmaları, uyarlanabilir optik sistemler ve uzay teknolojileri yer almaktadır [Zhang vd., 2025].

Şekil 2.6, çok katmanlı (yığın tipi) piezoelektrik aktüatörlerin iç yapısını ve çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir. Şemada her bir piezoelektrik malzeme katmanı (Piezoelektrik Malzeme), iç ve dış elektrotlar (İç Elektrot, Dış Pozitif Elektrot, Dış Negatif Elektrot) ile çevrilidir ve aralarında yalıtım tabakaları (Yalıtım) yer alır. Uç Kapaklar ise mekanik bütünlüğü sağlar. Kutuplanma yönü (P) ve uygulanan elektrik alan (E) sayesinde aktüasyon yönü belirlenerek lineer veya kesme (shear) modu elde edilir. Alt kısımdaki (f) detayında görüldüğü gibi Ön Yükleme Yayısı (Preloading Spring), aktüatörün mekanik gerilme altında daha stabil çalışmasını sağlar. Bu yapı, düşük gerilimle yüksek deplasman ve kuvvet üretimi için optimize edilmektedir [Santhya vd., 2020].



Şekil 2.6: (a) Boyuna Yığın (Longitudinal Stack) Aktüatör, (b) Kesme Yığın (Shear Stack) Aktüatör, (c) Kare Kesitli Piezo Yığın Aktüatör, (d) Dairesel Kesitli Piezo Yığın Aktüatör, (e) Halka Tipi Piezo Yığın Aktüatör ve (f) Paralel Ön Gerilmeli Piezo Yığın Aktüatör (PPA) yapılarına ait şematik gösterimler [Santhya vd., 2020].

2.5. Yığın Tipi (Stack) Piezoelektrik Aktüatörler

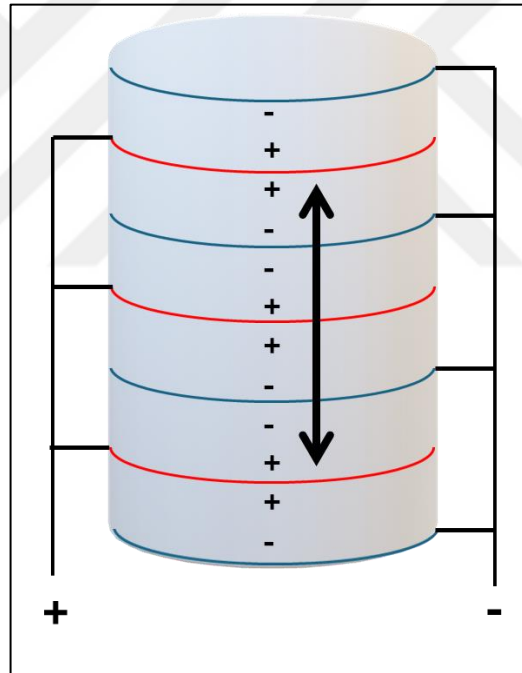
Piezoelektrik aktüatörler; disk/halka tipi, bimorf/monomorf, yüzey akustik dalga (SAW) ve yığın tipi gibi farklı yapı konfigürasyonları sayesinde geniş bir uygulama alanına hitap etmektedir. Ancak yığın tipi (stack) piezoelektrik aktüatörler, çok katmanlı (multilayer) dizilimleri sayesinde tek katmanlı çözümlere kıyasla daha yüksek blokaj kuvveti (blocking force) ve genişleme deplasmanı üretebilmektedir. Bu yapı, her bir ince piezo seramik tabakanın elektriksel olarak paralel, mekanik olarak seri bağlanmasıyla oluşur; böylece düşük gerilim değerlerinde bile toplam genleşme miktarı optimize edilir [Santhya vd., 2020].

Ayrıca bu aktüatörler, histerezis ve kayma davranışlarının kontrolüne olanak tanıyan katmanlar arası izolasyon ve ön yükleme sistemleriyle desteklenmekte, bu da uzun süreli kararlılık ve tekrarlanabilir performans sağlar. Yığın tipi piezoelektrik

aktüatörlerin yüksek mekanik sertlik, mikron-altı hassasiyet ve hızlı tepki süresi özellikleri, özellikle hassas konumlama, mikro-pompa sistemleri, titreşim sönümleme ve optik hizalama gibi uygulamalarda tercih edilmesini mümkün kılar [Li vd., 2023].

Literatürdeki son çalışmalar, ön gerilmeli yapı tasarımlarının yığının çatlama riskini azalttığını ve termal genişlemeye karşı mekanik stabiliteyi artırdığını göstermektedir [Zhou vd., 2024]. Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında, bu tezde hassas konumlama ve mikron mertebesinde kontrollü genişleme gerektiren deneysel düzenekler için yığın tipi piezoelektrik aktüatör kullanılması hem performans hem de dayanıklılık açısından bilimsel olarak rasyonel bir tercih sunmaktadır.

2.5.1. Yapı ve Çalışma Prensibi



Şekil 2.7: Piezo yığın tasarımı.

Yığın tipi piezoelektrik aktüatörler, çok sayıda ince piezoseramik tabakanın ardışık biçimde üst üste dizilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılardır (Şekil 2.7). Her piezo katmanın arasına yerleştirilen elektrotlar sayesinde, uygulanan elektrik alan tüm katmanlara eş zamanlı olarak iletilir. Bu elektriksel uyarım, her bir katmanda nanometre düzeyinde eksenel genişleme veya büzölmeye yol açar. Katmanların toplam

deformasyonu birleşerek mikron seviyelerinde bir yer değiştirme elde edilmesini sağlar [ScienceDirect Topics, 2024].

Bu yapı, birbirine paralel bağlı katmanların mekanik olarak sıralı eklenmesi sayesinde hem yüksek kuvvet üretme kapasitesi sağlar hem de kompakt bir hacimde hassas hareketler elde etmeye olanak tanır. Kompakt tasarımı ve elektromanyetik parazit üretmeyen yapısı sayesinde, yığın tipi piezoelektrik aktüatörler mikro pozisyonlama, optik hizalama sistemleri ve ultrasonik transdüsörler gibi hassas uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [Zhou vd., 2024].

2.5.2. Avantaj ve Dezavantajlar

Yığın tipi piezoelektrik aktüatörler, yüksek kuvvet üretimi ve hassasiyet gerektiren uygulamalar için ideal yapılardır. Çok katmanlı yapıları sayesinde, küçük gerilimlerle yüksek çıkış kuvvetleri elde edilebilir; bu da onları mikro pozisyonlama, titreşim kontrolü ve akustik uygulamalar için son derece uygun hale getirir. Ayrıca elektromanyetik gürültü üretmemeleri, onları optik sistemlerde ve biyomedikal ortamlarda güvenle kullanılabilir kılar [Yue vd., 2024].

Bununla birlikte bu aktüatörlerin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Örneğin, yer değiştirme miktarları sınırlıdır ve genellikle birkaç on mikronla sınırlı kalır. Ayrıca piezoelektrik malzemelerin histerezis ve sıcaklık bağımlılığı gibi doğrusal olmayan davranışları, hassas kontrol uygulamalarında ilave dengeleme teknikleri gerektirir. Yüksek frekanslı uygulamalarda ise termal etkilerin dinamik davranış üzerinde önemli etkileri olabileceği gösterilmiştir. Bu nedenle, yığın tipi aktüatörlerin tasarımı yapılırken hem termal hem de mekanik etkileşimler dikkate alınmalıdır [Wu vd., 2024].

2.5.3. Malzeme Seçimi

Piezoelektrik yığın aktüatörlerin performansı, seçilen piezoseramik malzemenin özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu tür aktüatörlerde en yaygın kullanılan malzemeler arasında kurşun zirkonat titanat (PZT) türevleri olan PZT-4, PZT-5H ve PZT-8 yer almaktadır. PZT-5H, yüksek piezoelektrik katsayısı (d_{33}) ve düşük mekanik kalite faktörü (Q_m) sayesinde yüksek hassasiyetli uygulamalarda tercih edilir. Küçük

sinyal koşullarında yüksek duyarlılık sunar, bu nedenle mikro pozisyonlama ve düşük frekanslı titreşim kontrolü için uygundur [Xue vd., 2025].

Buna karşılık PZT-4, daha yüksek mekanik kalite faktörüne ve daha düşük dielektrik kayba sahip olup, yüksek güçlü uygulamalarda, özellikle rezonans altında çalışan sistemlerde daha stabil bir performans sergiler. Düşük sıcaklık katsayısı sayesinde termal stabilite gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Kurşun bazlı bu malzemeler hem üstün mekanik dayanımları hem de endüstriyel üretimdeki yaygınlıkları nedeniyle hâlâ piezoelektrik sistemlerde en sık kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır [Kumar vd., 2024].

PZT-8 ise, yüksek güç ve düşük hassasiyet gerektiren uygulamalar için daha uygun olup, daha düşük piezo katsayısı ancak daha yüksek rijitlik sağlar. Bu çeşitlilik, yığın tipi aktüatör tasarımında uygulama bazlı malzeme seçiminde esneklik sunar [Kumar vd., 2024]. Bu malzemeler arasındaki farklılıklar, aktüatör tasarımında uygulamaya özel optimizasyon imkânı sunar. Özellikle bu çalışmada kullanılan PZT-5H, düşük ve yüksek güçlü uygulamalar arasında performans-kararlılık dengesini sağlamak açısından uygulama temelli ihtiyaçlarla örtüşen uygun bir malzeme tercihidir.

2.5.4. Tipik Uygulama Alanları

Yığın tipi piezoelektrik aktüatörler, yüksek doğrulukla konumlandırma yapabilmeleri (yüksek çözünürlükleri), hızlı yanıt süreleri ve elektromanyetik gürültülere karşı dirençli yapıları sayesinde birçok ileri teknoloji uygulamasında önemli bir yer edinmiştir. Bu tür aktüatörler, özellikle mikro düzeyde hareket kontrolü gerektiren sistemlerde; örneğin hassas konumlandırma, optik hizalama, sıvı taşıma mekanizmaları ve titreşim azaltma uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [Wu vd., 2024], [Zhang vd., 2025].

Zhang ve arkadaşları (2025), piezoelektrik-elektromanyetik hibrit tahrikli bir platform geliştirerek yüksek konumlandırma çözünürlüğü ve çok modlu çalışma yeteneği sayesinde mikro üretim sistemleri ve optik uygulamalarda etkili sonuçlar elde ettiklerini bildirmiştir. Bu platform, nanometre düzeyinde pozisyonlama başarısı ile öne çıkmıştır.

Benzer şekilde Lv ve çalışma arkadaşları (2025), yığın tipi piezoelektrik aktüatörle çalışan, valfsiz ve sentetik jet prensibine dayalı bir mikro pompa tasarlamış; sistemin

düşük enerji tüketimi ile yüksek debi sağlayabildiğini göstermiştir. Bu tarz mikro pompalar özellikle taşınabilir tıbbi cihazlar ve mikro akışkan sistemlerinde kullanıma uygundur.

Piezo aktüatörler, optik sistemlerde lens ve ayna konumlandırması gibi görevlerde de yaygın olarak yer bulmaktadır. Wu ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, bu sistemlerin termal ve dinamik davranışları modellenmiş ve optik uygulamalarda piezoelektrik yığın yapılarının stabilite ile doğruluk açısından avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Bunlara ek olarak, bu aktüatörler uzay ve havacılık uygulamalarında uydu konumlandırma, titreşim izolasyonu ve nano-imalat sistemlerinde de tercih edilmektedir. Kompakt yapıları, düşük güç tüketimi ve yüksek tekrarlanabilirlik gibi özellikleri sayesinde geleneksel elektromekanik çözümlere güçlü bir alternatif oluşturmaktadır [Kumar vd., 2024], [Zhang vd., 2025].

2.6. Piezoelektrik Yığın Aktüatörlerin Tasarım İlkeleri

Piezoelektrik yığın aktüatörlerin tasarımı, istenen çıkış kuvveti, strok uzunluğu (yer değiştirme mesafesi: aktüatörün uygulanan gerilimle elde edebileceği maksimum doğrusal hareket aralığı) ve frekans tepkisi gibi performans parametrelerini doğrudan belirler. Bu tür aktüatörler, çok katmanlı seramik disk veya plakalardan oluşan yapıların, araya yerleştirilen elektrot tabakalarıyla birlikte birleştirilmesiyle tasarlanır. Katman sayısı, her bir katmanın kalınlığı ve elektrot dizilimi, aktüatörün üretebileceği yer değiştirme miktarını ve uygulanabilir kuvveti doğrudan etkiler [Yong vd., 2019].

Tasarım sürecinde, her katmandaki malzeme polarizasyon yönünün doğru hizalanması kritik önem taşır. Ayrıca katmanlar arası elektriksel izolasyonun sağlanması ve sürücü devresinin voltaj limiti de temel kısıtlayıcı faktörlerdendir [Damjanovic, 2006]. Genelde yer değiştirme mesafesini artırmak için ince katmanlı yapı tercih edilir; ancak bu durum üretim karmaşıklığı ve dielektrik arıza riskini de beraberinde getirir.

Dolayısıyla piezoelektrik yığın aktüatör tasarımında malzeme özellikleri, mekanik uyum, termal davranış ve elektriksel yükleme koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerekir. Birlikte değerlendirildiğinde, aktüatörün hem hedeflenen performansı

sağlamasına hem de uzun süreli kullanımda dayanımını korumasına önemli ölçüde katkıda bulunulur.

2.6.1. Aktüatör Geometrisinin Performansa Etkisi

Yığın tipi piezoelektrik aktüatörlerin geometrisi, elde edilebilecek strok uzunluğu (yer değiştirme mesafesi), çıkış kuvveti ve frekans yanıt aralığı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Temel olarak, bir aktüatörün toplam genleşmesi, her katmanın bireysel deformasyon kapasitesinin katman sayısı ile çarpılması sonucu elde edilir. Bu nedenle, ince katmanlı ve çok katmanlı yapıların kullanılması, sınırlı gerilim değerleri altında daha uzun strok elde etmeyi mümkün kılar [Yong vd., 2019].

Geometrik parametreler arasında katman kalınlığı, disk veya plaka çapı, uzunluk-çap oranı ve katmanlar arası elektrot düzeni kritik öneme sahiptir. Örneğin, daha ince tabakalar daha büyük yer değiştirme sağlarken, üretim sırasında elektriksel yalıtımı sağlamak zorlaşabilir ve dielektrik arıza riski artabilir (Yong et al., 2019). Ayrıca, geometrinin rijitliği, mekanik rezonans frekansını ve titreşimli uygulamalardaki stabiliteyi doğrudan etkiler [Damjanovic, 2006].

Bu parametreler optimize edilmediğinde, istenilen hassasiyet seviyelerine ulaşmak veya yüksek hızlı hareketleri doğru şekilde kontrol etmek güçleşebilir. Dolayısıyla, yığın aktüatör tasarımında geometri, sadece malzemenin piezoelektrik özelliklerine değil, aynı zamanda uygulamanın mekanik yükleme koşullarına ve sürücü devresinin kapasitesine uygun olarak belirlenmelidir.

2.6.2. Elektrot Dizilimi ve Polarizasyon Yönelimi

Piezoelektrik yığın aktüatörlerde elektrot dizilimi, her katmandaki elektrik alan yönünü ve dolayısıyla malzeme içindeki dipol hizalanmasını belirleyerek aktüatörün genel performansını doğrudan etkiler. Katmanlı yapıdaki her piezo seramik tabakanın, uygulanan voltajla uyumlu biçimde kutuplanmış olması gerekir; aksi halde ters hizalanan katmanlar, çıkış yer değiştirmesini azaltır veya aktüatörün verimini düşürür [Yong vd., 2019].

Genellikle yığın aktüatörlerde, alternatif elektrot dizilimi (interdigitated electrodes) veya sandviç tipi katmanlama gibi yapılandırmalar tercih edilir. Bu düzenleme,

elektrik alanının her katmanda aynı yönde oluşmasını sağlar ve böylece katmanların mekanik deformasyonu birbirini destekler **[Damjanovic, 2006]**. Ayrıca, elektrot kalınlığı ve malzeme ile uyumluluğu da dielektrik arıza riskini ve enerji kaybını azaltmada önemli bir tasarım parametresidir.

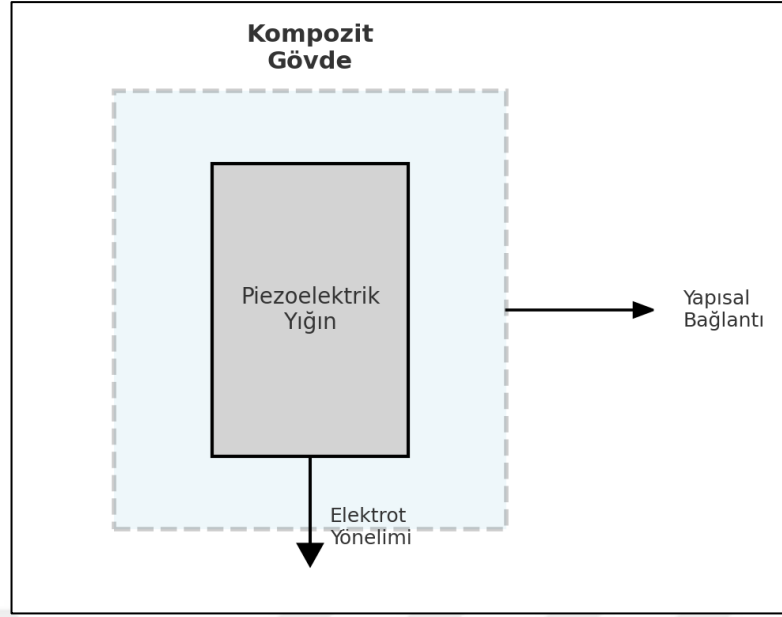
Polarizasyon yönelimi, aktüatörün çalışma ömrü boyunca korunmalıdır. Aşırı sıcaklıklar veya yüksek gerilim dalgalanmaları, malzeme içinde yerel kutuplanma bozulmalarına yol açabilir. Bu durum, histerezis eğrilerinde kaymaya, çıkış hassasiyetinin düşmesine ve performansın dalgalanmasına sebep olur **[Damjanovic, 2006]**. Dolayısıyla, doğru elektrot dizilimiyle uyumlu bir kutuplanma tasarımı, piezoelektrik yığın aktüatörlerin uzun vadeli kararlılığı için kritik bir gerekliliktir.

2.6.3. Yapısal Gömülülük ve Kompozit Yapılar

Gelişmiş piezoelektrik yığın aktüatör tasarımlarında, seramik yığınların tek başına kullanılması yerine, genellikle mekanik destek sağlayan kompozit veya metal gömülü yapılara entegre edilmesi tercih edilmektedir. Bu sayede, aktüatörün hem mekanik dayanıklılığı hem de titreşim davranışı iyileşir. Örneğin, metal veya fiber takviyeli kompozit gövdeler, piezoelektrik katmanların kırılma riskini azaltır ve yüksek frekanslı çalışmalarda rijitlik kayıplarını önler **[Yong vd., 2019]**.

Yapısal gömülü tasarımlar, özellikle titreşim kontrolü, uyarlanabilir yapılar (adaptive structures) ve hassas konumlandırma sistemlerinde öne çıkar. Aktüatör, bir taşıyıcı elemanın (örneğin alüminyum, titanyum veya karbon fiber panel) içine gömülerek çalışır; böylece hem koruma sağlanır hem de yerden tasarruf edilir **[Damjanovic, 2006]**. Bu tür kompozit yerleştirmeler, aktüatörün ürettiği mekanik enerjiyi çevre yapıya daha verimli aktararak istenmeyen deformasyonları azaltır.

Ayrıca, gömülü piezoelektrik yığın aktüatörlerin tasarımında ısı genleşme farklarının ve yapışma gerilmelerinin dikkate alınması gerekir. Uygun yapısal entegrasyon sağlanmazsa, katmanlar arasında delaminasyon veya elektriksel arızalar oluşabilir. Dolayısıyla, kompozit malzeme seçimi, bağlayıcı malzemeler ve arayüz tasarımı, gömülü piezoelektrik sistemlerin uzun vadeli kararlılığı için kritik parametreler arasında yer alır **[Yong vd., 2019]**.



Şekil 2.8: Yığın tipi piezoelektrik aktüatörün kompozit gövde içine gömülü temel tasarımı (şematik).

Şekil 2.8’deki yapı, çok katmanlı piezoelektrik seramik yığının, mekanik destek sağlayan bir kompozit veya metal gövde içerisine yerleştirilerek korunmasını ve rijitliğinin artırılmasını gösterir. Elektrot dizilimi, her katmandaki elektrik alan yönünü belirlerken, gömülü yapı aktüatörün titreşim davranışını ve uzun süreli mekanik dayanıklılığını iyileştirir [Yong vd., 2019].

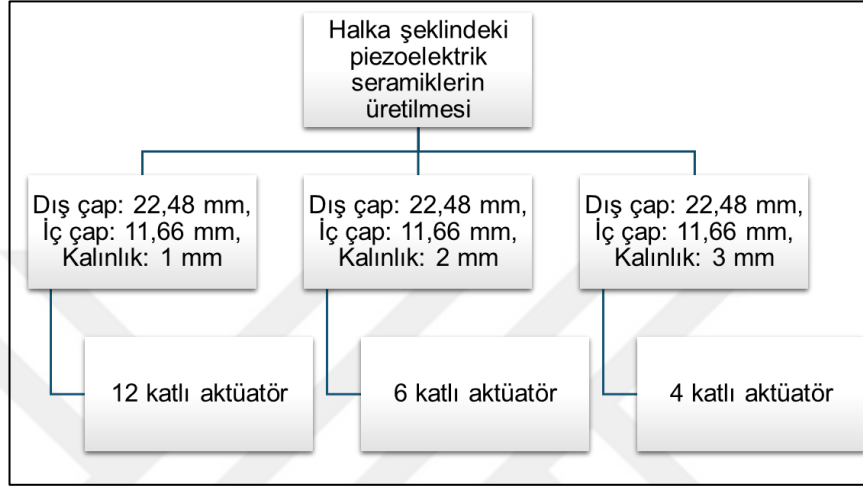
3. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu tez çalışmasının amacı, PZT(Pb[Zr_(x)Ti_(1-x)]O₃) 5H sınıfı piezoelektrik tozlar kullanılarak çok katmanlı piezoelektrik yığın aktüatörler geliştirmek ve bu aktüatörleri hassasiyet, tekrarlanabilirlik, tepki süresi ve blokaj kuvveti gibi performans parametreleri açısından iyileştirilmek ve karakterize etmektir. Çok katmanlı PZT yığın aktüatörler, iç elektrotlara sahip seramik tabakaların üst üste istiflenmesiyle üretilmektedir. Bu aktüatörlerde iç elektrotlar, harici bir voltaj kaynağına paralel olarak bağlandığında, piezoelektrik etki sayesinde dikey ekseninde seri bir genişleme/büzülme hareketi meydana getirmektedir. Bu tasarım, tek katmanlı piezoelektrik seramik sistemlerin sınırlı hareket kabiliyetini aşarak mikrometre düzeyinde hassas deplasman ve yüzlerce Newton'a varan blokaj kuvveti sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu hedefe yönelik olarak, çalışma kapsamında öncelikle piezoelektrik seramikler üretilmiş, ardından yapısal ve elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen aktüatörlerin performansını optimize etmek amacıyla, seramik katman kalınlığı, iletken yapıştırıcı kullanımı ve uygulanan ön gerilme (pre-stress) seviyesi gibi kritik parametreler sistematik olarak değiştirilmiş ve nihai aktüatörler silikon ile enkapsüle edilmiştir. Bu değişikliklerin aktüatörlerin deplasman ve blokaj kuvveti kapasiteleri üzerindeki etkileri ölçülmüştür. Ayrıca, aktif katmanların inceltilmesiyle daha düşük sürüş voltajı gerektiren, enerji verimliliği yüksek tasarımların geliştirilmesi de hedeflenmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

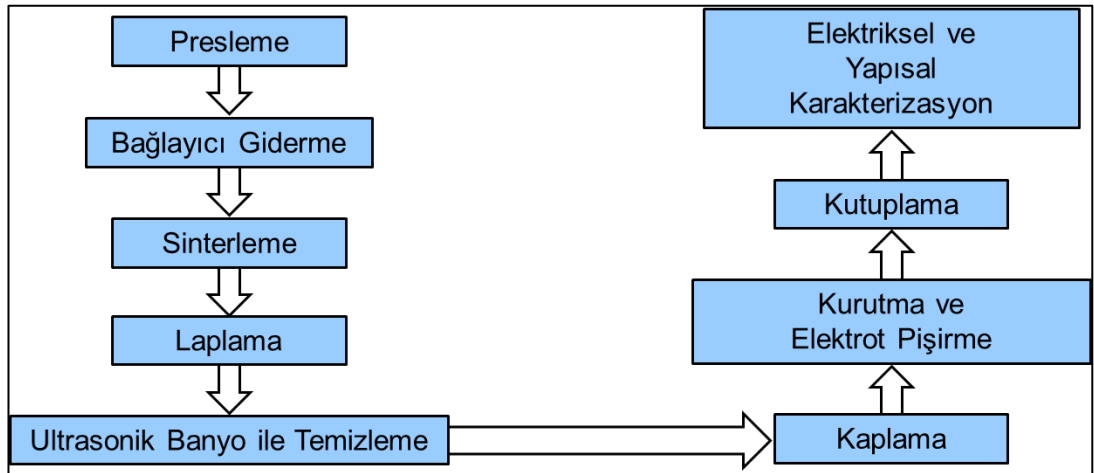
Bu tez çalışmasında üretilen aktüatörler **Şekil 4.1**'de özetlenmiştir. Her bir basamak ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



Şekil 4.1: Aktüatör tasarımı akış şeması.

4.1 Halka Şeklindeki Piezoelektrik Seramiklerin Üretimi

Bu çalışmada PZT-5H esaslı ticari piezoelektrik tozu kullanılmıştır. Çalışmada, piezoelektrik seramiklerin üretimi, PZT-5H başlangıç tozu kullanılarak ve **Şekil 4.2**'de gösterilen üretim süreci adımlarına uygun biçimde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2: Piezoelektrik seramik üretim akış şeması.

İlk aşamada, 3 farklı kalınlıkta piezoelektrik seramik üretileceği için 4, 8 ve 10 gram PZT-5H tozu tartılmış ve ardından presleme işlemine geçilmiştir. Piezoelektrik seramik malzeme üretiminde kullanılan metal kalıp **Şekil 4.3**'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Piezoelektrik seramik malzeme üretiminde kullanılan metal kalıp.

Halka şekilli numuneler, iç çapı 11,66 mm ve dış çapı 22,48 mm olan metal bir kalıp (**Şekil 4.3**) ile pres (**Şekil 4.4**) kullanılarak üretilmiştir. Presleme işlemi, numunelerin ham (yaş) yoğunluğunun 4,90-5,00 g/cm³ aralığına ulaşmasını sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4: Piezoelektrik seramik malzeme üretiminde kullanılan pres.

Şekil 4.5'te preslenmiş yaş halka(ring) piezoelektrik seramik numunelerin görüntüsü verilmiştir.

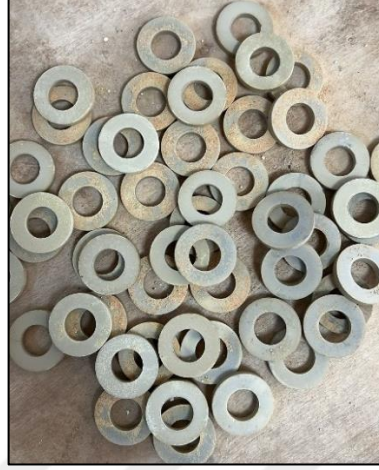


Şekil 4.5: Presleme sonucu elde edilen numune örnekleri.

PZT-5H piezoelektrik seramiklerin üretiminde, şekillendirme sonrası numunelerdeki organik bağlayıcıların uzaklaştırılması ve yapının sinterleme öncesi stabilize edilmesi amacıyla, belirli bir sıcaklık programına göre bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Bu ısıl işlem adımları şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Numuneler, oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar 60 °C/saat hızla ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Ardından, sıcaklık 300 °C'ye kadar yine 60 °C/saat hızla yükseltilmiş ve burada 1 saat bekletme süresi uygulanmıştır. Daha sonra, ısıtma 300–800 °C aralığında 60 °C/saat hızla devam ettirilmiş ve en son olarak 800 °C'de 2–4 saat arasında bekletilerek ısıl işlem tamamlanmıştır. Bu aşamalar sayesinde, seramik yapıdaki organik bağlayıcıların tamamen uzaklaştırılması sağlanmış ve sinterleme öncesi homojen bir mikroyapı elde edilmiştir.

Bağlayıcı giderme işlemleri tamamlanan PZT-5H bazlı piezoelektrik seramik numunelere, mikroyapının yoğunlaştırılması ve piezoelektrik özelliklerin kazanılması amacıyla sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işleminde izlenen sıcaklık profili şu şekildedir: Numuneler, oda sıcaklığından 800 °C'ye kadar 200–300 °C/saat ısıtma hızıyla ısıtılmış ve burada 1–2 saat bekletilmiştir. Daha sonra sıcaklık, 1290 °C'ye kadar (sinterleme sıcaklığı) 150 °C/saat hızla artırılmıştır. Sinterleme sıcaklığında (1290 °C) 4–6 saat bekletilerek mikroyapının yoğunlaşması sağlanmıştır. Ardından sıcaklık, 150 °C/saat hızla 1000 °C'ye kadar düşürülmüş, bu noktadan itibaren ise fırın kapatılarak numunelerin doğal soğuma ile ortam sıcaklığına inmesi beklenmiştir. Bu çok kademeli sinterleme programı, piezoelektrik seramiklerin faz saflığını ve

yoğunluğunu optimize etmek, aynı zamanda çatlak oluşumunu ve termal gerilmeleri en aza indirmek amacıyla uygulanmıştır. **Şekil 4.6'**da sinterlenmiş numunelerin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.6: Sinterlenmiş numuneler.

Sinterleme sonrası seramik malzemelere, yüzey düzgünlüğü ve paralelliği kazandırmak amacıyla laplama işlemi uygulanmıştır. Numune yüzeylerinin paralel olmaması, sonraki aşama olan kutuplama sırasında voltaj atlamalarına ve numunelerin kırılmasına neden olabildiğinden, bu işlem kritik öneme sahiptir. Laplama ile farklı başlangıç kalınlıklarındaki numuneler, 3 mm, 2 mm ve 1 mm olmak üzere hedeflenen nihai kalınlıklara getirilmiştir. Bu işlem, **Şekil 4.7'**de gösterilen çift taraflı laplama cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Laplamanın ardından, yüzeydeki kalıntıları temizlemek için numuneler saf su içerisinde ultrasonik banyoda yıkanmıştır.



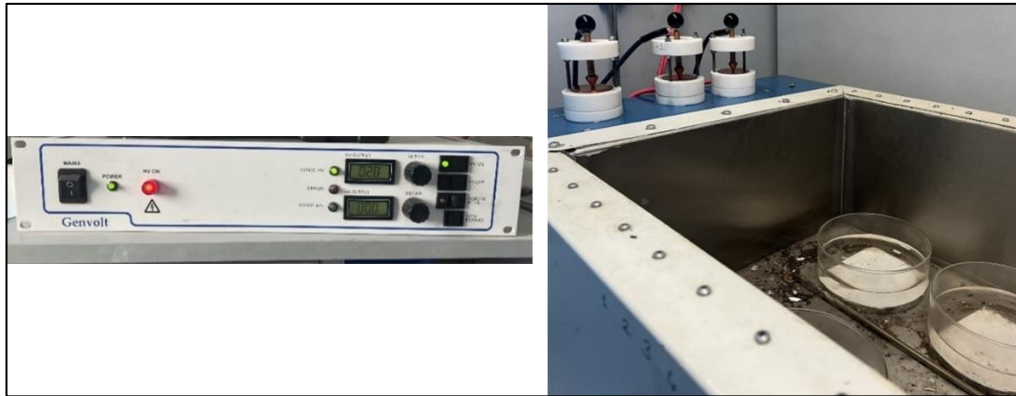
Şekil 4.7: Çift taraflı laplama cihazı.

Numuneler temizlendikten sonra, **Şekil 4.8**'de görülen serigraf baskı yöntemiyle seramik malzemelerin üzerine Ag içerikli elektrot pasta kullanılarak elektrotlama (kaplama) yapılmıştır. Elektrotlama işlemi tamamlandıktan sonra, elektrot ile seramik arasındaki fiziksel bağın oluşumunu sağlamak üzere numuneler 300 °C'de 10 dakika ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur (kurutma). Elektrot ile seramik malzeme arasındaki kimyasal bağın oluşmasını sağlamak amacıyla, 850 °C'de 10 dakika süreyle elektrot pişirme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.8: Serigraf baskı.

Elektrot pişirme işlemi uygulanmış seramik numunelere kalıcı polarizasyon kazandırmak amacıyla kutuplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, seramiklerin 120 °C sıcaklıktaki silikon yağı banyosu içerisinde, 2.00-3.00 kV/mm arasında elektrik alan altında 5-20 dakika süreyle uygulanmış ve optimizasyonu sağlanmıştır. Uygulanan elektrik alanın etkisiyle ferroelektrik domainler yönlendirilerek seramiklerde kalıcı polarizasyon sağlanmıştır. Kutuplama işlemi, **Şekil 4.9**'da verilen düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9: Kutuplama düzeneği.

Kutuplama sonrası seramik numunelerin piezoelektrik yük katsayısı (d_{33}), **Şekil 4.10**'da gösterilen APC YE2730A model d_{33} -metre kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda ortalama d_{33} değeri, 666 ± 48 pC/N gibi oldukça yüksek bir değer olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, PZT-5H sınıfı yumuşak seramikler için literatürle uyumlu olup, üretilen seramiklerin yüksek piezoelektrik performansa sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Bu denli yüksek bir d_{33} katsayısı, malzemenin aktüatör uygulamaları için temel gereksinim olan yüksek deplasman kapasitesine sahip olduğunun en önemli göstergesidir. Bununla birlikte, PZT-5H sınıfı malzemelerin bu yüksek hassasiyetinin bir ödünleşmesi olarak; düşük koersif alanları ve yüksek kayıpları nedeniyle yüksek mekanik stres veya dinamik sürüş koşulları altında depolarizasyona daha yatkın oldukları unutulmamalıdır. Sonuç olarak, geliştirilen seramiklerin, özellikle yüksek deplasman gerektiren ancak aşırı mekanik yük veya yüksek frekans altında çalışmayan hassas konumlandırma sistemleri gibi uygulamalar için oldukça uygun ve potansiyeli yüksek olduğu değerlendirilmektedir [Hooker, 1998].



Şekil 4.10: d_{33} ölçüm düzeneği.

Halka geometrisine sahip PZT-5H seramiklerin karakterizasyonu sonucunda elde edilen temel piezoelektrik parametreler **Tablo 4.1**'de özetlenmiştir. Seramiklerin dielektrik katsayısı (K_{33}^T) 3274 ± 219 olarak ölçülmüştür. Bu yüksek değer, malzemenin PZT-5H sınıfı 'yumuşak' bir piezoelektrik seramik olduğunu teyit etmekte ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için potansiyelini göstermektedir.

Diğer yandan ölçülen mekanik kalite faktörü (Q_m) yaklaşık 48 ± 11 'dir. Bu düşük Q_m değeri, PZT-5H gibi yumuşak seramiklerin tipik bir özelliğidir ve malzemenin rezonans koşullarında mekanik enerjiyi verimli bir şekilde sönümlediğini, yani yüksek

mekanik kayıplara sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle, seramiklerin yüksek dielektrik sabiti sayesinde statik veya düşük frekanslı (quasi-statik) aktüatör ve sensör uygulamaları için oldukça uygun olduğu söylenebilirken, düşük Q_m değeri (yüksek kayıplar) sebebiyle yüksek frekanslı rezonans modunda çalışacak uygulamalar (örneğin, ultrasonik transdüserler) için tercih edilmediği sonucuna varılabilir [Kitagawa vd., 2005].

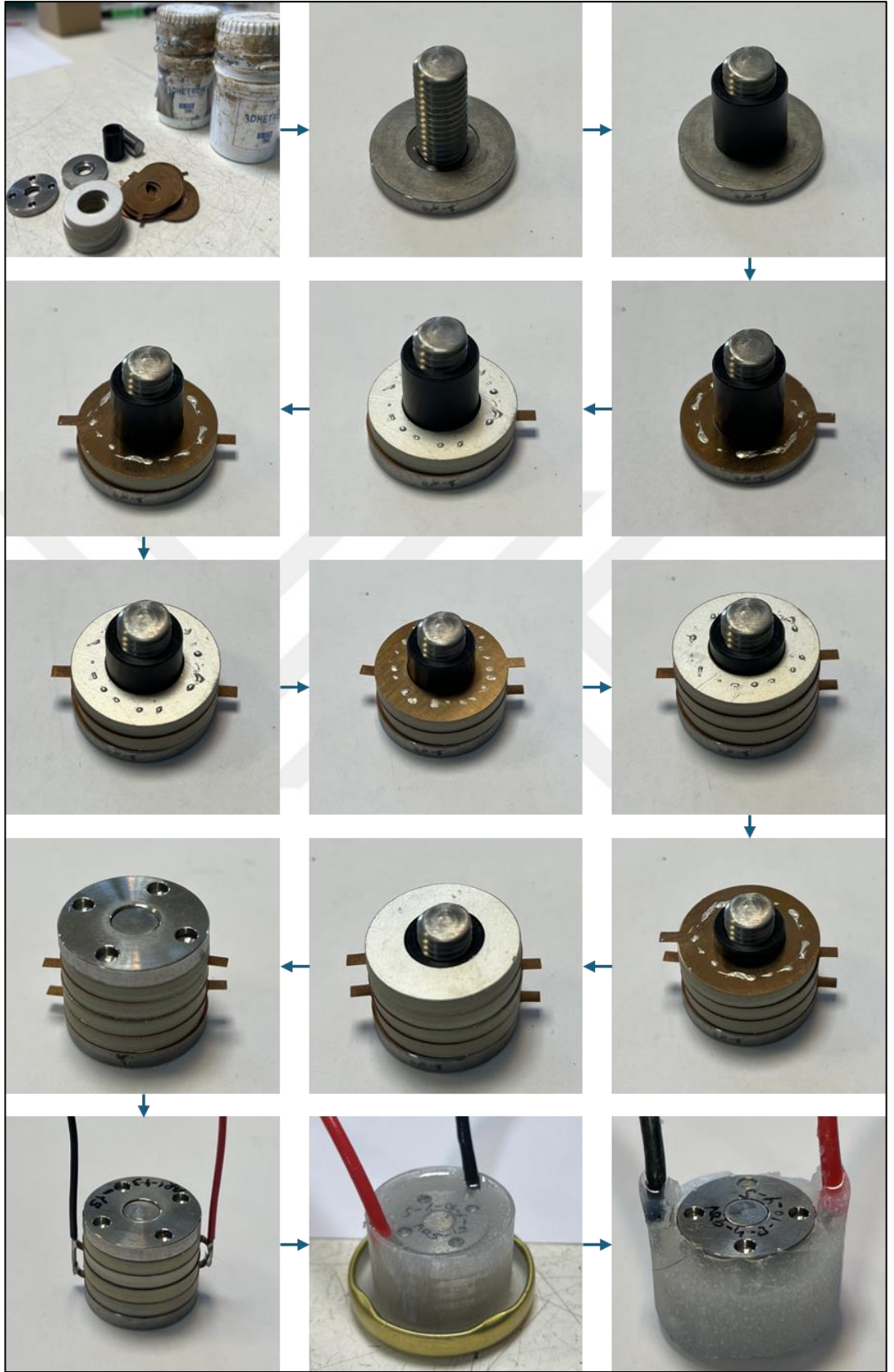
Tablo 4.1 Seramiklerin piezoelektrik özellikleri.

Piezoelektrik Özellikleri	PZT Seramik
d_{33} , (pC/N)	666 ± 48
Dielektrik katsayısı, K^T_{33}	3274 ± 219
Mekanik Kalite Faktörü, Q_M	48 ± 11
Frekans Sabiti, $N_{kalınlık}$ (kHz.mm)	116 ± 44

4.2. Piezoelektrik Yığın Aktüatör Üretimi

Bu çalışmada, yığın piezoelektrik aktüatörlerin üretim süreci ve performans optimizasyonu kapsamında çeşitli temel parametreler incelenmiştir. Bu parametreler; seramik katman kalınlığı, uygulanan ön gerilme (pre-stress) seviyesi ve katmanlar arasında iletken epoksi yapıştırıcı kullanılıp kullanılmamasıdır. Katman kalınlığı ve ön gerilme seviyelerinin sistematik olarak değiştirilmesiyle, aktüatörlerin deplasman ve engelleme kuvveti (blocking force) kapasitelerinin en üst düzeye çıkarılması hedeflenmiştir. Ayrıca, son aşamada üretilen aktüatörler silikon ile enkapsüle edilmiştir. Bu enkapsülasyon işlemiyle, yüksek voltaj altında meydana gelebilecek elektriksel atlamaların (arkların) önlenmesi ve dolayısıyla daha yüksek elektrik alanların güvenle uygulanabilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, aktüatörlerin nihai deplasman ve blokaj kuvveti performansında artış sağlanması planlanmıştır.

Bu bölümde, deneysel çalışmalar için üretilen çok katmanlı (yığın) piezoelektrik aktüatörlerin tasarım prensipleri, montaj süreci ve son hazırlık aşamaları detaylandırılmıştır. Piezoelektrik aktüatörlerin üretim aşamaları **Şekil 4.11**'de verilmiştir.



Şekil 4.11: Piezoelektrik aktüatör üretim aşamaları.

Piezoelektrik seramiklerin kırılkan yapısı ve mekanik darbelere karşı hassasiyeti, yığın aktüatör tasarımlarında mekanik bütünlüğü ve yüzey temas kalitesini kritik hale getirmektedir. Bu doğrultuda, aktüatörün tabanında, yüzey hassasiyeti yüksek, 2 mm kalınlığında bir titanyum katman kullanılmıştır. Seramiklerin mekanik dayanımını artırmak ve homojen bir elektriksel temas sağlamak amacıyla, her bir seramik katmanı arasına ince bakır folyolar yerleştirilmiştir. Tüm katmanların eş eksenli olarak hizalanması ise merkezden geçen yalıtkan bir vida ile sağlanmıştır.

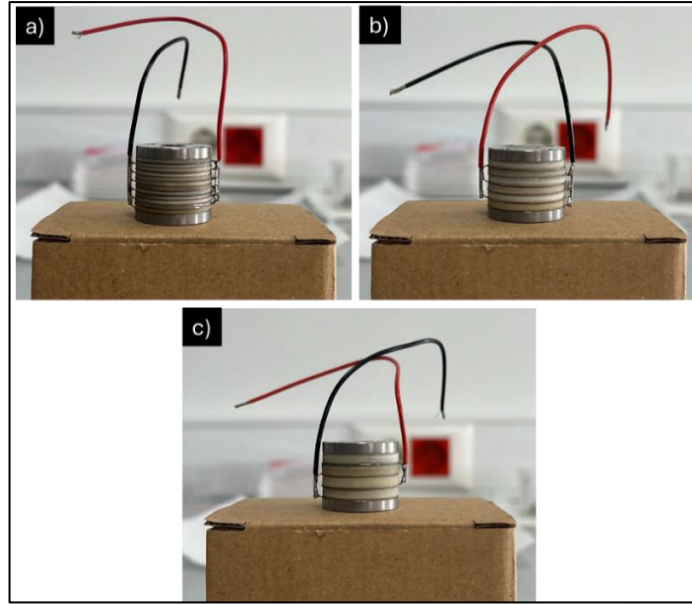
Montaj işlemine, titanyum taban üzerine ilk PZT-5H seramik katmanının yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Ardından, her seramik katmanı arasına gümüş içerikli iletken epoksi yapıştırıcı sürülmüş ve bir bakır folyo elektrot yerleştirilmiştir. Bu işlem, hedeflenen katman sayısına ulaşılan kadar tekrarlanmıştır.

Tüm katmanlar istiflendikten sonra, yapı bir üst metal katman ile kapatılmıştır. Elektriksel olarak paralel bağlantı kurmak amacıyla, bakır folyo elektrotların uçları yapının zıt taraflarında "+" ve "-" kutuplarını oluşturacak şekilde gruplandırılmıştır. Bu uçlara kablolar lehimlenerek elektriksel bağlantı tamamlanmıştır. Kablolama işleminin ardından, yapı bütünlüğünü sağlamak ve montaj sırasında katmanların kaymasını önlemek amacıyla merkezi vida kullanılarak yapıya bir ön gerilme (pre-stress) uygulanmıştır (**Şekil 4.11**). Son olarak, iletken yapıştırıcının kürlenmesi ve katmanlar arası bağlantının pekiştirilmesi için montajı tamamlanmış aktüatör, 80 °C'de 90 dakika süreyle ısıtılma tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, tüm aktüatörlerin toplam aktif seramik kalınlığı 12 mm'de sabit tutulmuştur. Bu tasarım kısıtı doğrultusunda, farklı seramik katman kalınlıkları kullanılarak üç farklı konfigürasyon üretilmiştir:

- 1 mm kalınlığında 12 katmanlı yapı
- 2 mm kalınlığında 6 katmanlı yapı
- 3 mm kalınlığında 4 katmanlı yapı

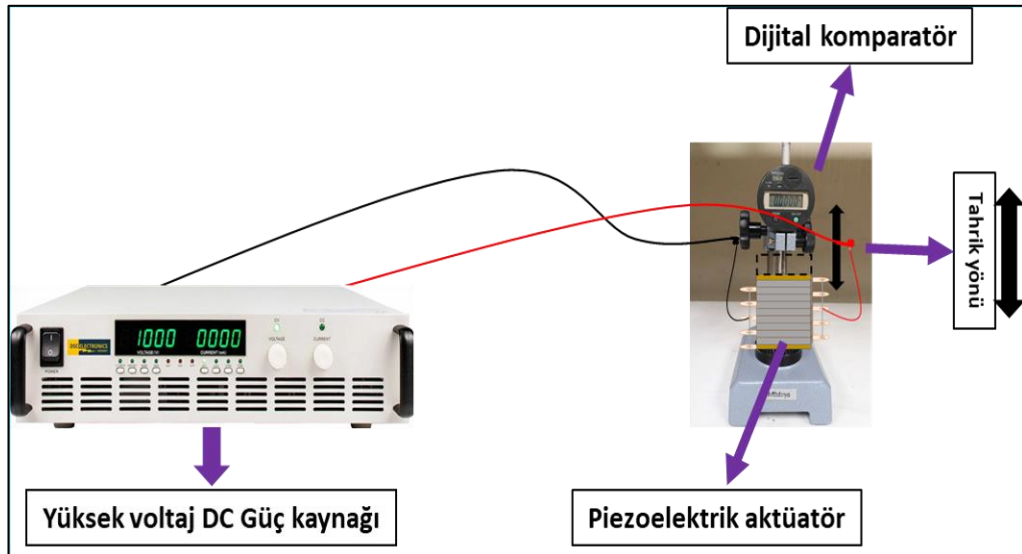
Bu konfigürasyonların gösterimi **Şekil 4.12**'de sunulmaktadır.



Şekil 4.12: Farklı kalınlıklarda seramikler kullanılarak oluşturulan aktüatör tasarımları: a) 1 mm b) 2 mm c) 3 mm.

4.3. Deplasman (Yer değiştirme) Ölçümü

Aktüatörlerin voltaja bağlı deplasman (yer değiştirme) performansını karakterize etmek amacıyla, Şekil 4.13'te şematik gösterimi verilen ölçüm düzeneği kurulmuştur. Düzenek, aktüatörleri sürmek için bir DC güç kaynağı ve piezoelektrik etkiyle oluşan mikrometre düzeyindeki boyutsal değişimi kaydetmek için Mitutoyo Absolute marka yüksek hassasiyetli bir dijital komparatörden oluşmaktadır.



Şekil 4.13: Deplasman ölçüm düzeneği.

Ölçüm sırasında, aktüatöre uygulanan voltaj kademeli olarak artırılıp azaltılmış ve her voltaj adımındaki deplasman değeri dijital komparatör ile kaydedilmiştir. Bu prosedürle, her bir aktüatör konfigürasyonu için voltaj-deplasman karakteristik eğrileri elde edilmiştir.

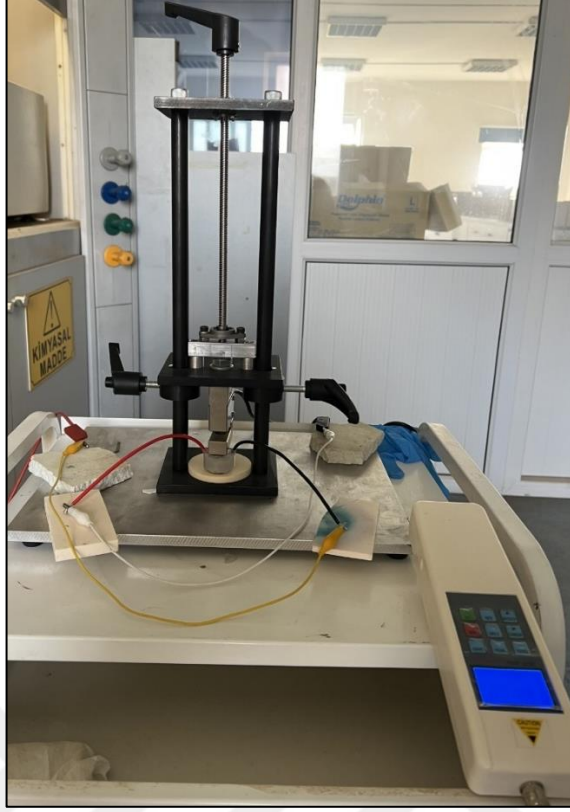
Elde edilen voltaj-deplasman eğrilerinin analizi yoluyla, aktüatörlerin aşağıda tanımlanan kritik performans parametreleri nicel olarak değerlendirilmiştir:

- Maksimum Deplasman: Belirli bir maksimum voltaj altında aktüatörün ulaştığı en yüksek yer değiştirme miktarı.
- Lineerlik: Deplasmanın, uygulanan voltaja ne ölçüde doğrusal bir tepki verdiğinin ölçüsü.
- Histerezis: Voltaj artırma ve azaltma döngüsü sırasında deplasman eğrileri arasında oluşan kapalı alan. Bu etki, aktüatörün enerji kaybının ve konumlandırma hatasının önemli bir göstergesidir.
- Tekrarlanabilirlik ve Stabilité: Aynı voltaj döngüsü tekrarlandığında ölçümlerin tutarlılığı ve sistemin zaman içindeki kararlılığı.

4.4. Blokaj Kuvveti Ölçümü

Piezoelektrik aktüatörlerin mekanik performansının temel bir göstergesi olan blokaj kuvvetini (blocking force) ölçmek için **Şekil 4.14**'te verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu düzenek, aktüatörün hareketini kısıtlayan rijit bir mekanik baskı sistemi ve bu koşul altında üretilen kuvveti ölçen bir yük hücresinden (SUNDOO dijital kuvvet ölçer) meydana gelmektedir.

Ölçüm sırasında, aktüatöre DC güç kaynağı ile kademeli olarak voltaj uygulanmıştır. Aktüatör, elektriksel uyarıya yanıt olarak genişlemeye çalışırken, mekanik sistem tarafından hareketi engellenmiş (bloke edilmiş) ve bu esnada ürettiği kuvvet yük hücresi tarafından doğrudan kaydedilmiştir. Bu yöntemle, her bir aktüatör konfigürasyonunun maksimum engelleme kuvveti ve voltaj-kuvvet karakteristiği belirlenmiştir. Bu veriler, aktüatörlerin pratik uygulamalarda sergileyebileceği yük taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.14: Blokaj kuvveti ölçüm düzeneği.

5. SONUÇLAR

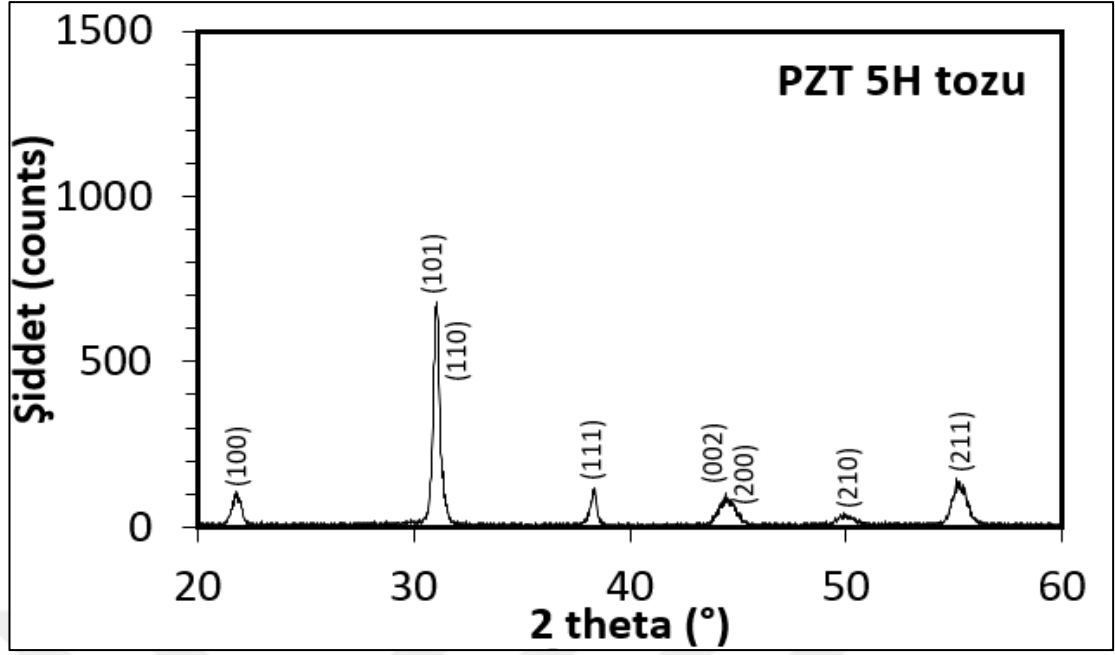
5.1. Piezoelektrik Seramiklerin Yapısal Karakterizasyonu

Piezoelektrik seramiklerin performans özellikleri, elektriksel parametrelerin yanı sıra mikroyapısal ve kristal yapısal özellikleriyle de doğrudan ilişkilidir. Malzemenin kristal faz yapısı, tane boyutu ve mikroyapısal homojenliği gibi faktörler, temel fonksiyonel özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [Bijalwan vd., 2018], [Li vd., 2023]. Üretilen PZT-5H seramiklerinde bu yapı-özellik ilişkisini aydınlatmak amacıyla, kristal yapı ve faz saflığı X-Işını Kırınımı (XRD) yöntemiyle incelenmiştir. Bu analizler, Cu K α radyasyonu ($\lambda=1.5405$ Å) kullanan PANalytical X'Pert PRO MPD model bir difraktometre ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal özellikler, tane morfolojisi ve sinterleme kalitesini incelemek için ise JEOL JSM-6510LV model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

5.1.1. X-Işınları Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını difraksiyonu (XRD), kristal malzemelerin atomik yapısını ve faz bileşimini aydınlatmak için kullanılan temel bir karakterizasyon tekniğidir. Bu yöntem, malzemeye gönderilen monokromatik X-ışınlarının kristal düzlemlerinden karakteristik bir şekilde saçılmasıyla oluşan kırınım desenlerinin analizine dayanmaktadır [Mahmood vd., 2025]. Bu çalışmada, üretilen PZT-5H halka seramiklerin yapısal özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla XRD analizinden faydalanılmıştır. Analizin temel hedefleri; (1) malzemenin istenen perovskit kristal yapısına sahip olduğunu doğrulamak, (2) malzemenin faz özelliklerini (örneğin tetragonallık) belirlemek ve (3) üretim sürecinde oluşabilecek istenmeyen ikincil fazların varlığını tespit etmektir.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen XRD analizleri, sinterlenmiş PZT esaslı numunelerin saf perovskit kristal yapısına sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 5.1). Elde edilen kırınım desenleri, PZT'nin rombohedral (JCPDS No: 73-2022) ve tetragonal (JCPDS No: 70-4264) fazlarına ait standart referans kartları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 5.1: Ticari yumuşak PZT-5H tozu XRD paterni.

Sinterlenmiş halka numunelerin XRD sonuçları, piroklor gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığını ortaya koymuştur. Özellikle 44°-48° (2θ) aralığındaki kırınım deseninin detaylı incelenmesi, tetragonal (002) ve rombohedral (200) düzlemlerine ait piklerin bir arada bulunduğunu göstermektedir. Bu iki kristal yapının bir arada varlığı, geliştirilen seramik kompozisyonunun, yüksek piezoelektrik özelliklerin elde edildiği morfortropik faz sınırı (MPB) bölgesinde yer aldığına kuvvetle işaret etmektedir.

Kırınım piklerinin dar ve keskin bir yapıya sahip olması, numunelerin yüksek kristaliniteye ve homojen bir mikroyapıya ulaştığını göstermektedir. Bu durum, kalsinasyon ve sinterleme süreçlerinin başarıyla tamamlandığının önemli bir kanıtıdır. Bu çalışmada elde edilen tüm yapısal bulgular, literatürde yer alan PZT esaslı seramiklerle ilgili önceki çalışmalarla [Liu vd., 2019], [Kumari vd., 2014], [Ketsuwan vd., 2009] uyum içerisinde.

5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

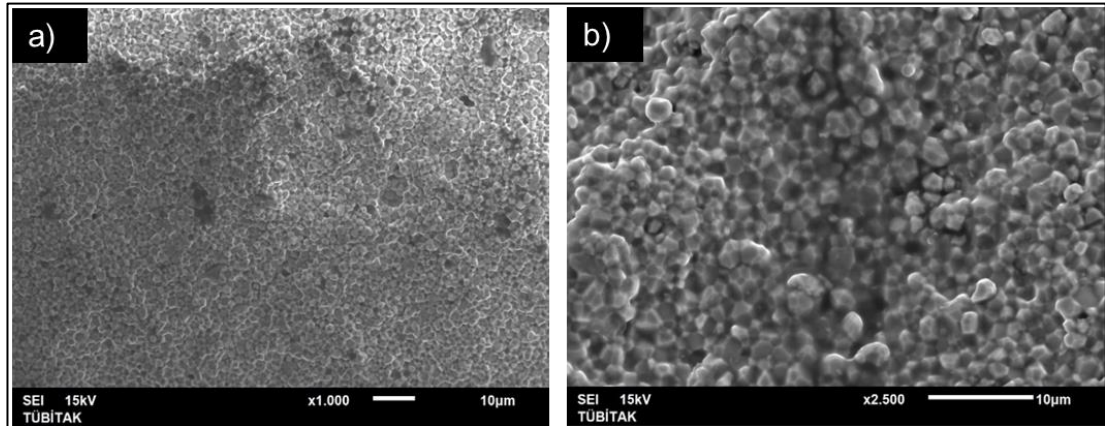
Sinterleme prosesi, piezoelektrik seramik üretiminde malzemenin nihai özelliklerini belirleyen kritik bir aşamadır. Mikroyapıdaki aşırı tane büyümesi, camsı faz oluşumu ve özellikle gözeneklilik gibi kusurlar, malzemenin elektriksel ve piezoelektrik performansını doğrudan etkilemektedir [Uchino, 2017]. Gözenekli bir yapı,

kutuplama işlemi sırasında elektriksel atlamalara (arılara) yol açarak malzemenin hasar görmesine neden olabilir.

Bu nedenle, mikroyapısal özelliklerin kontrolü ve analizi büyük önem taşır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), seramiklerin yüzey morfolojisi, tane boyutu dağılımı ve gözeneklilik durumu gibi özelliklerini incelemek için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir [Kulkov vd., 2019]. Bu çalışmada SEM analizi, geliştirilen PZT-5H seramiklerinin sinterleme sonrası mikroyapısal bütünlüğünü doğrulamak ve tane yapısının fonksiyonel özelliklerle ilişkisini kurmak amacıyla kullanılmıştır.

Üretilen PZT-5H halka seramiklerinden alınan temsili bir SEM mikroyapı görüntüsü **Şekil 5.2**'de sunulmuştur. Görüntüde, malzemenin sinterleme sürecine özgü, kompakt ve yoğun bir morfolojiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ortalama tane boyutunun yaklaşık 2 μm olduğu ve tanelerin homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir.

Taneler arası boşlukların (gözeneklerin) oldukça az olması, sinterleme sürecinin başarıyla gerçekleştirilerek yüksek bir yoğunluğa ulaşıldığının bir göstergesidir. Tane boyutlarındaki homojenlik ise sinterleme prosesinin kontrollü koşullar altında yürütüldüğünü ve sonuç olarak istenen düzenli mikroyapının elde edildiğini teyit etmektedir.

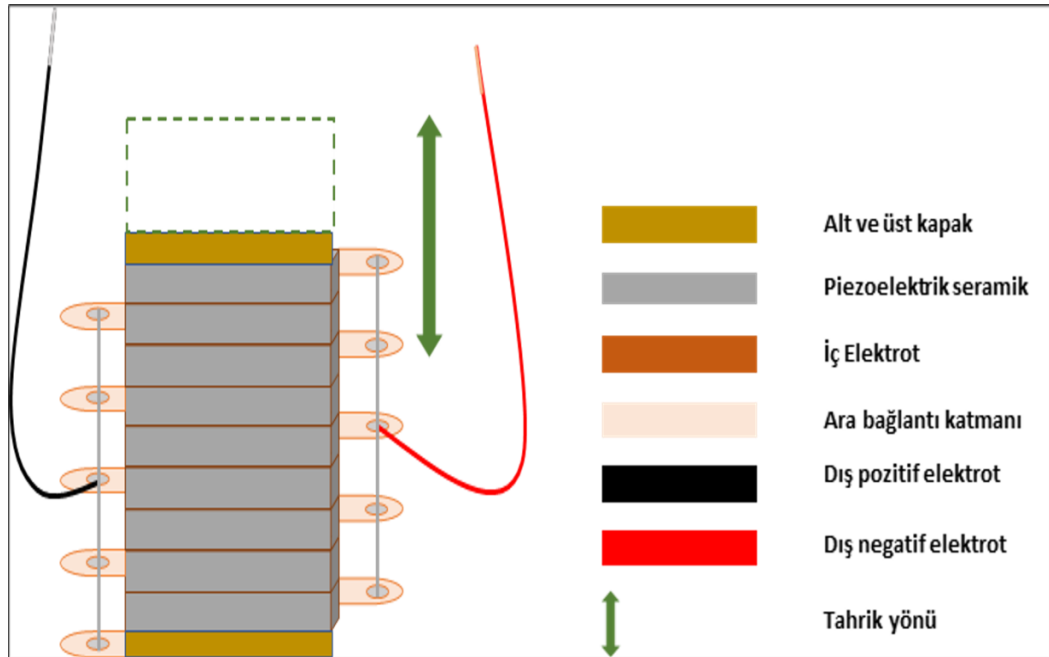


Şekil 5.2: (Yumuşak matris) piezoelektrik seramik SEM kırık yüzey görüntüleri: a) x1000 b) x2500

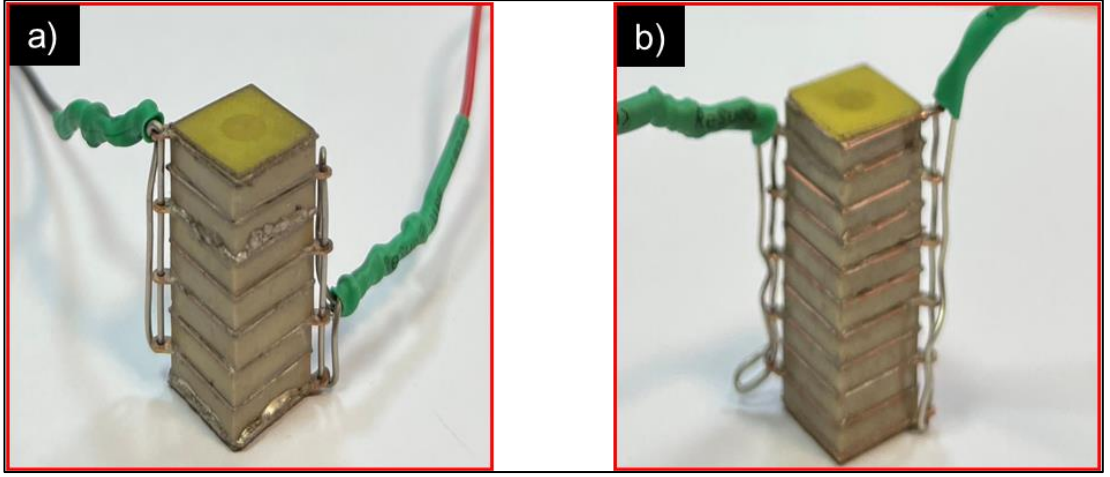
5.2. Entegrasyon Koşullarının Optimizasyonu

5.2.1. Piezoelektrik Seramiklerin Geometrisi

İlk tasarım aşamasında kullanılmak üzere kare formda piezoelektrik seramikler üretilmiş ve **Şekil 5.3**'te gösterildiği şekilde entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Seramiklerin düzgün bir şekilde eksenlenebilmesi için özel olarak tasarlanmış bir kalıp kullanılmıştır. Kalıbın altına yerleştirilen polimer tabaka, üretim sırasında yapısal stabilite sağlamakla birlikte sıcaklık ve neme karşı dayanıklılık kazandırmıştır. Katmanlı yapının oluşturulması sırasında her seramik tabaka arasına gümüş içerikli epoksi iletken yapıştırıcı uygulanmıştır. Elektriksel iletkenliği sağlamak amacıyla bakır elektrot tabakaları kullanılmış ve seramikler paralel bağlantı şeklinde birleştirilmiştir. Tüm katmanlar tamamlandıktan sonra en üst katmana yeniden bir polimer tabaka yerleştirilmiş ve ön stres uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında yapıştırıcının kürlenmesi sağlanmış ve çok katmanlı yapı kalıptan çıkarılmıştır. Daha sonra, bir taraftan pozitif uçlar, diğer taraftan ise negatif uçlar olacak şekilde kablolama işlemi gerçekleştirilmiştir. **Şekil 5.4**'te farklı kalınlıklarda ve katman sayılarında üretilen aktüatörler gösterilmektedir.

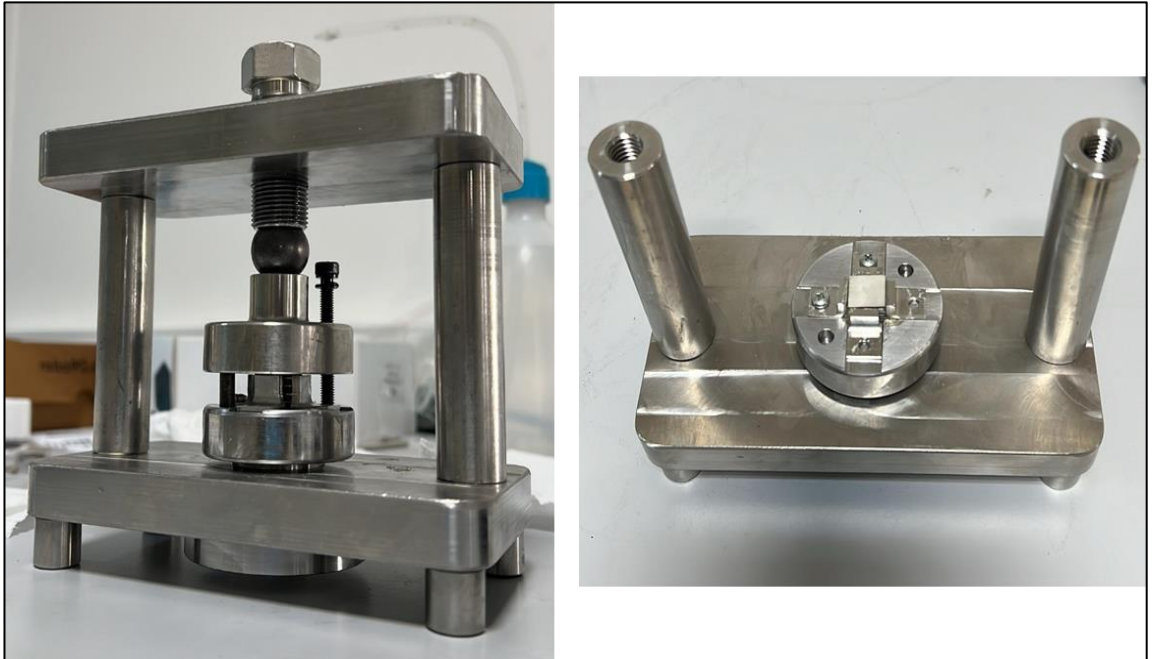


Şekil 5.3: Piezoelektrik aktüatör tasarım entegrasyonu.



Şekil 5.4: Farklı piezoelektrik aktüatör tasarım entegrasyonları: a) 7 katmanlı, 3 mm katman kalınlığı b) 10 katmanlı, 2 mm katman kalınlığı.

İlk tasarım için seramik boyutlarına uygun olacak şekilde **Şekil 5.5**'te verilen kalıp üretilmiştir. Kalıbın aparatları, kare formdaki seramikleri düzgün biçimde konumlandırmak için vida mekanizmasıyla sabitlenmiştir. Üretim sırasında yapıştırıcının kalıba yapışmaması amacıyla kalıp yüzeyine ince bir gres yağı tabakası uygulanmıştır. Malzemeye uygulanan yükün homojen dağılmasını sağlamak için kalıbın içine bilye yerleştirilmiş ve ardından kalıp kapatılmıştır. Bu aşamada ön stres uygulanmış ve yapıştırıcının kurlenmesi için ısıtım işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5: Kare formda aktüatör oluşturmak için kullanılan kalıp.

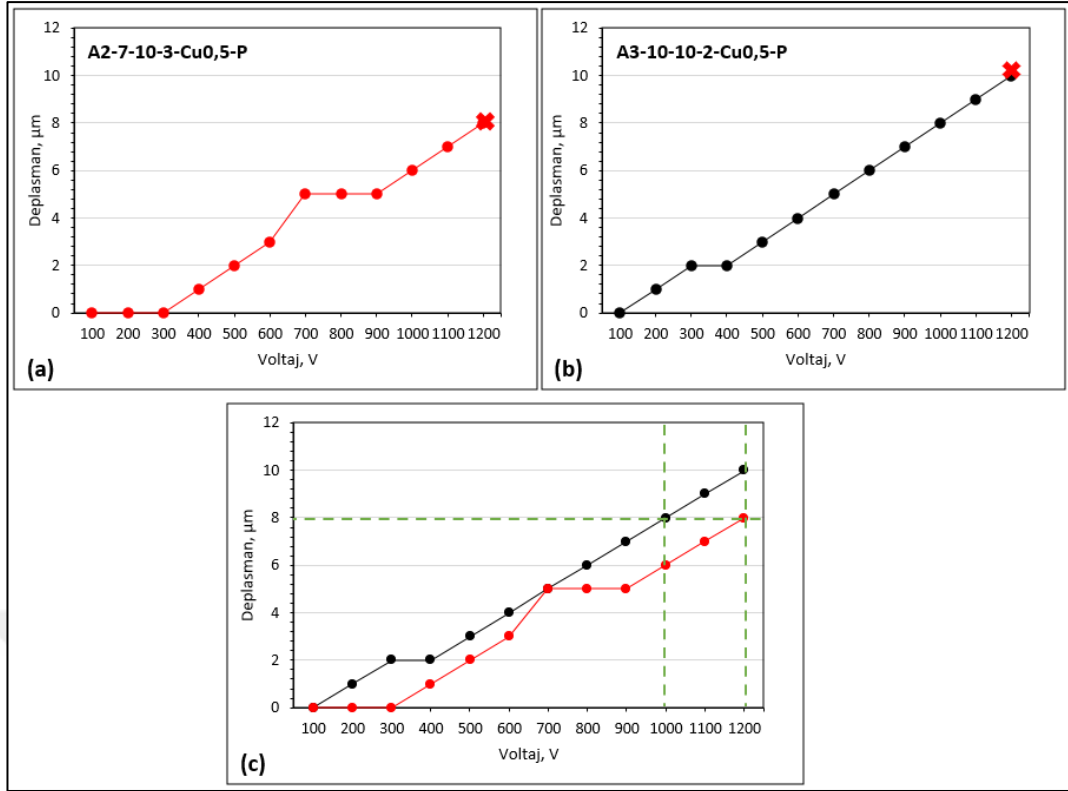
Numunelerin empedans-frekans karakteristikleri, Agilent 4294A model empedans analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda elde edilen eğriler üzerinden her bir numunenin rezonans (F_r), antirezonans (F_z) frekansları, ilgili empedans değerleri ve kapasitansı belirlenmiştir (Şekil 5.6).

3 mm kalınlık, 7 katman				2 mm kalınlık, 10 katman			
Deplasman ölçüm öncesi		Deplasman ölçüm sonrası		Deplasman ölçüm öncesi		Deplasman ölçüm sonrası	
A-7-10-3-Cu0,5-P		A-7-10-3-Cu0,5-P		A-10-10-2-Cu0,5-P		A-10-10-2-Cu0,5-P	
1. Rezonans, kHz:	55,19	1. Rezonans, kHz:	55,6688	1. Rezonans, kHz:	55,8182	1. Rezonans, kHz:	106,3202
Empedans, ohm:	261,7	Empedans, ohm:	141,506	Empedans, ohm:	30,53	Empedans, ohm:	48,96
1. Antirezonans, kHz:	60,766	1. Antirezonans, kHz:	61,8188	1. Antirezonans, kHz:	63,7778	1. Antirezonans, kHz:	110,6618
2. Rezonans, kHz:	118,796	2. Rezonans, kHz:	121,5158	2. Rezonans, kHz:	122,3894	2. Rezonans, kHz:	152,9924
Empedans, ohm:	207,346	Empedans, ohm:	248,29	Empedans, ohm:	62,29	Empedans, ohm:	59,57
2. Antirezonans, kHz:	124,223	2. Antirezonans, kHz:	126,9428	2. Antirezonans, kHz:	126,007	2. Antirezonans, kHz:	158,4194
1 kHz kapasitans, nF:	3,1514	1 kHz kapasitans, nF:	2,98377	1 kHz kapasitans, nF:	15,5756	1 kHz kapasitans, nF:	15,0974
Tek PZT 5- 3 mm kalınlık seramik				Tek PZT 5- 2 mm kalınlık seramik			
1. Rezonans, kHz:		138,679		1. Rezonans, kHz:		140,578	
Empedans, ohm:		61,53		Empedans, ohm:		70,42	
1. Antirezonans, kHz:		167,223		1. Antirezonans, kHz:		165,7652	
2. Rezonans, kHz:		667,536		2. Rezonans, kHz:		963,418	
Empedans, ohm:		525,1		Empedans, ohm:		115,5	
2. Antirezonans, kHz:		678,792		2. Antirezonans, kHz:		1053,466	
1 kHz kapasitans, nF:		1,4717		1 kHz kapasitans, nF:		2,26951	

Şekil 5.6: Piezoelektrik seramik ve aktüatör yapıların deplasman ölçüm öncesi ve sonrası rezonans, antirezonans, empedans ve kapasitans değerleri.

Aktüatörlerin yüksek voltaj altındaki performans kararlılığını ve olası bir degradasyonu (bozunumu) değerlendirmek amacıyla, empedans ve kapasitans ölçümleri, deplasman testlerinden hem önce hem de sonra gerçekleştirilmiştir.

Deplasman ölçümleri, aktüatörlerin elektriksel dayanım sınırlarını tespit etmek amacıyla, voltaj kademeli olarak artırılarak yürütülmüştür. Testler, numunelerde elektriksel atlama (ark) veya mekanik bozulma gözlemlenene kadar sürdürülerek maksimum çalışma voltajları belirlenmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen uygulanan voltaja bağlı deplasman grafikleri (Şekil 5.7) sunulmuştur. Deplasman testleri sırasında aktüatörlerin elektriksel dayanım limitleri de belirlenmiştir. Numunelerin yaklaşık 1200 V'a kadar stabil bir şekilde çalıştığı, bu voltaj seviyesinin üzerinde ise elektriksel atlamalar ve yapısal bozulmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, beklendiği gibi, seramik katman sayısındaki artışın, yapıların toplam kapasitans değerini de doğrusal olarak artırdığı doğrulanmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.7: Piezoelektrik aktüatör yapılarının elektriksel voltaja bağlı deplasman ölçüm sonuçları (a) A-7-10-3-Cu0,5-P aktüatör numunesi, (b) A-10-10-2-Cu0,5-P aktüatör numunesi ve (c) İki aktüatör yapısının birlikte gösterimi.

Seramik katman kalınlığının aktüatör performansı üzerindeki etkisini araştırmak üzere, toplam kalınlıkları $\sim 22\text{-}23$ mm olan iki farklı yığın aktüatör karşılaştırılmıştır: 7 katmanlı 3 mm'lik seramiklerden oluşan yapı (Konfigürasyon A, Şekil 5.7 (a)) ve 10 katmanlı 2 mm'lik seramiklerden oluşan yapı (Konfigürasyon B, Şekil 5.7 (b)). Yapılan deplasman ölçümlerinde, 1200 V altında Konfigürasyon A 8 μm , Konfigürasyon B ise belirgin şekilde daha yüksek olan 11 μm deplasman sağlamıştır.

İki aktüatörün karşılaştırmalı performansı (Şekil 5.7 (c)), katman kalınlığını azaltmanın deplasmanı artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Aynı sürüş voltajında, daha ince katmanlı (2 mm) aktüatörün daha yüksek deplasman üretmesinin temel nedeni, her bir katmana düşen efektif elektrik alanının ($E=V/t$) artmasıdır. Bu durum, aynı zamanda belirli bir deplasman değerine (örn. 8 μm) daha düşük voltajlarla ulaşılabilmesini de sağlamaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, aktüatör tasarımında seramik katman kalınlığının, düşük voltajlarda yüksek performans elde etmek için kritik bir optimizasyon faktörü olduğunu doğrulamıştır.

Aktüatör tasarımında, önceki kare formlu seramikler yerine silindirik halka geometrisine sahip seramiklerin kullanılması yönünde bir iyileştirme yapılmıştır. Bu geometrik değişikliğin temel gerekçeleri ve sağladığı avantajlar aşağıda özetlenmiştir:

Artan Elektriksel Performans: Halka geometrisi, kare forma kıyasla daha geniş bir yüzey alanı sunmaktadır. Bu durum, aktüatörün kapasitans değerini artırarak elektriksel verimliliğini iyileştirmektedir.

İyileştirilmiş Termal Kararlılık: Ayrıca, genişleyen bu yüzey alanı, dinamik çalışma sırasında oluşan ısının çevreye daha etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır. Bu durum, aktüatörün ısınma sorunlarını azaltarak daha kararlı bir performans sunmasına olanak tanımaktadır.

Basitleştirilmiş Üretim Süreci: Yeni tasarım, ön gerilme uygulaması için harici bir kalıp veya fikstür kullanımını gereksiz kılmaktadır.

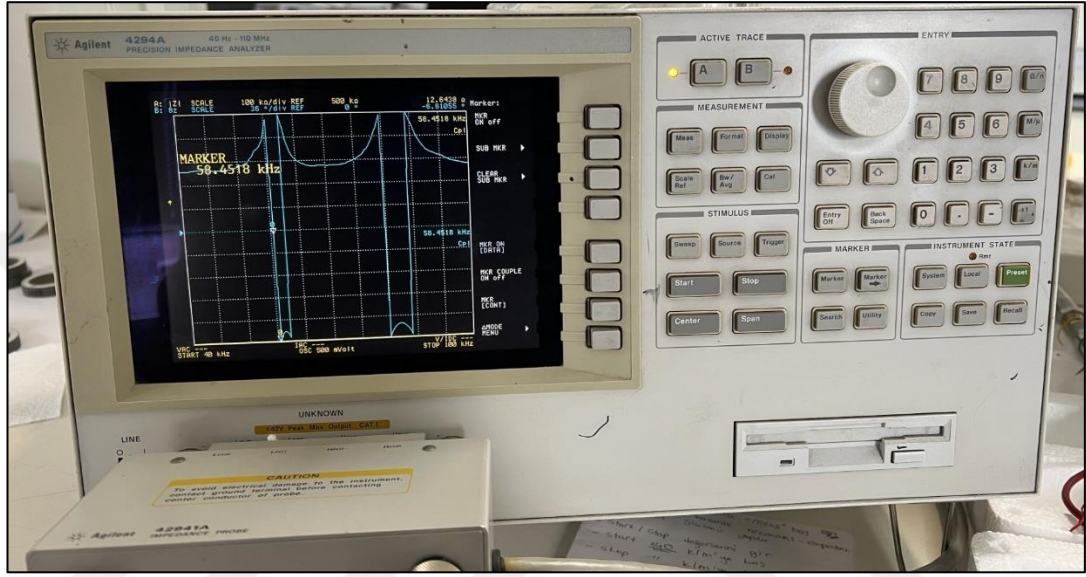
Ayrıca tasarımın en önemli pratik avantajı, ön gerilme uygulamasını önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Bu işlem, çok katmanlı sistem bir mengene ile sabitlendikten sonra, aktüatörün üst metal katmanına tam oturan standart bir lokma başlık ve tork anahtarı kullanılarak hassas ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, kare geometriye kıyasla hem montaj sürecini basitleştirmiş hem de uygulanan sıkma kuvvetinin tekrarlanabilirliğini artırmıştır. Geliştirilmiş tasarıma sahip nihai aktüatörün bir fotoğrafı **Şekil 5.8**'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8: Silindirik formda aktüatör oluşturmak için kullanılan sistem.

5.2.2. Enkapsülasyon (Silikon Uygulaması)

Şekil 5.9’da verilen Agilent 4294 A Empedans Kazanç Faz Analizörü yardımıyla aktüatörlerin 1 kHz’deki kapasitansı, empedans, rezonans ve antirezonans değerleri ölçülerek **Tablo 5.1**’de verilmiştir.



Şekil 5.9: Empedans Kazanç Faz Analizörü.

Tablo 5.1’de, silikon enkapsülasyonu uygulanmamış (AR4-6-2-15) ve uygulanmış (AR12-6-2-15-S) halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her iki numune de geometrik yapı, katman sayısı ve ön yükleme koşulları aynı tutulmuş, yalnızca enkapsülasyon koşulu değiştirilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, silikon enkapsülasyonu yapılan numunenin çok daha yüksek uygulama voltajlarına (2800 V) dayanabildiği görülmüştür. Bu durum, silikon tabakanın yüzeyde oluşturduğu elektriksel yalıtım sayesinde ark oluşumunu, yüzey kaçak akımlarını ve voltaj atlamalarını önlemesinden kaynaklanmaktadır.

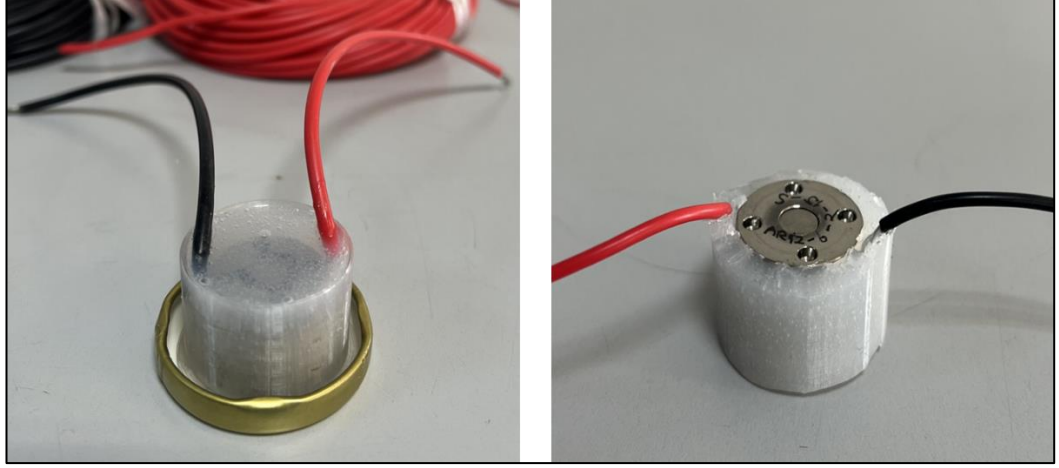
Enkapsülasyonun etkisi, mekanik çıktılarda da açıkça görülmektedir. Silikon uygulanmış numune, blokaj kuvveti (156 N) ve maksimum deplasman (7 μ m) değerlerinde silikon uygulanmamış numuneye (39 N ve 4 μ m) göre belirgin artış göstermiştir. Bu iyileşme, aktüatörün hem elektriksel kararlılığının hem de mekanik enerji dönüşüm veriminin arttığını göstermektedir. Ayrıca, ölçümler sırasında silikon

tabakasının oluşturduğu koruyucu yapı sayesinde voltaj dalgalanmaları, kıvılcım (ark) oluşumu ve ani deşarj olayları gözlenmemiştir.

Tablo 5.1: Silikon enkapsülasyonu uygulanmış ve uygulanmamış halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması: AR4-6-2-15 enkapsülasyonsuz; AR12-6-2-15-S silikon enkapsülasyonlu aktüatör.

Numune Kodu	AR4-6-2-15	AR12-6-2-15-S
Geometri	Halka	Halka
Seramik Kalınlığı (mm)	2	2
Katman Sayısı	6	6
Ön Yük (N)	15	15
Entegrasyon	Vidalı	Vidalı
Enkapsülasyon	×	✓
Yapışkan	×	×
1. Rezonans (kHz)	56,3428	59,0548
1. Empedans (ohm)	14,045	22,7516
1. Antirezonans (kHz)	61,408	62,311
2. Rezonans (kHz)	72,5032	78,2302
2. Empedans (ohm)	89,1614	52,0608
2. Antirezonans (kHz)	74,9152	82,0894
1 kHz kapasitans (nF)	25,7412	25,5064
Voltaj (V)	1200	2800
Blokaj Kuvveti (N)	39	156
Deplasman (μm)	4	7

Sonuç olarak, silikon enkapsülasyonu, aktüatörlerin yüksek voltaj altında kararlılığını artırmış, daha yüksek deplasman ve blokaj kuvveti elde edilmesine olanak sağlamıştır. Bu nedenle, sonraki tasarımlarda silikon kaplama uygulanmış sistemlerin tercih edilmesi performans ve güvenilirlik açısından daha uygun bulunmuştur. **Şekil 5.10'da** silikon enkapsülasyonu uygulanmış çok katmanlı halka tip aktüatörün son hali görülmektedir.



Şekil 5.10: Silikon enkapsülasyonu uygulanmış çok katmanlı halka tip aktüatör.

Ayrıca kare formdan halka geometrisine geçiş ile birlikte, piezoelektrik seramiklerin elektriksel ve mekanik performansı önemli ölçüde iyileşmiştir. Halka formundaki seramikler, daha geniş yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle elektriksel kapasitans değerlerinde artış sağlamış ve böylece aynı voltaj altında daha yüksek enerji depolama kapasitesi elde edilmiştir. Ayrıca, halka geometrisinin simetrik yapısı, uygulanan ön stresin tabakalara daha homojen dağılmasına olanak tanımış, bu da mekanik stabiliteyi ve uzun süreli kararlılığı artırmıştır. Entegrasyon sürecinin kalıpsız olarak gerçekleştirilebilmesi, üretim adımlarını sadeleştirerek tekrarlanabilirliği ve üretim verimliliğini artırmıştır. Sonuç olarak, halka formundaki tasarım, kare forma göre hem mekanik dayanım hem de elektriksel performans açısından üstün özellikler göstermiştir. Bu nedenlerle, çalışmanın sonraki aşamalarında halka geometrisine sahip piezoelektrik seramikler tercih edilerek deneysel çalışmalar bu tasarım üzerinden sürdürülmüştür.

5.2.3. Entegrasyon Tipi (Vidalı/Vidasız)

Bu çalışmada, yığın piezoelektrik aktüatörlerin entegrasyon yönteminin performans üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, yapısal bütünlüğü farklı yollarla sağlanan iki farklı montaj konfigürasyonu karşılaştırılmıştır. Her iki aktüatör de altı katmanlı halka seramiklerden oluşturulmuş ve 15 N aynı başlangıç ön gerilmesine maruz bırakılmıştır. Temel fark, bu ön gerilmenin kalıcı olup olmamasında yatmaktadır.

Tablo 5.2’de, vidalı (AR4-6-2-15) ve vidasız (AR5-6-2-Y-15-VZ) halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.2: Vidalı (AR4-6-2-15) ve vidasız (AR5-6-2-Y-15-VZ) entegrasyon yöntemiyle üretilen halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Numune Kodu	AR4-6-2-15	AR5-6-2-Y-15-VZ
Geometri	Halka	Halka
Seramik Kalınlığı (mm)	2	2
Katman Sayısı	6	6
Ön Yük (N)	15	15
Entegrasyon	Vidalı	Vidasız
Enkapsülasyon	×	×
Yapışkan	×	✓
1. Rezonans (kHz)	56,3428	57,0046
1. Empedans (ohm)	14,045	24,5859
1. Antirezonans (kHz)	61,408	60,2608
2. Rezonans (kHz)	72,5032	112,6756
2. Empedans (ohm)	89,1614	53,5173
2. Antirezonans (kHz)	74,9152	114,3858
3. Rezonans (kHz)	×	118,9128
3. Empedans (ohm)	×	72,962
3. Antirezonans (kHz)	×	123,6411
1 kHz kapasitans (nF)	25,7412	20,3624
Voltaj (V)	1200	0
Blokaj Kuvveti (N)	39	Blokaj kuvveti oluşmadı
Deplasman (μm)	4	Deplasman oluşmadı

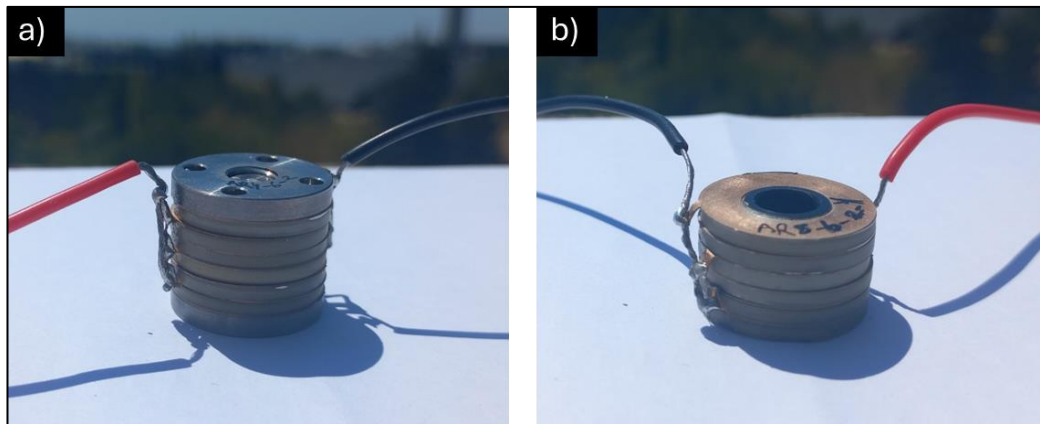
İlk sistemde ('vidalı'), merkezi bir vida ve metal başlıklar kullanılarak yapısal bütünlük ve ön gerilme sürekli olarak korunmuştur. İkinci sistemde ('vidasız') ise ön gerilme sadece yapıştırıcının kurlenmesi sırasında uygulanmış, sonrasında sıkıştırma mekanizması kaldırılmıştır. Böylece bu ikinci aktüatörün bütünlüğü, tamamen katmanlar arası yapışma kuvvetine dayanmaktadır. Bu iki farklı yaklaşım, entegrasyon yönteminin deplasman ve kuvvet üretimi üzerindeki doğrudan etkisini değerlendirme olanağı tanımıştır. **Tablo 5.2'**de görüldüğü üzere, vidalı entegrasyon yöntemiyle

Üretilen aktüatör 1200 V'a kadar kararlı çalışmış, 4 µm deplasman ve 39 N blokaj kuvveti üretmiştir. Buna karşılık, vidasız sistemde herhangi bir deplasman veya blokaj kuvveti elde edilememiştir. Her iki sistemde de aynı n yük uygulanmasına rağmen, vidasız yapının çalışmamasının temel nedeni, mekanik stabilitenin ve katmanlar arası temasın yeterli olmamasıdır.

Vidalı sistemde, vida aracılığıyla oluşturulan sürekli ve homojen sıkıştırma kuvveti, seramik katmanların birbiriyle tam temas etmesini sağlamış ve elektrik alanın her katmana düzgün bir şekilde iletilmesine olanak tanımıştır. Bu durum, rezonans-antirezonans farkının belirgin oluşmasına ve piezoelektrik cevabın aktif hale gelmesine neden olmuştur. Vidasız sistemde ise, n yük uygulaması yalnızca üretim aşamasında gerçekleştiği için, metal katmanlar çıkarıldığında bu kuvvet ortadan kalkmış, katmanlar arasında mikro boşluklar oluşmuştur. Bu mikro boşluklar, elektrik alanın kesintiye uğramasına ve dolayısıyla piezoelektrik deformasyonun oluşmamasına yol açmıştır.

Ayrıca vidasız sistemde seramiklerin yalnızca kendi ağırlıklarıyla hizalanması, titreşim sırasında mekanik kaymalara ve temas yüzeylerinde gerilim düzensizliklerine neden olmuştur. Bu durum rezonans davranışını tamamen bozmuş, sistemin elektriksel olarak aktif hale gelmesini engellemiştir.

şekil 5.11 (a)'da vidalı entegrasyon yöntemiyle üretilen çok katmanlı halka tip aktüatör, **şekil 5.11 (b)**'de ise vidasız entegrasyon yöntemiyle üretilen aktüatör görülmektedir.



şekil 5.11: Vidalı (a) ve vidasız (b) entegrasyon yöntemleriyle üretilen çok katmanlı halka tip piezoelektrik aktüatörlerin görünümü.

Vidalı sistemde seramik katmanların üst ve altına yerleştirilen metal plakalar, vida yardımıyla sıkıştırılarak mekanik bütünlük sağlanmıştır. Bu yapı, katmanlar arasında sürekli temas oluşturarak ön yükün homojen dağılmasını ve elektrik alanın eşit şekilde iletilmesini sağlamıştır.

Bu sonuçlar, piezoelektrik aktüatörlerde entegrasyon tipinin sistem kararlılığı ve performansı üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Katmanlar arasında mekanik temasın sürekliliği, elektrik alanın homojen dağılmasını doğrudan etkileyerek aktüatörün etkin çalışma kapasitesini belirlemektedir.

Sonuç olarak, vidalı entegrasyon yöntemi hem elektriksel süreklilik hem de mekanik dayanım açısından çok daha kararlı bir yapı sağlamıştır. Vidasız sistem, uygulama sırasında katmanlar arasında yeterli sıkıştırma kuvveti koruyamadığı için piezoelektrik etki gözlenmemiştir. Bu bulgular doğrultusunda, sonraki tüm tasarım ve üretim aşamalarında vidalı entegrasyon yöntemi tercih edilmiştir.

5.2.4. Yapışkan (İletken Yapıştırıcı) Kullanımı

Yığın piezoelektrik aktüatörlerin verimli ve kararlı çalışabilmesi, katmanlar arasındaki elektriksel ve mekanik arayüzün kalitesine doğrudan bağlıdır. Bu arayüzün etkin bir şekilde oluşturulması için genellikle iletken yapıştırıcılar kullanılır. Gümüş bazlı yapıştırıcılar, bu noktada çift yönlü bir işlev görmektedir. Yüksek elektriksel iletkenlik sağlayarak katmanların paralel bağlanmasına katkı sağlayarak, katmanlar arasında mekanik bir bağ oluşturarak sistemin yapısal bütünlüğünü ve uzun süreli kararlılığını artırmaktadırlar.

Bununla birlikte, yapıştırıcı kullanımının getirdiği avantajların yanı sıra dikkatle kontrol edilmesi gereken parametreler de mevcuttur. Yapıştırıcı katmanının kalınlığı, viskozitesi ve kürlenme koşulları gibi uygulama faktörleri, aktüatörün rezonans davranışı, sönümlleme karakteristikleri ve genel piezoelektrik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Tablo 5.3'te, yapışkanlı (AR13-6-2-15-Y-S) ve yapışkansız (AR12-6-2-15-S) halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3: Yapışkanlı (AR13-6-2-15-Y-S) ve yapışkansı (AR12-6-2-15-S) halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Numune Kodu	AR12-6-2-15-S	AR13-6-2-15-Y-S
Geometri	Halka	Halka
Seramik Kalınlığı (mm)	2	2
Katman Sayısı	6	6
Ön Yük (N)	15	15
Entegrasyon	Vidalı	Vidalı
Enkapsülasyon	✓	✓
Yapışkan	×	✓
1. Rezonans (kHz)	59,0548	58,6528
1. Empedans (ohm)	22,7516	32,3271
1. Antirezonans (kHz)	62,311	61,705
2. Rezonans (kHz)	78,2302	93,064
2. Empedans (ohm)	52,0608	14,7924
2. Antirezonans (kHz)	82,0894	105,7672
1 kHz kapasitans (nF)	25,5064	25,6441
Voltaj (V)	2800	1800
Blokaj Kuvveti (N)	156	81
Deplasman (μm)	7	10

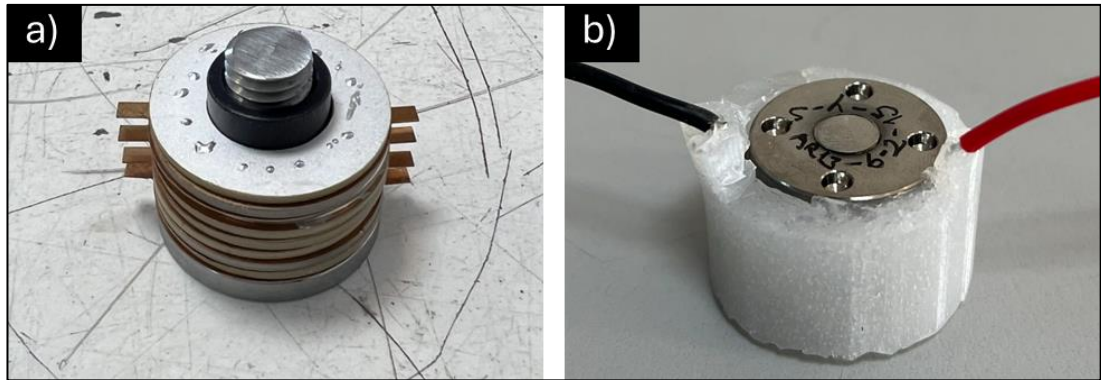
Bu çalışmada, aynı geometrik özelliklere, ön yük koşuluna (15 N) ve silikon enkapsülasyon durumuna sahip iki farklı numune üretilmiştir: AR12-6-2-15-S (yapışkansı) ve AR13-6-2-15-Y-S (yapışkanlı). Her iki aktüatör de vidalı entegrasyon yöntemiyle birleştirilmiş olup, aralarındaki fark yalnızca yapışkan uygulamasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.3'te görüldüğü üzere, yapışkan kullanılan numune (AR13-6-2-15-Y-S), daha düşük çalışma voltajı (1800 V) altında bile benzer veya daha yüksek mekanik

performans göstermiştir. Blokaj kuvveti, yapışkansız numunede 156 N, yapışkanlı numunede 81 N olarak ölçülmüş; ancak deplasman açısından yapışkanlı numune 10 μm ile yapışkansız numuneye göre daha yüksek değer üretmiştir. Bu farkın temel nedeni, yapışkanın aktüatör içinde oluşturduğu mekanik sönümleme ve esneklik etkisidir. Yapışkan tabaka, katmanlar arasındaki mikro boşlukları doldurarak daha homojen bir elektrik alan dağılımı sağlamış, ayrıca yüksek voltaj altında oluşabilecek arklanma (kıvılcım) ve yüzey kaçak akımlarını önlemiştir. Bununla birlikte, yapışkanın viskoelastik yapısı, enerji transferinin bir kısmını sönümleyerek blokaj kuvvetinde kısmi bir azalmaya neden olmuştur. Ancak bu durum, sistemin genel kararlılığını ve çalışma güvenliğini olumsuz etkilememiştir.

Rezonans frekansları incelendiğinde, yapışkanlı numunenin bir miktar daha düşük rezonans frekansına (58,65 kHz) sahip olduğu görülmektedir. Bu düşüş, yapıştırıcının sisteme ilave bir elastik tabaka kazandırmasından kaynaklanmaktadır. Antirezonans frekansının (61,73 kHz) da benzer şekilde az bir kayma göstermesi, sistemin piezoelektrik dönüşüm kabiliyetinin korunduğunu göstermektedir.

Şekil 5.12'de iletken yapıştırıcı uygulanarak hazırlanmış ve silikon enkapsülasyonla tamamlanmış çok katmanlı halka tip piezoelektrik aktüatörün üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 5.12: (a) Yapıştırıcı uygulanarak hazırlanmış çok katmanlı halka tip piezoelektrik aktüatörün üretim aşaması, (b) silikon enkapsülasyon sonrası tamamlanmış son hali.

Şekil 5.12 (a)'da aktüatörün montaj aşaması gösterilmiştir. Bu aşamada, her bir seramik tabaka arasına ince bir gümüş bazlı iletken yapıştırıcı tabakası uygulanmış ve sistem, üst ve alt metal plakalar arasında vida yardımıyla sıkıştırılarak ön yük altında

sabitlenmiştir. Bu yöntem hem elektriksel iletkenlik hem de mekanik dayanım açısından optimum bir entegrasyon sağlamıştır.

Şekil 5.12 (b)'de ise aynı aktüatörün silikon enkapsülasyon işlemi tamamlanmış son hali görülmektedir. Silikon kaplama, aktüatörün dış ortam koşullarına karşı korunmasını, nem ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesini ve çalışma sırasında meydana gelebilecek titreşimlerin sönümlenmesini sağlamıştır. Ayrıca silikonun esnek yapısı, aktüatör üzerindeki mekanik yüklerin dengelenmesine yardımcı olarak sistemin uzun süreli kararlılığını artırmıştır.

Bu yapı, önceki bölümlerde değerlendirilen parametrelerin (entegrasyon tipi, yapışkan kullanımı ve enkapsülasyon) tümünün optimize edildiği son tasarımı temsil etmektedir. Yapışkanın sağladığı düzgün elektriksel temas, vidalı entegrasyonun getirdiği mekanik dayanım ve silikon kaplamanın çevresel koruma etkisi birleştiğinde, sistemin en kararlı ve yüksek performanslı piezoelektrik aktüatör konfigürasyonu elde edilmiştir.

Sonuç olarak, iletken yapıştırıcı kullanımı, piezoelektrik aktüatörlerin mekanik dayanımını, elektriksel izolasyon güvenliğini ve uzun süreli çalışma kararlılığını önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle yüksek voltaj uygulamalarında yapışkan tabakasının varlığı, ark oluşumunu önleyerek sistemin kararlı şekilde çalışmasını sağlamıştır. Ayrıca silikon enkapsülasyonun sağladığı çevresel yalıtım ve mekanik sönümleme etkisiyle birlikte, sistemin hem elektriksel hem de mekanik kararlılığı daha da artmıştır. Bu nedenle, sonraki üretimlerde vidalı, yapışkanlı ve silikon enkapsülasyonlu sistem kombinasyonu en uygun entegrasyon yöntemi olarak tercih edilmiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda, sonraki bölümde ön stres uygulamasının aktüatör performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.2.5. Ön Stres Uygulamasının Etkisi

Piezoelektrik aktüatörlerde ön stres (preload), sistemin mekanik dayanımını, elektriksel kararlılığını ve uzun süreli çalışma güvenliğini belirleyen temel bir tasarım parametresidir [Koruza vd., 2015]. Seramik malzemenin gevrek yapısı gereği, yüksek elektrik alan altında çekme gerilmeleri oluşabilir ve bu gerilmeler seramiklerin çatlamasına neden olabilir. Ön stres uygulanarak seramiklerin daima sıkıştırma

gerilmesi altında çalışması sağlanır. Böylece hem mekanik bütünlük korunur hem de seramik tabakalar arasında düzgün elektriksel temas elde edilir.

Bu çalışmada, halka geometrisindeki PZT-5H seramiklerden üretilen altı katmanlı aktüatörlere 5 N, 10 N ve 15 N ön yük uygulanarak sistematik bir inceleme yapılmıştır. Tüm numunelerde vidalı entegrasyon, iletken yapıştırıcı ve silikon enkapsülasyon koşulları sabit tutulmuş, yalnızca ön stres değişkeni değiştirilmiştir.

Tablo 5.4'te, farklı ön yük değerlerinde elde edilen elektriksel (rezonans, antirezonans, empedans, kapasitans) ve mekanik (blokaj kuvveti, deplasman) sonuçlar verilmiştir. Elde edilen bulgular, ön stres miktarının sistemin deformasyon kabiliyeti üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

5 N ön yük uygulanan numunede, seramik tabakalar arasında tam yüzey teması sağlanamadığı için deformasyon sırasında mikro boşluklar oluşmuştur. Bu durum, sistemin elektrik alanı homojen şekilde iletmesini zorlaştırmış ve deplasman değerinin en düşük seviyede (8 μm) kalmasına neden olmuştur. Buna karşın, düşük ön stres altında seramiklerin elastik hareketi kısıtlanmadığından blokaj kuvveti 101 N gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Ancak düşük ön sıkıştırma, uzun süreli çalışmalarda tabakalar arasında ark oluşumu ve yüzey gerilim farklılıklarına yol açabileceğinden bu durum istenmemiştir.

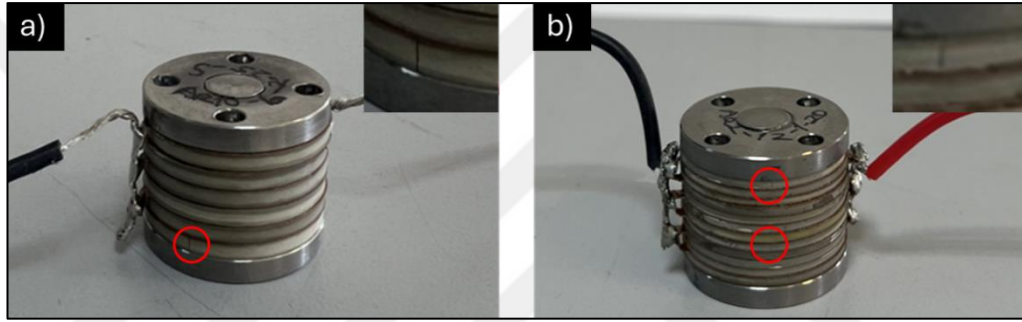
10 N ön yük uygulanan numune, yüksek deplasman (11 μm) ve dengeli blokaj kuvveti (60 N) ile en verimli çalışma koşulunu sağlamıştır. Bu ön yük seviyesi, seramiklerin kırılmadan çalışabilmesi için yeterli sıkıştırma sağlarken, domain hareketinin serbestliğini korumuştur. Ayrıca bu numunede daha yüksek voltaj (2200 V) uygulanabilmiş ve seramikler bu koşulda herhangi bir çatlama veya ark oluşumu göstermemiştir. Bu durum, 10 N ön yükün seramik tabakalar arasında optimum mekanik temas yaratarak elektrik alanın homojen dağılmasına olanak tanıdığını göstermektedir. Dolayısıyla, 10 N ön yük; hem deformasyon kabiliyetini (yüksek deplasman) hem de yapısal kararlılığı (kırılma olmaması) koruyan optimum ön stres değeri olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4: Farklı ön stres seviyelerine sahip halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Numune Kodu	AR13-6-2-15-Y-S	AR14-6-2-10-Y-S-2.	AR15-6-2-5-Y-S
Geometri	Halka	Halka	Halka
Seramik Kalınlığı (mm)	2	2	2
Katman Sayısı	6	6	6
Ön Yük (N)	15	10	5
Entegrasyon	Vidalı	Vidalı	Vidalı
Enkapsülasyon	✓	✓	✓
Yapışkan	✓	✓	✓
1. Rezonans (kHz)	58,6528	57,3664	56,1624
1. Empedans (ohm)	32,3271	21,3746	20,1337
1. Antirezonans (kHz)	61,705	61,3864	61,4688
2. Rezonans (kHz)	93,064	91,456	90,8952
2. Empedans (ohm)	14,7924	10,998	10,2256
2. Antirezonans (kHz)	105,7672	105,7672	107,7792
1 kHz kapasitans (nF)	25,6441	24,3992	24,0846
Voltaj (V)	1800	2200	2000
Blokaj Kuvveti (N)	81	60	101
Deplasman (µm)	10	11	8

15 N ön yük altında seramik tabakalar arasındaki sıkıştırma kuvveti artmış ve sistem daha rijit bir yapı kazanmıştır. Bu yüksek sıkıştırma, seramiklerin içindeki ferroelektrik domainlerin yön değiştirme kabiliyetini sınırlamıştır. Domain hareketinin kısıtlanması sonucu, uygulanan 1800 V gerilim altında seramik tabakalar daha az şekil değiştirmiş ve deplasman değeri 10 µm'ye düşmüştür. Ancak sistemin rijitliği arttığı için deformasyon sırasında karşı kuvvet oluşturma kapasitesi artmış ve blokaj kuvveti 81 N olarak ölçülmüştür. Bu durum, 15 N ön yükte sistemin mekanik olarak oldukça sağlam olmasına rağmen, piezoelektrik deformasyon yeteneğinin kısmen azaldığını göstermektedir.

20 N ve 25 N ön yüklerde yapılan denemelerde, seramik tabakaların aşırı sıkıştırma altında kırıldığı gözlemlenmiştir. **Şekil 5.13**'te kırık bölgeler kırmızı dairelerle gösterilmiştir. Bu kırılmalar, seramiklerin elastik sınırının aşılması ve tabakalar arasında oluşan dengesiz yük dağılımı sonucu meydana gelmiştir. Vida sıkıştırması sırasında uygulanan basınç, tüm yüzeye tamamen homojen dağılmadığından bazı bölgelerde yerel (lokal) basınç artışları oluşmuştur. Bu bölgelerde biriken gerilme zamanla mikro çatlaklara yol açmış ve yüksek ön stres seviyelerinde bu çatlaklar birleşerek kırılma davranışına neden olmuştur. Dolayısıyla, 20 N üzerindeki ön stres değerlerinde seramiklerin dayanım sınırı aşılmış ve çok katmanlı yapının bütünlüğü bozulmuştur.



Şekil 5.13: (a) 25 N (b) 20 N ön yük uygulanmış aktüatörlerde gözlenen seramik kırıkları (kırmızı dairelerle gösterilmiştir).

Sonuç olarak, ön stresin çok düşük olduğu koşullarda (5 N) seramik tabakalar arasında zayıf temas oluşmakta ve deformasyon etkinliği azalmakta; çok yüksek olduğu koşullarda (≥ 15 N) ise seramiklerin mekanik dayanımı aşılmakta ve kırılmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle, 10 N ön yük, seramiklerin kırılmadan çalışabildiği, yüksek voltaj altında en yüksek deplasmanın (11 μm) elde edilebildiği ve sistemin uzun süreli kararlılığının sağlandığı optimum ön stres değeri olarak belirlenmiştir.

Bu bölümde, piezoelektrik aktüatörlerin üretiminde etkili olan enkapsülasyon, entegrasyon tipi, yapışkan kullanımı ve ön stres miktarı sistematik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, vidalı entegrasyon, iletken yapıştırıcı ve silikon enkapsülasyonun birlikte kullanıldığı yapıların hem elektriksel kararlılık hem de mekanik dayanım açısından en başarılı konfigürasyon olduğunu göstermiştir. Ayrıca, seramiklerin kırılmadan çalışabilmesi ve yüksek deplasman elde edilebilmesi için 10 N ön yük değerinin optimum sıkıştırma koşulu olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu optimizasyon çalışmaları, piezoelektrik aktüatörlerin kararlı, güvenli ve

yüksek performanslı bir şekilde çalışabilmesi için gerekli temel tasarım parametrelerini ortaya koymuştur.

5.3. Aktüatör Performansının Değerlendirilmesi

Entegrasyon koşullarının optimize edilmesiyle elde edilen nihai piezoelektrik aktüatör yapılarında, farklı seramik katman kalınlıklarında, katman sayılarında üretilen aktüatör sisteminin voltaja bağlı olarak mekanik ve elektriksel performans özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu bölümde, üretilen aktüatörlerin deplasman–voltaj ve blokaj kuvveti–voltaj ilişkileri değerlendirilmiş, ayrıca rezonans ve antirezonans frekanslarından yararlanılarak sistemin dinamik tepkisi analiz edilmiştir. Ölçümler, aktüatörlerin uygulanan elektrik alan altında gösterdiği şekil değişimi (deplasman) ve karşı kuvvet üretme kapasitesi (blokaj kuvveti) esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen vidalı, yapışkanlı ve silikon enkapsülasyonlu nihai yapı, tüm performans deneylerinde referans aktüatör olarak kullanılmıştır. Ayrıca farklı ön stres seviyeleri altında (5 N, 10 N ve 15 N) üretilen numuneler, sistematik olarak karşılaştırılmış ve ön yük miktarının aktüatör davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu analizler, piezoelektrik aktüatörlerin çalışma verimliliğini, mekanik kararlılığını ve enerji dönüşüm etkinliğini belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, aktüatör performansının yalnızca malzeme özelliklerinden değil, aynı zamanda entegrasyon koşulları, sıkıştırma kuvveti ve yapısal tasarım parametrelerinden de güçlü bir şekilde etkilendiğini göstermiştir.

Bu kapsamda, optimum ön stres seviyesinin (10 N) sağlandığı, silikonla enkapsüle edilmiş ve iletken yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş vidalı yapının hem yüksek deplasman üretimi hem de mekanik dayanım açısından kararlı bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

Tablo 5.5'te, 10 N ön stres altında, vidalı–yapışkanlı–silikon enkapsülasyonlu piezoelektrik aktüatörlerin farklı seramik kalınlıkları ve katman sayıları için ölçülen elektriksel ve mekanik performans değerleri verilmiştir.

Tablo 5.5: 10 N ön yük altında farklı seramik kalınlıklarına sahip halka tip piezoelektrik aktüatörlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Numune Kodu	AR6-12-1-10-Y-S	AR14-6-2-10-Y-S	AR5-4-3-10-Y-S
Geometri	Halka	Halka	Halka
Seramik Kalınlığı (mm)	1	2	3
Katman Sayısı	12	6	4
Ön Yük (N)	10	10	10
Entegrasyon	Vidalı	Vidalı	Vidalı
Enkapsülasyon	✓	✓	✓
Yapışkan	✓	✓	✓
1. Rezonans (kHz)	58,693	57,3664	57,3664
1. Empedans (ohm)	24,2082	21,3746	49,6231
1. Antirezonans (kHz)	59,4166	61,3864	61,3864
2. Rezonans (kHz)	87,2752	91,456	93,3856
2. Empedans (ohm)	5,449	10,998	26,59
2. Antirezonans (kHz)	94,5112	105,7672	108,6616
3. Rezonans (kHz)	×	×	111,2364
3. Empedans (ohm)	×	×	763,41
3. Antirezonans (kHz)	×	×	111,96
1 kHz kapasitans (nF)	87,54	24,3992	11,1712
Voltaj (V)	900	2000	2800
Blokaj Kuvveti (N)	63	53	92
Deplasman (μm)	10	10	12

Tüm numunelerde aktüatörün toplam aktif kalınlığı 12 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Buna göre, 1 mm seramik kalınlığında 12 katman, 2 mm’de 6 katman ve 3 mm’de 4 katman kullanılarak üç farklı yapı elde edilmiştir. Bu yaklaşım, seramik

kalınlığının ve katman sayısının sabit toplam aktif yükseklik altında sistem performansına etkisini karşılaştırmaya olanak tanımıştır.

Sonuçlara göre, aktüatörlerde elde edilen deplasman ve blokaj kuvveti değerleri, uygulanan voltaj seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. Her üç aktüatör tipi de benzer aktif kalınlığa sahip olmasına rağmen, seramik kalınlığı arttıkça sistemin voltaj dayanımı yükselmiş, dolayısıyla daha yüksek voltaj uygulanabilmiş ve buna bağlı olarak daha büyük deplasman değerleri elde edilmiştir. Örneğin, 3 mm seramik kalınlığına sahip 4 katmanlı yapı (AR5-4-3-10-Y-S) 2800 V uygulanarak 12 µm deplasman üretmiştir. Bu durum, kalın seramiklerde birim elektrik alan başına düşen deformasyonun artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, kalın seramiklerin mekanik rijitliği daha yüksek olduğu için, blokaj kuvveti 92 N ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Buna karşın, 1 mm kalınlıktaki 12 katmanlı yapı (AR6-12-1-10-Y-S), daha ince seramiklerden oluştuğu için daha düşük voltajlarda bile benzer 10 µm deplasman üretmiştir. Bu yapıların toplam kapasitansının yüksek (87,54 nF) olması, daha yüksek yük depolama kapasitesine işaret etmektedir. Ancak çok sayıda seramik ince katman kullanıldığında, her bir seramik-yapıştırıcı-elektrot arayüzünde belirli miktarda enerji kaybı (dielektrik kayıp) meydana gelir. Elektrik alan, bu kadar fazla katmandan geçerken kısmen soğurulur ve zayıflar, bu da sistemde elektriksel sönüm etkisine yol açar. Bu nedenle, yüksek voltaj uygulandığında enerjinin bir kısmı bu arayüzlerde dağılır; sistemin tepkisi kararsız hale gelebilir ve ısı artışı, ark oluşumu veya yüzey kaçakları gibi olumsuz etkiler gözlemlenebilir.

2 mm kalınlıktaki 6 katmanlı aktüatör (AR14-6-2-10-Y-S), 2000 V altında 10 µm deplasman ve 53 N blokaj kuvveti değerleriyle iki yapı arasında dengeli bir performans göstermiştir. Bu konfigürasyon, seramik kalınlığı ile elektrik alan yoğunluğu arasında optimum bir denge sağlamıştır. Orta kalınlıktaki seramiklerde uygulanan voltaj, hem kırılma riskini artırmadan yeterli elektrik alan oluşturmakta hem de mekanik deformasyonu etkin şekilde sağlamaktadır.

Sonuç olarak, aktif kalınlığı 12 mm sabit tutulan sistemlerde, seramik kalınlığının artışı aktüatörün yüksek voltaj dayanımı ve mekanik kuvvet üretimi açısından avantaj sağlarken, ince tabakalı yapılarda daha düşük voltajlarda benzer deplasman değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür.

5.3.1. Deplasman Analizi

1 mm kalınlığındaki piezoelektrik seramiklerden üretilen çok katmanlı aktüatörlerde voltaj–deplasman ilişkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Her bir ölçüm, aynı numune üzerinde beş tekrar yapılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Ölçüm verileri **Tablo 5.6**’da bu ölçümlerden elde edilen voltaj–deplasman histeris eğrisi ise **Şekil 5.14**’te sunulmuştur.

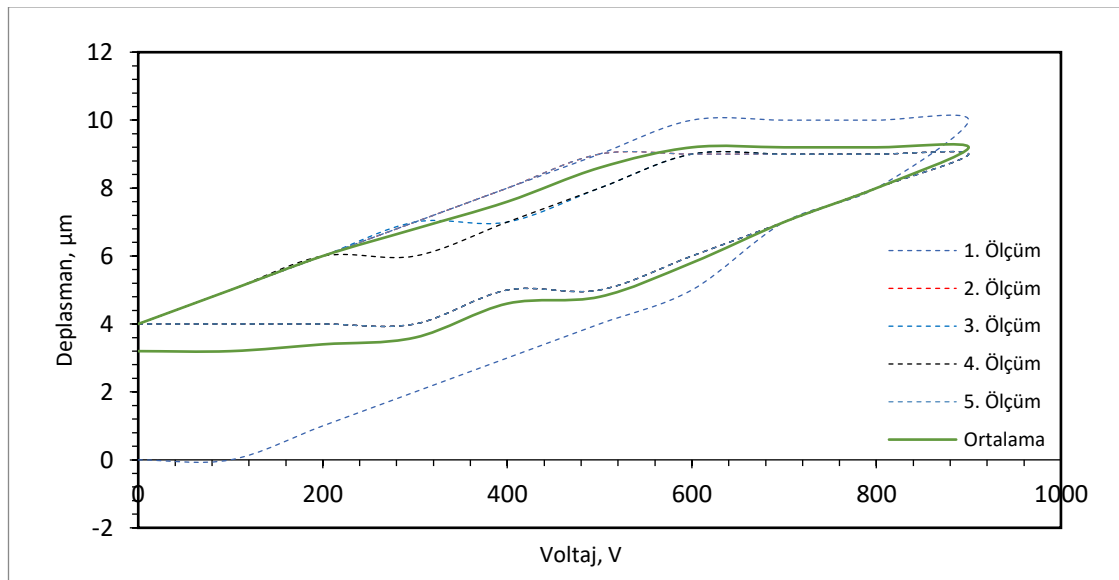
Tablo 5.6: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.

Deplasman ölçüm sonucu						
Voltaj, V	Deplasman mesafesi, μm					Ortalama
0	0	4	4	4	4	3,2
100	0	4	4	4	4	3,2
200	1	4	4	4	4	3,4
300	2	4	4	4	4	3,6
400	3	5	5	5	5	4,6
500	4	5	5	5	5	4,8
600	5	6	6	6	6	5,8
700	7	7	7	7	7	7
800	8	8	8	8	8	8
900	10	9	9	9	9	9,2
800	10	9	9	9	9	9,2
700	10	9	9	9	9	9,2
600	10	9	9	9	9	9,2
500	9	9	8	8	9	8,6
400	8	8	7	7	8	7,6
300	7	7	7	6	7	6,8
200	6	6	6	6	6	6
100	5	5	5	5	5	5
0	4	4	4	4	4	4

Tablo 5.6'da görüldüğü üzere, uygulanan voltajın 0–900 V aralığında kademeli olarak artırılmasıyla deplasman değerleri doğrusal olmayan biçimde artmış ve maksimum yaklaşık 10 μm değerine ulaşmıştır. Voltajın tekrar 0 V seviyesine düşürülmesiyle birlikte deplasman değerlerinde kısmi bir geri dönüş gözlenmiş, ancak tam olarak başlangıç noktasına ulaşılmamıştır. Ölçüm sonunda yaklaşık 4 μm kalıcı deplasman (remanent deformasyon) tespit edilmiştir.

Bu davranış, piezoelektrik seramiklerin karakteristik ferroelektrik histeris etkisi ile açıklanmaktadır. Elektrik alan uygulandığında seramik içindeki ferroelektrik domainler elektrik alan yönüne hizalanır. Ancak elektrik alan kaldırıldığında bu domainlerin bir kısmı eski yönelimlerine dönemez; bu durum remanent polarizasyon olarak adlandırılır [Ogawa vd., 2009]. Domainlerin kısmen yönlenmiş hâlde kalması, sistemde sıfır voltajda dahi belirli bir deformasyonun korunmasına neden olur.

Ayrıca, 1 mm kalınlığındaki seramik aktüatörün 12 katmandan oluşması, toplam arayüz sayısını artırmıştır. Her bir seramik–elektrot–yapıştırıcı arayüzünde meydana gelen mikro gerilme birikimleri, elektrik alan ortadan kalktığında bile tam olarak sönümlenmemekte ve deformasyonun bir kısmı sistemde kalıcı hâlde gelmektedir. Bu nedenle voltaj sıfıra döndüğünde sistemin tamamen başlangıç konumuna dönmemesi, yalnızca elektriksel değil aynı zamanda mekanik histeris bileşenleriyle de ilişkilidir.



Şekil 5.14: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.

Şekil 5.14'te verilen histeris eğrisinde, voltaj artışı ve azalışı sırasında farklı deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu çevrim farkı, piezoelektrik sistemdeki enerji kaybının (iç sürtünme ve domain yönlenme kayıpları) bir göstergesidir. Histeris döngüsünün genişliği, sistemdeki enerji dönüşüm veriminin sınırlı olduğunu, ancak çok katmanlı yapının yüksek deplasman kapasitesi sağladığını göstermektedir. Ayrıca, yapıştırıcı tabakaların viskoelastik karakteri de kalıcı deformasyona katkı sağlamaktadır. Elektrik alan kaldırıldığında seramik tabakalar hızlıca toparlanma eğilimindeyken, yapıştırıcı tabakalar bu deformasyonu gecikmeli olarak sönümler. Bu da ölçüm sonunda 0 V seviyesinde yaklaşık 4 µm'lik kalıcı deplasmanın görülmesine neden olur.

Sonuç olarak, 1 mm seramik kalınlığındaki çok katmanlı aktüatör, yüksek deplasman üretme kapasitesi göstermiş; ancak ferroelektrik ve mekanik histeris etkileri nedeniyle belirli bir kalıcı deformasyon oluşturmuştur. Bu yapı, yüksek hassasiyet gerektiren mikro-konumlandırma sistemlerinde kullanılabilirlik potansiyeline sahiptir, ancak enerji kayıpları nedeniyle kontrol edilebilirlik açısından dikkatli tasarım gerektirmektedir.

2 mm kalınlığında piezoelektrik seramiklerden oluşturulan aktüatör yapısında, uygulanan voltaj ile elde edilen deplasman değerleri arasındaki ilişki beş tekrar ölçüm ile belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilen değerler **Tablo 5.7**'de, histeris karakteristiği ise **Şekil 5.15**'te verilmiştir.

Tablo 5.7: 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.

Deplasman ölçüm sonucu						
Voltaj, V	Deplasman mesafesi, µm					Ortalama
0	0	1	1	1	1	0,8
100	0	1	1	1	1	0,8
200	0	1	1	1	1	0,8
300	1	1	1	1	2	1,2
400	1	2	2	2	2	1,8
500	2	2	2	2	2	2

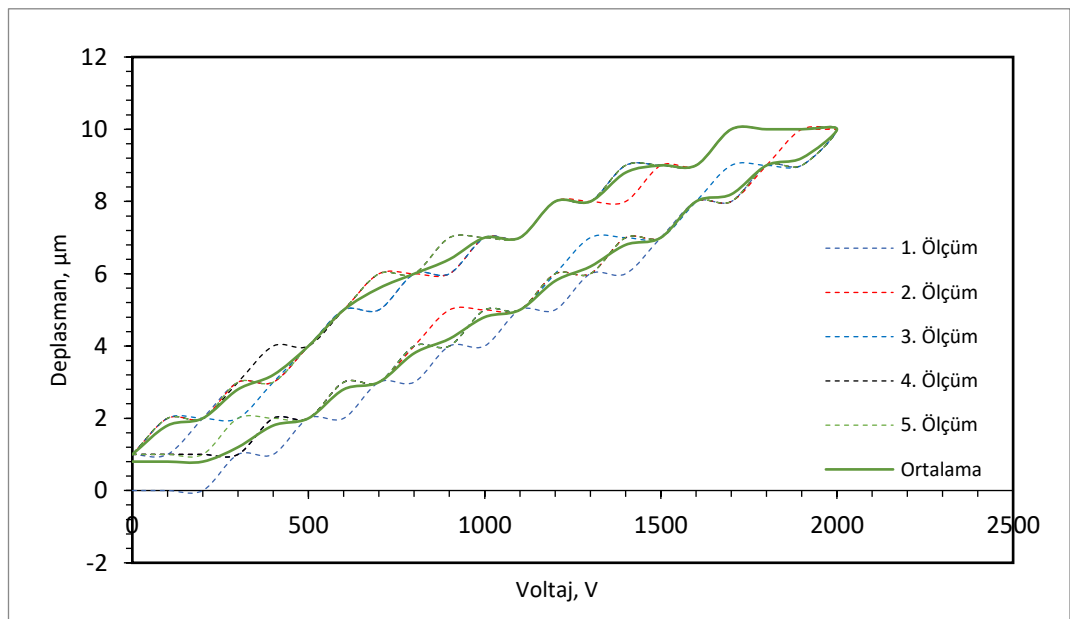
Tablo 5.7: Devamı.

600	2	3	3	3	3	2,8
700	3	3	3	3	3	3
800	3	4	4	4	4	3,8
900	4	5	4	4	4	4,2
1000	4	5	5	5	5	4,8
1100	5	5	5	5	5	5
1200	5	6	6	6	6	5,8
1300	6	6	7	6	6	6,2
1400	6	7	7	7	7	6,8
1500	7	7	7	7	7	7
1600	8	8	8	8	8	8
1700	8	8	9	8	8	8,2
1800	9	9	9	9	9	9
1900	9	10	9	9	9	9,2
2000	10	10	10	10	10	10
1900	10	10	10	10	10	10
1800	10	10	10	10	10	10
1700	10	10	10	10	10	10
1600	9	9	9	9	9	9
1500	9	9	9	9	9	9
1400	9	8	9	9	9	8,8
1300	8	8	8	8	8	8
1200	8	8	8	8	8	8
1100	7	7	7	7	7	7
1000	7	7	7	7	7	7

Tablo 5.7: Devamı.

900	6	6	6	7	7	6,4
800	6	6	6	6	6	6
700	5	6	5	6	6	5,6
600	5	5	5	5	5	5
500	4	4	4	4	4	4
400	3	3	3	4	3	3,2
300	3	3	2	3	3	2,8
200	2	2	2	2	2	2
100	1	2	2	2	2	1,8
0	1	1	1	1	1	1

Uygulanan voltaj 0 V'tan başlayarak 2000 V seviyesine kadar kademeli biçimde artırılmış, ardından aynı adımlarla tekrar 0 V'a düşürülmüştür. Voltaj artışıyla birlikte deplasman değerleri yaklaşık doğrusal bir artış göstermiş, maksimum 10 μm seviyesine ulaşmıştır. Voltaj azaldığında ise sistemin başlangıç konumuna tam olarak dönmediği, ölçüm sonunda yaklaşık 1 μm kalıcı deplasman (remanent deformasyon) kaldığı gözlenmiştir.

**Şekil 5.15:** 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.

Bununla birlikte, 2 mm kalınlığındaki seramik yapısında katman sayısının 1 mm'lik modele göre yarı yarıya azalması (6 katman) nedeniyle mekanik arayüz sayısı azalmış, dolayısıyla arayüzlerdeki mikro gerilme birikimleri ve sürtünme kaynaklı enerji kayıpları azalmıştır. Bu durum, **Şekil 5.15**'te görüldüğü üzere histeris döngüsünün 1 mm kalınlıklı aktüatöre göre daha dar olmasını sağlamıştır. Histeris döngüsünün daralması, sistemin daha verimli elektro-mekanik enerji dönüşümü yaptığını göstermektedir.

Tablo 5.7 incelendiğinde, 2 mm seramikli aktüatörün düşük voltajlarda (0–500 V aralığı) oldukça kararlı ve tekrarlanabilir küçük deplasmanlar ürettiği, yüksek voltajlarda (1500–2000 V) ise deplasman artışının kademeli olarak yavaşladığı görülmektedir. Bu durum, yüksek alanlarda domain yönlenmesinin büyük oranda tamamlanmasından kaynaklanmaktadır [Li vd., 2009].

Voltaja bağlı deplasman eğrilerinde görülen küçük dalgalanmalar (özellikle 1000–1500 V aralığında) ise, sistemdeki mekanik sürtünme ve yapıştırıcı tabakasının viskoelastik davranışı ile ilişkilidir. Elektrik alan kaldırıldığında yapıştırıcı tabaka deformasyonu anında sönümleyememekte, bu da ölçüm sonunda az miktarda kalıcı deformasyonun (yaklaşık 1 μm) sistemde kalmasına yol açmaktadır.

Sonuç olarak, 2 mm kalınlığındaki seramik yapıda histeris döngüsü daralmış, enerji kayıpları azalmış, ancak maksimum deplasman değeri korunmuştur. Bu yapı hem yüksek deplasman kapasitesi hem de düşük histeris etkisi sayesinde 1 mm kalınlıklı modele göre daha dengeli ve kararlı bir performans göstermiştir.

3 mm kalınlığında piezoelektrik seramiklerden oluşturulan aktüatör yapısında, uygulanan voltaj ile elde edilen deplasman arasındaki ilişki detaylı biçimde incelenmiştir. Ölçümler aynı numune üzerinde beş tekrar yapılmış, ortalama değerler hesaplanarak **Tablo 5.8**'de verilmiştir. Elde edilen voltaj–deplasman histeris karakteristiği ise **Şekil 5.16**'da gösterilmiştir.

Tablo 5.8: 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman ölçüm sonuçları.

Deplasman ölçüm sonucu						
Voltaj, V	Deplasman mesafesi, μm					Ortalama
0	0	2	2	2	2	1,6
100	0	2	2	2	2	1,6
200	0	2	2	2	2	1,6
300	1	2	2	2	2	1,8
400	1	2	3	3	3	2,4
500	1	3	3	3	3	2,6
600	2	3	3	3	3	2,8
700	2	3	4	4	4	3,4
800	2	4	4	4	4	3,6
900	3	4	4	4	4	3,8
1000	3	5	5	5	5	4,6
1100	4	5	5	5	5	4,8
1200	4	5	5	5	5	4,8
1300	5	6	6	6	6	5,8
1400	5	6	6	6	6	5,8
1500	6	6	6	7	6	6,2
1600	6	7	7	7	7	6,8
1700	7	7	7	7	7	7
1800	7	8	7	8	8	7,6
1900	8	8	8	8	8	8
2000	8	8	8	8	8	8
2100	9	9	9	9	9	9
2200	9	9	9	10	9	9,2

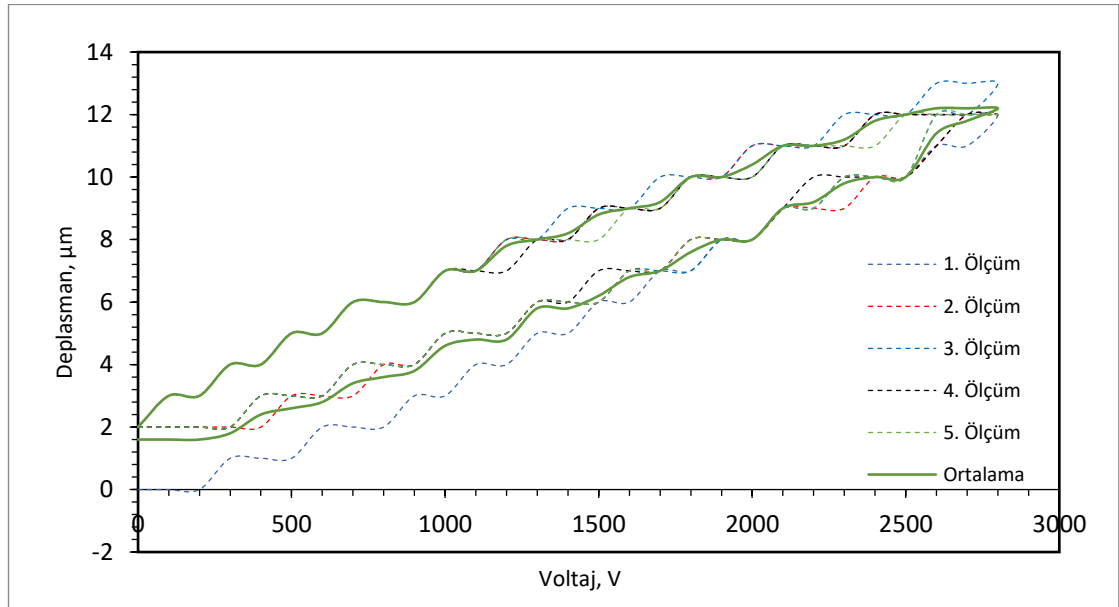
Tablo 5.8: Devamı.

2300	10	9	10	10	10	9,8
2400	10	10	10	10	10	10
2500	10	10	10	10	10	10
2600	11	11	12	11	12	11,4
2700	11	12	12	12	12	11,8
2800	12	12	13	12	12	12,2
2700	12	12	13	12	12	12,2
2600	12	12	13	12	12	12,2
2500	12	12	12	12	12	12
2400	12	12	12	12	11	11,8
2300	11	11	12	11	11	11,2
2200	11	11	11	11	11	11
2100	11	11	11	11	11	11
2000	10	11	11	10	10	10,4
1900	10	10	10	10	10	10
1800	10	10	10	10	10	10
1700	9	9	10	9	9	9,2
1600	9	9	9	9	9	9
1500	9	9	9	9	8	8,8
1400	8	8	9	8	8	8,2
1300	8	8	8	8	8	8
1200	8	8	8	7	8	7,8
1100	7	7	7	7	7	7
1000	7	7	7	7	7	7
900	6	6	6	6	6	6

Tablo 5.8: Devamı.

800	6	6	6	6	6	6
700	6	6	6	6	6	6
600	5	5	5	5	5	5
500	5	5	5	5	5	5
400	4	4	4	4	4	4
300	4	4	4	4	4	4
200	3	3	3	3	3	3
100	3	3	3	3	3	3
0	2	2	2	2	2	2

Uygulanan voltaj 0 V'tan başlayarak kademeli biçimde artırılmış, maksimum 2800 V seviyesine kadar çıkılmış ve ardından aynı adımlarla 0 V'a geri dönlmüştür. Voltaj artışıyla birlikte deplasman değerlerinin yaklaşık 12–13 μm seviyelerine kadar yükseldiği, voltaj azaldığında ise deformasyonun tamamen sıfırlanmadığı ve yaklaşık 2 μm kalıcı deplasman kaldığı belirlenmiştir.

**Şekil 5.16:** 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–deplasman histeris eğrisi.

3 mm kalınlığındaki seramiklerde katman sayısının 1 mm ve 2 mm kalınlıklara göre daha az (4 katman) olması, arayüz sayısını da azaltmıştır. Arayüzlerin azalmasıyla birlikte mekanik kayıplar ve sürtünme etkileri azalmış, bu da **Şekil 5.16**'da gözlenen daha kararlı ve düzgün bir histeris eğrisine yol açmıştır. Bu yapıda, sistemin rijitliği arttığı için deformasyon tepkisi daha dengeli hale gelmiştir.

Tablo 5.8 incelendiğinde, 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün düşük voltaj aralıklarında (0–800 V) sınırlı bir deformasyon sergilediği, ancak yüksek voltaj seviyelerinde (2000–2800 V) deplasmanın belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu durum, kalın seramiklerde elektrik alanın iç bölgelere daha zayıf dağılmasından kaynaklanmakta olup, aynı deformasyonu elde edebilmek için daha yüksek voltaj gereksinimi doğurmaktadır [**Lebedev & Akedo, 2002**].

Şekil 5.16'daki eğriler, 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün hem yüksek deplasman hem de düşük histeris genişliği açısından en kararlı yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Artan kalınlıkla birlikte sistemin mekanik dayanımı ve kuvvet üretim kapasitesi artarken, enerji dönüşüm kayıpları azalmıştır. Ancak bu avantaj, aynı zamanda daha yüksek sürme voltajı gerektiren bir tasarım maliyetiyle elde edilmiştir.

Sonuç olarak, 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatör, 1 mm ve 2 mm kalınlıklara kıyasla daha yüksek deplasman kapasitesi ($\approx 13 \mu\text{m}$), daha kararlı mekanik tepki ve daha dar histeris çevrimi göstermiştir.

5.3.2. Blokaj Kuvveti Analizi

1 mm kalınlığındaki piezoelektrik seramiklerden üretilen aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti davranışı beş tekrar ölçüm ile belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarının ortalaması **Tablo 5.9**'da eğrilerin histerezis davranışı ise **Şekil 5.17**'de verilmiştir.

Tablo 5.9: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.

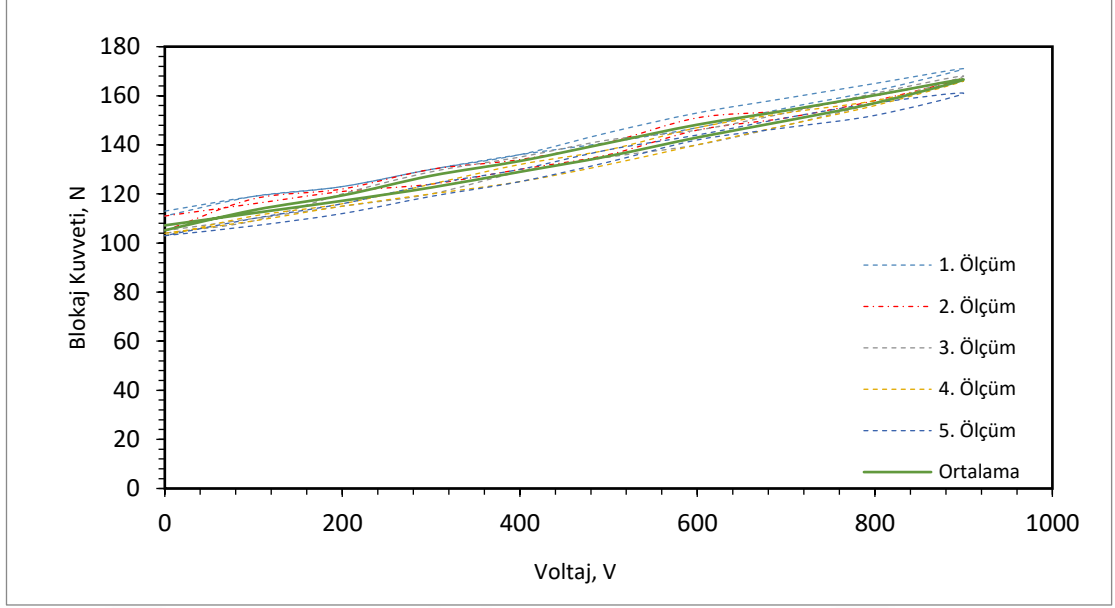
Blokaj Kuvveti Ölçüm Sonucu						
Voltaj, V	Blokaj Kuvveti, Newton					Ortalama
0	113	111	105	104	103	107,2
100	119	116	110	109	107	112,2
200	123	121	115	115	112	117,2

Tablo 5.9: Devamı.

300	130	124	120	120	119	122,6
400	136	130	129	125	125	129
500	141	136	135	132	133	135,4
600	147	146	140	140	142	143
700	155	151	148	148	147	149,8
800	162	158	157	156	152	157
900	171	167	168	166	161	166,6
800	165	160	161	158	157	160,2
700	159	154	153	153	151	154
600	153	151	146	147	144	148,2
500	145	141	142	138	138	140,8
400	136	134	135	132	130	133,4
300	130	130	129	124	124	127,4
200	123	122	120	116	116	119,4
100	119	118	109	111	110	113,4
0	111	105	104	103	103	105,2

Aktüatöre uygulanan voltaj 0 V'tan başlayarak 900 V'a kadar kademeli olarak artırılmış ve her adımda elde edilen blokaj kuvveti ölçülmüştür. Uygulanan voltaj arttıkça blokaj kuvvetinde düzenli bir artış gözlenmiştir. Ortalama değerler dikkate alındığında, blokaj kuvveti 107 N'dan başlayarak yaklaşık 166 N seviyesine kadar yükselmiştir.

Bu artış, uygulanan elektrik alanla birlikte seramik içindeki ferroelektrik domainlerin yönlenmesi sonucu oluşan mekanik deformasyonun karşı kuvvet olarak artmasıyla açıklanabilir. Başka bir ifadeyle, voltaj yükseldikçe seramiğin uzama eğilimi artmakta; ancak aktüatör uçları sabit tutulduğu için bu uzama blokaj kuvveti olarak ölçülmektedir [Daniel vd., 2015].



Şekil 5.17: 1 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti eğrileri.

Şekil 5.17'de görüldüğü üzere, beş tekrar ölçüm arasında oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir; bu durum, sistemin tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. 0–400 V aralığında blokaj kuvveti artışının daha yavaş, 500 V'tan sonra ise eğimin kademeli biçimde yükseldiği gözlenmiştir. Bu eğilim, seramiğin aktif bölgesinde elektrik alanın belirli bir eşiği aşmasıyla domain yönlenmesinin hızlanmasına bağlanabilir. Yüksek voltajlarda (700–900 V) blokaj kuvveti artışının giderek azaldığı, yani eğrinin doygunluğa ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum, seramik malzemenin elektromekanik doygunluğa yaklaşmasıyla açıklanabilir; domainlerin büyük bölümü elektrik alan yönünde hizalandığından ilave voltaj artışları artık önemli bir kuvvet değişimi yaratmamaktadır [Tran vd., 2016].

Voltaja bağlı blokaj kuvveti artışı neredeyse doğrusal bir eğilim göstermekte ve histeris davranışı oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu da 1 mm kalınlığındaki yapının yüksek frekanslı, hassas konumlama gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak bu yapı, sınırlı aktif hacme sahip olduğundan elde edilen maksimum blokaj kuvveti diğer kalınlık gruplarına göre daha düşüktür.

Sonuç olarak, 1 mm kalınlığındaki seramiklerde blokaj kuvveti voltajla birlikte doğrusal biçimde artmış, yüksek tekrarlanabilirlik ve düşük histeris davranışı sergilenmiştir. Ancak ince seramiklerin düşük rijitliği nedeniyle maksimum 166 N civarında bir kuvvet elde edilmiş, bu değer kalın seramikli yapılara göre daha sınırlı kalmıştır.

2 mm kalınlığındaki piezoelektrik seramiklerden üretilen aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti karakteristiği beş tekrar ölçüm ile belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarının ortalaması **Tablo 5.10**’da histerezis davranışı ise **Şekil 5.18**’de verilmiştir.

Tablo 5.10: 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.

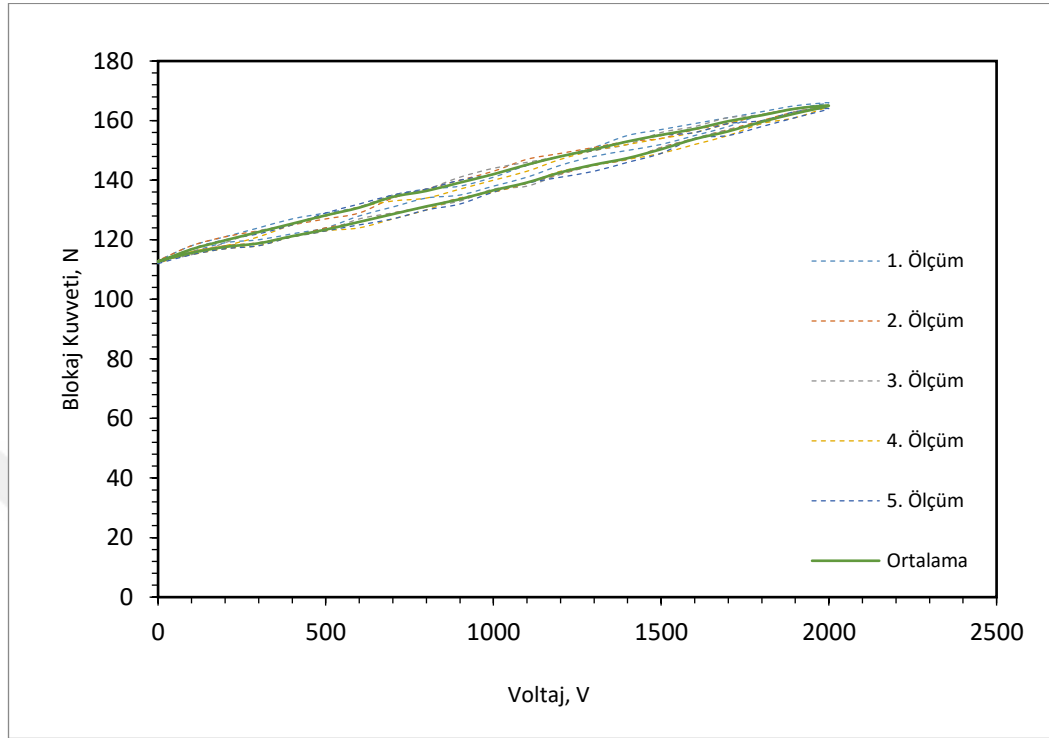
Blokaj Kuvveti Ölçüm Sonucu						
Voltaj, V	Blokaj Kuvveti, Newton					Ortalama
0	113	113	113	113	112	112,8
100	116	116	116	115	115	115,6
200	119	118	117	117	117	117,6
300	120	119	119	118	118	118,8
400	122	121	121	121	121	121,2
500	124	124	123	123	123	123,4
600	128	126	127	124	125	126
700	131	129	129	127	127	128,6
800	134	131	131	130	130	131,2
900	135	134	133	134	132	133,6
1000	138	136	137	136	136	136,6
1100	141	139	138	139	139	139,2
1200	145	142	142	143	141	142,6
1300	148	145	145	145	143	145,2
1400	150	147	147	147	146	147,4
1500	152	151	151	149	149	150,4
1600	155	154	154	152	154	153,8
1700	158	157	157	155	155	156,4
1800	162	160	159	159	158	159,6

Tablo 5.10: Devamı.

1900	164	163	163	161	161	162,4
2000	166	165	165	165	164	165
1900	165	164	164	164	163	164
1800	163	162	162	162	160	161,8
1700	161	159	161	159	159	159,8
1600	159	157	158	156	156	157,2
1500	157	154	156	154	155	155,2
1400	155	153	152	152	153	153
1300	151	151	150	150	150	150,4
1200	148	149	148	147	148	148
1100	145	147	146	143	145	145,2
1000	141	143	144	140	142	142
900	138	140	141	137	140	139,2
800	137	137	137	134	137	136,4
700	135	134	135	133	135	134,4
600	131	129	131	131	132	130,8
500	129	127	128	128	129	128,2
400	127	125	125	125	125	125,4
300	124	123	123	121	122	122,6
200	121	121	119	118	120	119,8
100	118	118	115	116	117	116,8
0	113	113	113	112	112	112,6

Uygulanan voltaj 0 V'tan başlayarak kademeli biçimde 2000 V'a kadar artırılmış, ardından aynı adımlarla 0 V'a düşürülmüştür. Ortalama değerler incelendiğinde blokaj kuvvetinin 112 N'dan başlayarak yaklaşık 165 N seviyesine kadar yükseldiği

görülmektedir. Kuvvet artışı neredeyse doğrusal bir karakter sergilemiş ve yüksek voltajlara çıkıldığında dahi belirgin bir doygunluk eğilimi gözlenmemiştir.



Şekil 5.18: 2 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti eğrileri.

Şekil 5.18’de görülen beş ölçüm eğrisi birbirine oldukça yakın seyretmektedir; bu durum, ölçüm sisteminin yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, düşük voltaj aralıklarında (0–600 V) blokaj kuvveti artışının daha yavaş, 1000 V üzeri alanlarda ise daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Bu geçiş bölgesi, seramik içindeki domainlerin yönlenme eşiği ile ilişkilidir.

Voltaja bağlı kuvvet değişiminin doğrusal karakterde olması, bu aktüatörün yüksek hassasiyetli lineer hareket gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, sistemde gözlenen histeris aralığının dar olması, enerji kayıplarının sınırlı olduğunu ve mekanik sönüm etkilerinin minimum seviyede gerçekleştiğini göstermektedir [Kim vd., 2012], [Zhang vd., 2019].

1 mm ve 2 mm kalınlığındaki seramiklerden üretilen aktüatörlerin blokaj kuvveti ve deplasman performansları karşılaştırıldığında, 2 mm kalınlığındaki seramik yapının maksimum blokaj kuvvetinin yaklaşık 53 N, 1 mm kalınlığındaki yapının ise yaklaşık 63 N olduğu belirlenmiştir. Her iki yapıda da maksimum deplasman yaklaşık 10 μm

ölçülmüştür. Bu sonuçlar, seramik kalınlığının artmasına rağmen deplasmanın belirgin şekilde artmadığını, buna karşın blokaj kuvvetinde düşüş yaşandığını göstermektedir. Bu durum, piezoelektrik seramiklerde elektrik alan yoğunluğu ($E = V/t$) kavramı ile açıklanabilir. Kalınlık arttıkça uygulanan voltaj aynı oranda artsa bile, birim kalınlık başına düşen elektrik alan azalmakta ve domain yönlenme etkinliği sınırlanmaktadır. Sonuç olarak, deformasyon miktarı benzer kalırken üretilen kuvvette azalma meydana gelmiştir. Ayrıca kalınlığın artmasıyla birlikte mekanik rijitlik de yükselmekte, bu da uygulanan elektriksel uyarıya karşı daha az şekil değişimi anlamına gelir. 2 mm seramikte deformasyon daha geniş bir hacme yayılır, fakat bu yayılma nedeniyle üretilen kuvvetin yoğunluğu düşer. Sonuç olarak, seramik kalınlığı arttığında hareket miktarı değişmemiş ancak kuvvet üretimi azalmıştır. Bu durum, hem elektrik alanın daha az etkili olması hem de malzemenin daha rijit hale gelmesiyle açıklanabilir [Daniel vd., 2015].

Elde edilen sonuçlar, piezoelektrik aktüatörlerde kalınlık parametresinin hem elektriksel hem de mekanik etkiler açısından kritik bir optimizasyon unsuru olduğunu ortaya koymaktadır. 2 mm kalınlığındaki yapı, 1 mm'ye kıyasla daha düşük kuvvet üretimi göstermesine rağmen daha kararlı bir voltaj–kuvvet yanıtı sergilemiştir.

3 mm kalınlığındaki seramiklerden üretilen aktüatörlerin blokaj kuvveti ölçüm sonuçları **Tablo 5.11**'de, voltaj–blokaj kuvveti eğrileri ise **Şekil 5.19**'da verilmiştir. Ölçümler beş tekrar halinde yapılmış, ortalama değerler grafikte yeşil eğri ile gösterilmiştir.

Tablo 5.11: 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj–blokaj kuvveti ölçüm sonuçları.

Blokaj Kuvveti Ölçüm Sonucu						
Voltaj, V	Blokaj Kuvveti, Newton					Ortalama
0	104	95	94	93	92	95,6
100	107	98	96	95	94	98
200	109	100	98	98	96	100,2
300	110	102	100	100	98	102
400	113	105	103	102	101	104,8

Tablo 5.11: Devamı.

500	115	107	105	104	104	107
600	118	110	108	108	106	110
700	121	112	111	110	110	112,8
800	124	116	114	113	113	116
900	127	119	116	116	115	118,6
1000	129	122	120	118	118	121,4
1100	133	125	122	122	121	124,6
1200	136	128	125	125	124	127,6
1300	139	131	129	129	127	131
1400	142	135	133	132	131	134,6
1500	145	139	136	136	134	138
1600	148	141	140	139	137	141
1700	152	145	143	142	141	144,6
1800	154	149	146	145	145	147,8
1900	157	153	150	149	149	151,6
2000	161	156	153	154	152	155,2
2100	164	160	158	156	156	158,8
2200	168	162	161	160	160	162,2
2300	171	165	164	164	164	165,6
2400	175	168	170	168	168	169,8
2500	179	176	172	172	171	174
2600	182	179	176	175	175	177,4
2700	186	185	180	181	178	182
2800	191	187	186	183	182	185,8
2700	189	185	184	182	182	184,4

Tablo 5.11: Devamı.

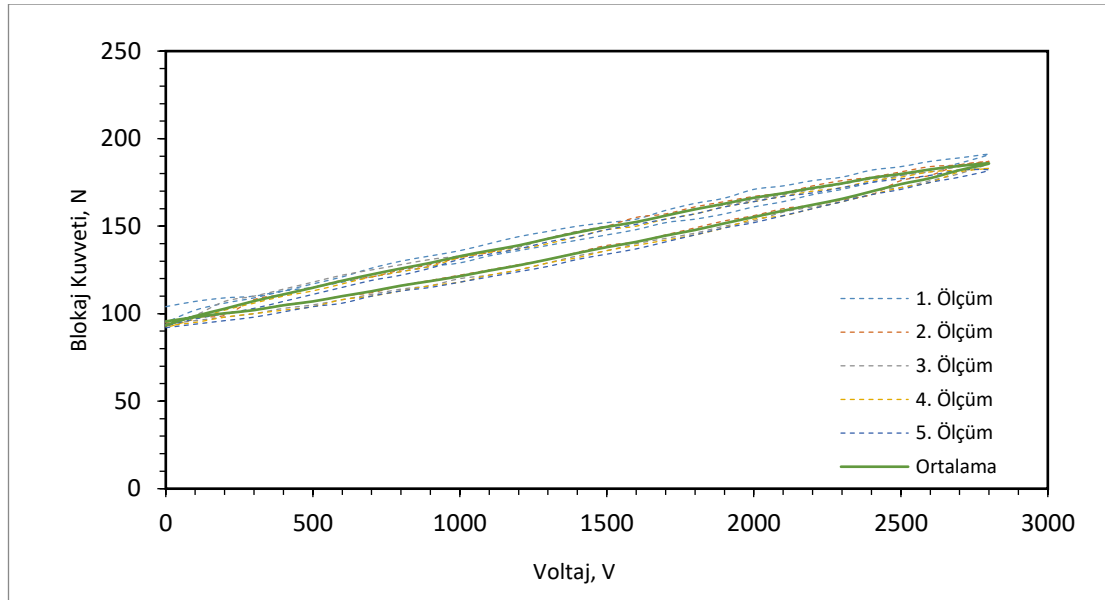
2600	187	184	181	181	179	182,4
2500	184	181	179	178	177	179,8
2400	182	178	177	176	175	177,6
2300	178	176	174	172	172	174,4
2200	176	173	171	170	169	171,8
2100	173	169	168	167	167	168,8
2000	171	167	165	164	164	166,2
1900	166	164	162	161	161	162,8
1800	163	161	160	157	157	159,6
1700	159	157	156	154	154	156
1600	154	155	152	150	151	152,4
1500	152	150	150	148	148	149,6
1400	150	147	147	144	144	146,4
1300	147	143	143	140	141	142,8
1200	144	139	138	137	137	139
1100	140	135	136	135	134	136
1000	136	132	133	132	131	132,8
900	133	128	131	127	126	129
800	130	125	128	124	122	125,8
700	126	121	125	121	119	122,4
600	121	119	122	117	115	118,8
500	117	115	118	113	111	114,8
400	113	111	114	110	107	111
300	109	108	110	106	103	107,2
200	106	99	107	102	100	102,8

Tablo 5.11: Devamı.

100	102	98	99	97	97	98,6
0	95	94	93	92	93	93,4

Elde edilen verilere göre, 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün maksimum blokaj kuvveti yaklaşık 92 N, maksimum deplasmanı ise 13 μm olarak ölçülmüştür. Bu değerler, 1 mm (63 N, 10 μm) ve 2 mm (53 N, 10 μm) seramiklerle karşılaştırıldığında hem kuvvet hem de deplasman açısından belirgin bir artış göstermektedir.

Bu artışın temel nedeni, 3 mm kalınlığındaki seramiklerin daha yüksek voltajlara (≈ 2800 V) dayanabilmesidir. Kalınlığın artması, malzemenin dielektrik dayanımını yükselterek elektrik alan altında kırılma riskini azaltmakta; böylece domain yönlenmesi için daha yüksek enerji uygulanabilmektedir [Xi vd., 2023]. Uygulanan voltajla birlikte seramik hacmi boyunca daha fazla domain hizalanmış ve toplam deformasyon (deplasman) artmıştır. Ayrıca kalın seramiklerde aktif piezoelektrik hacmin artması, sistemin toplam kuvvet üretim kapasitesini yükseltmiştir. 3 mm kalınlığındaki yapıda mekanik rijitlik daha fazla olmasına rağmen, artan hacimsel deformasyon bu etkiyi dengelemiş ve toplam kuvveti artırmıştır.



Şekil 5.19: 3 mm seramik kalınlığındaki aktüatörün voltaj-blokaj kuvveti eğrileri.

Şekil 5.19'daki grafik incelendiğinde, blokaj kuvvetinin voltajla birlikte neredeyse lineer bir artış gösterdiği, yüksek voltajlarda dahi doygunluk davranışının oluşmadığı

görülmektedir. Bu durum, elektrik alanın seramik hacmi içinde daha dengeli dağılması ve domainlerin kademeli olarak yönlenmesiyle açıklanabilir.

Sonuç olarak, 3 mm kalınlığındaki seramik yapı, yüksek voltaj gerektirmesine rağmen hem en yüksek blokaj kuvvetini (≈ 92 N) hem de en yüksek deplasmanı (≈ 13 μm) üretmiştir.

5.3.3. Seramik Kalınlığının Aktüatör Performansına Etkisi – Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, seramik kalınlığının piezoelektrik aktüatör performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, seramik kalınlığı sırasıyla 1 mm, 2 mm ve 3 mm olacak şekilde üç farklı yapı tasarlanmıştır. Her üç yapıda da aktüatörün toplam aktif kalınlığı 12 mm olarak sabit tutulmuş, dolayısıyla katman sayısı sırasıyla 12, 6 ve 4 olarak belirlenmiştir. Tüm numunelerde üretim koşulları (ön yük = 10 N, vidalı entegrasyon, yapışkan ve silikon enkapsülasyon) aynı tutulmuştur. Elde edilen blokaj kuvveti ve deplasman sonuçları **Tablo 5.12**'de özetlenmiştir.

Tablo 5.12: Blokaj kuvveti ve deplasman sonuçları.

Seramik Kalınlığı (mm)	Katman Sayısı	Maks. Voltaj (V)	Maks. Blokaj Kuvveti (N)	Maks. Deplasman (μm)
1	12	900	63	10
2	6	2000	53	10
3	4	2800	92	13

Sonuçlar incelendiğinde, seramik kalınlığının artmasıyla birlikte aktüatörün voltaj dayanımının yükseldiği, dolayısıyla daha yüksek voltaj seviyelerinde çalışabildiği görülmektedir. 3 mm kalınlığındaki yapı, en yüksek elektrik alanlara dayanarak hem en büyük blokaj kuvvetini (92 N) hem de en yüksek deplasmanı (13 μm) üretmiştir. Bununla birlikte, 1 mm ve 2 mm kalınlıklarındaki yapılar arasında deplasman açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir (her ikisi ≈ 10 μm). Bu durum, 2 mm kalınlığında uygulanan voltaj artışına rağmen, birim kalınlık başına düşen elektrik alan

yoğunluğunun azalması ($E = V/t$) nedeniyle seramik içerisindeki domain yönlenme etkinliğinin sabit kalmasıyla açıklanabilir [Tran vd., 2016].

1 mm'den 2 mm'ye geçişte, deplasman sabit kalırken blokaj kuvveti 63 N'den 53 N'ye düşmüştür. Bu da kalınlığın artmasıyla birlikte mekanik rijitliğin yükselmesi ve deformasyonun daha geniş bir hacme yayılması sonucu kuvvetin birim alana göre azalmasından kaynaklanmaktadır. Buna karşın 3 mm kalınlığında, rijitliğin artışı daha yüksek voltaj uygulanabilmesini sağlamış, böylece toplam kuvvet üretimi artmıştır. Bu noktada sistem, mekanik rijitlik–elektrik alan yoğunluğu dengesi açısından optimum bir kalınlık seviyesine ulaşmıştır.

Voltaj–blokaj kuvveti eğrileri karşılaştırıldığında, tüm seramik kalınlıklarında voltaj arttıkça blokaj kuvvetinin lineer bir şekilde yükseldiği, ancak 3 mm kalınlığında artış eğiminin daha belirgin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, voltaj–deplasman eğrileri incelendiğinde, 3 mm kalınlığındaki yapının daha yüksek voltaj altında daha geniş bir deplasman aralığı sergilediği gözlenmiştir.

Sonuç olarak, seramik kalınlığının artmasıyla birlikte piezoelektrik aktüatörlerin yüksek voltaj toleransı ve blokaj kuvveti artmış; ancak çok ince seramiklerde (1 mm) daha düşük çalışma gerilimiyle yeterli deplasman elde edilmiştir. Bu durum, kalınlık parametresinin uygulama türüne göre seçilmesi gerektiğini göstermektedir: 1–2 mm seramikler düşük voltajla çalışabilen, hassas konumlama uygulamaları için, 3 mm seramikler ise yüksek kuvvet gerektiren, endüstriyel mikro-mekanik sistemlerde kullanılmak üzere uygun tasarımlar sunmaktadır.

5.3.4. Deplasman–Blokaj Kuvveti İlişkisi ve Kalınlığa Bağlı

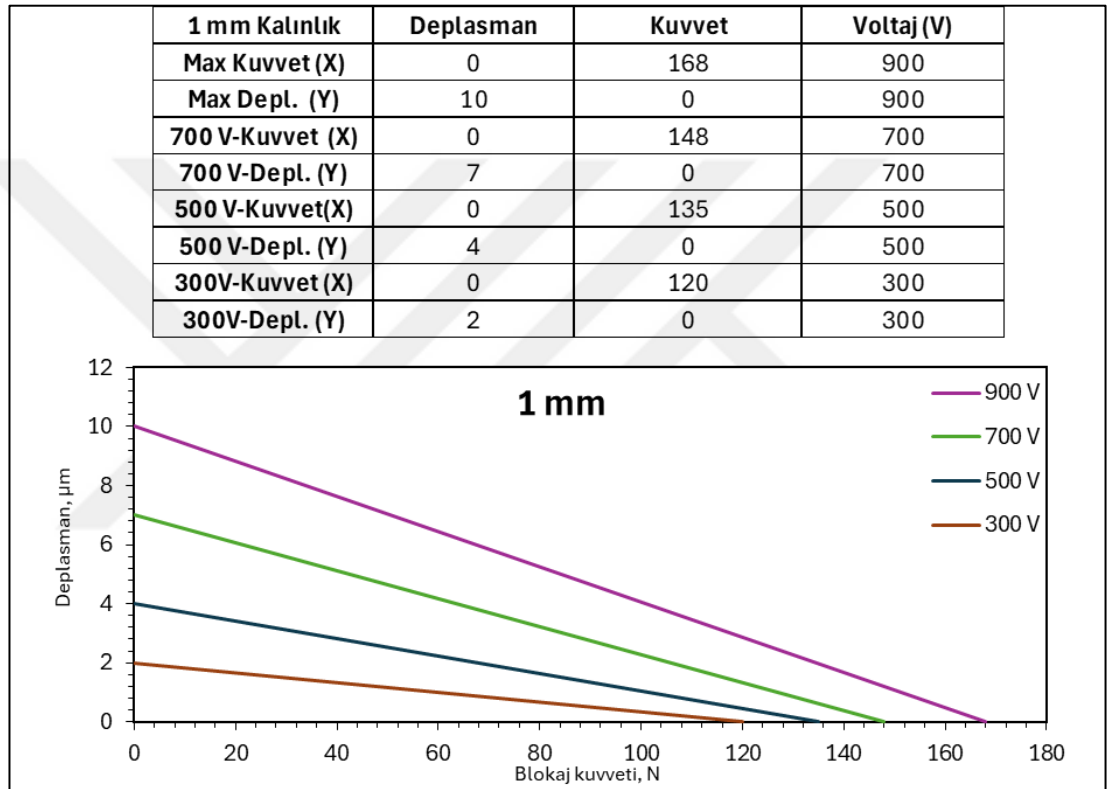
Karşılaştırma

Piezoelektrik aktüatörlerin mekanik performansını karakterize eden en temel iki parametre deplasman (yer değiştirme) ve blokaj kuvvetidir. Bu iki büyüklük, aktüatörün elektriksel enerjiyi mekanik işe dönüştürme kabiliyetini temsil eder. Bir aktüatöre uygulanan voltaj, piezoelektrik seramikte elektrik alan oluşturarak kristal yapı içindeki domainlerin yeniden yönlenmesine neden olur. Bu yönlenme, iki eş zamanlı fiziksel etki üretir:

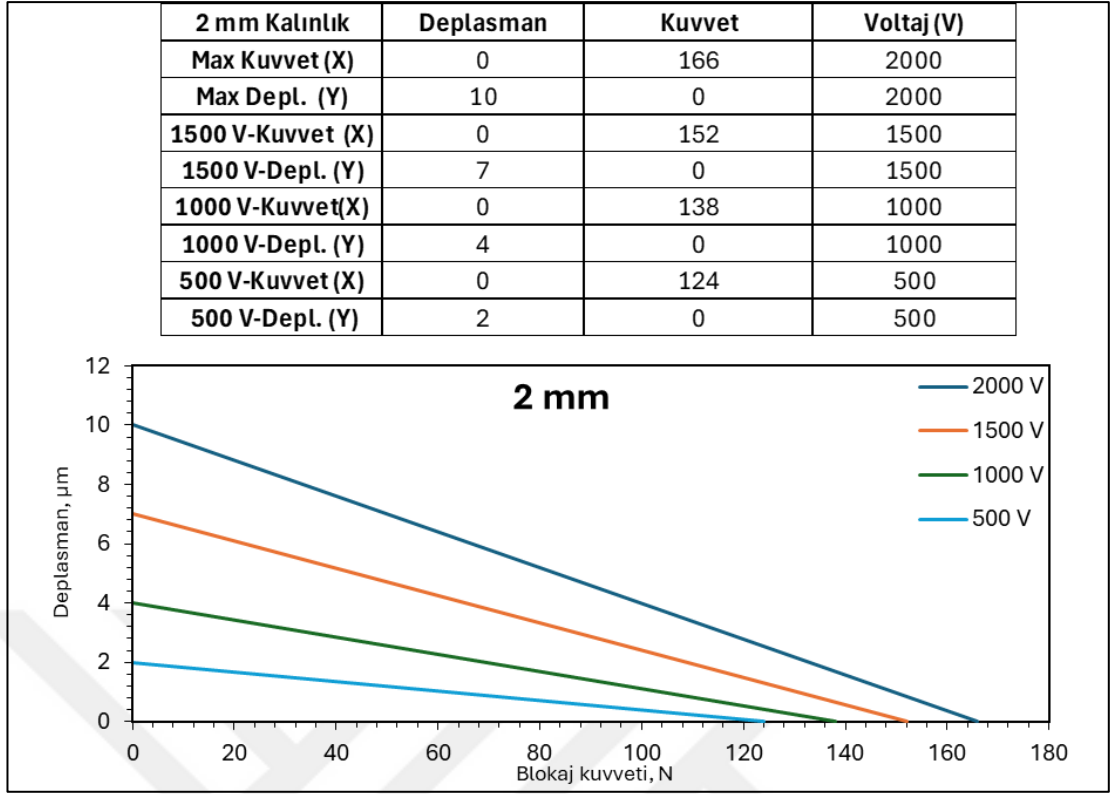
- Deformasyon (deplasman) – Aktüatörün serbest durumda uzama miktarıdır.

- Kuvvet (blokaj kuvveti) – Hareketi tamamen engellendiğinde üretebildiği maksimum karşı kuvvettir.

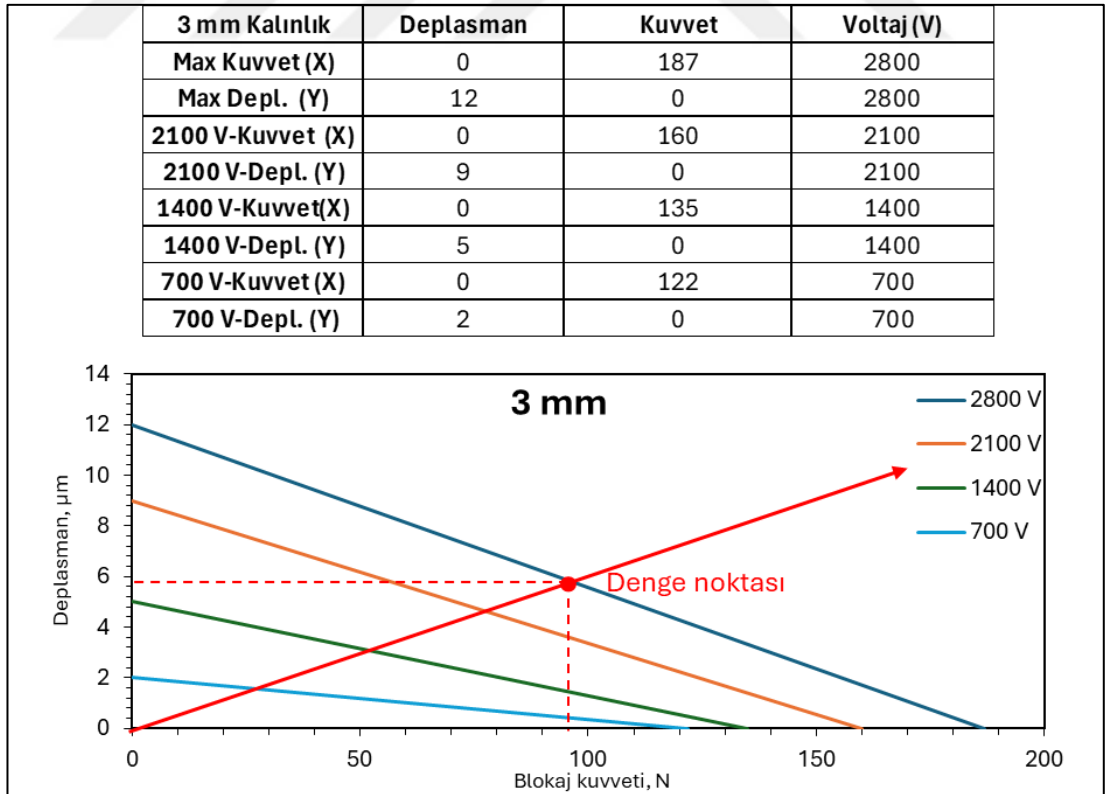
Bu iki parametre arasında lineer fakat ters orantılı bir ilişki vardır. Aktüatör serbest çalıştığında (yük yokken) maksimum deplasman oluşturur, kuvvet sıfırdır. Hareket tamamen engellendiğinde ise deplasman sıfır, kuvvet maksimumdur. Bu durum, Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilen deplasman–blokaj kuvveti eğrilerinde açıkça görülmektedir.



Şekil 5.20: 1 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.



Şekil 5.21: 2 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.



Şekil 5.22: 3 mm kalınlığında seramik kullanılarak elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri.

Her bir voltaj seviyesi için elde edilen eğriler, tipik bir doğrusal kuvvet–deplasman karakteristiği sergilemektedir. Eğrilerin eğimi, aktüatörün rijitliğini temsil ederken; eğrinin uç noktaları, o voltajdaki maksimum deplasman (y-ekseninde) ve maksimum blokaj kuvveti (x-ekseninde) değerlerini gösterir. Voltaj arttıkça, eğriler sağa ve yukarıya kaymaktadır, bu da hem kuvvet hem de deplasman kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu davranış, piezoelektrik malzemelerin elektrik alan altında doğrusal enerji dönüşüm karakteristiğini doğrulamaktadır.

Üç farklı seramik kalınlığı (1 mm, 2 mm ve 3 mm) için elde edilen deplasman–blokaj kuvveti eğrileri karşılaştırıldığında, 1 mm kalınlığındaki aktüatör, düşük çalışma gerilimi (900 V) altında yaklaşık 10 μ m serbest deplasman ve 168 N blokaj kuvveti üretmiştir. 2 mm kalınlığındaki aktüatör, daha yüksek çalışma gerilimi (2000 V) gerektirmiş; benzer deplasman (≈ 10 μ m) üretmiş, ancak maksimum kuvvet değeri 166 N olmuştur. 3 mm kalınlığındaki aktüatör, en yüksek çalışma gerilimi (2800 V) altında 12 μ m deplasman ve 187 N blokaj kuvveti üretmiştir.

Bu sonuçlar, seramik kalınlığının artmasıyla birlikte sistemin hem voltaj dayanımının hem de toplam kuvvet kapasitesinin arttığını göstermektedir. Kalın yapılar daha rijit oldukları için birim voltaj başına deformasyon miktarı azalsa da daha yüksek voltajlara dayanabildikleri için toplam mekanik iş üretimi artmaktadır. Bu nedenle, 3 mm kalınlığındaki yapı en geniş çalışma aralığına ve en yüksek enerji dönüşüm kapasitesine sahip olmuştur.

Deplasman–blokaj kuvveti eğrileri incelendiğinde, her bir voltaj seviyesinde neredeyse doğrusal bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu, piezoelektrik aktüatörün elastik bölge içinde çalıştığını ve elektrik–mekanik dönüşümün geri dönüşümlü (reversible) olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğriler arasında belirgin bir “yayılma” bulunmaması, sistemdeki histerisisin düşük olduğunu ve tekrarlanabilirliğin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu, özellikle hassas konumlandırma uygulamaları için istenen bir özelliktir.

Eğrilerin eğimi kalınlığa göre değişmektedir: 1 mm yapıda eğim daha dik olup, daha az rijit bir sistem davranışı göstermektedir. 3 mm yapıda eğim daha yatık, yani rijitlik artmış ve deformasyon daha kontrollü gerçekleşmiştir. Bu fark, seramik kalınlığının mekanik modül üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır.

Literatürde, piezoelektrik aktüatörler için maksimum iş üretiminin, serbest deplasmanın yarısına karşılık gelen noktada elde edildiği belirtilmektedir. Bu nokta hem yeterli deplasman hem de yeterli kuvvetin sağlandığı “ideal performans noktası” olarak tanımlanır [Monith vd., 2020]. Şekil 5.22’de görülen doğrusal eğrilerde bu nokta, yaklaşık olarak her eğrinin ortasında yer almakta ve uygulama açısından denge noktasını (balanced operating region) temsil etmektedir. Örneğin, 3 mm kalınlığındaki aktüatörde yaklaşık 6 µm deplasman ve 90–100 N kuvvet aralığı, yüksek hassasiyetli mikro-konumlandırma sistemlerinde optimum çalışma koşulunu sağlayabilecek bir bölge olarak değerlendirilebilir.

Bu analiz sonucunda, üç kalınlık için de deplasman ve blokaj kuvveti arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğu ve artan voltajla birlikte eğrilerin hem yatay hem de dikey eksenlerde genişlediği görülmüştür. Bu davranış, piezoelektrik malzemelerin yüksek lineerlik, düşük histerisis ve yüksek enerji dönüşüm verimliliği gibi özelliklerini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, kalınlık artışıyla birlikte aktüatörlerin enerji depolama kapasitesi ve mekanik dayanımı artmakta; ancak daha yüksek voltaj gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle:

- 1 mm seramik: düşük voltajda çalışan, hassas konumlandırma ve optik hizalama sistemleri için uygundur.
- 3 mm seramik: yüksek kuvvet ve geniş hareket gerektiren endüstriyel mikro-mekanik uygulamalarda üstün performans sergiler.
- 2 mm seramik: her iki uç arasında denge sağlayan, genel amaçlı bir tasarım çözümüdür.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, PZT-5H esaslı piezoelektrik seramiklerden yığın tipi halka formunda aktüatörlerin üretimi, entegrasyonu ve performans karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, üretim parametreleri ve tasarım değişkenlerinin (entegrasyon tipi, yapışkan, ön stres, seramik kalınlığı, enkapsülasyon) aktüatörün elektromekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir.

Yapısal karakterizasyon sonuçları, sinterleme sonrası seramiklerin yoğun, homojen ve tek fazlı perovskit yapıya sahip olduğunu göstermiştir. SEM analizleri tane sınırlarının belirgin ve mikro çatlaklardan arınmış olduğunu doğrulamış, XRD sonuçları ise faz saflığının korunduğunu ortaya koymuştur. Ortalama piezoelektrik yük katsayısı ($d_{33} \approx 666$ pC/N), malzemenin yüksek duyarlılığa sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Entegrasyon optimizasyonu kapsamında yapılan çalışmalar, vidalı montaj sisteminin mekanik dayanım açısından en kararlı çözüm olduğunu, silikon enkapsülasyonun ise elektriksel kaçakları ve ark oluşumunu engelleyerek sistemin yüksek voltaj dayanımını artırdığını göstermiştir. İletken yapıştırıcı kullanımı, katmanlar arası elektriksel temasın homojenleşmesini ve uzun süreli stabiliteyi sağlamıştır.

Ön stres deneyleri sonucunda, 10 N'luk ön yükün optimum olduğu belirlenmiştir. Daha düşük yüklerde gevşeme ve mekanik oynama gözlenirken, 15 N üzerindeki yüklerde seramik kırılmaları meydana gelmiştir.

Performans analizlerinde, seramik kalınlığının 1–2–3 mm olarak değiştirildiği üç farklı aktüatör üretilmiştir.

- 1 mm kalınlığında aktüatör: düşük voltajlarda yüksek hassasiyet ve düşük histeris özellikleri sergilemiştir.
- 2 mm kalınlığında aktüatör: deplasman ve blokaj kuvveti arasında dengeli bir performans göstermiştir.
- 3 mm kalınlığında aktüatör: en yüksek deplasman (≈ 13 μ m) ve blokaj kuvveti (≈ 92 N) değerlerine ulaşmıştır.

Bu sonuçlar, seramik kalınlığı arttıkça voltaj gereksiniminin yükseldiğini, ancak deformasyon kapasitesi ve kuvvet üretiminin de arttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, ön stres seviyesi, entegrasyon tipi ve seramik kalınlığının piezoelektrik aktüatörlerin elektromekanik performansında belirleyici parametreler olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, vidalı entegrasyon yöntemi, silikon enkapsülasyon ve 10 N ön yük uygulamasının, sistemin kararlılığı, elektriksel dayanımı ve mekanik tepki gücü açısından en verimli koşulları sağladığını göstermiştir. Bu kombinasyon, hem yüksek deplasman ve kuvvet üretimi hem de kararlı uzun süreli çalışma özellikleriyle öne çıkmıştır. Belirlenen bu optimum çalışma koşulları, aktüatör tasarımında performans–dayanıklılık dengesinin sağlanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, elde edilen sonuçlar doğrultusunda, piezoelektrik yığın aktüatörlerin yüksek hassasiyetli konumlandırma, titreşim kontrolü, mikro-mekanik sistemler ve enerji dönüştürücü uygulamalarda kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.

7. UYGULAMA ALANLARI VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu tez kapsamında geliştirilen piezoelektrik aktüatör yapıları; yüksek hassasiyet, hızlı tepki süresi ve düşük enerji tüketimi gibi özellikleri nedeniyle çok geniş bir mühendislik uygulama alanına sahiptir. Elde edilen sonuçlara göre, bu tip PZT-5H tabanlı yığın aktüatörler, aşağıdaki alanlarda kullanılabilecek potansiyele sahiptir:

- Hassas konumlandırma sistemleri: Optik hizalama, mikro-manipülasyon ve mikro-mekanik montaj sistemleri gibi mikrometre seviyesinde hareket gerektiren uygulamalarda, düşük histeris ve yüksek tekrarlanabilirlik avantajı sunar.
- Titreşim kontrolü ve aktif sönümlleme: Mekanik sistemlerde istenmeyen titreşimleri bastırmak için aktif titreşim kontrol elemanı olarak görev alabilir.
- Ultrasonik ve akustik uygulamalar: PZT-5H'nin yüksek piezoelektrik katsayısı sayesinde, ultrasonik dönüştürücüler veya akustik sensörlerde etkin enerji dönüşümü sağlar.
- Enerji hasadı sistemleri: Mekanik titreşimleri elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeliyle düşük güçlü enerji üretim uygulamalarında kullanılabilir.
- Havacılık ve savunma sistemleri: Termal kararlılığı yüksek, kompakt yapılı aktüatörler, uçak kanat kontrolü, radar sistemleri veya optik bileşen ayarlama mekanizmalarında değerlendirilebilir.

Bu çalışmada ortaya konan sonuçlar, farklı uygulama gereksinimlerine göre optimum aktüatör tasarımının değişebileceğini de göstermektedir. Örneğin; yüksek kuvvet gerektiren endüstriyel sistemlerde daha kalın seramik tabakalar, hızlı yanıt gerektiren mikro-elektromekanik sistemlerde ise daha ince katmanlı yapılar tercih edilmelidir. Benzer şekilde, titreşim sönümlleme odaklı sistemlerde yüksek ön stres kararlılığı artırırken, hassas pozisyonlama uygulamalarında düşük ön stres daha kontrollü deformasyon sağlar.

Bu kapsamda, ilerleyen çalışmalarda aşağıdaki araştırma yönlerinin ele alınması önerilmektedir:

- Dinamik karakterizasyon çalışmaları: Aktüatörlerin alternatif akım (AC) voltaj altında frekans bağımlı davranışlarının incelenmesi.
- Frekans tepkisi analizi: Farklı frekanslarda sürülen aktüatörlerin rezonans, antirezonans ve mekanik kalite faktörlerinin belirlenmesi.
- Yorulma (fatigue) testleri: Tekrarlanan elektriksel ve mekanik yükler altında aktüatör dayanıklılığının incelenmesi.
- Termal analiz çalışmaları: Sıcaklık değişiminin piezoelektrik katsayı, dielektrik sabiti ve mekanik deformasyon üzerindeki etkilerinin araştırılması.
- Malzeme modifikasyonu: Doping, kompozit katkı veya yüzey kaplama yöntemleriyle piezoelektrik performansın artırılması.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasıyla elde edilen bulgular, PZT-5H tabanlı piezoelektrik yığın aktüatörlerin tasarım ve optimizasyonuna yönelik kapsamlı bir temel oluşturmuştur. Belirlenen üretim ve tasarım parametreleri, gelecekteki araştırmalar için rehber niteliğinde olup, yüksek hassasiyetli elektromekanik sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

APC International Ltd. (2002). *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. APC International.

Bijalwan, V., Nath, R., Ranjan, R., & Kumar, M. (2018). Grain size dependence of the microstructures and ferroelectric/piezoelectric properties of perovskite ceramics. *Ionics*, 24(4), 1147–1154.

Campbell, C. K. (1998). *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications*. Academic Press.

Damjanovic, D. (2006). Hysteresis in piezoelectric and ferroelectric materials. *In The Science of Hysteresis* (3), 337–465.

Daniel, L., Hall, D. A., Koruza, J., Webber, K. G., King, A., & Withers, P. J. (2015). Revisiting the blocking force test on ferroelectric ceramics using high energy x-ray diffraction. *Journal of Applied Physics*, 117(18), 184102.

Doğan, V. H. M., Mondal, S., & Oh, J. (2025). Piezoelectric micropumps: State of the art review. *ACM*.

Duan, Z., Zhang, Y., & Qian, D. (2023). High-resolution precision surface acoustic wave motor based on double electrode and reflected wave amplification. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 70(2), 204–212.

Ergun, C., Yılmaz, Ş., Özdemir, E., Gül, Ö., & Kalenderli, Ö. (2006). Piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları. Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı. Pamukkale, Türkiye.

Hooker, M. W. (1998). Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics Between -150 and 250 °C (NASA/CR-1998-208708). NASA.

Huang, W., & Lu, Q. (2021). Finite element modeling and test of piezo disk with local ring electrodes for micro displacement. *PMC*.

Ketsuwan, P., Prasatkhetragarn, A., Triamnuk, N., Huang, C. C., Ngamjarurojana, A., Ananta, S., & Yimnirun, R. (2009). Effects of niobium doping on dielectric and ferroelectric properties of chromium modified lead zirconate titanate ceramics. *Ferroelectrics*, 380(1), 183–189.

Kim, B., Washington, G. N., & Yoon, H.-S. (2012). Hysteresis-reduced dynamic displacement control of piezoceramic stack actuators using model predictive sliding mode control. *Smart Materials and Structures*, 21(5), 055018.

Kitagawa, K., Yamamoto, T., & Kitagawa, K. (2005). Cyclic fatigue behavior and mechanical properties of PZT piezoelectric ceramics. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 52(1), 16–20.

- Koruza, J., Franzbach, D. J., Schader, F. H., Rojas, V., & Webber, K. G. (2015). Enhancing the operational range of piezoelectric actuators by uniaxial compressive preloading. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(21), 215302.
- Kühn, M., & Henning, P. (2015). Smarter actuator design with complementary and synergetic functions. In Janocha, H. (Ed.), *Adaptronics and Smart Structures*, 201–220.
- Kulkov, A. S., Shadrin, V. S., & Kasparyan, S. O. (2019). Microstructure of porous ceramics sintered at different temperatures. *AIP Conference Proceedings*.
- Kumar, S., Singh, D. N., & Mahato, D. K. (2024). PZT-based piezoelectric materials: From synthesis to functional properties and diverse applications. In *Piezoelectric Materials and Applications*, 65–88.
- Kumari, M., Singh, A., & Mandal, J. (2014). Structural and Dielectric properties of PZT ceramics prepared by solid state reaction route. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(4), 404–406.
- Lebedev, M., & Akedo, J. (2002). What thickness of the piezoelectric layer with high breakdown voltage is required for the microactuator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41(5B), 3344–3348.
- Lee, H., Chen, Y., Zhang, J., & Kim, D. (2024). Clamp–shear coupling compensation of a walking piezo actuator combining ILC and hysteresis compensation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 211, 111674.
- Li, J., Xu, W., & Zhang, Y. (2023). Machine learning approaches for condition monitoring and fault prediction of smart actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(5), 4582–4593.
- Li, L., Xu, Q., & Wu, H. (2022). Surface acoustic wave driven microsystems: A review. *Applied Sciences*, 12(6), 3214.
- Li, T., Chen, Y. H., & Ma, J. (2009). Factors affecting the performance of piezoelectric bending actuators for advanced applications: An overview. *Journal of Materials Science*, 44(10), 2583–2592.
- Li, Z., Li, C.-B.-W., Thong, H. C., Jiang, Y., Xu, J., Hao, Y., Dou, Z., Bi, K.-H., & Wang, K. (2023). Grain size effect on piezoelectric properties of rhombohedral lead zirconate titanate ceramics. *Ceramics International*, 49(13), 19310–19319.
- Liang Lou, H. Y., Yu, H., Tan Xing Haw, M., Zhang, S., & Gu, A. (2016). Comparative characterization of bimorph and unimorph AlN piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. In MEMS 2016 Conference Proceedings.
- Liu, D., Yao, W., Zhou, C., & Zhang, J. (2019, November). Electromechanical properties and temperature stability of 1-3 type PZT/epoxy piezoelectric composite. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 678, No. 1, p. 012136). IOP Publishing.

Liu, H., Luo, Y., Chen, H., Zhuang, W., Wang, W., & Zhu, J. (2024). Improvement of piezoelectric properties of PZT-based low-temperature-sintered ceramics through heterovalent ion doping. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(12).

Lv, W., Ni, J., Xuan, W., Li, Y., Huang, X., Sun, L., Jin, H., Dong, S., & Luo, J. (2025). A simulation and experimental study of a valveless piezoelectric micropump based on the synthetic jet principle. *Nanotechnology and Precision Engineering*.

Ma, J., Zhu, K., Huo, D., Qi, X., Sun, E., & Zhang, R. (2021). Performance enhancement of the piezoelectric ceramics by alternating current polarizing. *Applied Physics Letters*, 118(2), 022902.

Mahmood, H. F., Ahmad, S. A., & Abu-Bakr, M. (2025). Comprehensive overview of X-ray diffraction: Principles, techniques, and applications in material science. *Technobius Physics*, 3(3), Article 35.

Mohith, S., Upadhyay, A. R., Navin, K. P., Kulkarni, S. M., & Rao, M. (2020). Recent trends in piezoelectric actuators for precision motion and their applications: A review. *Smart Materials and Structures*, 30(1), 013002.

Ogawa, T., Furukawa, M., & Tsukada, T. (2009). Poling field dependence of piezoelectric properties and hysteresis loops of polarization versus electric field in alkali niobate ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 48(9), 09KD07.

Park, J., & Yamamoto, T. (2023). A review of smart materials researches and applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34(12), 1357–1375.

ScienceDirect Topics. (2024). *Piezoelectric stack – an overview*. Elsevier.

Sherrit, S., Bao, X., & Ledwith, B. (2009). Unimorph and bimorph piezoelectric actuator configurations for micro-positioning and vibration applications. In *Proceedings of SPIE 7288, Smart Structures and Materials*.

Smolenskii, G. A., Bokov, V. A., Isupov, V. A., Krainik, N. N., Pasynkov, R. E., & Sokolov, A. I. (1984). *Ferroelectrics and Related Materials*. Gordon and Breach Science Publishers.

Tran, K. S., Phan, H. V., Lee, H. Y., Kim, Y., & Park, H. C. (2016). Blocking force of a piezoelectric stack actuator made of single crystal layers (PMN-29PT). *Smart Materials and Structures*, 25(9), 095038.

Tressler, J. F., Alkoy, S., & Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of Electroceramics*, 2, 257–272.

Uchino, K. (2008). Piezoelectric actuators 2006: Expansion from IT/robotics to ecological/energy applications. *Journal of Electroceramics*, 20(3–4), 301–311.

- Uchino, K. (2015). Piezoelectric actuator renaissance. In K. Uchino, *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology* (2nd ed., pp. 1–29). Woodhead Publishing.
- Wang, H., Hu, M., & Li, Z. (2016). Modelling and analysis of circular bimorph piezoelectric actuator for deformable mirror. *Applied Mathematics and Mechanics*, 37(6), 639–646.
- Wang, L., Chen, W., Liu, J., Deng, J., & Liu, Y. (2019). A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 106254.
- Wu, X., Wang, X., Wang, S., & Fan, S. (2024). Layered thermal effects dynamic characteristics modeling and application in piezoelectric stack actuator. *Smart Materials and Structures*.
- Xi, J., Chen, H., Peng, X., Wan, H., Tan, Z., Xing, J., Chen, Q., Zhu, J.-Z., & Ye, Z.-G. (2023). Achieving significantly enhanced piezoelectricity in aurivillius ceramics by improving initial polarization and dielectric breakdown strength. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(11), 5787–5796.
- Xue, W., Wang, X., Zhu, Y., & Luo, C. (2025). Studies on the high-power piezoelectric property measurement methods and decoupling the power and temperature effects on PZT-5H. *Sensors*, 25(2), 349.
- Yaakub, M. A., Ghazali, M. I., & Abdullah, E. J. (2017). Development and analysis of unimorph and bimorph piezoelectric actuators for vibration control applications. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 11(3), 2857–2870.
- Yong, Y. K., Moheimani, S. O. R., & Aphale, S. S. (2019). Design and control of piezoelectric stack actuators for high-precision applications. *Smart Materials and Structures*, 28(1), 015013.
- Yue, H., Xue, H., Yang, D., Wang, F., & Yang, L. (2024). Hybrid noise control in helicopter cabin with piezoelectric stack periodic strut. *AIAA Journal*.
- Zhang, E. X., Liu, J., Ma, J., Li, J., Hu, Y., Chen, K., Li, X., & Wen, J. (2025). A 3-DOF multi-mode parallel positioning platform utilizing piezoelectric-electromagnetic hybrid actuation. *Smart Materials and Structures*.
- Zhang, G., Ma, M., & Lin, Y.-J. (2025). Stiffness compensation in variable displacement mechanisms of swash plate axial piston pumps utilizing piezoelectric actuators. *Materials*, 18(3), 520.
- Zhang, L., Huang, J., Tang, Y., Li, R.-J., Huang, Q., Cheng, R., & Wang, C. (2019). Independent driving method for significant hysteresis reduction of piezoelectric stack actuators. *Review of Scientific Instruments*, 90(11), 115002.

Zhang, Y., Tu, Z., Lu, T. F., & Al-Sarawi, S. (2017). A simplified transfer matrix of multi-layer piezoelectric stack. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(5), 595–603.

Zhou, T., Lu, Y., Wang, W., Wang, L., & Wang, L. (2024). A piezo-actuated nanopositioning stage based on spatial parasitic motion principle. *Sensors and Actuators A: Physical*, 364, 114802.

Zhou, X., Wu, S., Wang, X., Wang, Z., Zhu, Q., Sun, J., Huang, P., Wang, X., Huang, W., & Lu, Q. (2024). Review on piezoelectric actuators: Materials, classifications, applications, and recent trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 19(1), 6.

Zhou, Y., Wang, H., & Chen, X. (2024). Smart actuator systems for predictive maintenance in Industry 4.0 environments. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(2), 245–259.



ÖZGEÇMİŞ

Hülya Nur YAKAR, lise öğrenimini 2018 yılında Kartal Burak Bora Anadolu Lisesi Fransızca bölümünde tamamladıktan sonra aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliğini kazandı. 2023 yılında bölüm dördüncüsü olarak mezun oldu ve sonra aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliğinde yüksek lisans programına başladı.



TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Yakar H. N., Güzel A. S., Öztürk Y., Aktuğ S. L., (2025), “Piezoelektrik Seramik Yığın Aktüatörlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu”, Poster Sunum, 9. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu.

