

**PIEZOELEKTRİK SERAMİK EYLEYİCİLER KULLANARAK AKTİF
AKUSTİK SÖNÜMLEME**

Emre ÜNEŞİ

YÜKSEK LİSANS YETERLİK TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mart 2019**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Emre ÜNEŞİ'nin "**Piezoelektrik Seramik Eyleyiciler Kullanarak Aktif Akustik Sönümleme**" başlıklı tezi 28/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği** Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Aydın DOĞAN	.....
Üye	: Prof. Dr. A. Savaş KOPARAL	.....
Üye	: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN	.....

Prof.Dr. Ersin YÜCEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET
PIEZOELEKTRİK SERAMİK EYLEYİCİLER KULLANARAK AKTİF
AKUSTİK SÖNÜMLEME

Emre ÜNEŞİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2019
Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

Titreşimler sistemlerin hem yapısal bütünlüğüne olumsuz yönde etki ederken hem de sistemlerin gürültü seviyelerini arttırmaktadır. Sistemlerde meydana gelen titreşimi kontrol edebilmek ve sönmölemek amacıyla pasif kontrol yöntemlerinin dışında yarı-aktif ve aktif titreşim kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, farklı geometrilere sahip paslanmaz çelik plakalarda oluşturulan titreşimi, farklı sayıdaki piezoelektrik malzeme kullanarak oluşturulan aktif titreşim sönmöleme yöntemini kullanarak sönmölemektir. Aktif titreşim kontrolü için kullanılan malzemeler piezoelektrik seramik plakalardır. Bu çalışmada deneysel ve analitik metotlara ek olarak güncel sayısal yöntemlerden de yararlanılmıştır. Farklı geometrilerdeki plakalar üzerinde yapılan aktif titreşim sönmöleme çalışmaları ile bu yöntemin hem iki boyutlu sistemlerdeki uygulanabilirliği ortaya çıkarılmış olacak hem de piezo sistem tasarımının şekillenmesinde iki boyutlu sistemin geometrisine uygunluğuna yönelik araştırmalara katkı sağlanacaktır.

Anahtar Sözcükler: Aktif titreşim sönmöleme, Aktif akustik sönmöleme, Piezoelektrik seramik, Piezoelektrik seramik eyleyici, Disk ve kare plaka

ABSTRACT
ACTIVE ACOUSTIC CANCELLATION BY USING PIEZOELECTRIC
ACTUATORS

Emre ÜNEŞİ

Department of Materials Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Graduate School of Sciences, Mart 2019

Supervisor: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

Vibrations negatively affect both the structural integrity of the systems and increase the noise levels of the systems. In order to control and dampen the vibration occurring in the systems, except for passive control methods, semi-active and active vibration control systems are used. The aim of this thesis is to absorb the vibration generated in stainless steel plates with different geometries by using the active vibration damping method which is created by using a different number of piezoelectric materials. The materials used for active vibration control are piezoelectric ceramic plates. In addition to experimental and analytical methods, current numerical methods were also be used in this study. With the active vibration damping studies performed on the plates of different geometries, the applicability of this method in both two-dimensional systems will be unearthed and the research on the suitability of the two-dimensional system to the geometry will be contributed in shaping the piezo system design.

Keywords: Active vibration cancellation, Active acoustic cancellation, Piezoelectric ceramic, Piezoelectric ceramic actuator, Disk and square plates.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında zamanını hiç esirgemeyen, destek, yardım ve öneri ile hem literatür hem de deneysel çalışmalarında sürekli birlikte olduğumuz değerli hocam Sayın Prof. Dr. Aydın DOĞAN'a, çalışmalarım süresince manevi ve teknik destekleri ile sürekli yanımda olan Sayın Mert GÜL'e, Sayın Hakan GÜLEÇ'e ve Sayın Nebahat BIYIKLI'ya ayrı ayrı teşekkür ederim. Tüm iş arkadaşlarıma bu süreç içerisinde verdikleri destek için teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için maddi katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna ve Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümüne saygılarımı arz ederim.

Hayatım boyunca sürekli arkamda olan ve benden desteklerini esirgemeyen değerli eşime ve aileme sonsuz teşekkürleri sunarım.

Emre ÜNEŞİ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emre ÜNEŞİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN TARİHİ	1
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMENİN YAPISI	3
2.1. Piezoelektrik Etki	4
2.2. Piezoelektrik Katsayılar	6
2.2.1. Piezoelektrik yük katsayısı (d)	7
2.2.2. Piezoelektrik voltaj katsayısı (g)	8
2.2.3. Elastik esneklik (s)	8
2.2.4. Elektromekanik bağlaşma faktörü (k_{eff})	9
2.2.5. Düzlemsel elektromekanik bağlaşma katsayısı (k_p)	10
2.2.6. Mekanik kalite faktörü (Q_m)	10
2.3. Piezoelektrik Özelliği Etkileyen Faktörler	11
2.3.1. Yaşlanma.....	11
2.3.2. Mekanik sınırlamalar	11
2.3.3. Elektriksel sınırlamalar	12
2.3.4. Isısal sınırlamalar	12
3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	13
3.1. Piezoelektrik Doğal Kristal Malzemeler	13

3.2. Piezoelektrik Seramikler	13
3.2.1. Baryum titanat ($BaTiO_3$).....	14
3.2.2. Kurşun zirkonat titanat (PZT).....	15
3.2.3. Piezoelektrik polimerler	19
3.2.4. Piezoelektrik kompozitler.....	20
3.3. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Yeri ve Uygulama Alanları.....	20
3.3.1. Sensörler	20
3.3.2. Üreteçler.....	21
3.3.3. Aktuatörler (Eyleyiciler)	22
3.3.4. Transdüserler (Dönüştürücüler)	26
4. TİTREŞİM TEORİSİ	27
4.1. Periyodik Titreşimler	29
4.1.1. Periyodik serbest titreşim hareketi	29
4.1.2. Gelişigüzel titreşimler	30
4.1.3. Şok.....	30
4.2. Titreşimin Nicelikleri	31
4.2.1. Titreşimin ölçülmesi	31
5. TİTREŞİM KONTROL YÖNTEMLERİ.....	33
5.1. Pasif Titreşim Kontrolü.....	33
5.1.1. Viskoelastik sönümleme	33
5.1.2. Sürtünme kuvveti yardımı ile sönümleme	34
5.1.3. Darbe sönümleyiciler	34
5.2. Yarı Aktif Titreşim Kontrolü.....	34
5.3. Aktif Titreşim Kontrolü	35
5.3.1. Piezoelektrik malzemeler ile aktif titreşim kontrolü	36
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
6.1. Modelleme Çalışmaları.....	45
6.1.1. Kiriş yapı modelleme çalışmaları	45
6.1.2. Disk plaka yapısı modelleme çalışmaları	47
6.1.3. Kare plaka yapısı modelleme çalışmaları	50
6.2. Piezoelektrik Seramik Malzeme Üretimi.....	53
6.3. Piezoelektrik Seramikleri Plakalara Yerleştirme İşlemleri	62
6.3.1. Kiriş yapı piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri.....	62

6.3.2. Disk plaka yapısı üzerine piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri..	64
6.3.3. Kare plaka yapısı piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri.....	66
6.4. Kiriş Yapı Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümleme Çalışmaları.....	67
6.5. Disk Plaka Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümleme Çalışmaları	72
6.6. Kare Plaka Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümleme Çalışmaları	81
7. SONUÇ.....	89
7.1. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	90
KAYNAKÇA	91
ÖZGEÇMİŞ	

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması [3]	14
Tablo 3.2. Bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri [6]	14
Tablo 3.3. Yumuşak ve sert PZT özelliklerinin karşılaştırılması	16
Tablo 3.4. PZT seramiklerin özellikleri [6]	19
Tablo 3.5. PVDF'nin bazı piezoelektrik özelliklerinin piezoelektrik seramikler ile karşılaştırılması [3]	20
Tablo 5.1. İleri ve geri beslemeli aktif titreşim kontrolü yöntemlerinin karşılaştırılması	36
Tablo 6.1. Çelik kirişin titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı	46
Tablo 6.2. Paslanmaz disk yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı	49
Tablo 6.3. Paslanmaz çelik kare plaka yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı	51
Tablo 6.4. DAD 3350 hassas kesim tezgahı özellikleri	59
Tablo 6.5. PZT-5H piezoelektrik seramik malzemenin katalog değerleri	60
Tablo 6.6. Piezoelektrik seramiklerin d_{33} ölçüm sonuçları	61
Tablo 6.7. Sinocera d_{33} ölçüm sistemi özellikleri	62
Tablo 6.8. Titreştirici özellikleri	69
Tablo 6.9. WF 1966 sinyal jeneratörü özellikleri	69
Tablo 6.10. 2718 model sinyal güçlendirici özellikleri	70
Tablo 6.11. 4011 sinyal güçlendirici özellikleri	70
Tablo 6.12. Polytec titreşim tarayıcı cihaz özellikleri	72
Tablo 6.13. Paslanmaz disk yapısı titreşim sönümlenme sonrası deplasman değerleri	77
Tablo 6.14. Paslanmaz disk yapısı titreşim sönümlenme sonrası deplasman sonuçları	81
Tablo 6.15. Paslanmaz çelik kare plaka yapısı titreşim sönümlenme sonrası deplasman değerleri	85

Tablo 6.16. Paslanmaz çelik kare plaka yapısı titreşim sönümlenme sonrası deplasman değerleri	88
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Perovskit yapı	3
Şekil 2.2. (a) Curie sıcaklığının üstündeki kristal görünüm (b) Curie sıcaklığının altındaki kristal görünüm [3]	3
Şekil 2.3. Piezoelektrik etki [3]	4
Şekil 2.4. Tek ve çok kristal piezoelektrik malzemeler arasındaki fark	5
Şekil 2.5. Piezoelektrik seramiklerin kutuplama işlemi	5
Şekil 2.6. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri [4]	7
Şekil 2.7. Piezoelektrik yük katsayısı matrisi	7
Şekil 3.1. Kuvars kristalleri	13
Şekil 3.2. PZT faz diyagramı [12]	17
Şekil 3.3. Faz diyagramında görülen kafes yapıları [13]	18
Şekil 3.4. Farklı kompozisyonlardaki PZT'lerin piezoelektrik yük sabiti değişimleri	18
Şekil 3.5. (a) Eksenel sensör (b) Fleksör sensör	21
Şekil 3.6. (a) Ark üretimi (b) Şarj üretimi	22
Şekil 3.7. Temel eyleyici çeşitleri	23
Şekil 3.8. Piezoelektrik yama eyleyici [17]	23
Şekil 3.9. Farklı boyutlardaki piezoelektrik eyleyiciler [19]	24
Şekil 3.10. Bimorf eyleyiciler [20]	24
Şekil 3.11. Katmanlı piezoelektrik eyleyiciler [21]	25
Şekil 3.12. Mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyici [22]	25
Şekil 3.13. Piezoelektrik tüp eyleyici şematik gösterimi [23]	26

Şekil 4.1. Titreşim sistemi	27
Şekil 4.2. Titreşimin zaman ve frekans düzleminde gösterimi [24]	28
Şekil 4.3. Sönümlü serbest titreşim sistemi	29
Şekil 4.4. Sönümsüz serbest titreşim sistemi	30
Şekil 4.5. Titreşim niceliklerinin parametreleri	31
Şekil 4.6. Titreşim ölçüm sistemi şematik gösterimi	31
Şekil 4.7. Band geçiş filtresi	32
Şekil 5.1. Viskoelastik malzeme ile sönümleme	34
Şekil 5.2. Manyetik damper sisteminin şematik gösterimi	35
Şekil 5.3. Karın omurgasında piezoelektrik test yamaları	37
Şekil 5.4. Kokpit bölgesindeki aktif titreşim kontrol sistemi	38
Şekil 5.5. Aktif flaplar ile test edilen ilk helikopter [33]	39
Şekil 5.6. Helikopterin pervane bıçaklarına ve flap uçlarına yerleştirilen mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyiciler [31, 34]	39
Şekil 5.7. Kompozit motor bıçakları ve piezoelektrik elemanlar [35]	40
Şekil 5.8. Piezoelektrik seramiklerin uydu, uzay ve optik sistemlerde kullanımı	42
Şekil 5.9. Avrupa birliği FP7 projesi PEASSS, Piezo malzemeler ile giydirilmiş akıllı uydu yapısı	43
Şekil 5.10. Alüminyum silindirik yapı üzerinde MFC piezoelektrik eyleyiciler	44
Şekil 6.1. Çelik kirişin bölümlenmiş hali	45
Şekil 6.2. Paslanmaz çelik diskin bölümlenmiş hali	48
Şekil 6.3. Piezoelektrik seramik malzemelerin üretim şeması	53
Şekil 6.4. Preslemeye kadar olan oksit karışım genel üretim akış şeması	54
Şekil 6.5. Piezoelektrik seramik malzeme deneysel üretim akış çizelgesi	54

Şekil 6.6. Seramik malzeme için kullanılan metal kalıp	55
Şekil 6.7. Seramik malzeme üretiminde kullanılan pres	55
Şekil 6.8. Presleme sonucu elde edilen ürün	56
Şekil 6.9. Soğuk izostatik pres	56
Şekil 6.10. Isıl işlem döngüsü	57
Şekil 6.11. Sinterleme döngüsü	57
Şekil 6.12. DAD 3350 hassas kesim tezgahı ve kesim sonrası elde edilen seramik parçalar	58
Şekil 6.13. Elektrotlama düzeneği	59
Şekil 6.14. Polarizasyon düzeneği	60
Şekil 6.15. d_{33} ölçüm sistemi	61
Şekil 6.16. İletken epoksi ile yapıştırma işlemi	63
Şekil 6.17. Kiriş yapısının şematik gösterimi ve yapısı	63
Şekil 6.18. Piezoelektrik seramikler ve lehimlenmiş kablolar	64
Şekil 6.19. Seramik malzemelerin yerleştirilmesi işlemi	64
Şekil 6.20. 3 adet seramik malzeme ile hazırlanmış disk yapı	65
Şekil 6.21. 6 adet seramik malzeme ile hazırlanmış disk yapı	65
Şekil 6.22. 4 adet seramik malzeme ile hazırlanmış kare plaka yapısı	66
Şekil 6.23. 8 adet seramik malzeme ile hazırlanmış kare plaka yapısı	67
Şekil 6.24. Bir boyutta gerçekleştirilen aktif titreşim test düzeneği	68
Şekil 6.25. Metal kiriş üzerindeki titreşim hareketi	71
Şekil 6.26. Metal kiriş üzerindeki sönümlenmiş titreşim hareketi	71
Şekil 6.27. 3 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi	73

Şekil 6.28. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları	74
Şekil 6.29. Piezo elemanlara 100 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	75
Şekil 6.30. Piezo elemanlara 150 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	75
Şekil 6.31. Piezo elemanlara 200 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	76
Şekil 6.32. Piezo elemanlara 180 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	76
Şekil 6.33. 6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi	78
Şekil 6.34. 6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde voltaja göre deplasman değişimi	79
Şekil 6.35. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları	80
Şekil 6.36. Piezo elemanlara 180 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	80
Şekil 6.37. 4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi	82
Şekil 6.38. 4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde voltaja göre deplasman değişimi	83
Şekil 6.39. Paslanmaz çelik kare plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları	84
Şekil 6.40. Piezo elemanlara 45 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	84
Şekil 6.41. Paslanmaz çelik kare plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları	87
Şekil 6.42. Piezo elemanlara 130 V verilerek elde edilen deplasman değerleri	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A^0	: Angstrom
$BaSnO_3$	: Baryum Kalay Oksit
$BaTiO_3$	: Baryum Titanat
$Bi_2(SnO_2)_3$	: Bizmut Kalay Oksit
C	: Coulomb
C/N	: Coulomb/Newton
C_0	: 1 kHz'de ölçülen statik kapasitans
Ca	: Kalsiyum
$CaTiO_3$	: Kalsiyum Titanat
$CaZrO_3$	: Kalsiyum Zirkonat
Co	: Kobalt
d	: Piezoelektrik yük katsayısı
dk	: Dakika
d_{ij}	: Piezoelektrik katsayı
E_k	: Elektrik alan
f	: Frekans
f_a	: Antirezonsans frekansı
f_r	: Rezonans frekansı
g_{ij}	: Piezoelektrik voltaj katsayısı
gr	: Gram
Hz	: Hertz

K	: Kelvin
k_{eff}	: Elektromekanik bağlaşma faktörü
kg	: Kilogram
k_{ij}	: Elektromekanik düzlemsel bağlaşma faktörü
KOK	: Kareler ortalamasının karekökü
k_p	: Düzlemsel elektromekanik bağlaşma katsayısı
kV	: Kilovolt
kW	: Kilowatt
l	: Numune uzunluğu
La	: Lantan
MFC	: Makro fiber kompozit
$MgZrO_3$	: Magnezyum Zirkonat
MHz	: Megahertz
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
m/V	: Metre/volt
$NiSnO_3$	: Nikel Kalay Oksit
mN-kN	: Milinewton – Kilonewton
N	: Newton
nm	: Nanometre
Pb	: Kurşun
pC	: Pikocoulomb
pF	: Pikofarad

PLZT	: Kurşun Lantan Zirkonat
PTC	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı
PbTiO ₃	: Kurşun Titanat
PVDF	: Poliviniliden Florür
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
s	: Elastik esneklik
sn	: Saniye
Sr	: Stronsiyum
SrTiO ₃	: Stronsiyum Titanat
T	: Periyot
Q _m	: Mekanik kalite faktörü
Z _m	: Rezonanstaki impedans
V/mm	: Volt/Milimetre
W	: Watt
X _{jk}	: Gerilim
⁰ C	: Santigrad derece
ρ	: Yoğunluk

1. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN TARİHİ

Yunancadaki sıkıştırmak ve bir bölgeye basınç uygulamak manasına gelen piezoelektrik kavramı, piezein ve elektrik kelimelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Kristal yapıdaki malzemelerin basınç uygulandığı zaman elektrik yükü üretebilmesi kabiliyetine piezoelektrik özellik denir. Bu özelliğe sahip malzemelere ise piezoelektrik malzemeler denir. Piezoelektrik özellik düz ve ters piezoelektrik etki olmak üzere iki farklı şekilde kendisini göstermektedir. Düz piezoelektrik özellik üzerine basınç uygulanan malzemelerin elektrik akımı üretmesi, ters piezoelektrik özellik ise malzemeye elektrik akımı uygulandığında deforme olması anlamına gelmektedir [1].

Piezoelektrik malzemelerin tarihi oldukça uzun bir geçmişe dayanmaktadır. 1655 senesinde bilinen ilk piezoelektrik özelliğe sahip Rochelle tuzu malzemesi Elie Seignette tarafından bulunmuştur ancak piezoelektrik özelliklerinin dışında farklı amaçlarda kullanılmıştır. Bu malzemenin piezoelektrik özelliği ise 225 sene sonra Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir. Bu malzemeye ek olarak 1899 senesinde kuvars kristalinin piezoelektrik özelliği Edison tarafından fonograflarda kullanılmıştır.

Nicholson ve Paul Langevin bilim insanları, 1. Dünya Savaşı sırasında kuartz kristalleri ile malzemenin piezoelektrik özelliğinden yararlanarak denizaltı sistemlerinde ultrasonik transdüser tasarlamış ve kullanmışlardır. Piezoelektrik özellik kavramı üzerine 1920'li yıllarda yapılan bir diğer çalışma ise özelliğin histeris eğrisinin Joseph Valasek tarafından çıkarılması üzerine olmuştur.

Devam eden senelerde ise bu malzemelerin piezoelektrik özelliğine ek olarak piroelektrik ve dielektrik gibi bazı elektriksel özelliklerinin araştırılmasına devam edilmiştir. Özellikle sonar uygulamalarında kullanılan Potasyum Dihidrojen Fosfat (PDF) ve Dihidrojen Arsenat gibi malzemelerin ferroelektrik özelliği 1935 yılında Busch ve Scherer tarafından keşfedilmiştir.

1940'lı yıllarda ise ferroelektrik malzemelerin genel hücre yapısının perovskit adı verilen yapı olduğu keşfedilmiştir. Baryum Titanat ($BaTiO_3$) transdüser uygulamasında kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin Curie sıcaklığının düşük olması ve piezoelektrik özelliğini bu sıcaklık üzerinde kaybetmesi bilim insanlarını yeni malzemeleri keşfetmeye sevk etmiştir. Ancak Baryum Titanat ($BaTiO_3$) çok yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu için özellikle kapasitör uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

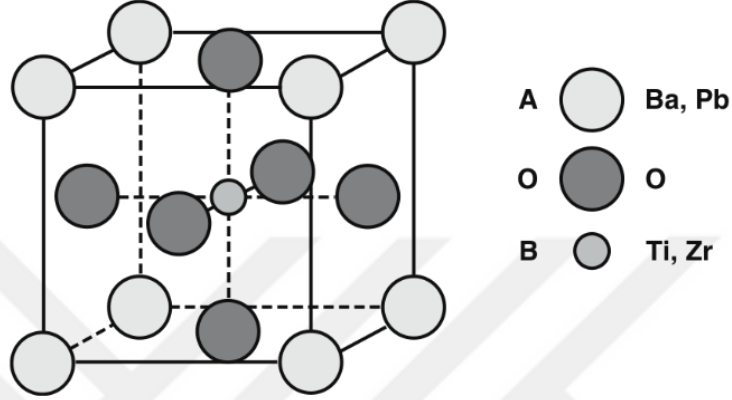
1950'li yıllarda ferroelektrik malzemeler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Üniversitelerde ve özel kuruluşlarda yapılan araştırmalar ile ferroelektrik malzeme ailesi 25'e kadar genişletilmiştir. Günümüzde birçok uygulamada sıkça kullanılan ve yüksek verimlilikle performans gösteren PZT olarak adlandırılan Kurşun Zirkonat Titanat seramiklerinin çalışmaları da bu yıllarda başlamıştır.

PZT'nin ferroelektrik özelliği Japon bilim insanları Shirane, Hoshino ve Suzuki tarafından keşfedilmiştir. Bu keşfi takiben PZT özelinde katı çözeltili araştırmaları ve elektriksel özelliklerin belirlenmesi adına yoğun araştırmalar devam etmiştir. Teknolojinin yavaş yavaş gelişmesi ve elektronik sektörünün büyümesiyle beraber piezoelektrik malzemelere olan ilgi daha da artmıştır [2].



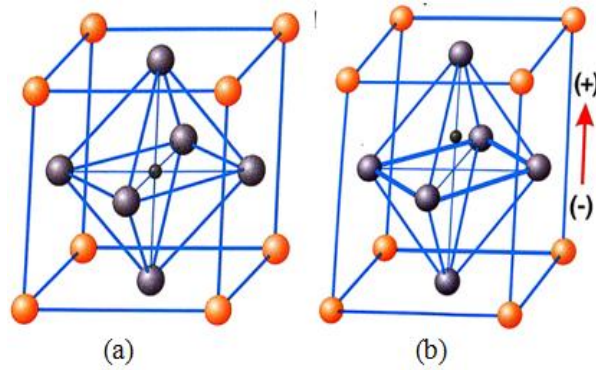
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMENİN YAPISI

Geleneksel piezoelektrik seramik malzemeler perovskit yapıdadır. Kristal yapısı ABO_3 şeklinde olan perovskit aynı zamanda ferroelektrik malzemelerin de kristal yapılarını göstermektedir. Perovskit yapının görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Perovskit yapısı

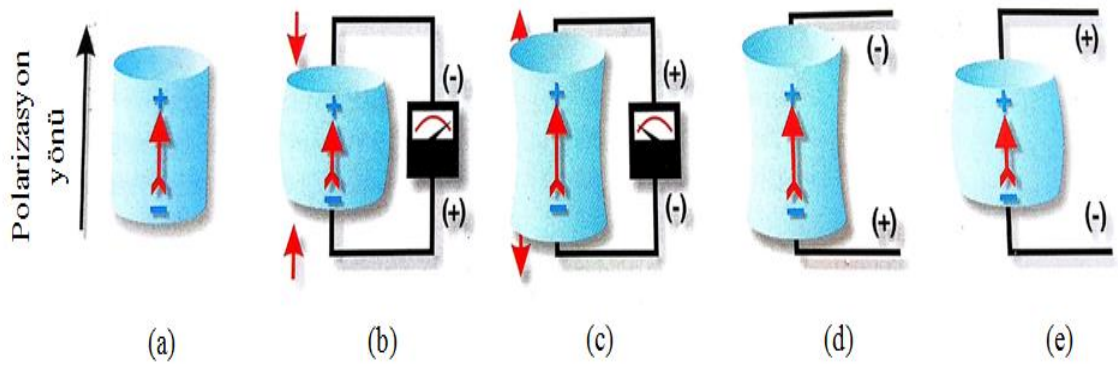
Perovskit yapıya sahip piezoelektrik malzemeler Curie sıcaklığının üzerine çıkarıldıklarında pozitif ve negatif yükler Şekil 2.2 (a)'da gösterildiği gibi simetrik bir görünüm sergilemektedir. Bu malzemeler Curie sıcaklığının altında çalıştıkları zaman kristal yapılarında elektrikselsel dipol bulunmaktadır. Diğer bir deyişle pozitif ve negatif yükler Şekil 2.2 (b)'de gösterildiği gibi simetrik bir dağılımda değildir.



Şekil 2.2. (a) Curie sıcaklığının üstündeki kristal görünüm (b) Curie sıcaklığının altındaki kristal görünüm [3]

2.1. Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik etki, kristal malzemelere mekanik gerilim uygulandığında elektrik alanı yaratması veya elektrik alana tabi tutulduğunda mekanik deformasyona uğramasıdır. Piezoelektrik etki Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Malzemenin mekanik gerilim uygulandığında polarizasyon göstermesi düz piezoelektrik etki; bunun tam tersi olan elektrik alan uygulandığında mekanik deformasyona uğraması ise ters piezoelektrik etkidir [4].



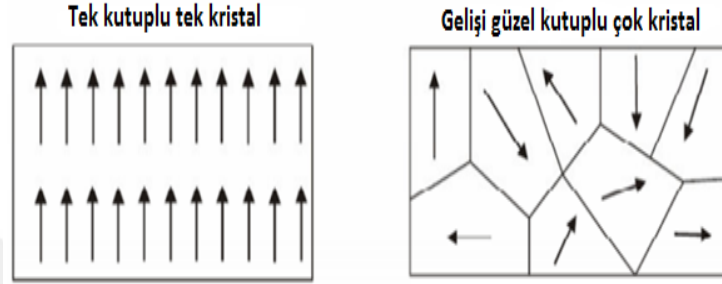
Şekil 2.3. Piezoelektrik etki [3]

Şekil 2.3 (a), silindirik geometriye sahip piezoelektrik bir malzemenin mekanik kuvvet uygulanmadan ve polarize edildikten sonraki halini göstermektedir. Silindire mekanik gerilim uygulandığında elektrotlar arasında akım geçisi gözlenir. Silindir Şekil 2.3 (b)'deki gibi sıkıştırıldığında veya Şekil 2.3 (c)'deki gibi gerdirildiğinde elektriksel yük açığa çıkmaktadır. Piezoelektrik malzemeye elektrik alan uygulandığında malzemede şekil değişimi oluşmaktadır. Uygulanan elektrik alanın doğrultusu malzemenin polarizasyonu ile ters yönde olduğunda Şekil 2.3 (d)'deki gibi uzama, uygulanan elektrik alan malzeme polarizasyonu ile aynı doğrultuda olduğunda malzemede Şekil 2.3 (e)'deki gibi kısılma görülür.

Herhangi bir malzemenin piezoelektrik özelliğe sahip olabilmesi için, malzemenin kristal yapısında dengede olmayan kutuplar bulunmalıdır. Piezoelektrik özellik malzemenin birim hücreindeki asimetrik yük dağılımının sonucudur. Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, piezoelektrik kristallerde dengelenmemiş kutuplar vardır.

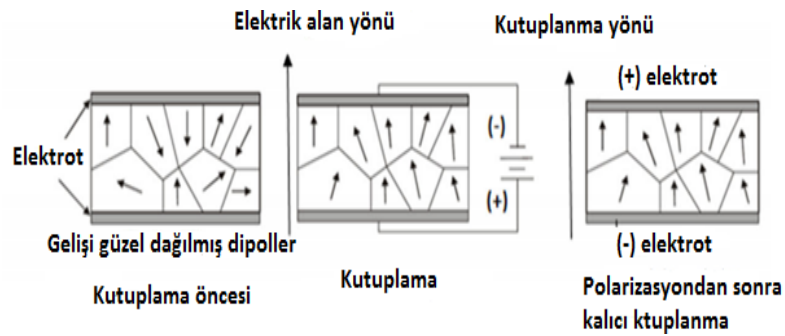
Doğal piezoelektrik malzemeler tek kristal yapıya sahiptirler ve tüm kristal yapı boyunca yük dağılımı dengededir. Doğal malzemeler bu özelliklerinden dolayı herhangi

bir işleme tabii tutulmadan piezoelektrik özellik sahibidirler. Diğer bir taraftan yapay piezoelektrik malzemeler sinterleme işleminden sonra çok kristal yapıdadırlar. Çok kristal malzemeler gelişigüzel yük dağılımından ve birçok taneden oluştuğu için makroskopik ölçüde malzemede piezoelektrik özellik sıfırlanmaktadır. Şekil 2.4'te tek kristal ve çok kristal piezoelektrik malzemeler arasındaki farkı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Tek ve çok kristal piezoelektrik malzemeler arasındaki fark

Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda piezoelektrik kristallerdeki kutuplanma bozulur ve birim hücre tekrar simetrik yapı halini alır. Yapay piezoelektrik malzeme üretmek için, malzemenin kutuplanması gerekmektedir. Kutuplama işleminde, piezoelektrik malzemeler Curie sıcaklığının üzerine ısıtılır ve kutuplanma yönünde güçlü bir elektriksel alan uygulanır. Elektrik alanının etkisiyle, gelişigüzel dağılmış kutuplar yönlendirilmektedir. Ancak şu bilinmelidir ki tüm tanelerde tam bir yönlendirme söz konusu değildir. Tanelerdeki kutupların yönlendirilmesinden sonra, malzeme elektrik alanının etkisinde soğutulur. Curie sıcaklığının altında, malzemede kalan kutuplanma kalıcı hale gelir. Bu yöntemle malzeme Curie sıcaklığın altındaki değerlerde piezoelektrik özellik göstermektedir. Şekil 2.5'te kutuplama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Piezoelektrik seramiklerin kutuplama işlemi

Kristal yapıdaki malzemeler kristal simetrilerine göre 32 farklı gruptan oluşmaktadır. Piezoelektrik özellik bu simetri grupları içerisinde simetri göstermeyen 20 kristal simetri sisteminde görülmektedir. Bu kristal simetrisine sahip malzemelerde uzamalar ya da büzülme malzeme elektriksel yük oluşmasını sağlar [5].

Düz piezoelektrik özellik gösteren malzemeler dönüştürücülerde, ani basınç değişimi algılayıcılarında, gerilmedeki değişimi tespit eden algılayıcılar gibi aygıtlarda yaygın olarak kullanılır. Ters piezoelektrik özellik gösteren malzemeler ise eyleyicilerde kullanılmaktadır. Malzemelerin kullanılacak uygulamaya uygunluğu için gerekli piezoelektrik özellikleri ise deneysel ve teorik yöntemlerle hesaplanmaktadır. Üretimi uygun yöntemlere göre yapılmış ve hassas biçimde tasarlanmış piezoelektrik esaslı sensörler 1 Hz ile birkaç MHz aralığında hareket veya kuvvet değişimini rahatlıkla tespit edebilmektedir. Mikrometre mertebesindeki fiziksel değişimler için kuvvet tespit aralığı ise mN-kN ölçütlerinde değişim gösterir [6].

Piezoelektrik özellik anizotropiktir. Bu nedenle düz ve ters piezoelektrik özellik farklı eşitliklerle ifade edilir. Düz piezoelektrik etki (2.1) numaralı eşitlik ile ifade edilirken, ters piezoelektrik etki (2.2) numaralı eşitlik ile ifade edilir.

$$P_i = d_{ijk} X_{jk} \quad (2.1)$$

$$X_{ij} = d_{kij} E_k \quad (2.2)$$

(2.1) ve (2.2) numaralı eşitliklerde ifade edilen terimler ve alt indisler aşağıdaki gibidir.

P_i = Uygulanan gerilime karşı "i" yönünde oluşan polarizasyon, C/m²

d_{ij} = Piezoelektrik katsayı, C/N

X_{jk} = Gerilim, N/m²

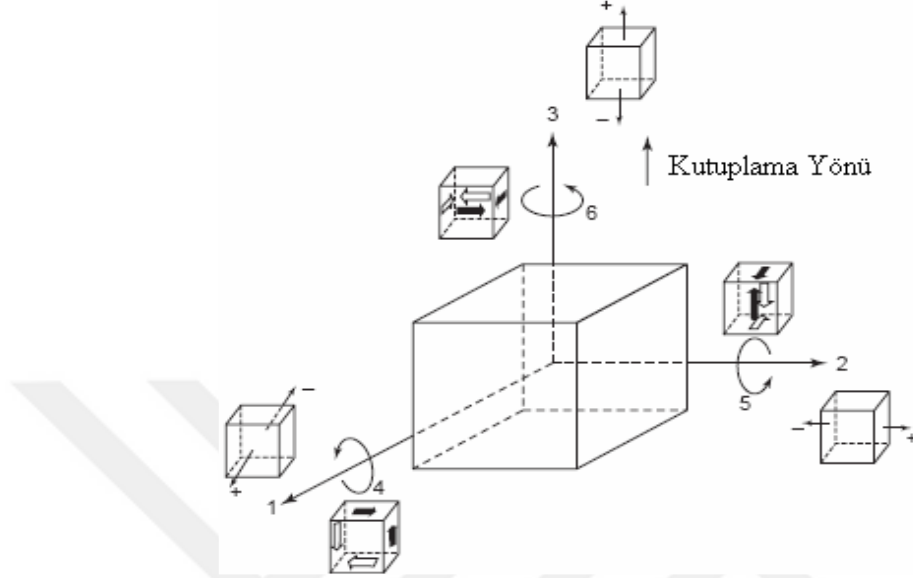
X_{ij} = "k" yönünde uygulanan elektrik alan ile kristalin belirli oryantasyonu sonucu oluşan gerilme, m/m

E_k = Elektrik alan, V/m

2.2. Piezoelektrik Katsayılar

Piezoelektrik özellikler yöne bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu sebepten dolayı piezoelektrik özellikler tensörler ile ifade edilir. Tensörler kullanılırken alt indisler ile bazı terimler ifade edilmektedir. "3" alt indisi kutuplama yönünü gösterirken, "1" ve "2" alt indisler de "3" yönüne dik eksenleri ifade eder. "4", "5" ve "6" alt indisleri "1", "2" ve "3" yönlerine dik gerilme ve gerinmenin olduğu kayma düzlemlerini belirtir [7]. Birinci alt indis malzemeye uygulanan elektrik alan yönünü

gösterirken, ikinci alt indis ise mekanik gerilimin yönünü gösterir. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri [4]

2.2.1. Piezoelektrik yük katsayısı (d)

Malzemeye uygulanan mekanik gerilimin elektriksel polarizasyon veya uygulanan elektrik alanın gerinim meydana getirmesi piezoelektrik özelliktir. Piezoelektrik gerinim katsayısında birimler, düz piezoelektrik etki için Coulomb/Newton (C/N) iken ters piezoelektrik etki için metre/volt (m/V)'tur. Piezoelektrik malzemelerden PZT özelinde d_{33} , sisteme yapılan katkılara göre geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu aralık yumuşak PZT için 300~700 pC/N ve sert PZT için 50~350 pC/N'dir. Piezoelektrik yük katsayısını gösteren matris Şekil 2.7'de verilmiştir.

$$[d_y] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Şekil 2.7. Piezoelektrik yük katsayısı matrisi

Piezoelektrik yük katsayısı için genellikle d_{33} ve d_{31} katsayıları hesaplanmaktadır. d_{33} , 3 doğrultusunda uygulanan birim elektrik alanın, yine 3 doğrultusunda oluşturduğu gerinimi gösterir. Gerilmenin uygulandığı yön ile polarizasyon yönü aynıdır ve bu 3 doğrultusudur. d_{31} , 3 doğrultusunda uygulanan birim elektrik alanın, yine 1 doğrultusunda oluşturduğu gerinimi gösterir. d_{33} hesaplanırken (2.3) numaralı eşitlik kullanılırken, d_{31} için (2.4) numaralı eşitlik kullanılır [3].

$$d_{33} = k_{33} \sqrt{(\epsilon_0 s_{33}^E \epsilon_{33}^T)} \text{ (C/N)} \quad (2.3)$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{(\epsilon_0 s_{11}^E \epsilon_{33}^T)} \text{ (C/N)} \quad (2.4)$$

2.2.2. Piezoelektrik voltaj katsayısı (g)

Piezoelektrik voltaj katsayısı malzemeye uygulanan mekanik kuvvete karşı oluşan elektrik alanını veya malzemeye uygulanan elektrik alanına karşı oluşan mekanik gerinimi ifade eder. Piezoelektrik voltaj katsayısı g_{ij} tensörü ile gösterilir. Birinci alt indis piezoelektrik malzemede oluşan elektrik alanın doğrultusunu gösterir. İkinci alt indis ise uygulanan gerilimin veya oluşan gerinimin doğrultusudur. “g” sabiti malzemelerin sensör uygulaması için kullanılıp kullanılmayacağını bir göstergesidir. Piezoelektrik voltaj sabiti, piezoelektrik yük katsayısı ile doğrudan ilişkilidir. Piezoelektrik voltaj sabiti (2.5) ve (2.6) numaralı eşitlikler ile hesaplanabilir.

$$g_{ij} = (\text{Açık devre elektrik alan}) / (\text{Uygulanan mekanik stres}) \text{ (V.m/N)} \quad (2.5)$$

$$g_{ij} = (\text{Gerinim}) / (\text{Uygulanan dielektrik yer değiştirme}) \text{ (m}^2/\text{C)} \quad (2.6)$$

Piezoelektrik voltaj katsayısı için genellikle g_{33} ve g_{31} katsayıları hesaplanmaktadır. g_{33} , 3 doğrultusunda uygulanan birim elektrik alanın, yine 3 doğrultusunda oluşturduğu gerinimi gösterir. g_{31} , 3 doğrultusunda uygulanan birim elektrik alanın, yine 1 doğrultusunda oluşturduğu gerinimi gösterir. g_{33} hesaplanırken (2.7) numaralı eşitlik kullanılırken, g_{31} için (2.8) numaralı eşitlik kullanılır.

$$g_{33} = d_{33} / \epsilon_{33}^T \text{ (V}_m/\text{N)} \quad (2.7)$$

$$g_{31} = d_{31} / \epsilon_{33}^T \text{ (V}_m/\text{N)} \quad (2.8)$$

2.2.3. Elastik esneklik (s)

Piezoelektrik malzemede uygulanan birim gerilim başına oluşan gerinimdir ve 11 ve 33 doğrultuları için elastik modülünün tersi olarak tanımlanmaktadır. s^D sabit elektrik

yer değişimi olduğunda, s^E ise sabit elektrik alan altında ölçülmüş olan esnekliği ifade eder. İlk indis gerinimin, ikinci indis ise gerilimin doğrultusunu gösterir.

S_{11}^E ; Sabit elektrik alan altında (kısa devre koşulları), 1 doğrultusundaki (kutuplama doğrultusuna dik) gerilim ve 1 doğrultusunda oluşan gerinime sahip elastik esnekliği ifade eder.

S_{33}^D ; Sabit elektrik yer değişimi altında (açık devre koşulları), 3 doğrultusundaki (kutuplama doğrultusuna paralel) gerilimi ve 3 doğrultusunda oluşan gerinime sahip elastik esnekliği ifade eder.

$$S_{11}^E = 1/(4\rho f_r^2 l^2) \text{ (m}^2 \text{ / N)} \quad (2.9)$$

$$S_{33}^D = 1/(4\rho f_r^2 l^2) \text{ (m}^2 \text{ / N)} \quad (2.10)$$

$$S_{11}^D = (1-k_{31}^2) S_{11}^E \text{ (m}^2 \text{ / N)} \quad (2.11)$$

$$S_{33}^E = S_{33}^D / (1-k_{31}^2) \text{ (m}^2 \text{ / N)} \quad (2.12)$$

ρ : yoğunluk, kg/m³

l : numunenin uzunluğu, m

f_r : Rezonans frekansı, Hz

f_a : Antirezonsans frekansı, Hz

2.2.4. Elektromekanik bağlaşma faktörü (k_{eff})

Piezoelektrik özelliğinin etkinliğini tanımlamaktadır. Seramik dönüştürücülerin kabiliyeti, enerjiyi, bir çeşidinden diğerine çevirmektir. Elektriksel çıkış enerjisinin, toplam mekanik giriş enerjisine oranının karekökü olarak veya mevcut mekanik enerjinin, toplam elektriksel giriş enerjisine oranının karekökü olarak tanımlanırlar [8]. Direk etki eşitlik (2.13)'te, ters etki eşitlik (2.14)'te ve rezonans-antirezonsans metoduyla matematiksel olarak hesaplanması ise eşitlik (2.15)'te gösterilmiştir.

$$k_{eff}^2 = (\text{Depolanan elektrik enerji miktarı}) / (\text{Uygulanan mekanik enerji}) \quad (2.13)$$

$$k_{eff}^2 = (\text{Depolanan mekanik enerji miktarı}) / (\text{Uygulanan elektrik enerji}) \quad (2.14)$$

$$k_{eff}^2 / (1 - k_{eff}^2) = (f_a^2 - f_r^2) / f_r^2 \quad (2.15)$$

f_r : Rezonans frekansı (Hz),

f_a : Antirezonsans frekansı (Hz)

2.2.5. Düzlemsel elektromekanik bağlaşma katsayısı (k_p)

Düzlemsel elektromekanik bağlaşma katsayısı ise daha yüksek bir şekilde enerji dönüşümüne olanak sağlayan ve malzemenin 2 boyutlu düzlemsel moda katkısını ihtiva eden bir ölçüttür ve “ k_p ” ile ifade edilir. Önce bir disk için bu değer radyal titreşimlere sebep olan, 3 yönündeki elektrik alan ile çap düzlemindeki mekanik etkiyi temsil eder. Bu durum radyal bağlaşma olarak bilinmektedir. Seramikler için k_p , ferroelektrik malzemelerin piezoelektrik özelliklerini karşılaştırmak için kullanılan ve BaTiO₃ için 0,35’ten, PLZT için 0,72’ye değişen bir değerdir [8].

k_{33} , 3 doğrultusunda uygulanan elektrik alanın oluşturduğu elektriksel enerjinin, 3 doğrultusunda meydana gelen mekanik gerininin oluşturduğu mekanik enerjiye oranının kareköküne eşittir. Eşitlik (2.17)’de rezonans-antirezonans metoduyla matematiksel olarak hesaplanması gösterilmiştir.

k_{31} , 3 doğrultusunda uygulanan elektrik alanın oluşturduğu elektriksel enerjinin, 1 doğrultusunda meydana gelen mekanik gerininin oluşturduğu mekanik enerjiye oranının kareköküne eşittir. Eşitlik (2.18)’de rezonans-antirezonans metoduyla matematiksel olarak hesaplanması gösterilmiştir.

$$k_p = \sqrt{2,51(f_a - f_r)/f_a - ((f_a - f_r)/f_a)^2} \quad (2.16)$$

$$k_{33}^2 = (\pi/2)/(1+\Delta f/f_r) \tan((\pi/2)(\Delta f/f_r)/(1+\Delta f/f_r)) \quad (2.17)$$

$$k_{31}^2/(1 - k_{31}^2) = (\pi/2)(1+\Delta f/f_r) \tan((\pi/2)(\Delta f/f_r)) \quad (2.18)$$

$$\Delta f = f_a - f_r \quad (2.19)$$

k_{ij} : Elektromekanik düzlemsel bağlaşma katsayıları,

f_r : Rezonans frekansı (Hz),

f_a : Antirezonans frekansı (Hz)

2.2.6. Mekanik kalite faktörü (Q_m)

Piezoelektrik rezonatör olarak tanımlanan seri eşdeğer devresindeki reaktansın rezistansa oranıdır. Piezoelektrik malzemenin Q_m değeri genellikle rezonans antirezonans metoduyla ölçülür. Bu metot frekansa bağlı impedansın ölçülmesidir. Piezoelektrik malzeme rezonans frekansında (f_r) minimum, anti rezonans frekansında (f_a) ise maksimum impedansa sahiptir. Rezonans frekansı altında ve antirezonans frekansı üzerinde piezoelektrik malzeme bir kapasitör gibi davranırken, bu frekanslar arasında malzeme indükleyici gibi davranır. Mekanik kalite faktörü (Q_m) piezoelektrik

malzemenin titreşim elemanı olarak kalitesini belirler ve rezonans pikinin keskinliği ve büyüklüğü hakkında bilgi verir. Pik ne kadar dar ve keskin ise yüksek, ne kadar geniş ve yuvarlaksa düşük mekanik kalite faktörüne sahiptir [9]. Mekanik kalite faktörü hesaplaması eşitlik (2.20)'de verilmiştir.

$$Q_m = 1 / (2\pi f_r Z_m C_0) (f_a^2 / (f_a^2 - f_r^2)) \quad (2.20)$$

f_r : Rezonans frekansı (Hz),

f_a : Antirezonans frekansı (Hz),

Z_m : Rezonanstaki impedans (Ω),

C_0 : 1 kHz'de ölçülen Statik Kapasitans (F)

2.3. Piezoelektrik Özelliği Etkileyen Faktörler

Malzemelerin piezoelektrik özelliğini etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Bu etkenler yaşlanma, mekanik sınırlamalar, elektriksel sınırlamalar ve ısıl sınırlamalar olarak gösterilebilir. Her bir etkenin malzemelerin piezoelektrik özelliğine etkisi ayrı ayrı aşağıda açıklanmıştır.

2.3.1. Yaşlanma

Yaşlanma, zamana bağlı olarak malzemenin piezoelektrik özelliklerinde yaşanan kayıp veya azalma olarak tanımlanabilir. Yaşlanma, normal şartlar altında ya da servis durumunda kullanılan bir piezoelektrik malzemede de beklenen bir hadisedir. Yaşlanmanın hızı, piezoelektrik malzemenin kompozisyonuna ve piezoelektrik malzeme için kullanılan üretim yöntemine bağlıdır. Piezoelektrik malzemeyi mekanik, elektrik ve termal gereksinimlerin üzerinde kullanmak malzemenin yaşlanma hızını arttıracak ve malzeme ömrünü kısaltacaktır [10].

2.3.2. Mekanik sınırlamalar

Bir piezoelektrik malzemede, piezoelektrik özellik malzemeye uygulanan mekanik yüke göre değişiklik göstermektedir. Piezoelektrik malzemeye uygulanan mekanik gerilme büyüklüğü bölgelerin yönlendirmelerini bozmaya yetecek büyüklükte ise, bu durum malzemenin piezoelektrik özelliği üzerinde olumsuz etki yaratacaktır. Sonuç olarak bu durum, malzemeye kutuplanma ile kazandırılan piezoelektrik özelliğin kısmen veya tamamen ortadan kalkmasına neden olacaktır. Piezoelektrik malzemenin mekanik gerilmeye dayanma sınırı malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir [3].

2.3.3. Elektriksel sınırlamalar

Kutuplanmış bir piezoelektrik malzeme, kutuplanma işleminden sonra kutuplama doğrultusuna ters yönde ve güçlü bir elektrik alanına maruz bırakılırsa malzeme depolarize olur. Depolarizasyonun derecesi; malzemenin maruz kaldığı ters elektrik alanının uygulanma süresine, ortam sıcaklığına ve çevresel faktörlere bağlıdır. 200-500 V/mm aralığındaki ya da daha büyük değerdeki elektrik alanlar, piezoelektrik malzemelerde önemli bir depolarizasyona sebep olmaktadır. Malzemelerin piezoelektrik özelliklerine alternatif akımın da etkisi bulunmaktadır. Alternatif akımın depolarizasyon etkisi ise döngünün, kutuplanma alanına ters olduğu her bir yarım çevrimde gerçekleşir [3].

2.3.4. Isısal sınırlamalar

Malzemelerin piezoelektrik özelliği çalışma sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik özellikler artan sıcaklığa bağlı olarak azalır. Bir piezoelektrik malzeme, piezoelektrik malzemeler için kritik sıcaklık değeri olan Curie sıcaklığına ısıtılacak olursa, malzeme içerisindeki bölgeler yok olacak ve malzeme depolarize olacaktır. Bu işlemin ardından piezoelektrik malzeme oda sıcaklığına veya uygun çalışma sıcaklığına getirilse bile piezoelektrik özellik göstermeyecektir. Bu nedenle piezoelektrik malzemelerin çalışma sıcaklıkları Curie sıcaklıklarının altında olmalıdır. Piezoelektrik seramik malzemeler için genel olarak tavsiye edilen en üst çalışma sıcaklığı, Curie sıcaklığının yarısıdır. Tavsiye edilen sıcaklık değerlerindeki kullanımlarda, malzeme domainlerinin dizilimindeki değişimler geri dönüşümlüdür. Bunlara ek olarak ani sıcaklık dalgalanmaları da malzemelerin piezoelektrik özelliklerini bozabilir. Piezoelektrik seramik bir eleman ani sıcaklık değişimlerinde kendisini depolarize edebilecek nispeten yüksek voltajlar üretebilir [3].

3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

Piezoelektrik malzemeler doğal kristal malzemeler, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler olmak üzere 4 farklı başlıkta incelenebilir.

3.1. Piezoelektrik Doğal Kristal Malzemeler

Kuvars kristali piezoelektrik doğal kristaller içerisinde en bilinen malzemedir. Kuvars kristalinin bir görüntüsü Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Günümüzde kullanılan kuvarslar sentezlenmiş olup yüksek eğilmezlik ve dielektrik özelliklere sahip olduğundan dolayı frekans oluşturmada ve frekans sabitleyici olarak geniş kullanım alanına sahiptir [6].



Şekil 3.1. Kuvars kristalleri

3.2. Piezoelektrik Seramikler

Geleneksel bir piezoelektrik seramik, genelde perovskit kristal yapısına sahiptir. Piezoelektrik seramik malzemeler genel olarak yapıyı oluşturan elementlerin oksitlerinin tozları kullanılarak üretilir.

Piezoelektrik seramikler yumuşak ve sert piezoelektrik olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Piezoelektrik seramiğin bileşimine donör katkıları eklendiğinde elde edilen seramik malzeme yumuşak piezoelektrik seramik olarak isimlendirilirken, akseptör katkıları eklendiğinde elde edilen seramik malzeme sert piezoelektrik seramik olarak isimlendirilmektedir. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramik malzemelerin karşılaştırılması Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması [3]

Özellik	Yumuşak Piezoelektrik Seramikler	Sert Piezoelektrik Seramikler
Piezoelektrik sabitler	Büyük	Küçük
Geçirgenlik	Yüksek	Düşük
Dielektrik sabiti	Büyük	Küçük
Dielektrik kayıplar	Yüksek	Düşük
Elektromekanik çift faktörü	Büyük	Küçük
Elektriksel direnç	Yüksek	Düşük
Mekanik kalite faktörü	Düşük	Yüksek
Polarizasyon	Kolay	Zor

Ticari olarak yoğun olarak kullanılan bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri de Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri [6]

Piezoelektrik Seramik	Curie Sıcaklığı (°C)	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/N)	K_{33}^T	k_{33}	k_{31}
BaTiO ₃	115	190	-78	1700	0,5	0,21
PbTiO ₃	470	56	-	190	0,45	-
PbNb ₂ O ₆	570	85	9	225	0,38	0,045
KNaNb ₂ O ₆	420	127	-51	495	0,6	-0,27
Ba _{0,4} Bi _{0,5} Nb ₂ O ₆	260	220	-90	1500	0,55	0,22
LiNbO ₃	1150	6	-	25	0,23	0
Na _{0,5} Bi _{0,5} Ti ₂ O ₅	320	70	15	300	0,4	0,1

3.2.1. Baryum titanat (BaTiO₃)

Baryum titanat perovskit yapıya sahiptir. BaTiO₃ sahip olduğu bu yapısının sonucu olarak piezoelektrik özellik göstermektedir ve bulunan ilk doğal olmayan piezoelektrik malzemedir. BaTiO₃’ün dielektrik sabiti oldukça yüksektir bu nedenle yüksek kapasiteli kapasitör uygulamalarında sıkça kullanılan seramik malzemedir. Ancak BaTiO₃’ün Curie sıcaklığı yaklaşık olarak 120 °C’dir. BaTiO₃’ün bu özelliği ise bu malzemenin yüksek

güç kapasitörleri gibi birçok uygulama için kullanımı sınırlanmış olur. Ayrıca BaTiO₃'ün enerji dönüştürme oranı da oldukça düşüktür ve bu nedenle transduser uygulamalarında da tercih edilmez. BaTiO₃ PZT'nin aksine kararlı oksitlerden üretilir ve sinterlenmesi PZT sinterleme sürecine görece daha kolaydır [6, 10].

BaTiO₃'ün piezoelektrik özelliklerinin iyileştirilmesi için bazı katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Örneğin, Sr ilave edilerek, Curie sıcaklığında artış sağlanabilir ve bu sayede kullanım alanı genişletilebilir. Ca ilave edilerek tetragonal fazdaki sıcaklık aralığı genişletilebilir. Co takviyesi ile de yüksek elektrik alan altında dielektrik sabiti piezoelektrik katsayıları olumsuz yönde etkilemeden artırılabilir [6].

BaTiO₃'ün yüksek dielektrik sabitinin olması, bu malzemeyi kapasitör uygulamaları için uygun kılmaktadır. Ancak BaTiO₃'ün kapasitör uygulamaları ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için BaTiO₃ çözeltilisi içine katkı malzemeleri eklenerek ferroelektrik ve piezoelektrik özellikler korunmaya çalışılır. İstenilen özelliklere göre Curie sıcaklığını değiştirmek için SrTiO₃, CaZrO₃, PbTiO₃, BaSnO₃ gibi malzemeler BaTiO₃ çözeltilisine eklenir. Bi₂(SnO₂)₃, MgZrO₃, CaTiO₃, NiSnO₃ gibi malzemeler BaTiO₃ çözeltilisine eklendiğinde malzemenin Curie sıcaklığı düşürülebilir. Katkı malzemelerinin oranına göre oda sıcaklığında yüksek dielektrik sabitine sahip malzeme elde etmek mümkündür [6].

Ayrıca BaTiO₃ 120°C civarlarında, pozitif sıcaklık katsayısı olarak bilinen PTC (ing. Positive temperature coefficient) termistör uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. BaTiO₃'e Yitriya veya Lantan gibi bir katyonlar eklenerek ferroelektrik özellikleri olumsuz yönde etkilemeden yarı iletken malzeme elde etmek de mümkündür.

3.2.2. Kurşun zirkonat titanat (PZT)

PZT; fiziksel, kimyasal, mekanik ve piezoelektrik özellikleri göz önünde alındığında doğal piezoelektrik malzemelere göre daha üstün özelliklere sahiptir. Buna ek olarak kimyasal kararlılıkları da doğal piezoelektrik seramiklere göre daha iyidir. Nem ve atmosferik koşullara karşı dayanıklı yapıdadır. Özel uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilirler, karmaşık geometri veya büyük hacim gerektiren uygulamalar için kolay ve ucuz üretim olanağı sağlarlar [6].

PZT üretimi için, toz halindeki başlangıç PbZrO₃ ve PbTiO₃ metal oksitler belirli oranlarda ölçülerek karıştırılır ve homojen bir karışım elde edilir. Elde edilen bu toz

karışımına bazı bağlayıcılar eklenerek farklı geometriler elde edilebileceği gibi toz formunda da saklanabilirler. Farklı geometrilere sahip seramik parçalar uygun süreler ile uygun pişirme programları kullanılarak fırınlanırlar. Bu işleme sinterleme denir. Sinterlemenin amacı toz parçacıklarını birbirine bağlayarak yoğun kristal yapı elde etmektir. Sinterleme işleminden sonra elde edilen kristal yapıya çeşitli elektriksel işlemler uygulanarak piezoelektrik özellikler elde edilir [3] [6].

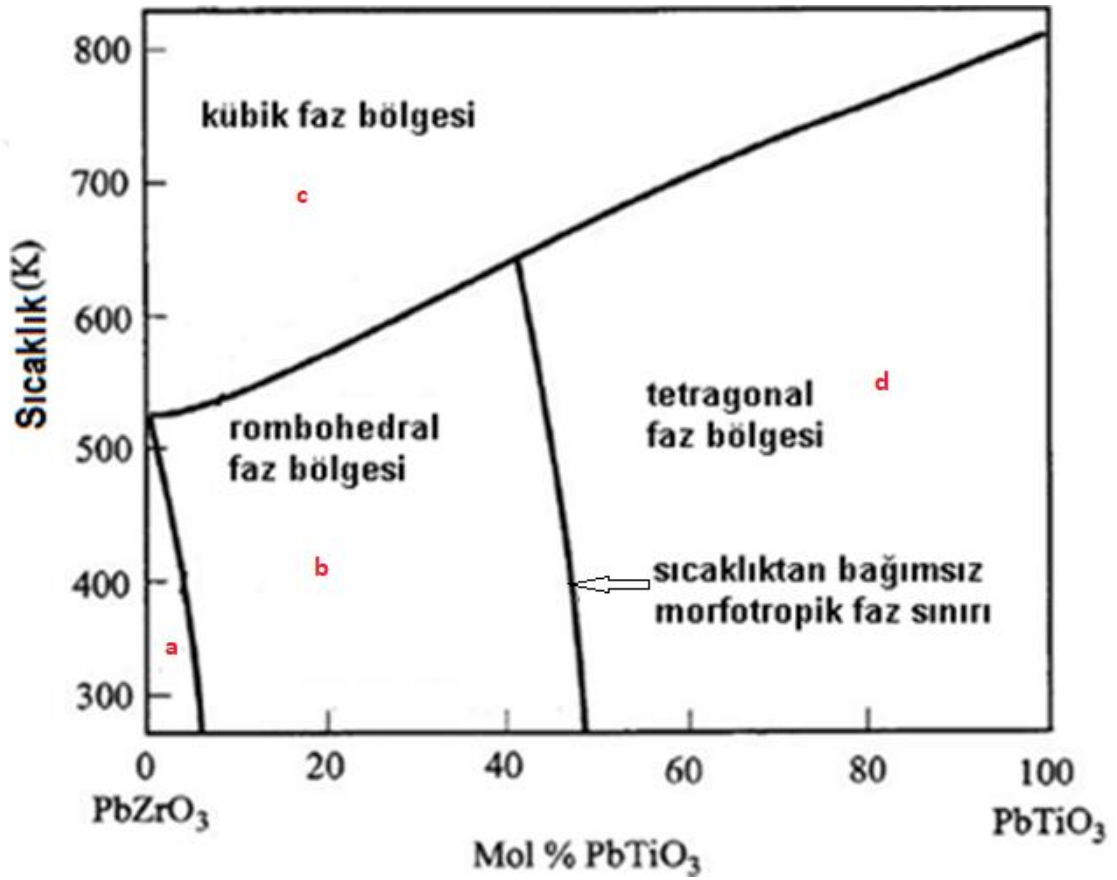
PZT birçok ferroelektrik malzemede olduğu gibi perovskit kristal yapıya sahiptir. Bu yapıda yüzeylerde oksijen atomları ve merkezde ise titanyum veya zirkonyum atomları bulunmaktadır. Bu kristal yapılarda aynı yöndeki birim hücrelerin birleşmesi sonucu domain denilen bölgeler oluşur. Domain adı verilen bölgeler kendi aralarında yönelmiş taneler olup bir tanenin içerisinde farklı yönde yerleşebildiği gibi, tek kristallerde olduğu gibi aynı yöne doğru yönelmiş de olabilirler.

Sert PZT'nin Curie sıcaklığı 300 °C'nin üzerindedir. Sert PZT'nin oda sıcaklığındaki polarizasyon işlemi kolay değildir. Yumuşak PZT'nin ise Curie sıcaklığı 200 °C'nin altındadır ve oda sıcaklığında kuvvetli elektrik alan altında polarize olabilirler [11]. Yumuşak ve sert PZT'nin karşılaştırılması Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. *Yumuşak ve sert PZT özelliklerinin karşılaştırılması*

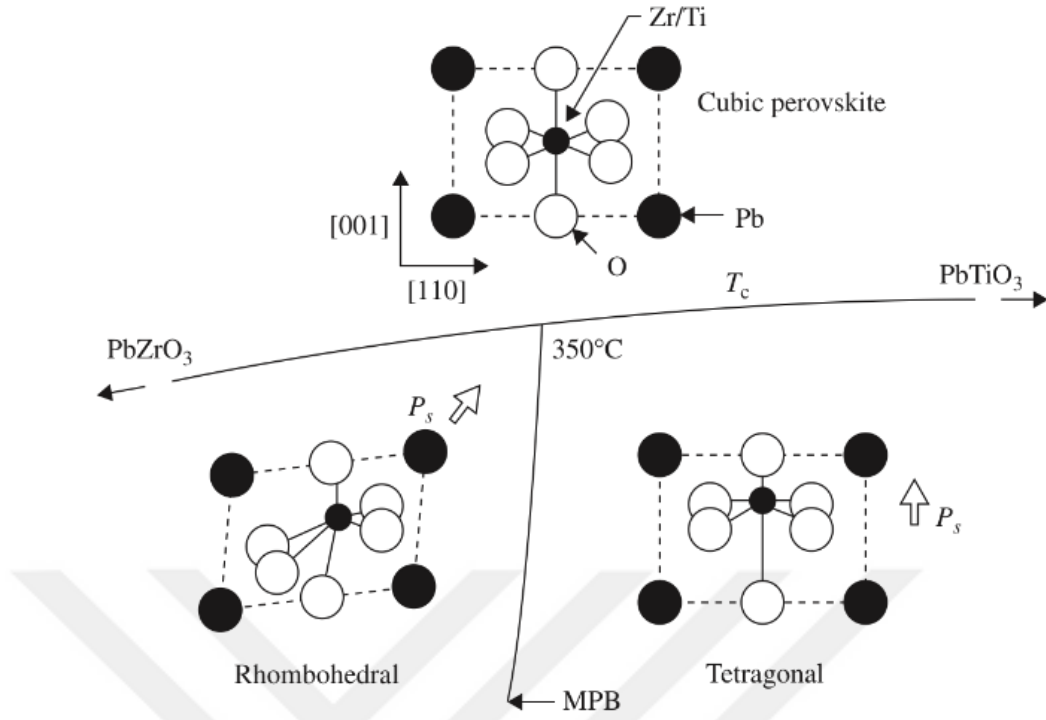
Özellik	Yumuşak Piezoelektrik Seramikler	Sert Piezoelektrik Seramikler
Piezoelektrik d sabiti	Yüksek	Düşük
Dielektrik sabiti	Yüksek	Düşük
Dielektrik kayıp	Yüksek	Düşük
Histerisis	Yüksek	Düşük
Mekanik kalite faktörü	Düşük	Yüksek
Kapling sabiti	Yüksek	Düşük
Elektriksel direnç	Yüksek	Düşük
Bozulma voltajı	Düşük	Yüksek
Elastisite sabiti	Yüksek	Düşük
Yaşlanma etkisi	Düşük	Yüksek

PZT'nin kristal yapısı $PbZrO_3$ ve $PbTiO_3$ tozlarının hangi oranda birleştirildiğine göre farklılık göstermektedir. Sıcaklık ve kompozisyona göre değişen kristal yapı kübik, rombohedral ya da tetragonal yapıda olabilir. Şekil 3.2'de PZT'ye ait faz diyagramı gösterilmiştir. "a" bölgesinde çözelti ferroelektrik özellik göstermez. "b" bölgesinde rombohedral, "c" bölgesinde kübik ve "d" bölgesinde de tetragonal yapıya sahiptir. Ortadan çıkan dikme ise özel bir faz sınırı olup morfotropik faz sınırı olarak bilinir.



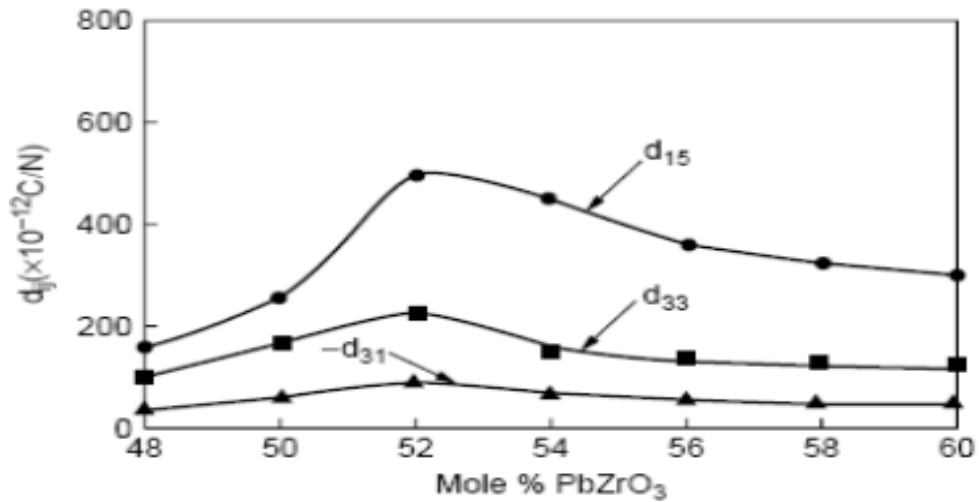
Şekil 3.2. PZT faz diyagramı [12]

Yüksek sıcaklıktaki bir PZT soğutulduğunda, PZT'de bir faz dönüşümü gerçekleşir. Bu faz dönüşümü sırasında yaklaşık olarak $0.1A^0$ 'lük atomik hareketler oluşur. Titanyum bakımından zengin PZT kompozisyonlarında, Curie sıcaklığında kübik $m3m$ yapıdan $4mm$ tetragonal yapıya dönüşüm gerçekleşir. Bu sayede tetragonal yapıda [001] doğrultusunda oluşan polarizasyon, Curie sıcaklığı ile 0 K arasında kendini korur [5]. Bahsi geçen bu yapısal dönüşümler de Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Faz diyagramında görülen kafes yapıları [13]

Belirli özelliklerde PZT çözeltisi oluşturmak istenildiğinde genel olarak Pb 52-48 oranı kullanılmaktadır. Ancak farklı kompozisyonlara sahip PZT'ler farklı piezoelektrik özelliklere sahip olacaktır. Şekil 3.4'te P_bZrO_3 miktarının değişiminin piezoelektrik yük sabitleri üzerine etkisi verilmiştir [14].



Şekil 3.4. Farklı kompozisyonlardaki PZT'lerin piezoelektrik yük sabiti değişimleri

PZT seramik malzemeler kompozisyonuna göre farklı özelliklere sahiptir. Farklı kompozisyonlardaki PZT seramiklerin özellikleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir. PZT'ye katkı olarak kullanılan Ba, Sr, Ca ve La gibi elementler malzemenin Curie sıcaklığı, malzeme kararlılığı ve dayanımı gibi karakteristik özellikleri etkileyerek daha geniş bir yelpazede çalışma imkanı sağlamaktadır [6].

Tablo 3.4. PZT seramiklerin özellikleri [6]

PZT Türü	Curie Sıcaklığı (°C)	d_{33} (pc/N)	d_{31} (pc/N)	K_{T33}	k_{33}	k_{31}
PZT-2	370	152	-60	450	0,63	-0,28
PZT-4	325	285	-122	1300	0,7	-0,33
PZT-4D	320	315	-135	1450	0,71	-0,34
PZT-5A	365	374	-171	1700	0,71	-0,34
PZT-5B	330	405	-185	2000	0,66	-0,34
PZT-5H	195	593	-274	3400	0,75	-0,39
PZT-5J	250	500	-220	2600	0,69	-0,36
PZT-5R	350	450	-195	1950	-	-0,35
PZT-6A	335	189	-80	1050	0,54	-0,23
PZT-6B	350	71	-27	460	0,37	-0,15
PZT-7A	350	153	-60	425	0,67	-0,3
PZT-7D	325	225	-100	1200	-	-0,28

3.2.3. Piezoelektrik polimerler

Piezoelektrik polimerler esnek, hafif, tok, düşük akustik impedans, yüksek darbe direnci ve imalat kolaylığı gösteren malzemelerdir. Çok farklı ve karmaşık geometrilere üretilbilirler. Piezoelektrik polimerler sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı uygulama alanlarında büyük avantajlara sahiptir. Ancak bu gibi özelliklerine rağmen piezoelektrik özellikleri piezo seramikler kadar iyi değildir. Piezoelektrik polimerler arasında en yaygın olarak kullanılan ve bilinen PVDF'dir. PVDF yukarıda belirtilen üstün özellikleri taşımasına rağmen polarizasyon işlemi oldukça zordur ve yüksek elektrik alan gereksinimi bulunmaktadır. PVDF'nin bazı piezoelektrik özelliklerinin BaTiO₃ ve PZT ile karşılaştırılması Tablo 3.5'te gösterilmiştir [3] [15].

Tablo 3.5. PVDF'nin bazı piezoelektrik özelliklerinin piezoelektrik seramikler ile karşılaştırılması [3]

Malzeme	ϵ	d_{31} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	k (%)
PVDF	12	20	-30	11
BaTiO ₃	600-1200	-30	-60	21
PZT	1000-4000	200	>600	30-75

3.2.4. Piezoelektrik kompozitler

Piezoelektrik kompozit malzemeler genel olarak sensör üretiminde kullanılır ve bu durumun sebebi piezoelektrik kompozitlerin hidrostatik duyarlılıklarının daha hassas olmasıdır. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilir. Hidrofonlar piezoelektrik kompozitlere örnek olarak gösterilebilir. Kompozit hidrofonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer iki fazdan oluşur. Yüksek ısı direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir [6].

3.3. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Yeri ve Uygulama Alanları

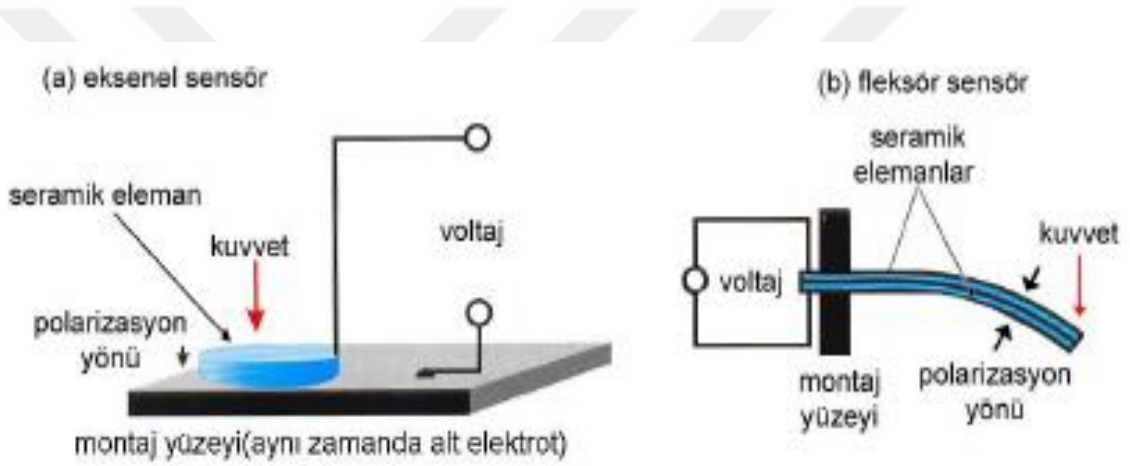
Piezoelektrik malzemeler sensörler, üreteçler, aktuatörler diğeri bir deyişle öteleyiciler ya da eyleyiciler ve transdüserler yani dönüştürücüler olmak üzere dört farklı amaç için kullanılabilirler.

3.3.1. Sensörler

Sensörler; fiziksel ortamlarla, elektronik olarak çalışan ve veri kayıt eden sistemlerin birbirleriyle uyum içerisinde çalışabilmesi için veri akışını sağlayan elemanlardır. Bir sensör belirli bir fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkiyi algılayarak, bu etkiyi bir elektrik sinyaline dönüştürür ve sinyali bir bilgi işlem sistemine gönderir. Genellikle sensörler yardımıyla kontrol edilen sistemlerde sensörün algıladığı girdiye bir çıktı ile cevap verilir. Bu duruma; sıcaklık, mesafe, kuvvet, ivme ölçümleri vb. örnek olarak verilebilir. Nesnelerin yerinin belirlenmesi, mesafe, akış, hız ölçümü gibi uygulamalar için işitilebilir ses sinyalleri veya ultrasonik sinyaller üreten ve algılayan dönüştürücü sistemlerde de sensör elemanlardan yararlanır. Bu uygulamaların birçoğunda ise sensör malzemesi olarak piezoelektrik seramik eleman veya elemanlardan yararlanır. Alıcı-verici uygulamalarında ise, hem gönderilecek sinyalin iletilmesinde, hem de yansıyan sinyalin toplanmasında tek bir piezoelektrik seramik eleman

kullanılacağı gibi bu işlemler için birden fazla piezoelektrik seramik eleman da kullanılabilir [3].

Bazı sensörlerde mekanik etki direk olarak piezoelektrik elemanın üzerine etki eder. Piezo eleman da üzerine etkiyen mekanik etkiye karşı bir elektrik sinyali üretir. Ayrıca bazı sensörlerde piezoelektrik elemana akustik sinyal etki eder. Piezo eleman yine aynı şekilde akustik etkiye karşı olarak elektrik sinyalini üretir. Piezoelektrik eleman tarafından üretilen bu sinyaller, sensör sistemlerinde bulunan yazılım ve donanımlar aracılığı ile anlaşılabilir verilere dönüştürülür. Eksenel ve fleksör sensörler piezoelektrik elemanlar kullanılarak yapılan iki farklı sensör çeşididir. Bu sensörlerin yapıları ise Şekil 3.5'te gösterilmiştir [3].



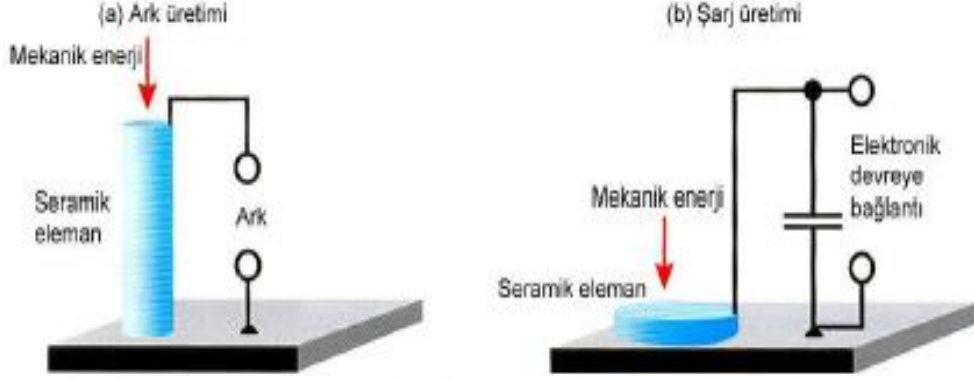
Şekil 3.5. (a) Eksenel sensör (b) Fleksör sensör

3.3.2. Voltaj Üretici ve Ateşleyici

Piezoelektrik malzemeler üreteç olarak tasarlanabilir. Bu şekilde tasarlanan piezoelektrik malzemeler kullanım sırasında voltaj üretir. Sahip oldukları bu özelliklerinden dolayı iki elektrot arasında ark oluşturabilirler. Bu özellik sayesinde en bilineni çakmak olmak üzere, yakıt ateşleme sistemlerinde, kombi sistemlerinde ve kaynak cihazlarında ateşleme aparatı olarak kullanılırlar.

Piezoelektrik bir elemandan elde edilen elektrik enerjisini depolama imkanı da mevcuttur. Çok katlı ve katmanlı kapasitörleri oluşturmada kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteçlerinin yapımında da kullanılır. Bu şekilde üretilen üreteçler elektronik devreleri beslemede kullanılan kuru pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok

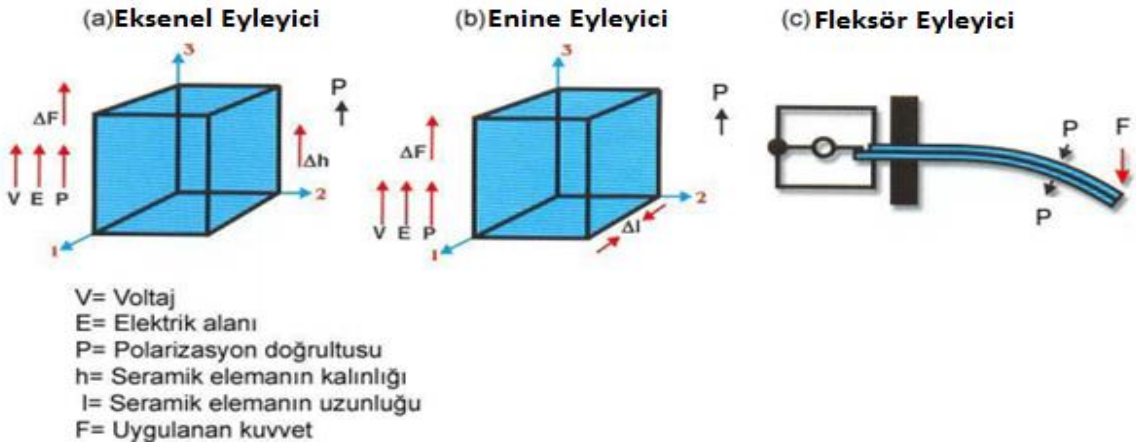
elverişlidirler. Şekil 3.6’da piezoelektrik eleman kullanılarak oluşturulan elektrik enerjisi sistemin şematik görünümü verilmiştir [3].



3.3.3. Aktuatörler (Eyleyiciler)

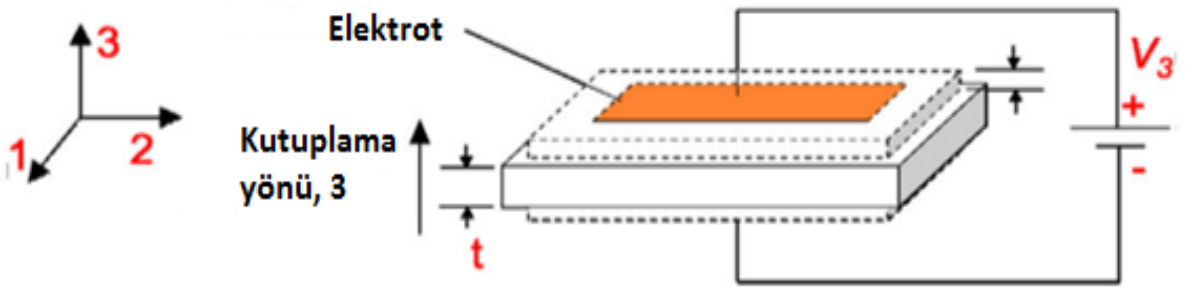
Piezoelektrik eyleyiciler yüksek hassasiyette hareket çözünürlüğü, hızlı tepki, yüksek dayanıklılık ve manyetik alandan etkilenmeme gibi çok önemli eşsiz özelliklere sahiptir [16]. Piezoelektrik eyleyiciden ne kadarlık hareket elde edileceği malzemeye uygulanan elektrik alanına bağlıdır. Ancak piezoelektrik malzemelerin de hareket kısıtlılığı söz konusudur çünkü hareket birim hücrede meydana gelen deformasyondan kaynaklanmaktadır.

Piezoelektrik eyleyiciler makinalarda kullanılan yüksek hızda çalışan takımların hassas şekilde kalibrasyonunda, optik lens ve aynaların kalibrasyonunda genel olarak yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Eyleyiciler piezoelektrik motorlardır ve çalışmaları sırasında elektromanyetik gürültü oluşturmazlar. Piezoelektrik eyleyiciler genel olarak yüksek voltajlı piezoelektrik güçlendiriciye ihtiyaç duyarlar. Bu ihtiyaç hava taşıtları ve uzay uygulamaları aktif titreşim kontrolünde yer ve yerleşim probleminden dolayı sıkıntılar yaratabilmektedir. Temel eyleyici çeşitleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Piezoelektrik eyleyicilerin yama eyleyiciler, bimorf eyleyiciler, katmanlı eyleyiciler, makro fiber kompozit eyleyiciler, piezo motor eyleyiciler ve özel geometrilerde tasarlanmış eyleyiciler olmak üzere farklı çeşitleri de bulunmaktadır [3].



Şekil 3.7. Temel eyleyici çeşitleri

Bilimsel araştırmalarda sıklıkla kullanılan eyleyici şekli genel olarak yama tipi eyleyicilerdir. Bu eyleyiciler kalınlıkları yönünde kutuplanır ve aynı zamanda kalınlıkları yönünde elektrik alanına maruz bırakılır. Piezoelektrik eyleyicilerin kutuplanma yönleri genel olarak "3" indisi ile gösterilir bu da Şekil 3.8'de gösterilen yama eyleyicinin kalınlığıdır [17]. Piezoelektrik eyleyicinin boyu ve kalınlığı da sırasıyla eksen "1" ve eksen "2" olarak isimlendirilir. Elektrik alanının karşıt kutuplanmayla birlikte "3" yönünde uygulanması, piezoelektrik eyleyicinin 3 yönünde sıkışmasına, 1 ve 2 eksenlerin de ise genişlemesine neden olacaktır.



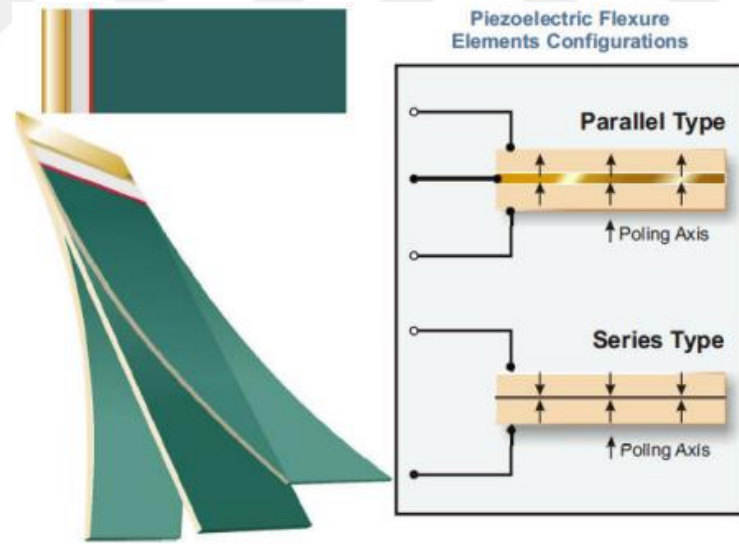
Şekil 3.8. Piezoelektrik yama eyleyici [17]

Piezoelektrik eyleyiciler ebatlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Şekil 3.9'da ise farklı boyutlardaki piezoelektrik eyleyiciler gösterilmiştir [18].



Şekil 3.9. Farklı boyutlardaki piezoelektrik eyleyiciler [19]

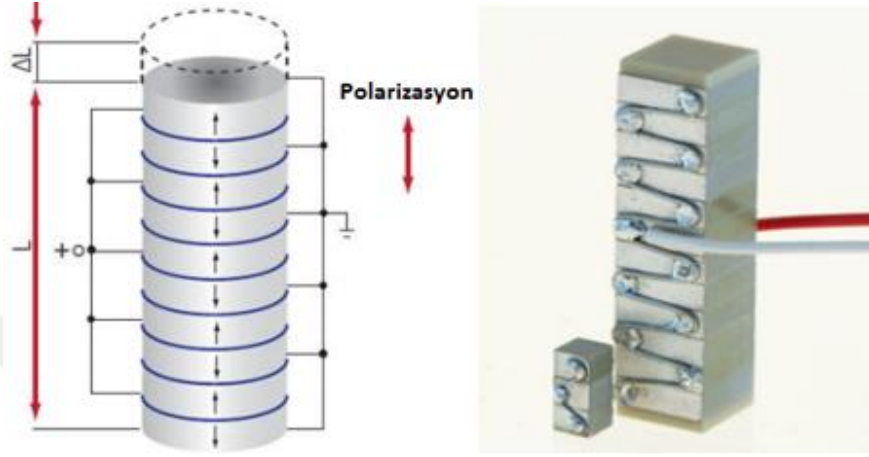
Bimorf piezo eyleyiciler iki tane piezoelektrik yamanın üst üste getirilmesi ile üretilir. Bimorf eyleyiciler birbirine zıt yönde çalışan iki adet piezoelektrik katmandan oluşmaktadır. Bu yapı bimorf eyleyicilere eğilme-bükülme hareketini yapabilme özelliği kazandırmaktadır. Bimorf yapı piezoelektrik katmanların paralel ya da seri bağlanmasıyla elde edilebilir. Bimorf bükücü eyleyici yapıların şematik gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir [20].



Şekil 3.10. Bimorf eyleyiciler [20]

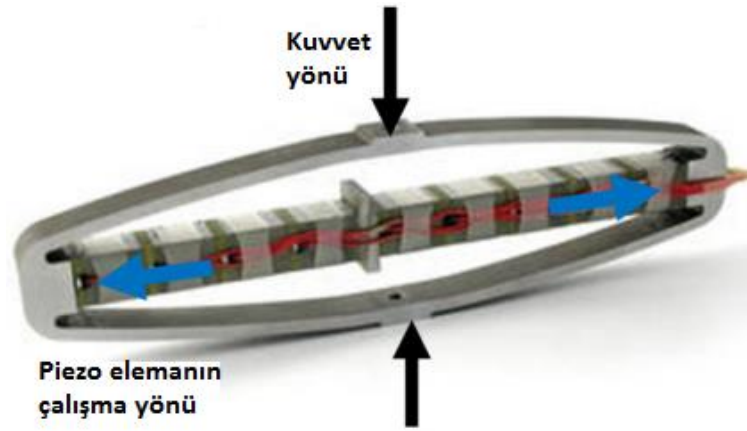
Piezoelektrik eyleyicilerin bir diğer formu ise katmanlı eyleyicilerdir. Katmanlı piezo eyleyiciler piezo plakaların üst üste yerleştirilmesiyle üretilmektedir. Katmanlı eyleyiciye uygulanan voltaj her bir katmana bölünerek ayrılmaktadır. Elektrik alanı kutuplanma yönünde uygulanır ve eksen "3" olarak isimlendirilmektedir. Eksen "3" aynı

zamanda deplasman hareketinin de olduğu yöndür. Katmanlı eyleyicilerin ortalama deplasman değeri her bir katmandaki deplasman miktarı toplanarak bulunur. Katman sayısı arttıkça elde edilen deplasman miktarı da artar. Katmanlı piezo eyleyiciler için bir örnek Şekil 3.11’de verilmiştir [21].



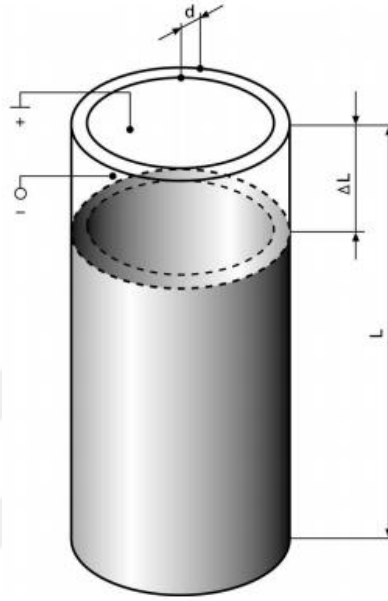
Şekil 3.11. Katmanlı piezoelektrik eyleyiciler [21]

Deplasman miktarı arttırılmış diğer bir eyleyici türü ise mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyicilerdir. Özel tasarlanmış mekanizmalar ile eyleyicideki deplasman miktarını arttırılabilir ve daha düşük kuvvetlerde de elde edilmesini sağlanabilir. Mekanik olarak güçlendirilmiş eyleyici örneği Şekil 3.12’de verilmiştir [22].



Şekil 3.12. Mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyici [22]

Piezoelektrik tüp eyleyiciler silindir şeklinde yapılardır. Bu tip eyleyiciler taramalı elektron mikroskoplarında, ultrasonik uygulamalarda, piezoelektrik pompalarda ve mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemenin iç ve dış yüzeyleri elektrotlardır. Tüp piezoelektrik eyleyiciler için şematik gösterim Şekil 3.13'te verilmiştir [23].



Şekil 3.13. Piezoelektrik tüp eyleyici şematik gösterimi [23]

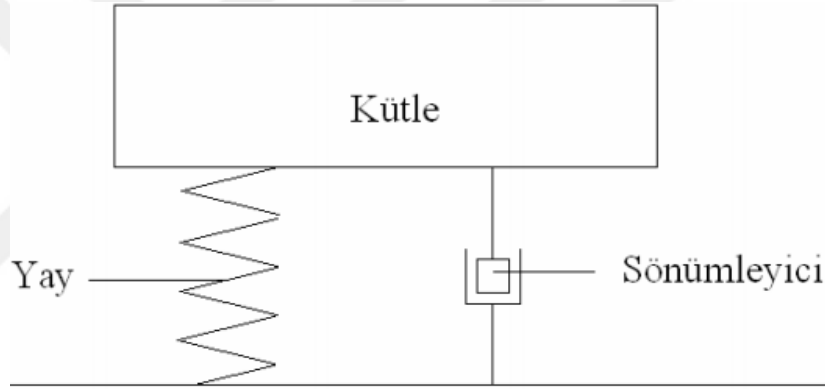
3.3.4. Transdüserler (Dönüştürücüler)

Piezoelektrik transdüserler elektrik enerjisini ses veya ses üstü titreşen mekanik enerjiye çeviren yapılardır. Kompak bir yapıda olma, sade sistem yapısı ve gereksinimleri, güvenilirlik ve az enerji gereksinimleri transdüserlerin avantajları arasında yer almaktadır. Bu özelliklerinden dolayı pil ile çalışan ve ses üreten cihaz uygulamalarında idealdirler. Transdüserler, düz piezoelektrik etki ve ters piezoelektrik etki özelliklerinin her ikisinden de yararlanabilir. Bu nedenle transdüserler hem elektrik enerjisinden ultrasonik sinyaller üretebilir hem de ses dalgasını elektrik sinyaline dönüştürebilir. Bu özelliğinden dolayı transdüserler kullanılarak mesafe, akış, sıvı seviyesi ölçen cihazlar geliştirilmiştir. Piezoelektrik transdüserler seramik ve gevrek malzemelerin işlenmesinde, plastik malzemelerin kaynak işlemlerinde, temizleme sistemlerinde ve sıvıların atomizasyonu gibi ultrasonik işlem gerektiren yerlerde sıklıkla kullanılmaktadır [3].

4. TİTREŞİM TEORİSİ

Titreşim bir kütlenin referans bir pozisyon etrafında yapmış olduğu salınım hareketidir. Başka bir deyişle titreşim, bir kütlenin belirli bir merkez etrafında çevrimsel hareketi olarak da ifade edilebilir.

Titreşim, bir kütlenin elastik bir eleman üzerinde salınım hareketi yapmasıyla oluşur. Titreşim sistemi yay, kütle, kuvvet ve varsa sönümleyici elemanlardan meydana gelmektedir. Titreşim sisteminin şematik görünümü Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Titreşim sisteminde bulunan yay potansiyel enerjiyi depo ederken, kütle sistemdeki kinetik enerjiyi depo eder. Kinetik enerji ve potansiyel enerji arasındaki enerji dönüşümünden titreşim oluşur. Sönümleyici eleman, sistemdeki salınım sırasında sistemden enerji alarak hareketi yavaşlatan ve sonunda hareketi durduran elemandır [24].



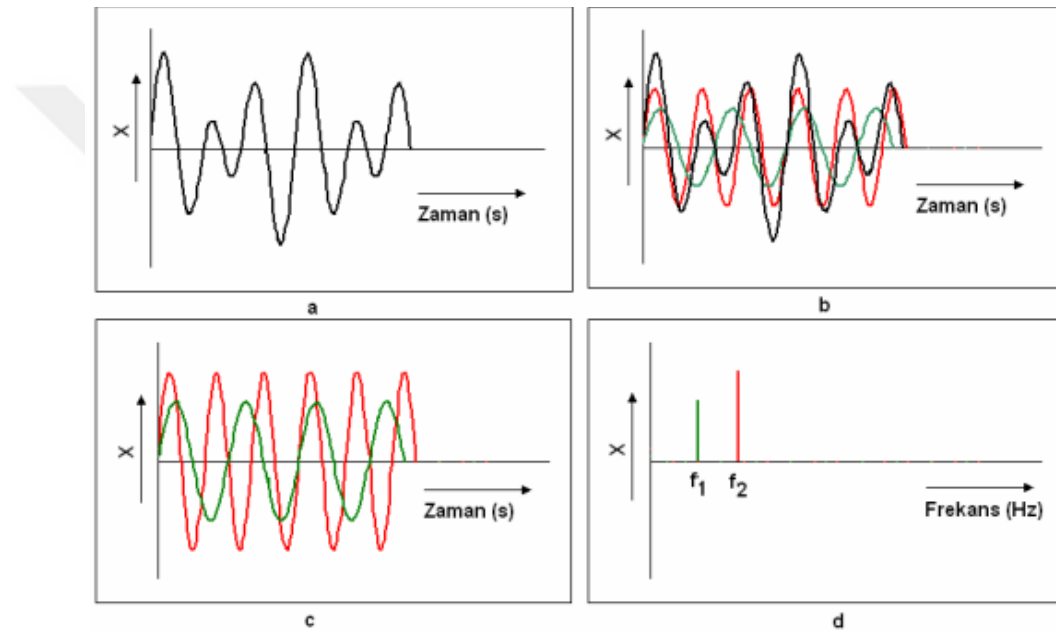
Şekil 4.1. Titreşim sistemi

Periyodik ve gelişigüzel ya da rastgele olmak üzere iki çeşit titreşim hareketi vardır. Belirli bir zaman zarfında aynen ya da kısmen tekrar eden titreşim hareketlerine periyodik titreşim hareketi denir. Gelişigüzel titreşim hareketlerinde böyle bir durum söz konusu değildir. Diğer bir deyişle gelişigüzel titreşim hareketi zaman içerisinde tekrarlanabilme özelliğini göstermez [24].

Periyodik titreşim hareketinde, hareketin tekrar süresine periyot (T), saniyede meydana gelen hareket sayısına frekans (f) adı verilir. Periyodun birimi saniye, frekansın birimi Hz’dir. Matematiksel tanım ile frekans periyodun tersidir ve çarpımları 1’dir [25].

Zaman düzleminde titreşim hareketlerini incelemek oldukça zordur çünkü titreşim hareketi birden fazla bileşenden oluşmaktadır. Titreşim hareketini daha kolay anlamak ve incelemek ve değerlendirmek için frekans spektrumu kullanılır. Frekans spektrumu, bir

titreşim hareketinin frekans ve titreşim niceliğine bağlı bir fonksiyon olarak gösterimidir. Şekil 4.2’de bir titreşim hareketinin zaman ve frekans düzleminde gösterimi verilmiştir. Şekil 4.2 a’da periyodik, fakat harmonik olmayan bir titreşim hareketi görülmektedir. Bu titreşim hareketi frekansları ve genlikleri farklı iki adet harmonik bileşene sahiptir (Şekil 4.2 b ve Şekil 4.2 c). Daha önce de belirtildiği üzere bu bileşenlerin zaman düzleminde incelenmeleri oldukça zordur. Bu yüzden hareket Şekil 4.2 d’de gösterildiği gibi frekans düzleminde incelenir [24].



Şekil 4.2. Titreşimin zaman ve frekans düzleminde gösterimi [24]

Doğal frekans, sistemin serbest titreşim frekansına ya da sistemin sürtünmesiz serbest titreşimi anındaki frekansına denir. Doğal frekans cisimlerin yapısına, cinsine, kütesine ve geometrisine göre bağlı olarak değişmektedir. Sönümlü doğal frekans ise sistemin sürtünmeli serbest titreşim yapması halindeki frekansıdır. Doğal frekans titreşim durumlarında oldukça önemlidir. Sistemlerin çalışmaları sırasında sistem elemanları doğal frekanslarına yaklaştıkça malzemelerde elastik ya da plastik deformasyon oluşabilir. Teorik olarak sürtünmesiz titreşim hareketi mevcut olsa da pratikte mühendislik sistemlerinin bir çoğu, titreşim hareketleri sırasında, sürtünmelerden ya da dirençlerden dolayı sönümleme ile karşı karşıyadır. Hava etkisiyle sönüm, akışkanların sürtünmesi, Colomb kuru sürtünmesi ve manyetik sönüm şekillerinde olabilen

sönümleme olayı, titreşim hareketini yavaşlatacak ve salınımı zamana bağlı olarak azaltacak veya durduracaktır [24].

Rezonans, mekanik, akustik veya elektriksel titreşim yapan sistemlerde, kendi doğal frekanslarına yakın frekanslarda genlikleri giderek artan titreşim yapmaları hali olarak tanımlanır. Sisteme uygulanan dış kuvvet ya da etkinin frekansı, sistemin doğal frekansına eşit olduğu zaman rezonans meydana gelir. Rezonans durumunda, sistemin genliği sınırsız olarak artacak ve bu olay ancak, sistemde sönümleme olması halinde kontrol edilebilecektir. Bu durumun çalışan sistemler üzerine olumsuz etkileri olmaktadır. Bu gibi olumsuz durumlardan kaçınmak için sistemlerin doğal frekansları bilinmeli ve çalışma koşulları ona göre ayarlanmalıdır [24].

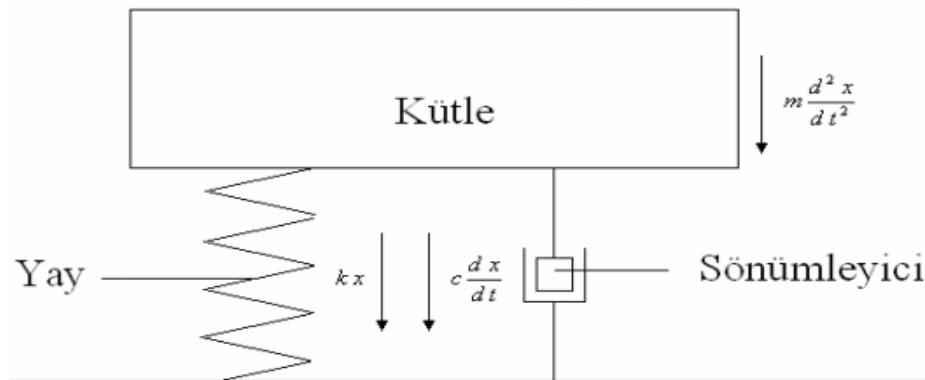
4.1. Periyodik Titreşimler

Belirli bir zaman zarfında aynen ya da kısmen tekrar eden titreşim hareketlerine periyodik titreşim hareketi denir. Titreşim sistemi bir kütle ve yaydan oluşmaktadır. Bu sistemin hareketi, zaman içerisinde sinüzoidal olarak değişen bir harmonik hareket olarak ifade edilebilir.

4.1.1. Periyodik serbest titreşim hareketi

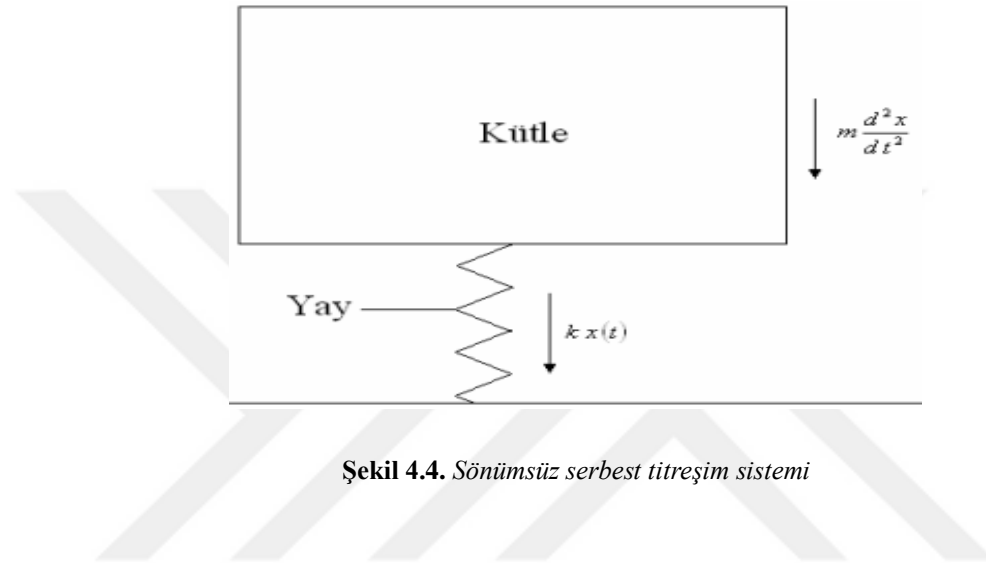
Serbest veya doğal titreşimler elastik bir sistem içerisine yerleştirilmiş kütle, sistemin sürekli yenilenen dâhili kuvvetleri tarafından hareket ettirilmesiyle meydana gelir. Kütleye dâhili veya harici sürtünme dirençleri etki ediyorsa, hareket sönümlü olarak adlandırılır [24].

Sönümlü serbest titreşim hareketinde titreşim sisteminde bir kütle, yay ve sönümleyici bulunmaktadır. Sönümlü serbest titreşim sistemi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Sönümlü serbest titreşim sistemi

Teorik olarak sürtünmesiz titreşim hareketi mevcuttur. Ancak gerçekte titreşim sistemleri içerisinde sönümleme elemanı olsun ya da olmasın, bütün titreşim sistemleri sürtünmelerden ya da dirençlerden dolayı sönümleme ile karşı karşıyadır. Snmszlk kavramı teorik hesaplamaların kolay yapılabilmesi için ortaya atılmış bir kavramdır. Sönümsüz bir titreşim sistemi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



4.1.2. Gelişigüzel titreşimler

Gelişigüzel titreşimler, mevcut bütün frekans aralıklarında genlik ve faz ilişkileri rastgele bir dağılım gösteren, zamana göre titreşim özelliklerini yinelemeyen titreşim türüdür. Uaların ve mühimmatların seyir sırasındaki hareketleri, yollarda hareket eden araçlar ve elektrik motorunun çalışması gelişigüzel titreşime örnek olarak verilebilir [24].

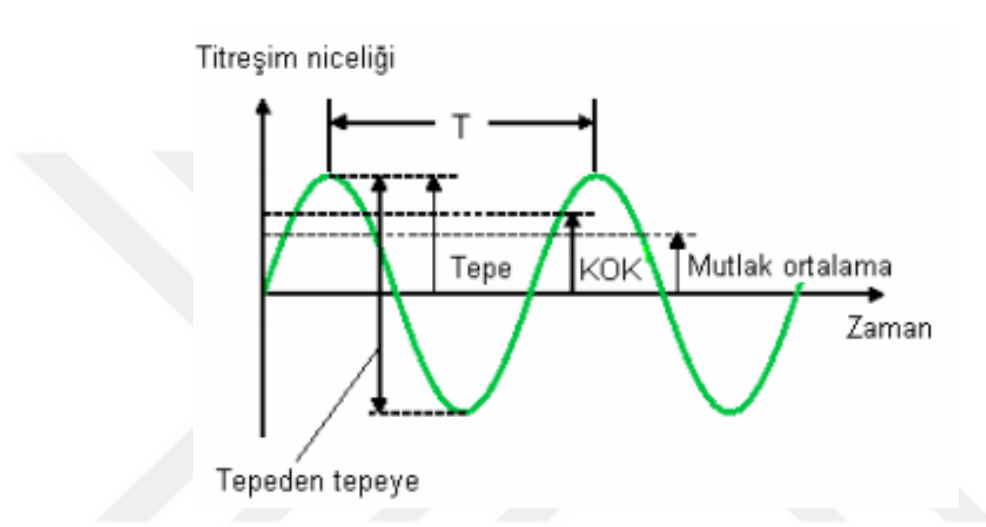
Gelişigüzel titreşim sinyali, çok sayıda anlık hareketin toplamıdır. Gelişigüzel titreşim türünün anlık verilerini matematiksel hesaplamalar ile önceden kestirmek mümkün değildir. Ancak, bu titreşim hareketini istatistiksel veriler kullanarak tanımlamak bazı durumlarda mümkün olabilir. Gündelik yaşantımızda ve teknolojik sistemlerde karşılaşılan titreşim türü çoğunlukla gelişigüzel titreimlerdir [24].

4.1.3. Şok

Mekanik Şok; patlama, çarpışma, sistemden kaynaklanmayan ani vuruntu ve darbe gibi dış etkiler nedeniyle oluşan enerji boalmasıdır. Şok sinyali onlarca frekans içerir. Çeşitli dış etkiler nedeniyle oluşan Şok sinyali birçok frekans içerir. Şok titreşimi anlık bir hareket olup, belirli bir band aralığında frekans spektrumu bulunmaktadır [24].

4.2. Titreşimin Nicelikleri

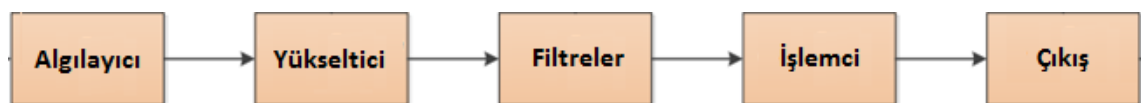
Bir titreşim hareketinin nicelikleri; yer değiştirme, hız ve ivmedir. Titreşim ölçümünde ve ölçümün değerlendirilmesinde bu niceliklerin tepe değer, tepeden tepeye değer, mutlak ortalama değeri, kareler ortalamasının kare kökü değeri (KOK), tepe faktörü, periyot ve tekrarlanma oranı ve süre gibi değişkenler kullanılır [24]. Şekil 4.5'te bu değişkenleri gösteren bir sinüzoidal bir grafik verilmiştir.



Şekil 4.5. Titreşim niceliklerinin parametreleri

4.2.1. Titreşimin ölçülmesi

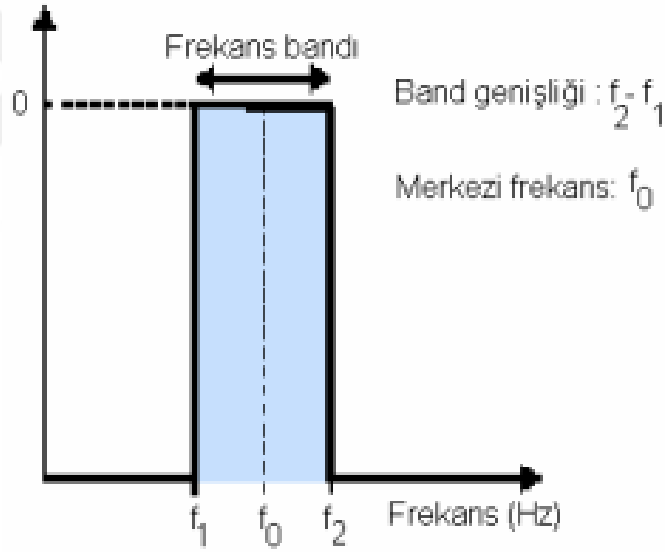
Titreşim ölçüm sisteminin genel şematik görünümü Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Sistem; algılayıcı, yükseltici, filtre, işlemci ve çıkış olarak tanımlanabilir. Sistemde deplasman ölçerler, hız ölçerler, ivme ölçerler, sinyal kuvvetlendiriciler, frekans çözümleyiciler ve titreşim ölçüm ve analizörleri gibi birçok ekipman ve algılayıcılar bulunabilir. Titreşim hareketini değerlendirebilmek için genellikle ivme ölçülür. Bunun nedeni rahatsız edici en büyük etkinin ivme olmasıdır [24].



Şekil 4.6. Titreşim ölçüm sistemi şematik gösterimi

Sistemlerde oluşan mekanik titreşim ilk olarak algılayıcı tarafından alınır. Bu algılayıcı tarafından alınan elektriksel sinyal ilk olarak yükselticiden ve ardından filtreden geçerek işlemciye iletilir. İşlemci sahip olduğu donanım ve yazılım ile aldığı sinyali işler ve genel olarak grafiksel veri olarak kontrol ekranına aktarır. Elde edilen grafik titreşim ölçüm sisteminin çıktısıdır [24].

Titreşim ölçüm sistemi elemanlarından birisi olan filtre çok önemli bir elemandır. Sistemlerde kullanılan filtre elemanı daha önce analiz edilmiş titreşim çalışmalarına uygun şekilde seçilmelidir. Uygunsuz kullanılan filtreler titreşim ölçümlerinin hatalı olmasına neden olur. Titreşim ölçüm sistemlerinde kullanılan filtrelere genel olarak band geçiş filtreleri adı verilir. Band geçiş filtresi, belirlenen frekans band aralığı içindeki sinyallerin geçmesine izin verir. Band aralığının dışında kalan sinyalleri ise geçirmez. Bir band geçiş filtresinin örneği Şekil 4.7’de gösterilmektedir [24].



Şekil 4.7. Band geçiş filtresi

5. TİTREŞİM KONTROL YÖNTEMLERİ

Titreşim kontrol yöntemleri pasif titreşim kontrolü, yarı aktif titreşim kontrolü ve aktif titreşim kontrolü olmak üzere 3 kısma ayrılmaktadır. Mekanik sistemlerin bir çoğunda pasif titreşim yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Ancak gelişen teknoloji ve akıllı malzemelerdeki ilerlemeler ile yarı aktif ve aktif titreşim kontrolü de yaygınlaşmaya başlamıştır.

5.1. Pasif Titreşim Kontrolü

Pasif titreşim kontrol yönteminde titreşim sönümlenme malzemeleri kullanılmaktadır. Pasif titreşim kontrol yöntemi kullanılan titreşim sönümlenme malzemesinin özelliklerine, titreşim sisteminin yapısına, geometrisine ve sistem özelliklerine bağlıdır [26]. Pasif titreşim kontrolü yapılan sistemlerde sönümleyici malzeme sayısı artırılırsa ya da büyütülürse daha iyi titreşim sönümlemesi elde etmek mümkündür. Ancak pasif titreşim kontrolü, genel olarak düşük frekanslarda titreşen sistem uygulamaları için uygun değildir [27].

Pasif titreşim kontrolü malzemeleri titreşen sistemdeki uygun bölgelere uygulanarak bu bölgelerin deformasyon enerjisini alması sağlanarak yapılır. Pasif titreşim kontrolü viskoelastik malzemelerle, sürtünme kuvveti yardımı ile, darbeyle, termal, elektromekaniksel, ve manyetomekaniksel şekilde uygulanabilir [27].

5.1.1. Viskoelastik sönümleme

Titreşen sistemdeki yapısal deformasyon enerjisini sönümleyerek sistem titreşim hareketini sönümleyen yöntemdir. Viskoelastik malzemeler genel olarak yapısal bütünlükten bağımsızdır. Şekil 5.1'de gösterilen titreşen kol dikey doğrultuda bir deformasyona uğradığında, viskoelastik sıvı titreşen kol ile destek arasında bu deformasyon enerjisine karşı bir direnç kuvveti gösterir ve titreşim hareketinde sönümleme sağlanır [27].



Şekil 5.1. Viskoelastik malzeme ile sönümleme

5.1.2. Sürtünme kuvveti yardımı ile sönümleme

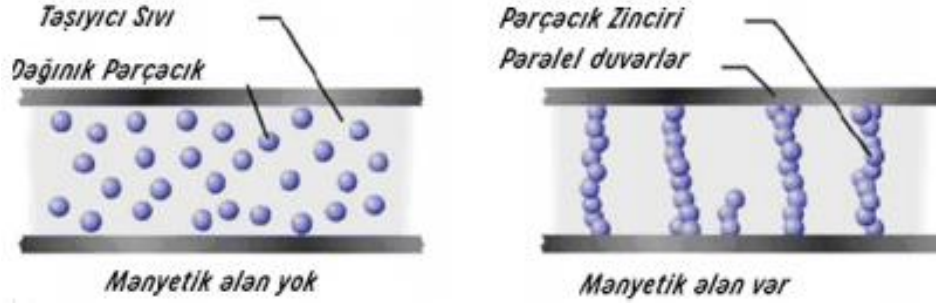
Diğer bir adı da Coulomb sönümlemedir. İki yüzeyin birbirleri arasında kaymasından yararlanır. Bu yöntemdeki sönüm miktarı malzemelerin sürtünme katsayısına, malzeme cinsine ve yüzey durumuna bağlıdır. Bu yöntemin uygulanması gündelik sistemler için pratik değildir. Ancak sürtünme kuvveti yardımı ile sönümleme yöntemi az yer değişimi olan ve eğilmezliği çok fazla olan sistemlerde kullanılabilir [27].

5.1.3. Darbe sönümleyiciler

Üzerinde birincil veya içerisinde ikincil bir yük taşıyan seri olarak çarpışma ile birlikte titreşen sistemler için uygulanır. Bu sistemlerde yüklü sistemler birbirine bağlanarak birbirlerine taşıyıcı yay benzeri sistemle tampon olarak kullanılırken titreşimin sönümlenmesi sağlanır [27].

5.2. Yarı Aktif Titreşim Kontrolü

Yarı aktif titreşim kontrolü manyetoreolojik damperler ve elektoreolojik damperler yardımıyla yapılır. Manyetoreolojik damperler akışkan sıvı formundadır. Bu sıvı içerisinde bulunan manyetik parçacıklar manyetik alan altında zincir yapısını alırlar ve yönlendirilir. Bunun sonucunda da akımsız bir sıvı halini alır. Kazandığı bu yapı sayesinde titreşen iki duvarın titreşimlerini sınırlarlar. Şekil 5.2’de manyetik damper sisteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Ayrıca manyetoreolojik damperler, elektoreolojik damperlere göre daha düşük voltajlarla da çalışabilmektedirler [27].



Şekil 5.2 Manyetik damper sisteminin şematik gösterimi

Elektroreolojik damperler ile yapılan yarı aktif titreşim kontrolünde ise sistemdeki akışkan sıvı içerisinde yarı iletken parçacıklar kullanılır. Manyetik alandan ziyade uygulanan yüksek elektrik alan ile sistemdeki sıvı akma bir sıvı halini alır ve titreşen iki yapı arasındaki titreşimi düşürür. Bu yöntemde kullanılan sıvılar manyetoreolojik sıvılardan çok daha yüksek voltajlarda çalışmaktadırlar [27].

5.3. Aktif Titreşim Kontrolü

Aktif titreşim kontrolü yönteminde sisteme harici olarak enerji beslemesi yapılır ve bununla sistemin enerji akışı değiştirilir. Sistemdeki ana eleman olarak kullanılan eyleyiciler sistem çalışması sırasında mevcut titreşimi sönümlenme işlevini yerine getirir. Bu eyleyiciler pnömatik, hidrolik, elektromanyetik veya akıllı malzemeler olabilirler. Piezoelektrik gibi akıllı malzemeler aktif titreşim sönümlenme yapabilmek için gereken kuvveti elde etmek için uygun malzemelerdir. Akıllı malzemeler eski teknoloji döneminde genellikle mikro boyuttaki titreşimleri sönümlenmek için kullanılırdı. Ancak hem elektronik hem de malzeme teknolojisinin ilerlemesiyle bu tip malzemeler yüksek düzeydeki titreşimlerin sönümlenmesinde kullanılmaya başlamıştır. Elektromekanik eyleyicilerin günümüzde birçok uygulama alanı vardır [27].

Aktif titreşim kontrolü çalışmaları üzerine genel olarak kiriş ve plaka yapılar üzerinde çalışmalar yoğun olarak yapılmaktadır. Kirişlerdeki aktif titreşim kontrolü, piezoelektrik eyleyiciler kullanılarak yapılmaya çalışılmıştır. Levhaların aktif titreşim kontrolü piezoelektrik etki kullanılarak, sonlu elemanlar metoduyla da uygulanmıştır. Kiriş yapısına uygulanan aktif titreşim kontrolünde, hem titreşimi önlenecek kiriş yapısı hem de piezoelektrik eyleyicinin sonlu eleman modeli yazılımları ile oluşturulabilmektedir.

Aktif titreşim kontrolü için çeşitli kontrol teknikleri vardır. İleri ve geri beslemeli olarak başlıca iki grupta incelenebilir. İleri ve geri beslemeli aktif titreşim kontrolü yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 5.1’de verilmiştir [27].

Tablo 5.1. İleri ve geri beslemeli aktif titreşim kontrolü yöntemlerinin karşılaştırılması

	İleri Besleme Yöntemi	Geri Besleme Yöntemi
Avantajlar	Model ihtiyacı yoktur	Model ihtiyacı yoktur
	Geniş band genişliği	Kararlıdır
	Dar bantlı bozucu etkilerde daha etkilidir	Geniş bölge kullanımı vardır wc dahilindeki tüm bozucu etkileri düşürür
Dezavantajlar	Referans ihtiyacı vardır	Sadece rezonans bölgesi civarında etkilidir
	Bölgesel bir yöntemdir	Band genişliği sınırlıdır
	Çok sayıda gerçek zamanlı hesaplama yapılması gerekir	wc dışında kalan bozucu etkiler şiddetlenir

Aktif titreşim kontrolünde genellikle akıllı malzemelerden piezoelektrik malzemeler kullanılır. Kullanım amacına göre farklı piezoelektrik eyleyiciler kullanarak aktif titreşim kontrolü çalışmaları gerçekleştirilebilir. Piezoelektrik malzemeler arasında en çok kullanılan PZT (Kurşun Zirkonat Titanat) malzemesidir. PZT kompozisyonu değiştirilerek; piezoelektrik etkinlik, kayıp veya yüksek sıcaklıkta çalışabilme ve kararlılık gibi özellikleri istenilen düzeylere getirilebilir [27]. Ayrıca PZT malzemenin sertliği ve yumuşaklığı diğer özelliklerini de etkilemektedir.

Aktif titreşim kontrol sistemlerinin akademik uygulamaları oldukça yaygınken, bu sistemlerin pratik hayatta uygulanması için uygulanması istenen sistemlerde genellikle yeterli hacim bulunamamaktadır. Bu kısıttan dolayı hem ölçüm hem de tepki işlemini aynı anda gerçekleştirebilen sistemler üzerinde çalışmalara yoğunlaşmıştır [27].

5.3.1. Piezoelektrik malzemeler ile aktif titreşim kontrolü

Piezoelektrik malzemelerin savunma, havacılık ve uzay sanayisinde kullanımının yaygınlaşmasıyla bu alanlardaki aktif titreşim kontrolü çalışmaları da başlamıştır. Hava

taşıtlarındaki dinamik kararsızlık, istenmeyen titreşimlere yol açabilir. Uçak kanatları, helikopter pervanesi ve bıçakları, motorlar için titreşimin kontrol edilmesi bu gibi hava taşıtlarının uygun biçimde çalışabilmesinde çok önemli rol oynamaktadır [28]. Savaş uçakları, füzeler, uydular ve uydu fırlatma istasyonları, helikopterler ve turboprop motorlu pervaneler titreşimden çok fazla olumsuz yönde etkilenmektedir. Yapısal titreşim probleminin çözülmesinde aktif titreşim kontrolü çalışmaları yapılmaktadır. Aktif titreşim kontrol yönteminin tek başına uygulanabileceği gibi aktif ve pasif titreşim kontrol yöntemlerinin bir arada olduğu yarı aktif yöntem de uygulanabilir. Akıllı malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte de yarı aktif titreşim kontrol yönteminin endüstriyel kullanımları giderek yaygınlaşmıştır [29-31].

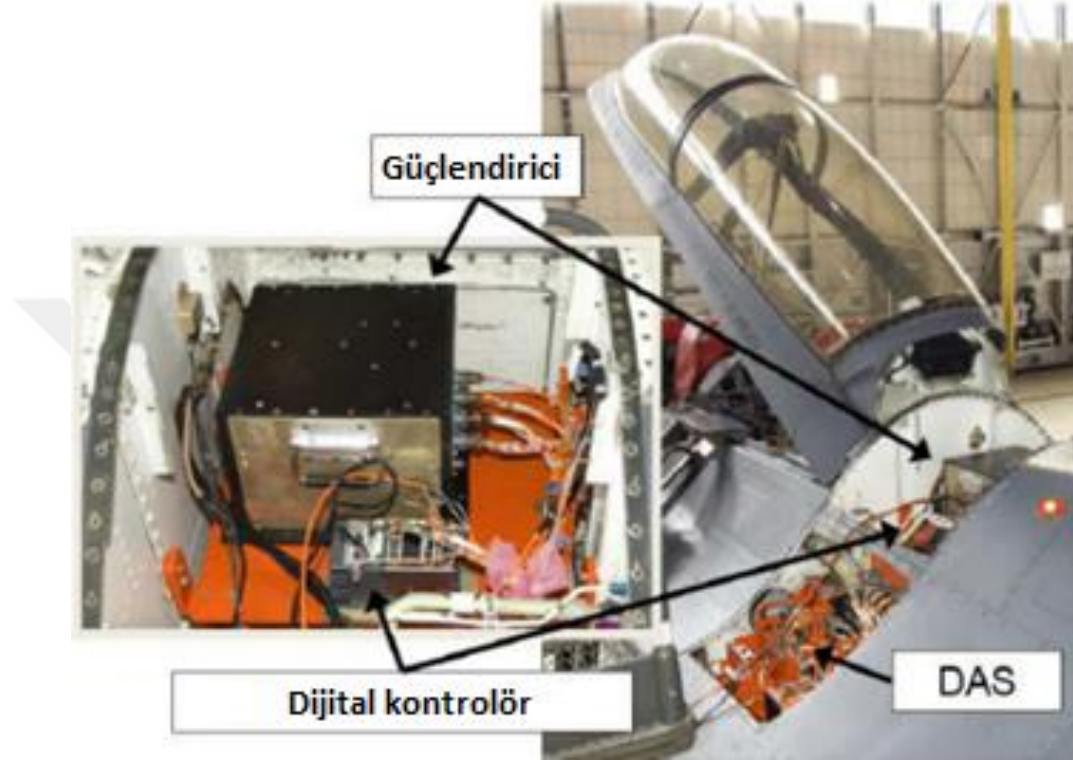
Diğer bir taraftan titreşim problemin üstesinden gelebilmek için yapısal güçlendirmeler de yapılabilmektedir ancak sistemin ağırlığında artışa sebep olduğu için çok tercih edilen bir yöntem değildir. Piezoelektrik malzemelerin aktif titreşim sönümlemedeki üstün özellikleri düşünüldüğünde, ani titreşim oluşumlarında sistemde ağırlık artışı olmadan aktif çözümler yapılabilir [32].

Browning'ın tez çalışmasında [32], F-16 uçaklarının karın omurgasında (ing. Ventral fins) aktif titreşim kontrol sistemi kurulmuştur. Şekil 5.3'te gösterilen piezoelektrik yamadan oluşan eyleyiciler uçağın uygun bölgesine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Karın omurgasında piezoelektrik test yamaları

Bu aktif titreşim sönümlenme sisteminin kontrol ünitesi ve piezoelektrik güçlendiricisi de Şekil 5.4'te gösterilen kokpit yakınlarındaki bir bölgeye yerleştirilmiştir. Bu sistem uçuş verilerine göre titreşim sönümlenmede başarılı olmuştur.



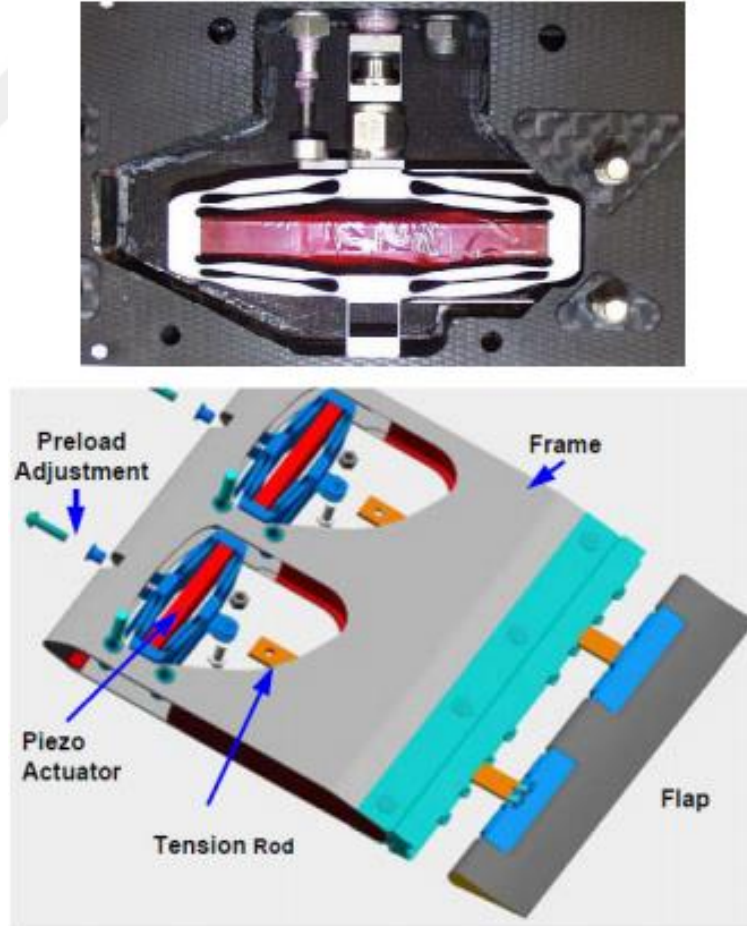
Şekil 5.4. Kokpit bölgesindeki aktif titreşim kontrol sistemi

Helikopterler, mekanik titreşimlerden etkilenen diğer bir hava taşıtıdır. Günümüz helikopterlerinde yolcu ve pilot konforu kabin sesi ve titreşimden dolayı önemli bir problemdir [33]. Helikopter pervanesi, helikopterlerdeki titreşimin en önemli kaynağıdır. Bu nedenle helikopterlerdeki titreşim azaltılması çalışmalarında pervanelere odaklanılmıştır [31, 33, 34]. Bu problemin çözülmesi için aktif ve pasif titreşim kontrol yöntemlerinden her ikisi de kullanılmaktadır. Helikopterin pervane bölgesine elektronik kontrol sistemi yerleştirilmiştir. Bu sistemle helikopterin pervane bıçaklarına ve flap uçlarına yerleştirilen mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyiciler kontrol edilerek aktif titreşim kontrolü yapılmıştır [33]. Bu sistemin denendiği helikopter Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Aktif flaplar ile test edilen ilk helikopter [33]

Helikoptere uygulanan aktif titreşim kontrol sistemi ise Şekil 5.6'da verilmiştir. Pervane bölgesine yerleştirilen elektronik kontrol sistemin daha küçük ve aerodinamik açıdan daha uygun olarak tasarlanabileceği öngörülmektedir [31, 33, 34].



Şekil 5.6. Helikopterin pervane bıçaklarına ve flap uçlarına yerleştirilen mekanik olarak güçlendirilmiş piezoelektrik eyleyiciler [31, 34]

Piezoelektrik eyleyicilerin kullanıldığı diğer bir aktif titreşim kontrol yöntemi ile titreşim sönümlenme bölgesi uçakların uçak motoru bıçaklarıdır. Bachmann'ın tez çalışmasında [35], piezoelektrik elemanlar uçak motoru bıçaklarında titreşim sönümlenmede kullanılmıştır. Bu yöntem pasif titreşim sönümlenme kontrolüdür. Bu yöntemde titreşim enerjisi, piezoelektrik elemanlarla elektriksel enerjiye dönüştürülerek sönümlenme yapılır. Piezoelektrik elemanlar, enerji dönüşümünün maksimize edilmesi için en yüksek gerinmenin olduğu bölgeye yerleştirilmiştir. Kompozit yapıdaki bıçaklarda kullanılan piezoelektrik elemanlar Şekil 5.7'de gösterilmiştir [35].



Şekil 5.7. Kompozit motor bıçakları ve piezoelektrik elemanlar [35]

Füzeler ve roketler titreşime maruz kalan diğer hava araçlarıdır. Diğer bütün hava taşıtlarında olduğu gibi füzelerde de şok tesiri ya da sallantıdan kaynaklanan titreşim problemleri bulunmaktadır. Ayrıca füze gövdelerinde hava akışından kaynaklanan titreşimler de söz konusu olmaktadır. Füzeler hassas ve yüksek pahada olan arayıcı başlıklar, navigasyon sistemleri ve elektronik parçalar içermektedir. Bu parçalar füzenin istenilen rotayı takip etmesinde ve hedefe ulaşmasında önemli rol oynamaktadır. Titreşimin, füze gövdesinden bu gibi elemanlara taşınması, elektronik sistemlerin çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir [29].

Mühimmatlar üzerinde titreşime neden olabilecek birçok yük bulunmaktadır. Mühimmat itki sisteminden kaynaklanan titreşimler, füzenin arayıcı başlık bölümünde etkisini gösterebilir. Bu etki arayıcının ekseninden kaçmasına ve işlevini tam olarak

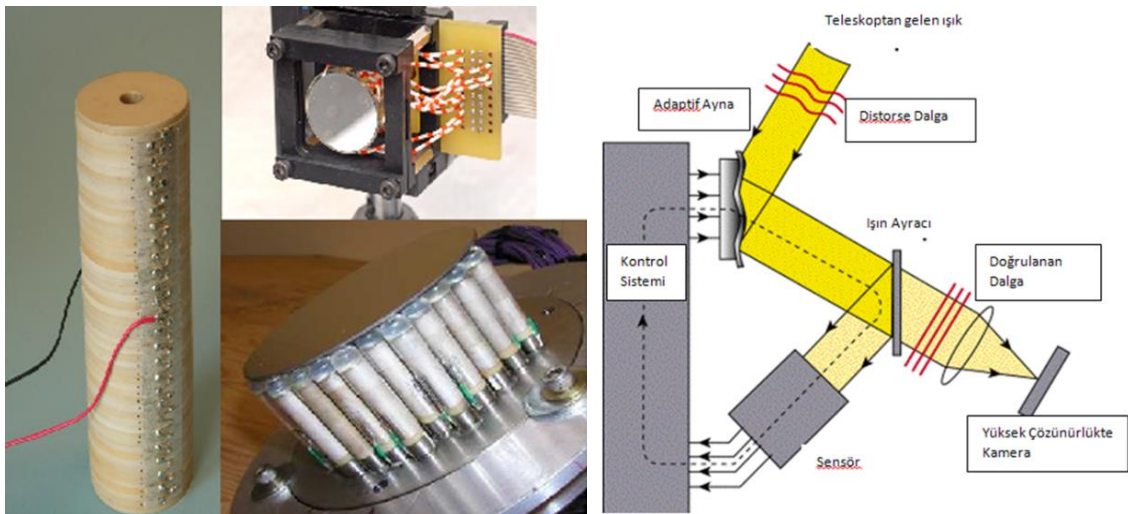
yerine getirememesiyle sonuçlanabilir. Tüm füzeler hedefini ve kendi konumunu, görevini tamamlayabilmek için çok iyi hesaplamak zorundadır. Bu nedenle füzelerde ataletsel ölçüm birimi bulunmaktadır. Ataletsel ölçüm birimi hassas bir aygıttır ve bu nedenle füze gövdesine katı ve hassas olarak bütünlenir. Bu sebeple füze gövdesindeki hareketlilikten çok fazla etkilenmez. Mühimmat gövdesinin katı, eğilmez ya da bükülmez olarak tasarlanması ataletsel ölçüm biriminin uygun çalışabilmesi için önemlidir. Ancak bu şekilde bir gövde yapılması mühimmatın ağırlığının artmasına sebep olmaktadır. Katı bir gövde aynı zamanda, motor çalışmasından kaynaklanan titreşimin ve şok dalgalarının, aerodinamik sallantıların ve akustik yüklerin arayıcı bölgesine ve elektronik elemanlarda kolay taşınmasında bir etkidir. Böyle bir yapıda arayıcı başlık titreşimden dolayı görevini yerine getiremeyebilir. Ataletsel ölçüm birimi füze gövdesinden bazı plastik ya da titreşim sönümleyici yapılar ile gövdeden ayrılmalıdır [29].

Mühimmat gövdesi titreşiminin sonucunda, ataletsel ölçüm birimi titreşim hareketlerini de hesaplayabilir ve bunu gövde hareketlerine entegre edebilir. Ataletsel ölçüm birimi kontrol yüzeylerine kontrol sistemleriyle bağlı olduğu için, mühimmat kanatlarına direktif yollayarak sistemi uygun olmayan yöne doğru yönlendirebilir. Sonuç olarak mühimmat kanatları sallanmaya başlar ve mühimmat kendi rotasından ve hedefinden başka yönler doğru hareket eder. Bu problemin çözümü için, mühimmatın doğal frekansında bazı filtreler tasarlanır ve bu filtreler mühimmatın elektronik kontrol sistemine bağlanır. Bu yöntemle mühimmattaki düzensiz titreşim durumu düzenlenir ancak bu filtreler sistemdeki elektronik cihazların performansında, kendi çalışma frekansları aralığında düşümlere sebep olabilmektedir. Mühimmat gövdesinin ince tasarımlarının yapılması ve ataletsel ölçüm birimi ile bağlantısı, uzun ve bazı varsayımlar içeren süreçtir. Bu gibi çalışmalarda detaylı olacak şekilde sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır [29, 36].

Yörüngeye faydalı yük taşıyan uzay mekikleri, çalıştıkları ortamda çok fazla şok ve titreşime maruz kalmaktadır. Taşınan faydalı yükü mekikten gelen titreşimden korumak en önemli tasarım parametrelerinden biridir. Motor ateşlemesinden, motorun kapanmasından ve modüllerin ayrılmasından kaynaklanan aşırı titreşim ve şok dalgalarından, mekiklerde taşınan faydalı yükler olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu nedenle taşınan yük mutlaka sistem titreşiminden izole edilmelidir. Faydalı yükün mekiğe bağlı olduğu bölgeler, mekikteki oturma bölgesi ve bağlantı noktaları bu konuda dikkat edilmesi gereken önemli yerlerdir. Faydalı yükü korumak için bazı pasif titreşim

sönümleyiciler bulunmaktadır. Ancak bu pasif titreşim sönümleyicilerde iki önemli tasarım isteri eksiktir. Bağlantı noktasındaki sönümleyici, itme kuvvetinden gelen yüke karşı dikey eksende düşük bükülmezliğe (ing. stiffness) ve yanal eksenlerde de yükün sarsılmasını ve titremesini önlemek için yüksek sertliğe sahip olmalıdır. Bunun nedeni yük ile duvarlar arasında kalan mesafenin sınırlı olmasıdır çünkü yanal hareketlerde yük duvarlara çarpabilir. Aktif titreşim sönümleme sistemleri farklı yönlerde farklı bükülmezlik özellikleri sergileyebilir. Pasif titreşim sönümleme sistemlerinin karakteristiği statik yükün durumuna göre değişkenlik gösterebilir. Taşınan faydalı yükün titreşim sönümleyicilere uyguladığı baskı mekiğin hareketi sırasında yerçekimi ivmesine göre değişkenlik göstermektedir ve bunun sonucunda titreşim sönümleyicinin performansı değişkenlik gösterir. Aktif titreşim sönümleme sistemlerinde bu gibi bir problem ile karşılaşılmaz [30].

Uydu ve uzay sanayinin bazı kritik uygulamalarında, adaptif optik sistemlerde istenen yüzey hassasiyetinin ve optik performansın sağlanabilmesi için ayna ve benzeri optik aygıt yüzeylerinin veya bunların boyutlarının dinamik olarak nanometreler hassasiyetinde kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Bu noktada nanometre hassasiyetinde deplasman oluşturan piezoelektrik uyarıcılar ile bu işlemler yürütülebilmektedir. Uydu, uzay ve optik sistemlerde, enerji kullanımı, hızlı tepki ve nanometrik boyutta hassasiyet ihtiyacından ötürü piezoelektrik uyarıcılar öne çıkmaktadır. Şekil 5.8'de istenen hassasiyeti yakalayabilmesi amacıyla tasarlanmış piezo malzeme ve gelen dalgaları doğrultmak amacıyla çok hızlı tepki vermesi amacıyla tasarlanmış kontrol sistemi görülmektedir.



Şekil 5.8. Piezoelektrik seramiklerin uydu, uzay ve optik sistemlerde kullanımı

Piezoelektrik malzemelerin de içerisinde bulunduğu akıllı yapılar sayesinde dünyanın çevresel ve bölgesel görüntülemesinin yapılabileceği ve hızlı tepki veren sistemler firmaların ortak çalışmaları sonucunda üretilmeye çalışılmaktadır. Bunun için PEASSS projesi çatısı altında çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 5.9’da piezoelektrik malzemelerin enerji üretebilme potansiyelinden de yararlanılarak kendi enerjisini üretilip, dışarıdan enerji gereksinimini en düşük düzeylere indirilmesine çalışılan bir uydu projesinin görseli verilmiştir.



Şekil 5.9. Avrupa birliği FP7 projesi PEASSS, Piezo malzemeler ile giydirilmiş akıllı uydu yapısı

Tüm havacılık uygulamalarında aktif titreşim kontrol sistemleri tasarım, kurulum ve çalıştırma-yürütme gereksinimi duymaktadır. Aktif titreşim kontrol sistemi sensörler, eyleyiciler, kontrol ekipmanları ve güçlendiricilerden oluşmaktadır. Hava taşıtlarına aktif titreşim kontrol sistemlerinin uygulanmasının yanı sıra, birçok laboratuvar çalışmasında aktif titreşim kontrol çalışmaları da yapılmaktadır. Bu tip çalışmalar konu üzerindeki bilgi birikimini arttırmak için yapılan çalışmalardır. Aktif titreşim kontrol sistemlerine yönelik temel bilgi birikimini kazanmak için, karmaşık mühendislik yapılarından ziyade kiriş ya da plaka üzerinde yapılan çalışmalar ön plana çıkmaktadır.

Birçok mühendislik yapılarında silindirik yapılar kullanılmaktadır. Uçak gövdeleri, denizaltılar, basınçlı kaplar, borular ve mühimmat gövdeleri silindirik yapılardır. Kiriş ve plaka geometrisindeki yapılar için piezoelektrik sensörler ve eyleyiciler kullanılarak birçok aktif titreşim kontrol çalışmaları yapılmıştır fakat silindirik yapılar için aktif

titreşim kontrol çalışmaları oldukça azdır [37]. 2 adet makro fiber kompozit (MFC) eyleyicilerin kullanıldığı alüminyum silindirik yapı için bir resim Şekil 5.10'da verilmiştir [38].



Şekil 5.10. Alüminyum silindirik yapı üzerinde MFC piezoelektrik eyleyiciler

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

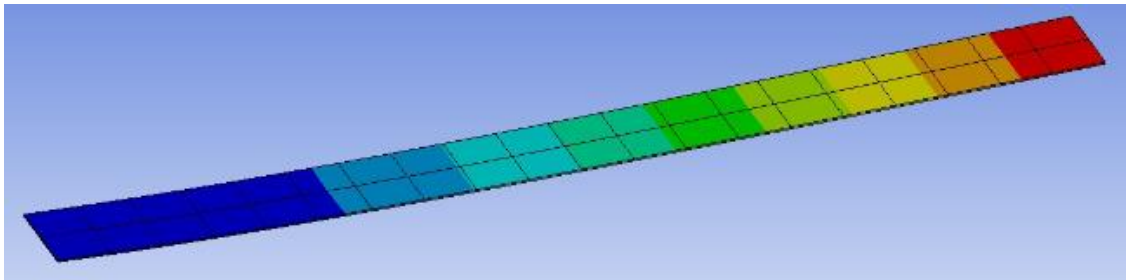
Bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda aktif titreşim kontrol yöntemi ile 0,8 mm kalınlığında disk ve kare gibi farklı geometrilere sahip paslanmaz çelik plakalar üzerinde oluşturulan titreşimlerin sönümlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalara ANSYS yazılımı yapılan titreşim modelleme çalışmaları ile başlanmıştır. Disk ve kare plaka olarak belirlenen iki farklı geometri üzerindeki aktif titreşim sönümlenme çalışmalarından önce kiriş yapısı üzerinde tek boyutta aktif titreşim sönümlenme çalışmaları yapılmıştır. Bu amaç için hem sensör hem de eyleyici olarak kullanılabilen piezoelektrik seramik malzemenin üretilmesi çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca üretilen seramik malzemelerin gerekli görülen piezoelektrik özellikleri ölçülmüş, aktif titreşim sönümlenme çalışmaları sırasında performansları değerlendirilmiştir.

6.1. Modelleme Çalışmaları

Aktif titreşim sönümlenme çalışmalarına başlamadan önce deneysel çalışmalarda kullanılacak olan farklı geometriler için ANSYS yazılımı ile titreşim analizi çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmaları ile kullanılacak piezoelektrik seramiklerin tasarımı belirlenmiştir. Sırasıyla kiriş yapısı, disk ve kare plaka yapısı sistemlerinin incelemesi gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Kiriş yapısı modelleme çalışmaları

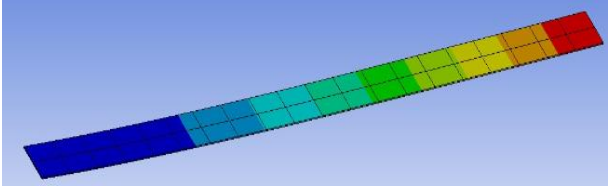
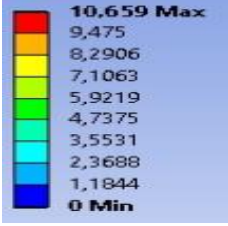
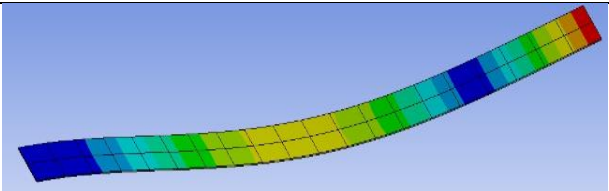

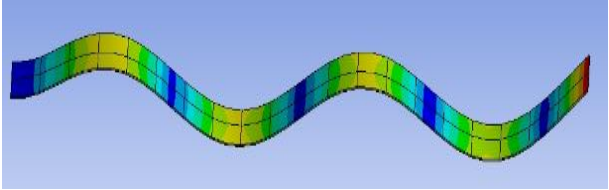

Tek boyutlu sistemde kullanılan çelik kiriş 50 mm genişliğinde, 250 mm boyunda ve 0.8 mm kalınlığındadır. Bu boyutlardaki çelik kiriş için oluşturulan katı model ANSYS yazılımına aktarılmış ve parça üzerine bölümlenme yapılmıştır. Bölümlenmiş yapının görseli Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



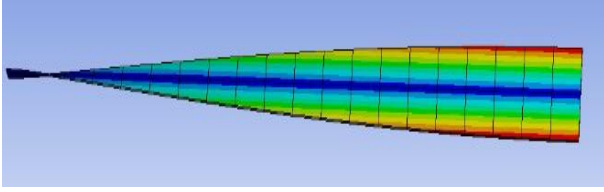

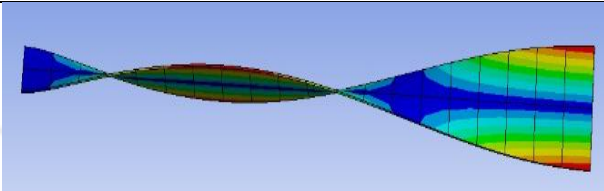
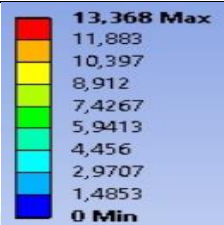
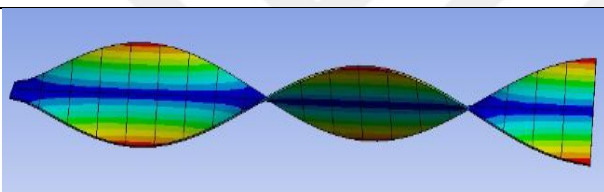
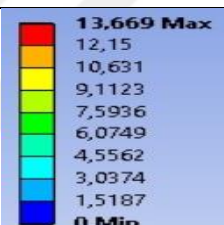
Şekil 6.1. Çelik kirişin bölümlenmiş hali

Model, titreşim biçiminin analizi ve frekans değerlerinin belirlenmesi için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında çelik kirişin ilk üç eğilme ve ilk üç burulma titreşim biçimlerine yer verilmiştir. Ayrıca titreşim sonucu meydana gelen deformasyon miktarı da incelenmiştir. Deformasyon incelemesinin nedeni ise aktif titreşim sönümlenme sisteminde kullanılacak piezoelektrik seramiklerin konumlanacağı yeri belirlemektir. En az deformasyonun bulunduğu bölgeler en fazla stres yoğunluğunun olduğu bölgelerdir ve titreşim sönümlenme sisteminde piezoelektrik seramik malzemeler bu bölgelere yerleştirilmiştir. ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının görselleri, oluşan toplam deformasyon değerleri ve frekans değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. ANSYS analizlerinden elde edilen birincil eğilme durumu biçimi aktif titreşim sönümlenme yöntemiyle sönümlenecek titreşim biçimidir.

Tablo 6.1. Çelik kirişin titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

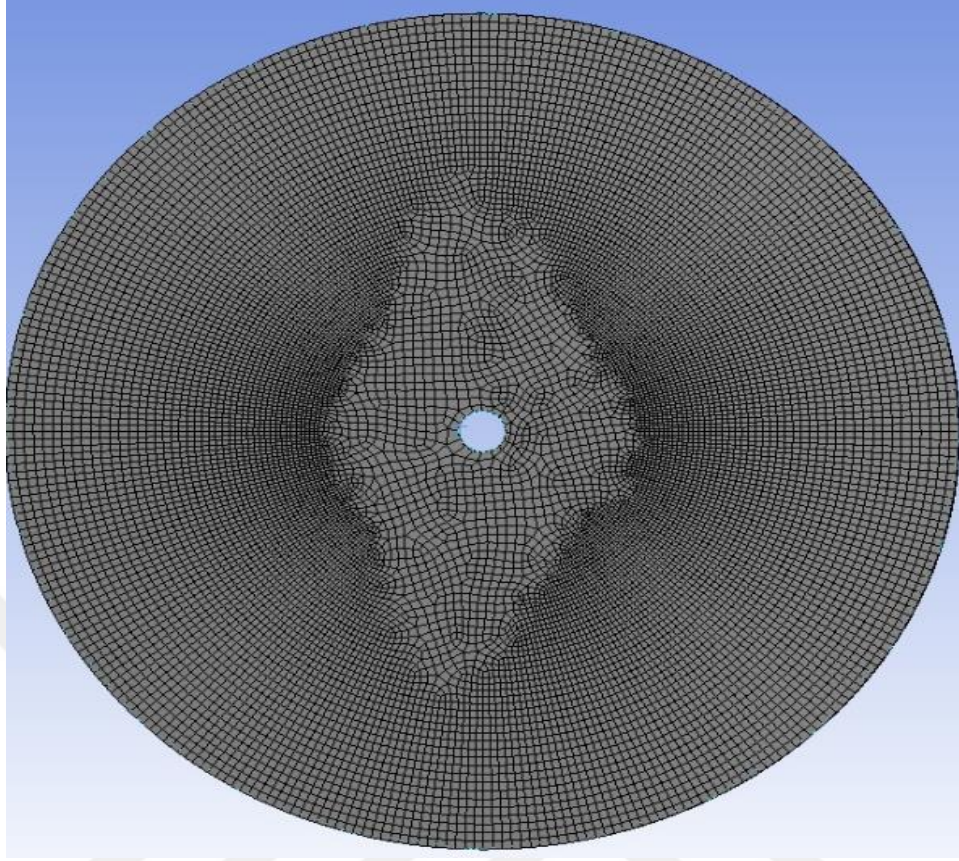
Çelik kirişin titreşim biçimi	Deformasyon miktarı	Frekans (Hz)
 <p>Birincil eğilme durumu</p>		9,67
 <p>İkincil eğilme durumu</p>		25,99
 <p>Üçüncül eğilme durumu</p>		237

Tablo 6.1. (Devam) Çelik kirişin titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

Çelik kirişin titreşim biçimi	Deformasyon miktarı	Frekans (Hz)
 Birincil burulma durumu		79,78
 İkincil burulma durumu		240,71
 Üçüncül burulma durumu		405,7

6.1.2. Disk plaka yapısı modelleme çalışmaları

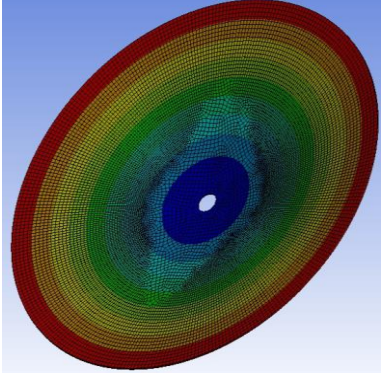
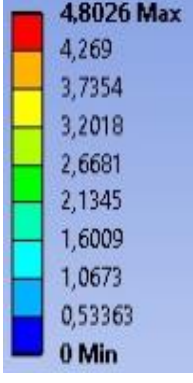
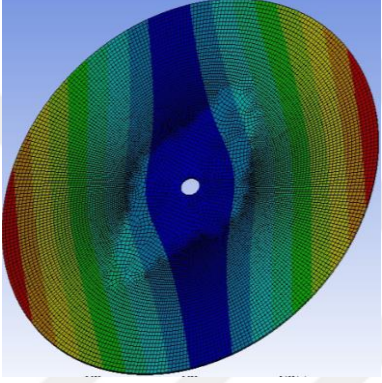
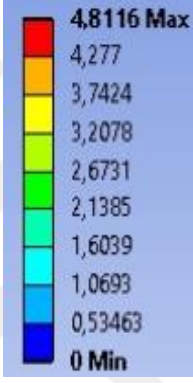
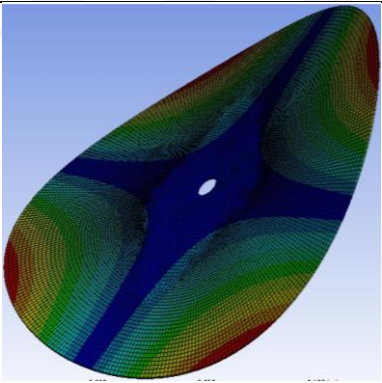

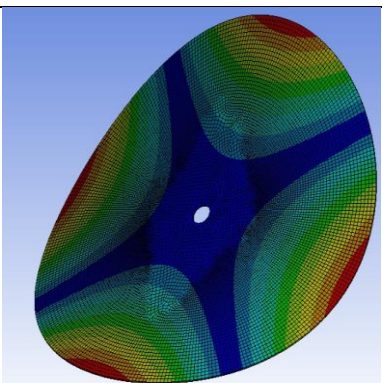

Disk plaka yapısı aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için ANSYS yazılımı ile titreşim analizi çalışmaları yapılmıştır. Sistemde kullanılan paslanmaz çelik 150 mm çapında ve 0.8 mm kalınlığındadır. Bu boyutlardaki paslanmaz çelik plakanın kullanılmasının sebebi titreşim sistemi yük sınırlarının içerisinde kalmaktır. Disk yapı için oluşturulan katı model ANSYS yazılımına aktarılmış ve parça üzerine bölümlenme yapılmıştır. Paslanmaz çelik diskin bölümlenmiş görüntüsü Şekil 6.2’de verilmiştir.



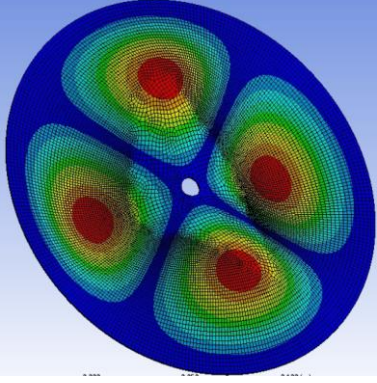
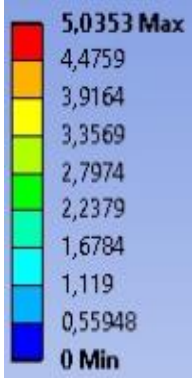
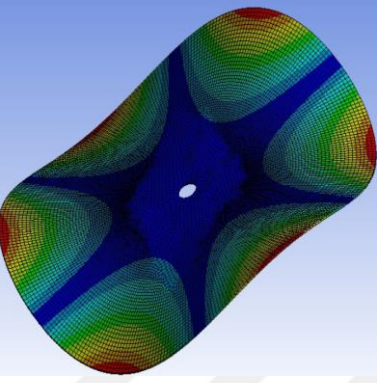
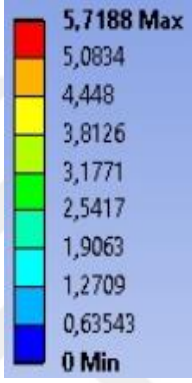
Şekil 6.2. Paslanmaz çelik diskin bölümlenmiş hali

Disk model, titreşim biçiminin analizi ve frekans değerlerinin belirlenmesi için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında paslanmaz çelik diskin titreşim biçimlerine yer verilmiştir. Ayrıca titreşim sonucu meydana gelen deformasyon miktarı da incelenmiştir. Deformasyon incelemesinin nedeni ise aktif titreşim sönümlenme sisteminde kullanılacak piezoelektrik seramiklerin konumlanacağı yeri belirlemektir. En az deformasyonun bulunduğu bölgeler en fazla stres yoğunluğunun olduğu bölgelerdir ve titreşim sönümlenme sisteminde piezoelektrik seramik malzemeler bu bölgelere yerleştirilmiştir. ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının görselleri, oluşan toplam deformasyon değerleri ve frekans değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir. ANSYS analizlerinden elde edilen birincil titreşim biçimi aktif titreşim sönümlenme yöntemiyle sönümlenecek titreşim biçimidir.

Tablo 6.2. Paslanmaz disk yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

Paslanmaz çelik diskin titreşim biçimi	Deformasyon miktarı	Frekans (Hz)
	 <p>4,8026 Max 4,269 3,7354 3,2018 2,6681 2,1345 1,6009 1,0673 0,53363 0 Min</p>	22,35
	 <p>4,8116 Max 4,277 3,7424 3,2078 2,6731 2,1385 1,6039 1,0693 0,53463 0 Min</p>	55,227
	 <p>3,3741 Max 2,9992 2,6243 2,2494 1,8745 1,4996 1,1247 0,74981 0,3749 0 Min</p>	76,408
	 <p>5,2288 Max 4,6478 4,0669 3,4859 2,9049 2,3239 1,7429 1,162 0,58098 0 Min</p>	105,45

Tablo 6.2. (Devam) Paslanmaz disk yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

		198,56
		241,72

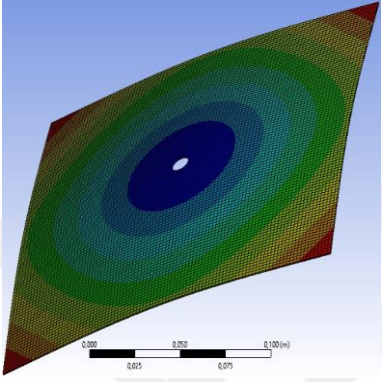

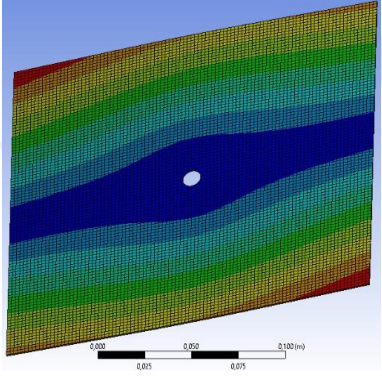
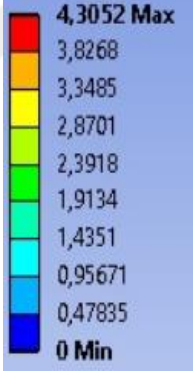
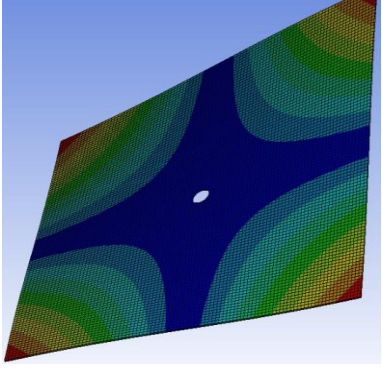

6.1.3. Kare plaka yapısı modelleme çalışmaları

Kare plaka yapısı aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için ANSYS yazılımı ile titreşim analizi yapılmıştır. Sistemde kullanılan paslanmaz çelik kare plaka 150 mm kenar uzunluğunda ve 0.8 mm kalınlığındadır. Bu boyutlardaki paslanmaz çelik plakanın kullanılmasının sebebi titreşim sistemi yük sınırlarının içerisinde kalmaktır. Kare plaka yapısı için oluşturulan katı model ANSYS yazılımına aktarılmış ve parça üzerine bölümlenme yapılmıştır.

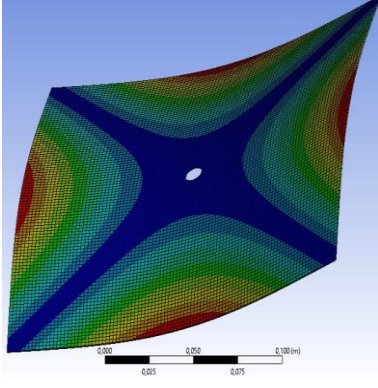
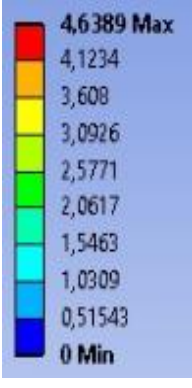
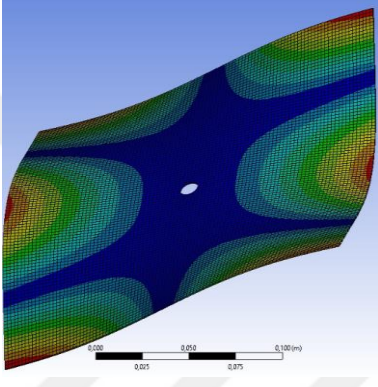

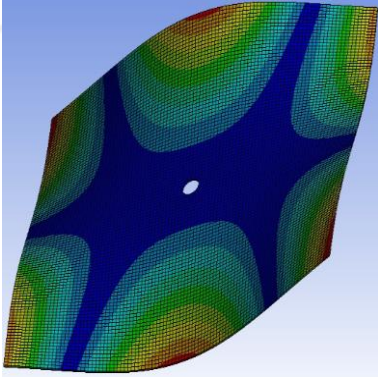
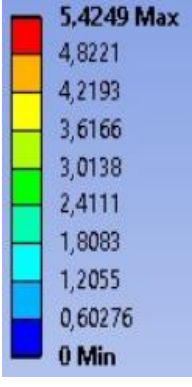
Kare plaka model, titreşim biçiminin analizi ve frekans değerlerinin belirlenmesi için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında paslanmaz çelik kare plakanın titreşim biçimlerine yer verilmiştir. Ayrıca titreşim sonucu meydana gelen deformasyon miktarı da incelenmiştir. Deformasyon incelemesinin nedeni ise aktif titreşim sönümlenme sisteminde kullanılacak piezoelektrik seramiklerin konumlanacağı yeri belirlemektir. En az deformasyonun bulunduğu bölgeler en fazla stres yoğunluğunun olduğu bölgelerdir ve titreşim sönümlenme sisteminde piezoelektrik seramik malzemeler bu bölgelere yerleştirilmiştir. ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının görselleri,

oluşan toplam deformasyon değerleri ve frekans değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. ANSYS analizlerinden elde edilen birincil titreşim biçimi aktif titreşim sönümlenme yöntemiyle sönümlenecek titreşim biçimidir.

Tablo 6.3. Paslanmaz çelik kare plaka yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

Paslanmaz çelik diskin titreşim biçimi	Deformasyon miktarı	Frekans (Hz)
		30,46
		40,47
		56,52

Tablo 6.4. (Devam) Paslanmaz çelik kare plaka yapının titreşim biçimi, deformasyon miktarı ve frekansı

Paslanmaz çelik diskin titreşim biçimi	Deformasyon miktarı	Frekans (Hz)
		65,95
		96,359
		175,93

Modelleme çalışmaları tamamlandıktan sonra aktif titreşim sönümlenme çalışmalarında kullanılmak üzere dikdörtgen plaka şeklinde piezoelektrik seramiklerin üretilmesine karar verilmiştir. Dikdörtgen plaka şeklinde piezo eleman üretilmesinin sebepleri ise çelik plakaların yüzeylerinin düz olması ve seramik üretimi için hali hazırda sahip olduğumuz hazır kalıp düzeneğidir.

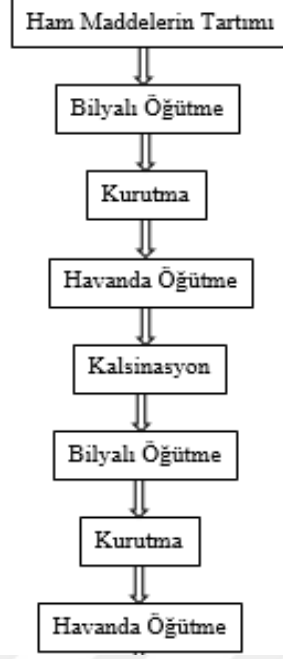
6.2. Piezoelektrik Seramik Malzeme Üretimi

Deneysel çalışmaların ilk aşaması olarak literatür araştırması yapılmıştır. Tezin 2. ve 3. ana başlıklarında ve alt başlıklarında elde edilen bilgiler ile seramiklerin üretimine geçilmiştir. Seramik üretimi farklı yöntemler kullanılarak yapılmakta olup, literatürde en sık karşılaşılanlar “oksit karışım yöntemi” ve “columbite yöntemi”dir. Endüstriyel olarak hammadde ve üretim kolaylığı sebebiyle oksit karışım yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Seramik malzemelerin üretim aşaması 2 ila 3 hafta arasında değişen bir süre içerisinde tamamlanmıştır. Üretilen piezoelektrik seramiklerin üretim şemasının özeti Şekil 6.3’te verilmiştir.



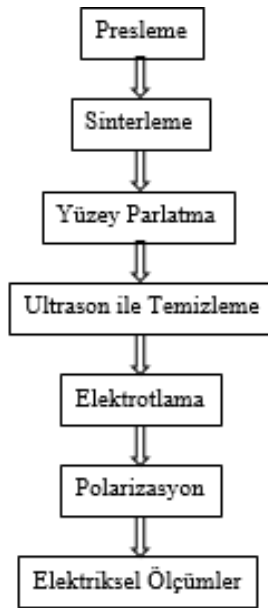
Şekil 6.3. Piezoelektrik seramik malzemelerin sentezleme üretim şeması

Oksit karışım yöntemiyle seramik üretimlerinin preslemeye kadar olan toz sentezi aşamalarının akış şeması Şekil 6.4’te verilmiştir.



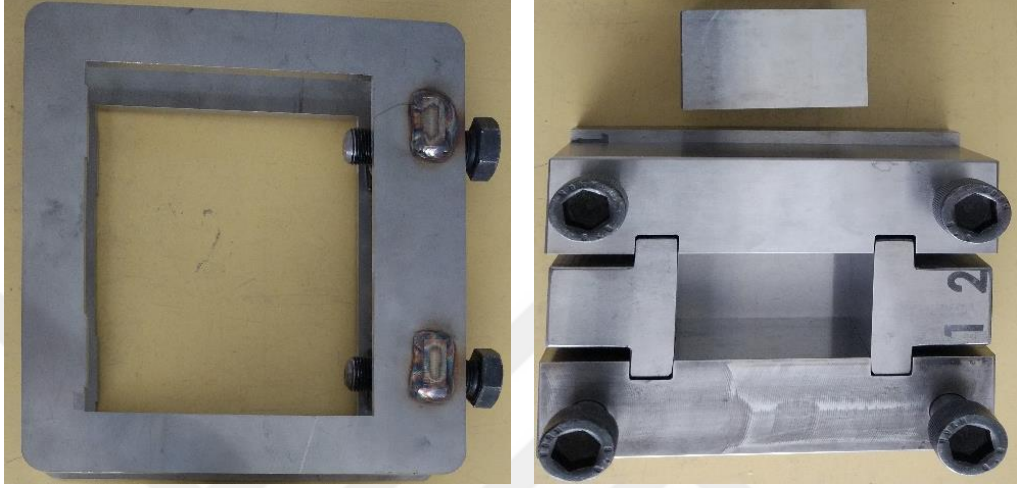
Şekil 6.4. Preslemeye kadar olan oksit karışım genel üretim akış şeması

Bu tez çalışmasında PZT-5H ticari piezoelektrik tozu kullanılmıştır. Ticari toz kullanıldığı için sentezleme yapılmamış, presleme yapılarak seramik üretimine başlanmıştır. Piezoelektrik seramik deneysel üretim akış çizelgesi Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Çizelgedeki her adımda üretim durumu kayıt altına alınmıştır.



Şekil 6.5. Piezoelektrik seramik malzeme deneysel üretim akış çizelgesi

İlk aşamada 130 gr PZT-5H tozu tartılmıştır ve 60x38 mm faydalı hacme sahip metal kalıpta ön şekillendirme yapılmıştır. Seramik malzeme üretiminde kullanılan metal kalıp Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Seramik malzeme tozları için kullanılan metal kalıp

Ön şekillendirme için PZT-5H tozu 100 kg ağırlık altında metal kalıp içerisinde preslenmiştir. Seramik malzeme üretiminde kullanılan pres Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Seramik malzeme üretiminde kullanılan pres

Presleme sonucunda elde edilen ürün 13,3 mm kalınlığındadır. Bu işlemlerin hemen ardından 100 gr PZT-5H tozu tartılmıştır ve yine aynı kalıpta ve aynı basınç altında preslenmiştir. Presleme sonucunda elde edilen ürün 10,5 mm kalınlığındadır. Farklı kalınlıklardaki preslenmiş ürünler üretimin ilerleyen aşamalarında eşit kalınlıklara getirilmiştir. Elde edilen preslenmiş ürün Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



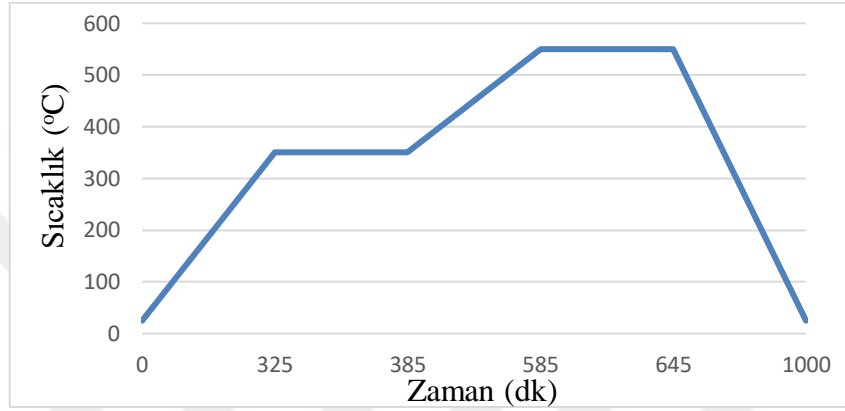
Şekil 6.8. Presleme sonucu elde edilen ürün

Presleme sonucunda elde edilen malzemelerin yoğunluğunu arttırmak için her iki ürün soğuk izostatik preste 190 MPa basınç altında preslenmiştir. Çalışmada kullanılan soğuk izostatik pres Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



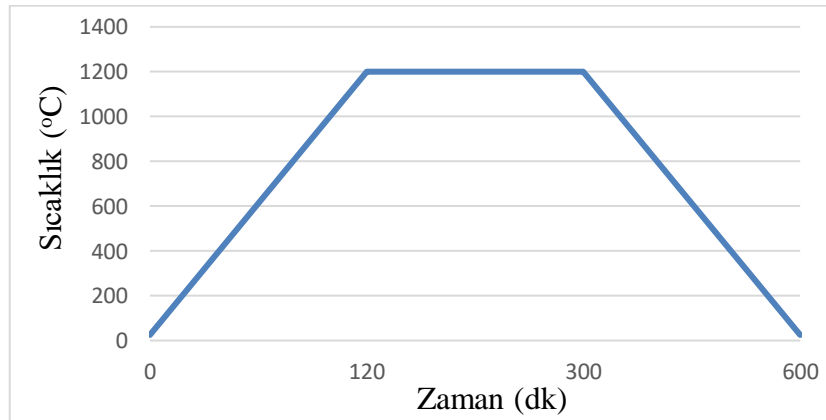
Şekil 6.9. Soğuk izostatik pres

Soğuk izostatik presleme sonucu elde edilen ürünlere, bağlayıcının uzaklaştırılması için bir ısıl işlem uygulanmıştır. Oda sıcaklığında bulunan numuneler 1 °C/dk ısıtma rejimi ile 350 °C'ye ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 60 dk beklenmiştir. Daha sonra 1 °C/dk ısıtma rejimi ile 550 °C'ye ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 60 dk beklenmiştir ve numunelerin fırında soğuması sağlanmıştır. Bağlayıcı uzaklaştırmak için uygulanan ısıl işlem döngüsünü gösteren grafik Şekil 6.10'da verilmiştir.



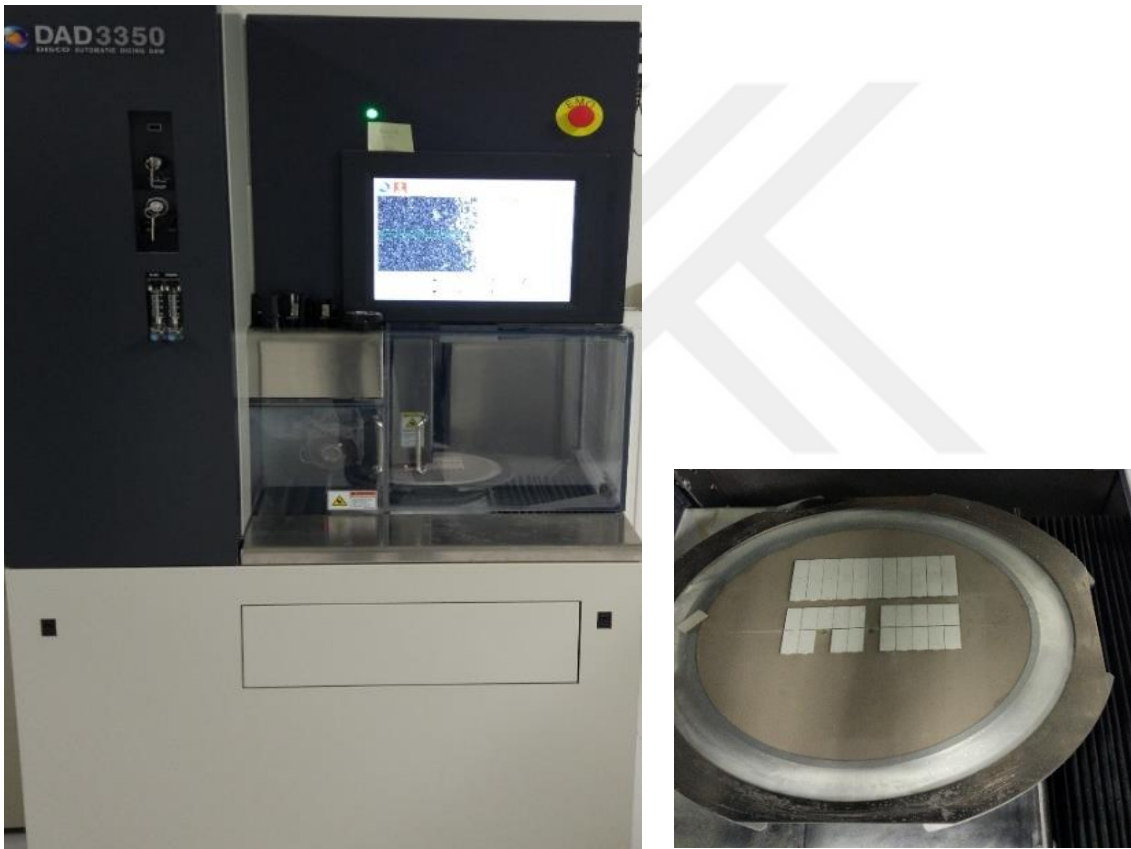
Şekil 6.10. Isıl işlem döngüsü

Bağlayıcı uzaklaştırma işleminden sonra malzemelere sinterleme işlemi uygulanmıştır. Malzemeler 10 °C/dk ısıtma rejimi ile sinterleme sıcaklığı olan 1200 °C'ye ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 3 saat bekletildikten sonra fırında soğuması sağlanmıştır. Sinterleme işleminin döngüsü Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11. Sinterleme döngüsü

Sinterleme işleminden sonra malzemenin kompozisyonu, içeriği ve kalitesi bilindiği için malzemeye X ışınları kırılımı analizi ve elektron mikroskobu ile izleme gibi analizler yapılmamıştır. Malzeme kesim ve yüzey işlemlerine geçilmiştir. Üretilen seramik malzemeler DAD 3350 marka hassas kesim tezgahında 1 mm kalınlığında kesilmiştir. Yaklaşık 20 mm uzuluğunda ve 1 mm kalınlığındaki seramik parçalardan 22 adet üretilmiştir. Kesim sırasında kullanılan kesim tezgahının görseli ve kesim sonrası elde edilen seramik parçalar Şekil 6.12’de gösterilmiştir.



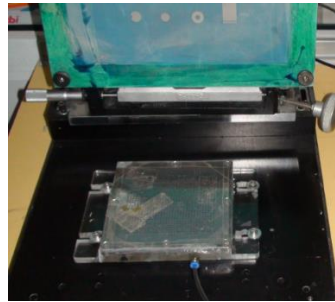
Şekil 6.12. DAD 3350 hassas kesim tezgahı ve kesim sonrası elde edilen seramik parçalar

DAD 3350 kesim tezgahının özellikleri ise Tablo 6.4’te verilmiştir. Seramiklerin kesimi sırasında hassas kesim tezgahının kullanılmasının sebebi, zımparalama ve parlatma işlemleri için daha hazır bir yüzey elde etmek ve hızlı bir şekilde zımparalama ve parlatma işlemlerini tamamlamaktır.

Tablo 6.5. DAD 3350 hassas kesim tezgahı özellikleri

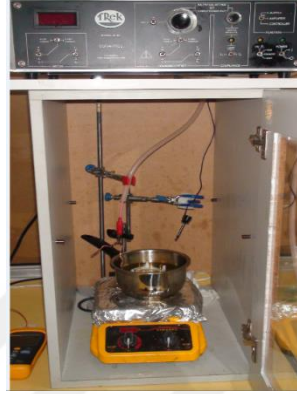
Özellik		Birim	1,8 kW	2,2 kW
İşlenecek parça boyutu		-	250mm x 250mm ya da 300mm çap	
x eksen	Kesme sınırı	mm	260	
	Kesme hızı	mm/sn	0,1-600	
y eksen	Kesme sınırı	mm	260	
	Kesim atlama miktarı	mm	0.0001	
	Kesim atlama doğruluğu	mm	0.002/260	
z eksen	Maks. Strok	mm	32,2	31,4
	Hareket çözünürlüğü	mm	0,00005	
	Tekrar edilebilirlik doğruluğu	mm	0,001	
Ø eksen	Maks. dönme açısı	derece	380	
Kesim bıçağı	Çıktı	kW	1,8 – 2,2	
	Tork değeri	N.m	0,29	0,7
	Dönme hızı aralığı	dk ⁻¹	6000-60000	3000-30000
Boyutlar		mm	900 x 1050 x 1800	
Ağırlık		kg	Yaklaşık 1200	

Kesim işleminin ardından seramik parçalara yüzey işlemleri için zımparalama ve parlatma yapılmıştır. Yüzey işlemlerinden sonra elek baskı yöntemiyle seramik malzemelerin üzerine gümüş içerikli elektrot pasta kullanılarak elektrotlama yapılmıştır. Elektrotlama düzeneği Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Elektrolama işlemini takiben seramik malzemelere, elektrot ile seramik malzeme arasında kimyasal bağ kurması için 650 ila 700 °C ve 15 ila 20 dk arasında ısı işlem uygulanmıştır.



Şekil 6.13. Elektrotlama düzeneği

Yapılan ısıtıl işleminden sonra seramik malzemelerde kalıcı polarizasyon değeri oluşturmak için malzeme, sıcak yağ banyosunda 2,3-2,4 kV/mm elektrik alana maruz bırakılmıştır. Elektrik alanın etkisi ile ferroelektrik domainler yönlendirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan polarizasyon düzeneği Şekil 6.14’te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Polarizasyon düzeneği

Polarize edilen piezoelektrik seramik malzemelerin teknik özelliklerinin katalog değerleri Tablo 6.6’da verilmiştir. Bu değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için her bir malzemenin d_{33} ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 6.6. PZT-5H piezoelektrik seramik malzemenin katalog değerleri

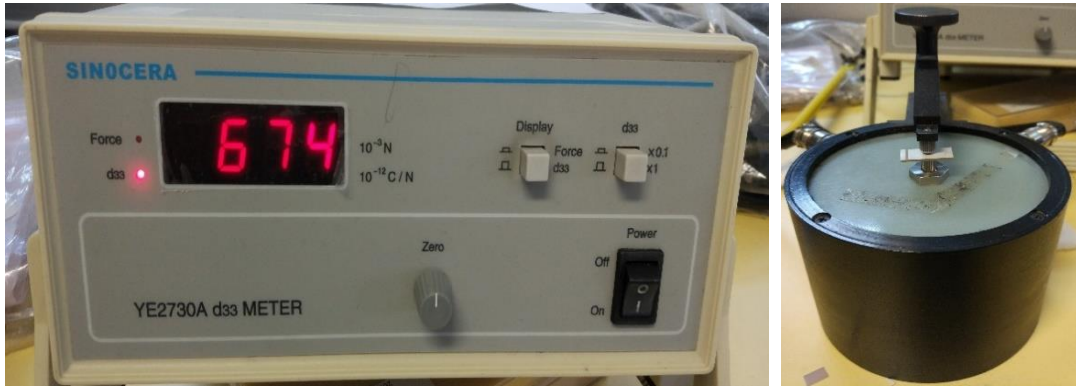
Özellik	PZT-5H
Yoğunluk (g/cm^3)	7,6
Curie Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	180
Görece Geçirgenlik	3800
Enerji Kayıp Katsayısı (%)	1,7
Eşleme Katsayıları (%)	$K_p = 77$, $k_t = 52$ $k_{31} = 42$
Frekans Katsayıları (MHz)	$N_p = 1980$, $N_t = 2040$ $N_l = 1500$
Mekanik Kalite Faktörü	65
Piezoelektrik Yük Sabitleri ($\times 10^{-12}$ M/V)	$d_{33} = 650$ $d_{31} = -290$
Piezoelektrik Voltaj Sabitleri ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	$g_{33} = 19,3$ $g_{31} = -8,6$
Elastik Sabitleri ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	$S^E_{11} = 14,1$ $S^D_{11} = 11,6$

Katalog değerine göre seramiklerin 650 pC/N ve üzeri değerlere sahip olması beklenmektedir. 22 adet piezoelektrik seramik malzemenin ölçüm sonuçları Tablo 6.7’de verilmiştir ve ölçüm sonrasında elde edilen sonuçlara göre aktif titreşim kontrolü deneylerinde kullanmaya uygun olduğunda karar verilmiştir.

Tablo 6.7. Piezoelektrik seramiklerin d_{33} ölçüm sonuçları

Numune Numarası	d_{33} Ölçüm Sonuçları ($\times 10^{-12}$ C/N)	Numune Numarası	d_{33} Ölçüm Sonuçları ($\times 10^{-12}$ C/N)
1	656	12	660
2	668	13	683
3	667	14	772
4	645	15	707
5	735	16	702
6	706	17	690
7	711	18	697
8	707	19	731
9	723	20	680
10	672	21	675
11	698	22	692
		Ortalama	694,4

Şekil 6.15’te deneysel çalışmalarda kullanılan d_{33} ölçüm sisteminin görseli verilmiştir. Kullanılan sistemin doğruluğu kalibrasyon ekipmanları ile kontrol edilmiştir. Kontroller sonrasında sistemin çalışmalar için gerekli olan özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.15. d_{33} ölçüm sistemi

Tablo 6.8’de d_{33} ölçüm sisteminin teknik özellikleri verilmiştir. Kullanılan sistem, d_{33} ölçümlerini kısa ve hızlı bir şekilde yapılmasını sağlamıştır.

Tablo 6.8. Sinocera d_{33} ölçüm sistemi özellikleri

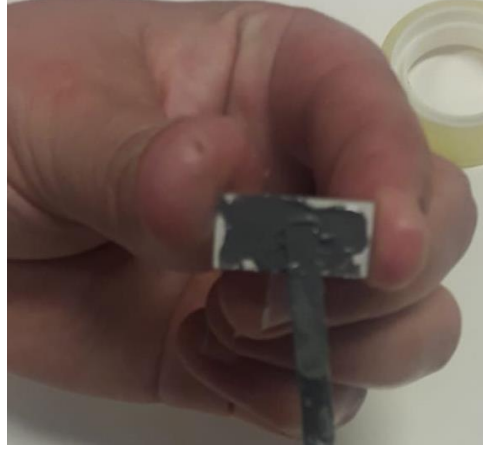
Özellik	Açıklama
Ölçülebilir d_{33} Aralığı	x0.1 aralık: 1-200 pC/N x1 aralık: 10-2000 pC/N
Duyarlılık	x0.1 aralık: 1-20 pC/N aralığında d_{33} değerinin $\pm\%5$ 'i 10-200 pC/N aralığında d_{33} değerinin $\pm\%2$ 'si x1 aralık: 10-200 pC/N aralığında d_{33} değerinin $\pm\%5$ 'i 100-2000 pC/N aralığında d_{33} değerinin $\pm\%2$ 'si
Çözünürlük	x0.1 aralık: 0,1 pC/N x1 aralık: 1 pC/N
Kuvvet	Frekans: 110 Hz Genlik: 0,25 N
Paralel Kapsitans	x0.1 aralık: 0,1 pF x1 aralık: 1 pF
Boyutlar	Kuvvet kafası: 110mm x 140mm Kasa: 280mm x 200mm x 90mm
Ağırlık	Kuvvet kafası: 3kg Kasa: 2kg
Güç	110-240 VA C/50/60 Hz/20 W

6.3. Piezoelektrik Seramikleri Plakalara Yerleştirme İşlemleri

Titreşim analizlerinin ve seramik üretimlerinin hemen ardından kiriş yapı ve plakalardaki en az deformasyon oluşan bölgelere piezoelektrik seramik malzeme yerleştirme işlemleri yapılmıştır. Aşağıdaki başlıklarda yerleştirme işlemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

6.3.1. Kiriş yapı piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri

Analiz sonuçlarının ve seramik malzeme üretiminin ardından metal kirişin sabit tutulacak ucuna yakın bölgeye iletken epoksi yardımıyla üretilen piezoelektrik seramik malzemelerden 2 adet yapıştırılmıştır. Yapıştırma sırasında seramik malzeme üzerine ağırlık konularak yapışmanın homejen olması sağlanmıştır. Yapıştırma işleminin bir örneği Şekil 6.16’da gösterilmiştir.



Şekil 6.16. İletken epoksi ile yapıştırma işlemi

Kullanılan epoksinin krlenmesi için 1 gün beklenmiştir. Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra metal kiriş döküm blok üzerine 4 köşesinden sabitlenmiştir ve Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Kiriş yapısının Şematik gösterimi ve yapısı

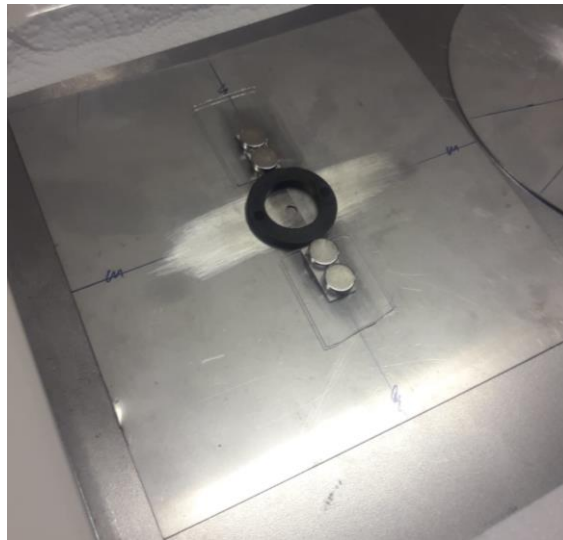
Sabitleme işleminin ardından seramiklerdeki “+” ve “-“ olarak elektrotlanmış yüzeylere kablolar lehimlenmiştir. Şekil 6.18’de metal kiriş üzerine yapıştırılmış piezoelektrik seramikler ve lehimlenmiş kablolar gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Piezoelektrik seramikler ve lehimlenmiş kablolar

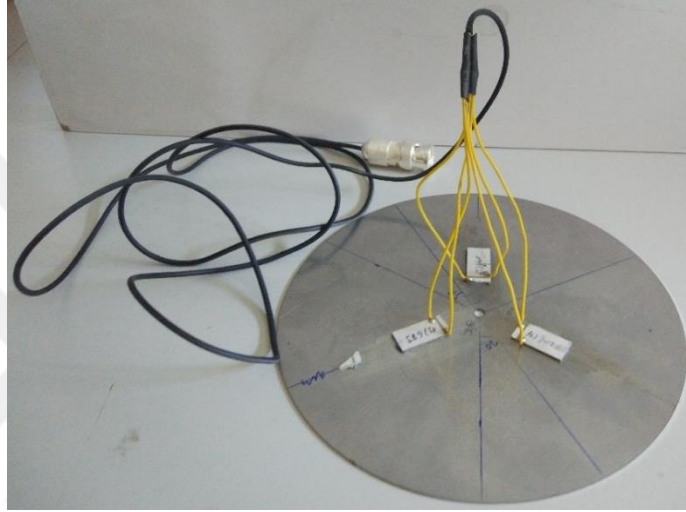
6.3.2. Disk plaka yapısı üzerine piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri

Analiz sonuçlarının ve seramik malzeme üretiminin ardından disk plaka üzerine piezoelektrik seramik malzeme yerleştirme işlemleri ile devam edilmiştir. Paslanmaz çelik disk plaka yapısı aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için diskin merkezinden 15 mm uzaklığa iletken epoksi yardımıyla üretilen piezoelektrik seramik malzemelerden 3'er ve 6'şar adet yapıştırılmıştır. Amaç seramik malzeme sayısının da titreşim sönümlenme üzerine etkisini incelemektir. Yapıştırma sırasında seramik malzeme mıknatıslar ile tutturularak yapışmanın homejen olması sağlanmıştır. Seramiklerin yerleştirilmesini gösteren görsel Şekil 6.19'da verilmiştir.

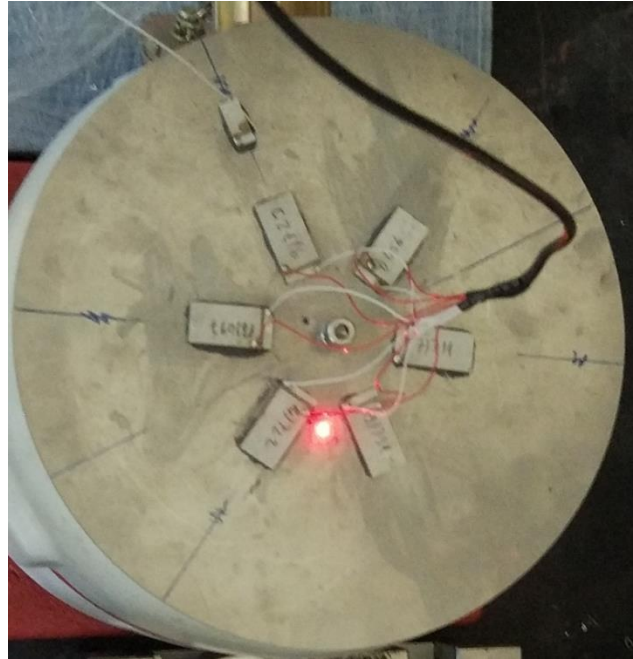


Şekil 6.19. Seramik malzemelerin yerleştirilmesi işlemi

Paslanmaz çelik disk plaka üzerindeki seramiklerin hazırlanması işlemi kiriş yapıdaki sistem ile aynıdır. 3 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan sistemde seramikler, aralarında 120° olacak şekilde, 6 adetli sistemde ise seramikler aralarında 60° olacak şekilde plakaya yapıştırılmıştır. 3 adet seramik malzeme ve 6 adet seramik malzeme ile hazırlanan disk plakalar sırasıyla Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de gösterilmiştir. Disk yapıda titreşim hareketi sistemin merkezinden sağlanmıştır. Bu nedenle diskin tam merkezine 3 mm çapında bir delik açılmıştır.



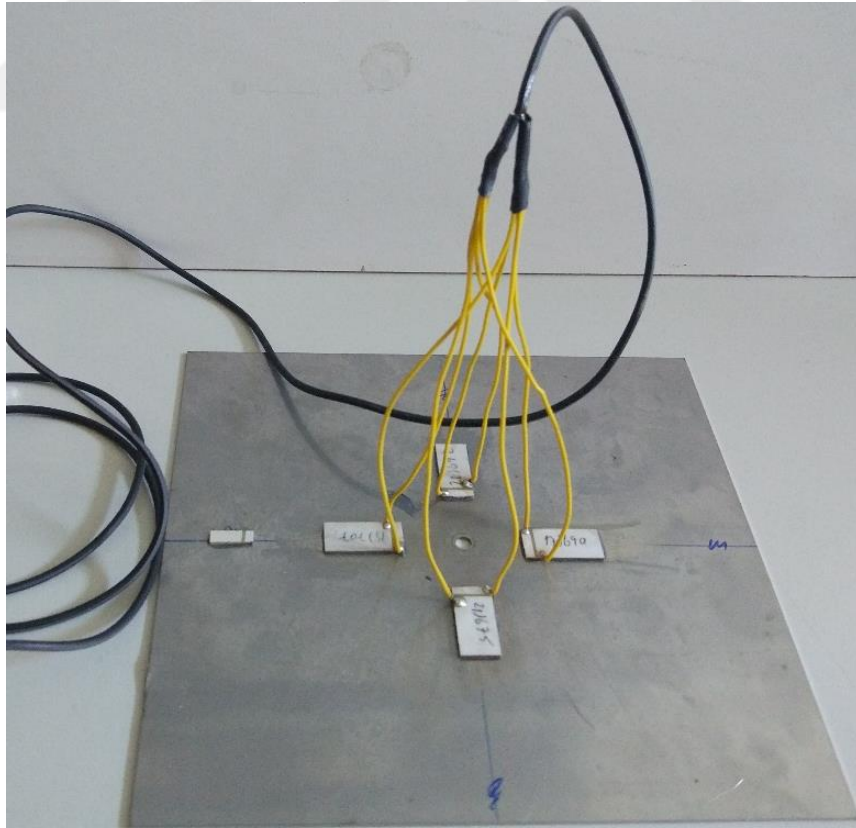
Şekil 6.20. 3 adet seramik malzeme ile hazırlanmış disk yapı



Şekil 6.21. 6 adet seramik malzeme ile hazırlanmış disk yapı

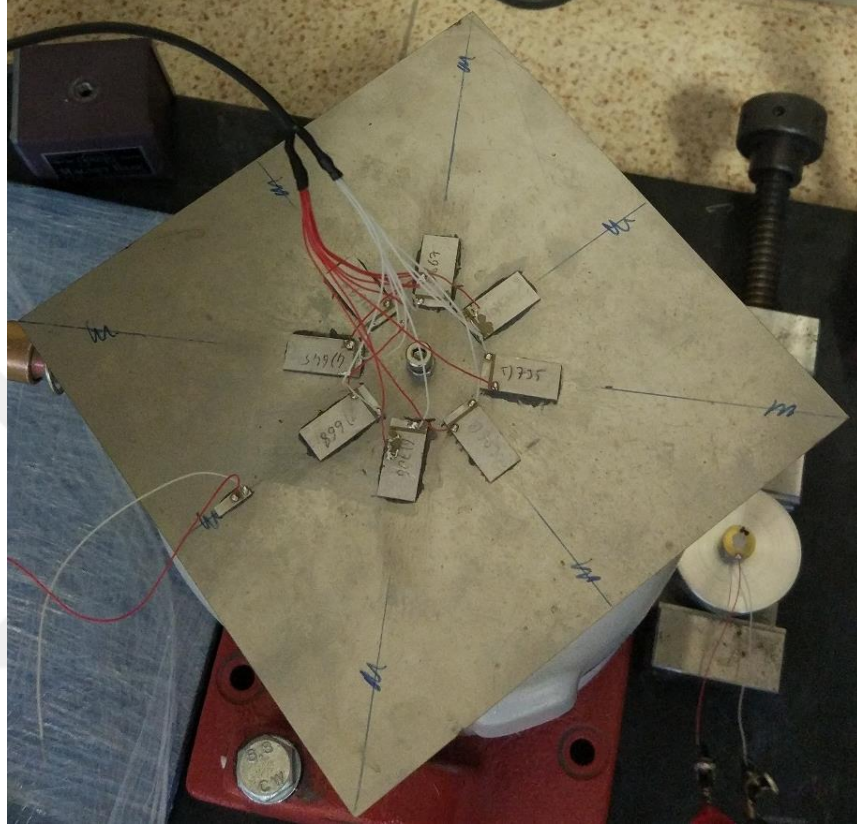
6.3.3. Kare plaka yapısı piezoelektrik seramik yerleştirme işlemleri

Analiz sonuçlarının ve seramik malzeme üretiminin ardından kare plaka üzerine piezoelektrik seramik malzeme yerleştirme işlemleri ile devam edilmiştir. Paslanmaz çelik kare plaka yapısı aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için diskin merkezinden 15 mm uzaklığa iletken epoksi yardımıyla üretilen piezoelektrik seramik malzemelerden 4'er ve 8'er adet yapıştırılmıştır. Amaç seramik malzeme sayısının da titreşim sönümlenme üzerine etkisini incelemektir. Yapıştırma sırasında seramik malzeme miktatıslar ile tutturularak yapışmanın homejen olması sağlanmıştır. Paslanmaz çelik kare plaka üzerindeki seramiklerin hazırlanması işlemi disk yapıdaki sisteme benzerdir. 4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan sistemde seramikler, aralarında 90° olacak şekilde yerleştirilmiştir. 4 adet seramik malzeme Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Kare plaka yapıda titreşim hareketi sistemin merkezinden sağlanmıştır. Bu nedenle diskin tam merkezine 3 mm çapında bir delik açılmıştır.



Şekil 6.22. 4 adet seramik malzeme ile hazırlanmış kare plaka yapısı

8 adetli sistemde ise seramikler aralarında 45° olacak şekilde sisteme yapıştırılmıştır. 8 adet seramik malzeme yapıştırılarak hazırlanan kare plaka yapısı Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23. 8 adet seramik malzeme ile hazırlanmış kare plaka yapısı

Piezoelektrik seramik malzemelerin üretimi, ölçüm sonuçları ve yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra aktif titreşim sönümlenme çalışmalarına başlanmıştır. Deneysel çalışmaların bundan sonraki bölümlerinde farklı geometrilere sahip paslanmaz çelik plakalar üzerinde yapılan aktif titreşim sönümlenme çalışmalarına yer verilmiştir.

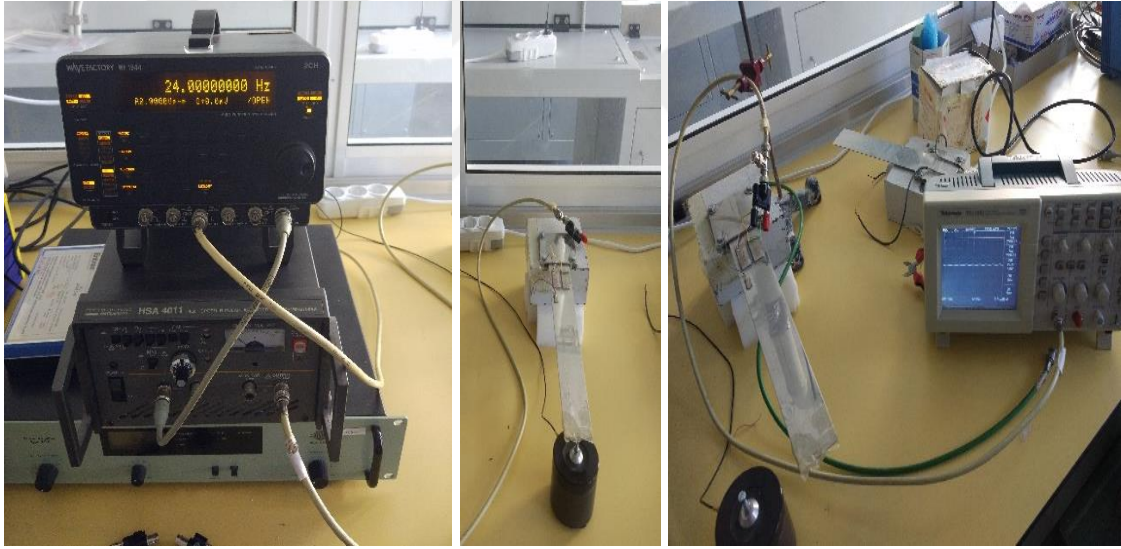
6.4. Kiriş Yapı Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümlenme Çalışmaları

Aktif titreşim sönümlenme çalışmalarına kiriş yapı üzerinde yapılan deneyler ile başlanmıştır. Literatürde tek boyutta aktif titreşim sönümlenme üzerine bir çok araştırma bulunmaktadır. Bu bölümdeki amaç hem kullanılan piezoelektrik seramiklerin

uygunluğunu görmek hem de farklı geometriler üzerinde uygulanabilirliğini incelemektir. Ayrıca bu çalışmada tek boyutta aktif titreşim sönümlenme kinetiği de incelenmiştir.

Tek boyutta yapılan aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için hazırlanan kirişin şematik gösterimi ve yapısı Şekil 6.17’de verilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmalarda çelik kiriş bir ucundan sabitlenmiştir. Kiriş diğer ucundan harici bir kuvvet ile titreştirilmiştir. Kiriş üzerine yerleştirilen piezoelektrik seramikler ile de aktif titreşim sönümlenme çalışmaları yapılmıştır.


Metal kirişin aktif titreşim sönümlenme karakteristiğini incelemek için sinyal jeneratörü, güçlendirici, titreşim kaynağı ve algılayıcıdan oluşan bir titreşim test düzeneği kurulmuştur. Tek boyutta yapılan aktif titreşim sönümlenme çalışmaları için hazırlanan test düzeneği Şekil 6.24’te verilmiştir.



Şekil 6.24. Bir boyutta gerçekleştirilen aktif titreşim test düzeneği


Tek boyuttaki aktif titreşim sönümlenme test düzeneğinde kullanılan titreştirici özellikleri Tablo 6.9’da verilmiştir. Bu cihaz kiriş yapıdaki titreşim sönümlenme çalışmalarında kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri kiriş yapıda elde edilmek istenen deplasman miktarlarını istenildiği düzeyde sağlamıştır.

Tablo 6.9. *Titreştirici özellikleri*

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Kuvvet Oranı	10 N	
Frekans Aralığı	DC – 18 kHz	
Maks. Genlik	4 mm	
Maks. İvmelenme	550 m/s ²	


WF 1966 sinyal jeneratörü özellikleri Tablo 6.10’da verilmiştir. Bu cihaz kiriş yapı, disk plaka ve kare plaka yapılarının tamamında titreşim sinyallerin ölçümü ve kontrolü için kullanılmıştır.

Tablo 6.10. *WF 1966 sinyal jeneratörü özellikleri*

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Frekans Aralığı	0,01 μ Hz – 15 MHz	
Kanal Sayısı	2	
Dalga Biçimi Dikey Çözünürlük	14 bit	
Frekans Ayarlama Çözünürlüğü	0,01 μ Hz	
Maks. Çıkış Gücü	Kanal1/2: 20Vp-p /Açık	
Maks. Çıkış Gücü Çözünürlüğü	Kanal1/2: 0,1 mVp-p /Açık	
Sürekli Osilasyon Hareketi	Mevcut	
Modülasyon	FM, PM	
Ekran Taraması	Frekans, faz	
Kayıt Edilebilir Hafıza Sayısı	10	
Güç	AC 100V/115V/230V	


2718 model sinyal güçlendirici cihazının özellikleri Tablo 6.11’de Bu cihaz kiriş yapı üzerindeki deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Tablo 6.11. 2718 model sinyal güçlendirici özellikleri

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Çıkış Gücü	75 VA	
Sürekli Akım Çekebilecek Miktar	1A – 5A	
Kazanım	40 dB	
Kontrol Ekranı	Akım ve voltaj değerleri	

4011 model sinyal güçlendirici cihazının özellikleri ise Tablo 6.12’de verilmiştir. Bu cihaz kiriş yapı, disk plaka ve kare plaka yapıları üzerindeki deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

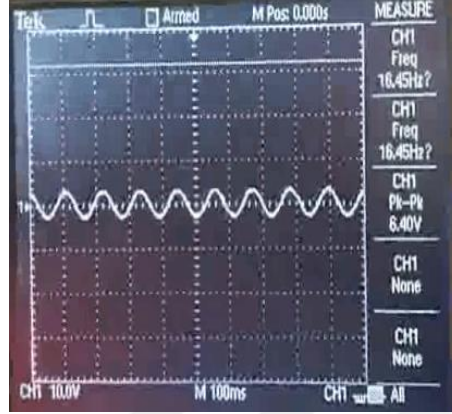
Tablo 6.12. 4011 sinyal güçlendirici özellikleri

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Frekans Aralığı	DC – 1 MHz	
Maks. Voltaj	150 Vp-p (± 75 V)	
Maks. Akım	1 Arms, 2,82 Ap-p	
Döndürme Oranı	600 V/ μ s	
Empedans	0,5 Ω	
Kazanım	x10, x20, x50, x100	
Enerji Tüketimi	200 W / 300 VA	

Titreşim hareketinin doğal frekansı, metal kirişin açık ucundan sisteme uygulanan harici bir kuvvet ile belirlenmiş ve osiloskop yardımı ile ölçülmüştür. Harici kuvvet metal kirişe en az 5 defa uygulanmıştır ve optimum doğal frekans değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen doğal frekans değeri 8,9 Hz’dir. ANSYS analizlerinde ise bu değer 9,67 Hz olarak hesaplanmıştır. Doğal frekanstaki bu farkın, metal kirişin titreşim bloğuna 4 noktadan sabitlenmesi ve kiriş üzerindeki piezoelektrik seramiklerden kaynaklanan fazla ağırlıktan dolayı olduğu düşünülmektedir.

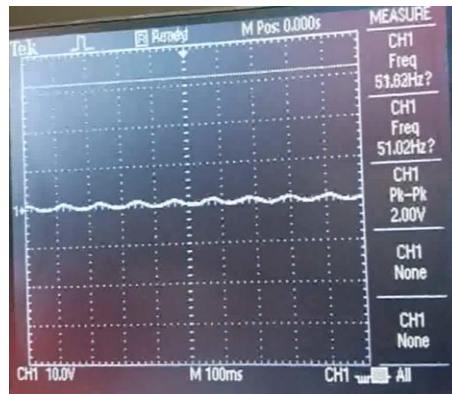
Sinyal jeneratörünün 1. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen sinyal 8,9 Hz’de 2718 model sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen sinyal titreştiriciye gönderilerek metal kirişe temas ettirilmeden bir mıknatıs yardımı ile titreşim hareketi elde edilmiştir. Titreştiriciye verilen sinyal sinüs dalgası şeklindedir. Metal kiriş üzerindeki titreşim hareketini izlemek için kiriş üzerine yapıştırılmış sensör piezoelektrik seramik malzeme kullanılmıştır. Sensör piezoelektrik seramik üzerine lehimlenmiş

kablolardan osiloskopa bağlantı yapılmıştır ve veriler anlık olarak ölçülmüştür. Titreştirici ile elde edilen sinüs şeklindeki titreşim hareketi Şekil 6.25'te gösterilmiştir.



Şekil 6.25. Metal giriş üzerindeki titreşim hareketi

Sinyal jeneratörü 2. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen ikinci sinyal ise sistemin doğal frekanası olan 8,9 Hz'de 4011 model sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen bu sinyal metal giriş üzerine yapıştırılan piezoelektrik seramik malzemelere iletilmiştir. Frekans değerleri eşitlendikten sonra faz açısı değiştirilerek ve voltaj değeri ayarlanarak titreşim hareketinin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Voltaj değeri 6,4 V iken, 180 derece faz açısı ile sistemdeki titreşim hareketi yaklaşık olarak %70 oranında azaltılmıştır. Aktif titreşim sönümleme sonunda sensör piezoelektrik malzemedan alınan sonuç Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Şekil 6.25'deki Pk-Pk değerinin 6,4 volttan, Şekil 6.26'daki 2 voltta düştüğü görülmektedir.




Şekil 6.26. Metal giriş üzerindeki sönümlenmiş titreşim hareketi

Metal kiriş üzerindeki titreşim sönümlenme çalışmaları ile hem test düzeneğinin uygunluğu kontrol edilmiştir hem de piezoelektrik seramiklerin titreşim sönümlenme çalışmalarında kullanılabileceği test edilmiştir. Bu tez çalışmasının sonraki aşamalarına farklı geometrilerdeki paslanmaz çelik plakalar üzerindeki aktif titreşim sönümlenme çalışmaları ile devam etmiştir.

6.5. Disk Plaka Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümlenme Çalışmaları

Paslanmaz çelik disk plaka yapısı titreşim hareketini ölçmek için kiriş yapısındaki titreşim test düzeneğine ayrıca polytec marka titreşim tarayıcı cihazı eklenmiştir. Cihazın bazı teknik özellikleri Tablo 6.13'te verilmiştir. Bu cihaz ile nanometrik boyutlardan metrik boyutlara kadar geniş bir aralıkta titreşim hareketleri izlenebilmektedir.

Tablo 6.13. Polytec titreşim tarayıcı cihaz özellikleri

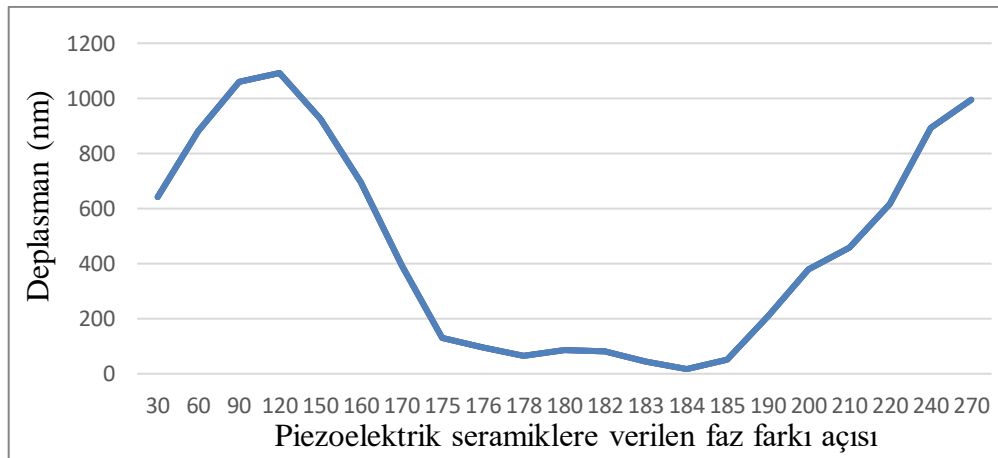
Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Boyutlar	189x370x177 mm	
Ağırlık	9 kg	
Lazer sınıfı	Sınıf 2	
Ölçüm mesafesi	125 mm	
Tarama açısı	50° x 40°	
Tarayıcı özellikleri	Açısal çözünürlük < 0,001°	
Kamera özellikleri	HD, 30x optik büyütme, görüş sahası 64° x 38°	
Arayüzler	Elektriksel ve mekanik arayüzleri bulunmaktadır	

3 adet piezoelektrik seramik yapılandırılmış paslanmaz çelik disk yapısı titreşim hareketinin doğal frekansı, diske 4 noktadan uygulanan harici kuvvet ile belirlenmiş ve titreşim tarayıcı test cihazı ile ölçülmüştür. Metal kirişte sisteminde olduğu gibi harici kuvvet disk plakaya en az 5 defa uygulanmıştır ve optimum doğal frekans değeri elde

edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen değer 18,8 Hz'dir. ANSYS analizlerinde ise bu değer 22,35 Hz olarak hesaplanmıştır. Doğal frekanstaki bu farkın, paslanmaz çelik diskin titreşim sistemine sabitleme mekanizması ve disk üzerindeki piezoelektrik seramiklerden kaynaklanan fazla ağırlıktan dolayı olduğu düşünülmektedir.

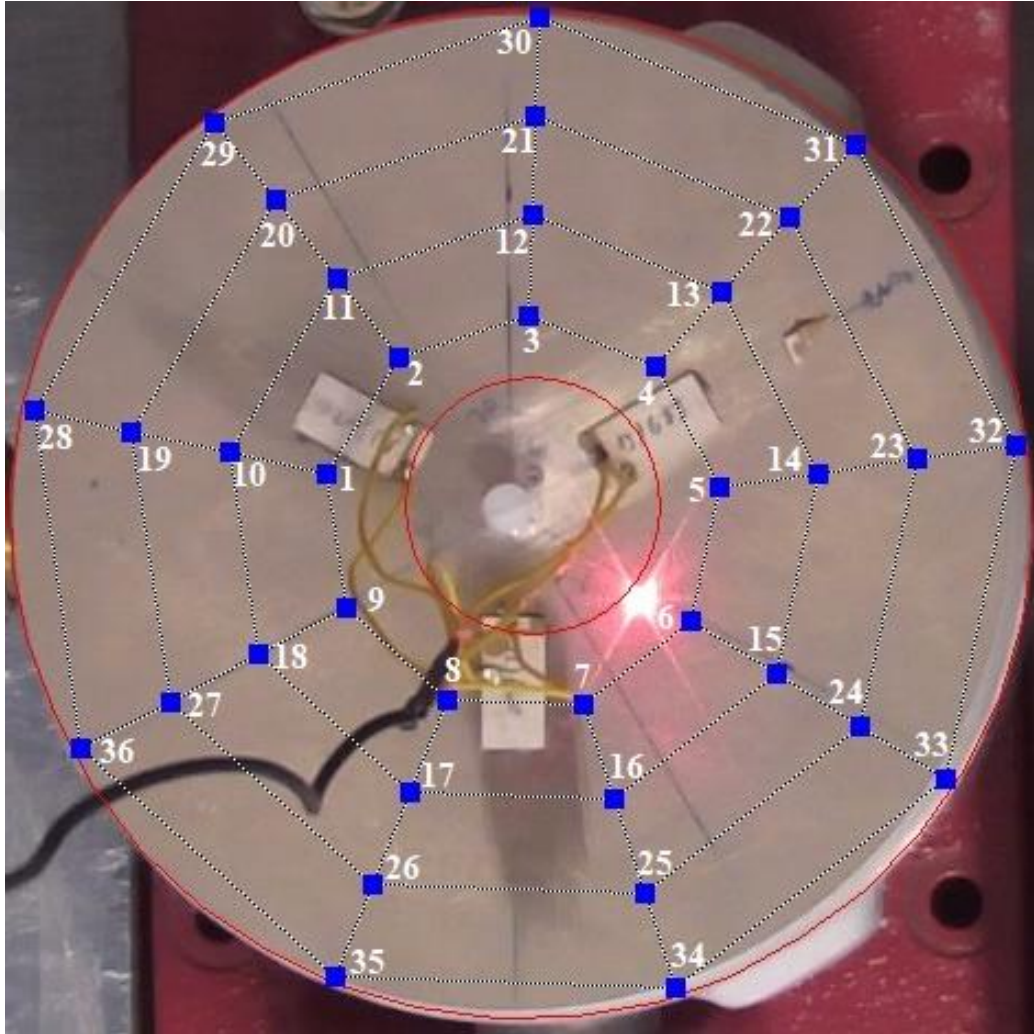
3 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik diskin doğal frekansı belirlendikten sonra sinyal jeneratörünün 1. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen sinyal, 18,8 Hz'de sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen sinyal titreştiriciye gönderilerek disk üzerinde titreşim hareketi elde edilmiştir. Aynı şekilde piezoelektrik seramiklere de 18,8 Hz'de sinyal gönderilmiştir. Titreştiricinin ve piezo elemanların frekans değerleri eşitlendikten sonra faz açısı değiştirilerek belirli bir voltaj değerinde titreşimin en az olduğu değer elde edilmeye çalışılmıştır. Faz açısı belirlenirken uyarıcı piezolara verilen voltaj sabit tutulmuş ve sistem kararlı halde iken faz açısı değiştirilmiştir. Minimum titreşim hareketinin olduğu faz açısı değerinde, uygulanan voltaj değiştirilerek minimum titreşim elde edilmeye çalışılmıştır.

3 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde titreşim kaynağından elde edilen deplasman miktarı 584 nm olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki aktif titreşim sönümlenme faz açısı ise 184 derece olarak elde edilmiştir. Teoride bu değer 180 derece olması gerekmektedir. Faz açısındaki bu farkın yapıştırılan piezoelektrik seramiklerden ve paslanmaz metal diskin titreşim kaynağına sabitleme koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Faz farkındaki fark önemli bir farklılık olarak kabul edilmemiştir. Aktif titreşim sönümlenme aşamasında faz farkı açısına göre elde edilen deplasman değerleri sonuçları Şekil 6.27'de gösterilmiştir.



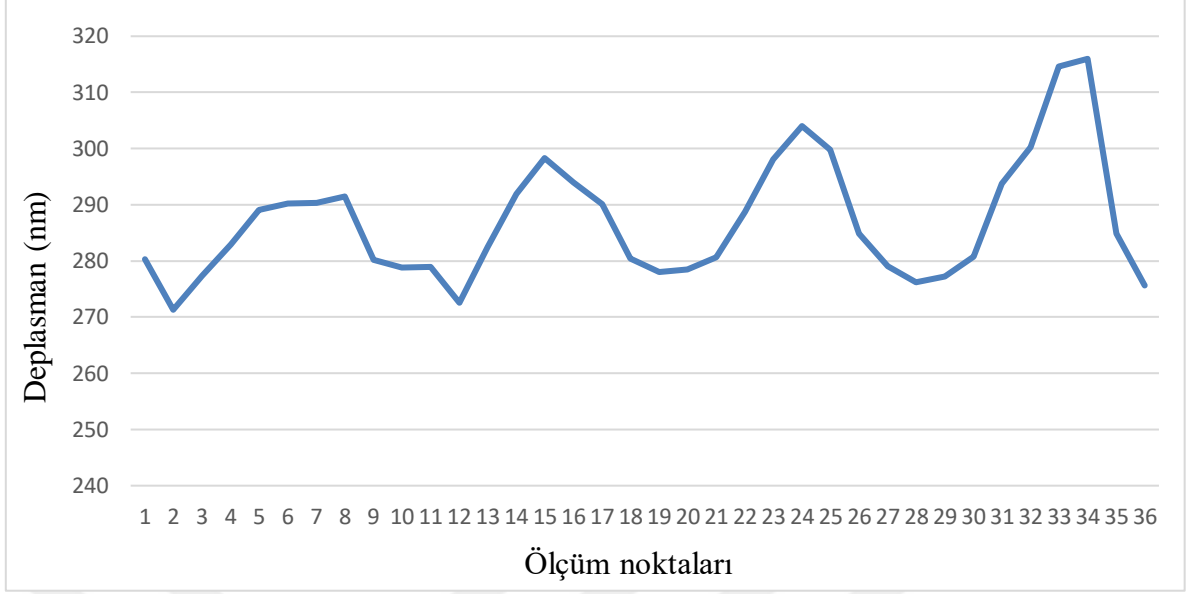
Şekil 6.27. 3 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi

3 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısı ile beraber voltaj eniyileştirme çalışması da yapılmıştır. Faz açısı 184 derece olarak belirlendikten sonra piezo elemanlara 100, 150 ve 200 V olmak üzere farklı voltaj değerleri uygulanmıştır. Disk üzerindeki 36 nokta üzerinden deplasman ölçümleri alınmıştır. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan noktalar Şekil 6.28’de gösterilmiştir.



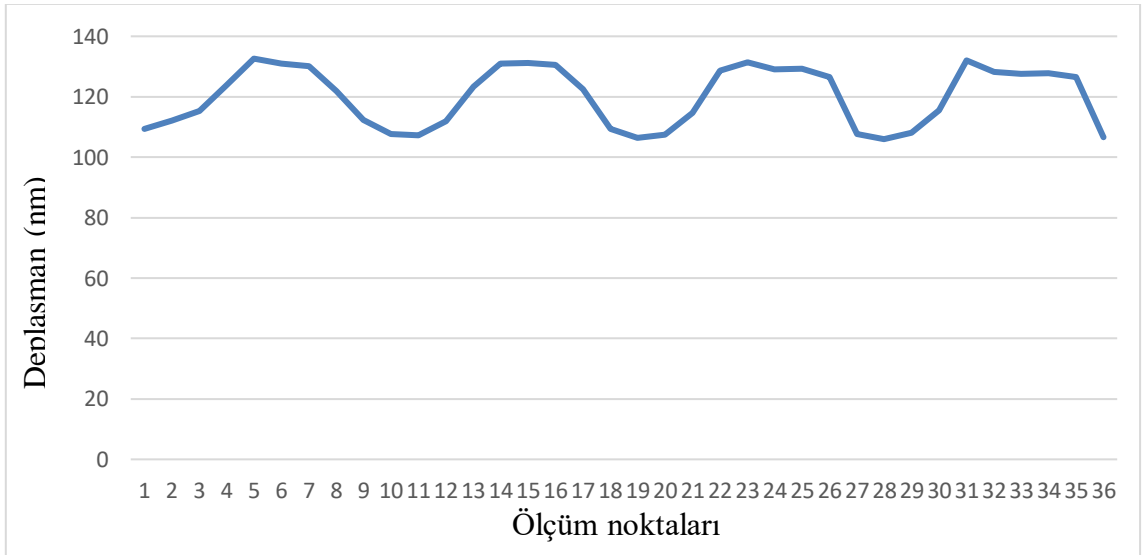
Şekil 6.28. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları

Disk plaka yapısı üzerindeki piezoelektrik seramiklere 100 V uygulandıktan sonra ölçülen deplasman değerleri Şekil 6.29’da gösterilmiştir.



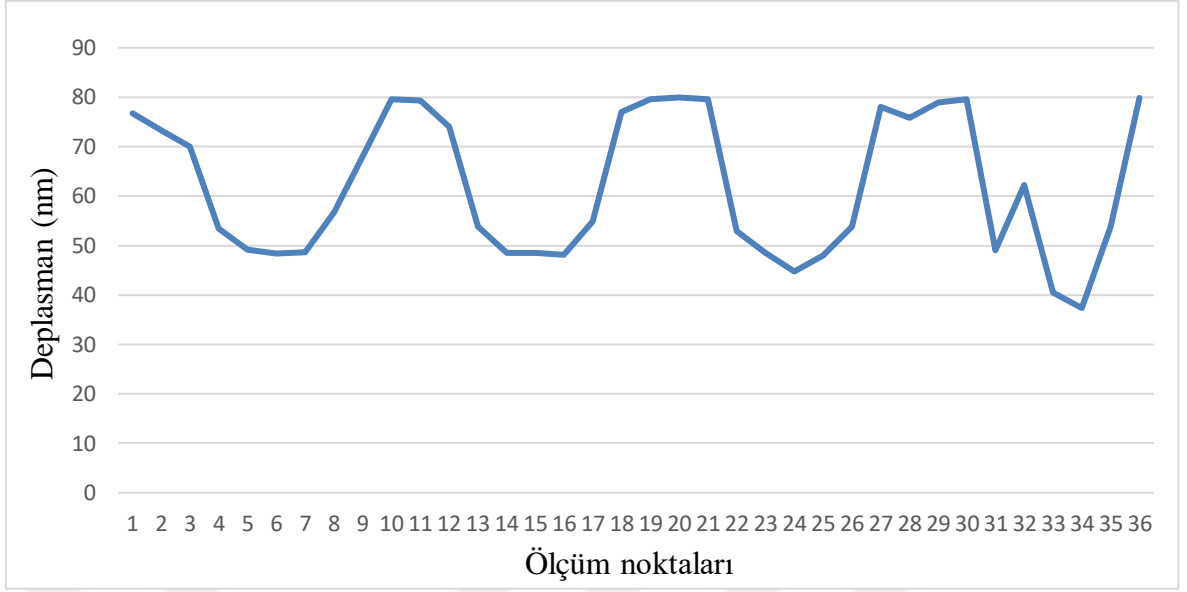
Şekil 6.29. Piezo elemanlara 100 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Disk plaka yapısı üzerindeki piezoelektrik seramiklere 150 V uygulandıktan sonra ölçülen deplasman değerleri Şekil 6.30’da gösterilmiştir.



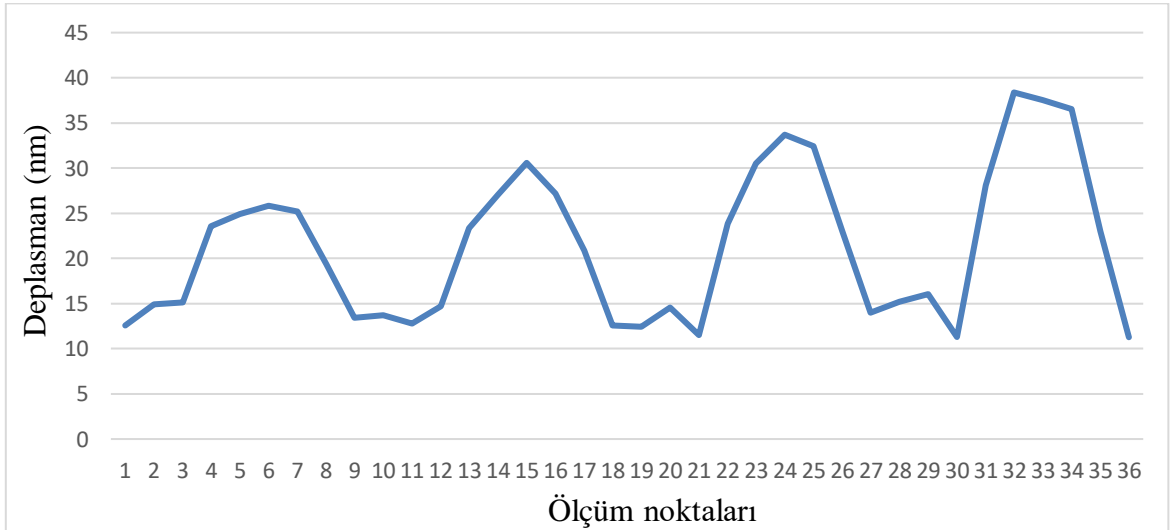
Şekil 6.30. Piezo elemanlara 150 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Disk plaka yapısı üzerindeki piezoelektrik seramiklere 200 V uygulandıktan sonra ölçülen deplasman değerleri Şekil 6.31’de verilmiştir.



Şekil 6.31. Piezo elemanlara 200 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Piezoelektrik seramiklere 200 V voltaj verildikten sonra voltaj eniyileştirmesi yapılmıştır ve optimum seviye 180 V olarak elde edilmiştir. Son olarak 184 derece faz açısında ve 180 V voltaj değerinde yapılan titreşim sönümlenme ile çalışmaları için elde edilen sonuçlar Şekil 6.32’de gösterilmiştir.



Şekil 6.32. Piezo elemanlara 180 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Tablo 6.14'te eniyiliştirme sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Piezoelektrik seramiklere enerji verilmeden ölçülen 584 nm olan deplasman değeri, piezo elemanlara optimize edilmiş faz açısı ve voltaj değeri ile enerji verilmesiyle 21,416 nm mertebelerine düşürülmüştür. Yaklaşık olarak % 95 oranında titreşim sönümleme gerçekleşmiştir.

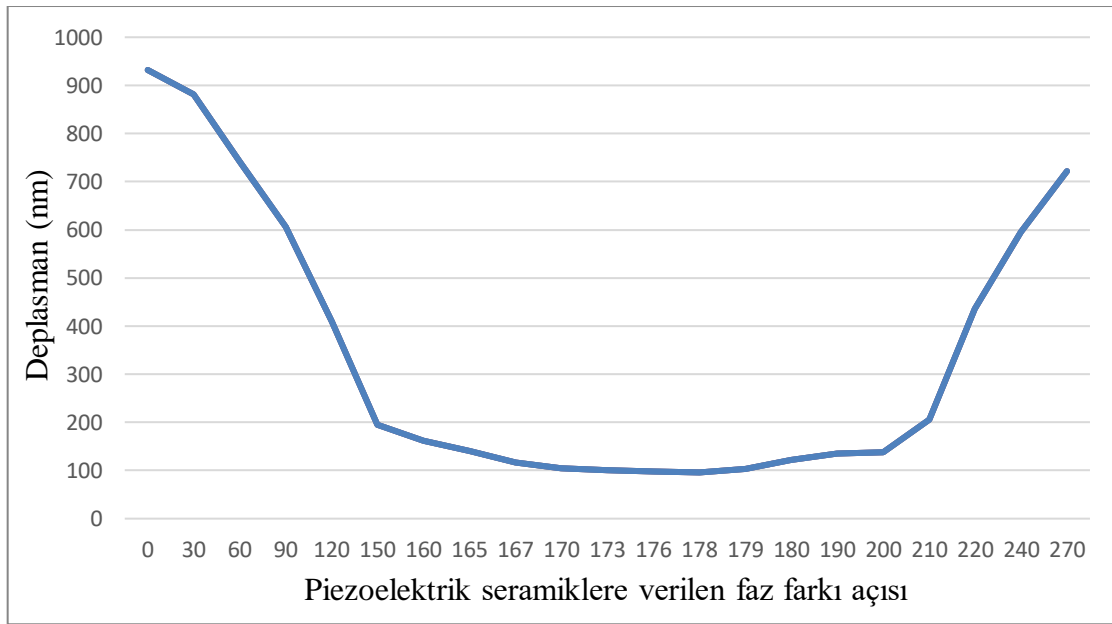
Tablo 6.14. Paslanmaz disk yapısı titreşim sönümleme sonrası deplasman değerleri

Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)
1	12,5702	19	12,4431
2	14,9484	20	14,5373
3	15,113	21	11,4901
4	23,5833	22	23,842
5	24,9307	23	30,5111
6	25,8446	24	33,7135
7	25,1723	25	32,4314
8	19,3994	26	22,979
9	13,3909	27	14,0281
10	13,696	28	15,178
11	12,782	29	16,0328
12	14,7071	30	11,2838
13	23,3549	31	28,077
14	27,0465	32	38,3761
15	30,6128	33	37,5312
16	27,161	34	36,5278
17	20,8369	35	22,979
18	12,5887	36	11,273
Ortalama		21,416	

3 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik disk yapısı aktif titreşim sönümleme çalışmalarından sonra 6 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik disk yapısı üzerindeki aktif titreşim sönümleme çalışmalarına geçilmiştir. Bu yapının doğal frekansı plakaya 4 noktadan uygulanan harici kuvvet ile belirlenmiş ve titreşim tarayıcı test cihazı ile ölçülmüştür. Aynı şekilde harici kuvvet disk plakaya en az 5 defa uygulanmıştır ve optimum doğal frekans değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen değer 15,6 Hz'dir. ANSYS analizlerinde ise bu değer 22,35 Hz olarak hesaplanmıştır. Doğal frekanstaki bu farkın, paslanmaz çelik diskin titreşim sistemine sabitlenmesi ve disk üzerindeki piezoelektrik seramiklerden kaynaklanan ekstra ağırlıktan dolayı olduğu düşünülmektedir.

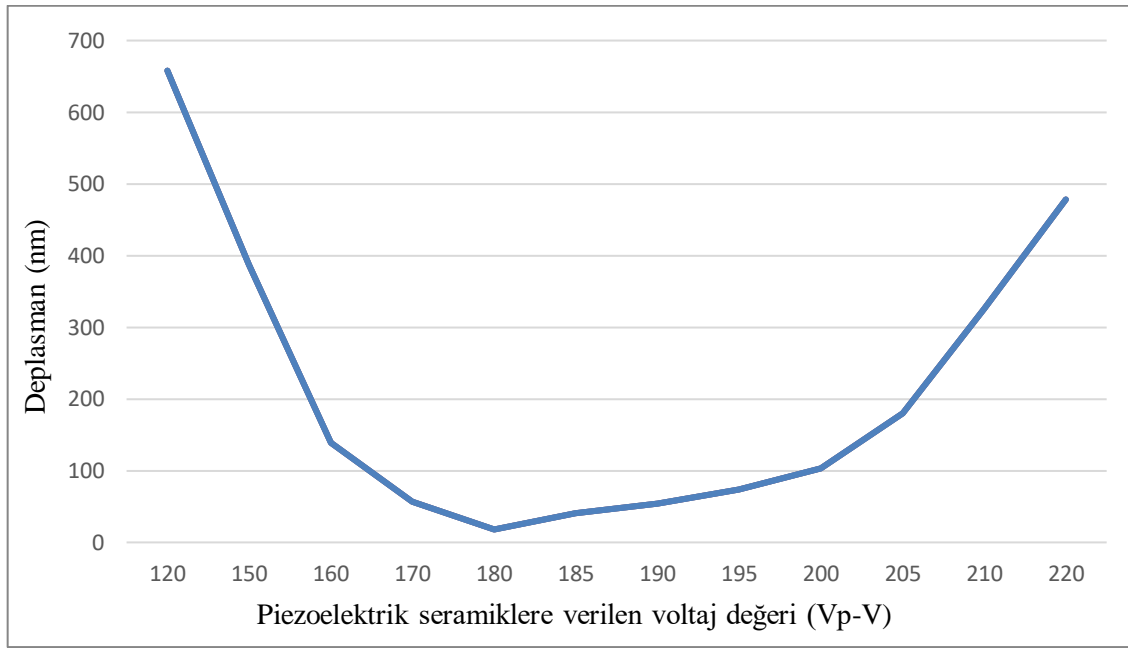
6 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik diskin doğal frekansı belirlendikten sonra sinyal jeneratörünün 1. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen sinyal, 15,6 Hz'de sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen sinyal titreştiriciye gönderilerek disk üzerinde titreşim hareketi elde edilmiştir. Aynı şekilde piezoelektrik seramiklere de 15,6 Hz'de sinyal gönderilmiştir. Titreştiricinin ve piezo elemanların frekans değerleri eşitlendikten sonra faz açısı değiştirilerek belirli bir voltaj değerinde titreşimin en az olduğu değer elde edilmeye çalışılmıştır. Faz açısı belirlenirken uyarıcı piezoları verilen voltaj sabit tutulmuş ve sistem kararlı halde iken faz açısı değiştirilmiştir. Minimum titreşim hareketinin olduğu faz açısı değerinde, uygulanan voltaj değiştirilerek minimum titreşim elde edilmeye çalışılmıştır.

6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde titreşim kaynağından elde edilen deplasman miktarı 515 nm olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki aktif titreşim sönümlenme faz açısı ise 178 derece olarak elde edilmiştir. Teoride bu değer 180 derece olması gerekmektedir. Faz açısındaki bu farkın yapıştırılan piezoelektrik seramiklerden ve paslanmaz metal diskin titreşim kaynağına sabitlenme koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Faz farkındaki fark önemli bir farklılık olarak kabul edilmemiştir. Aktif titreşim sönümlenme aşamasında faz farkı açısına göre elde edilen deplasman değerleri sonuçları Şekil 6.33'te gösterilmiştir.



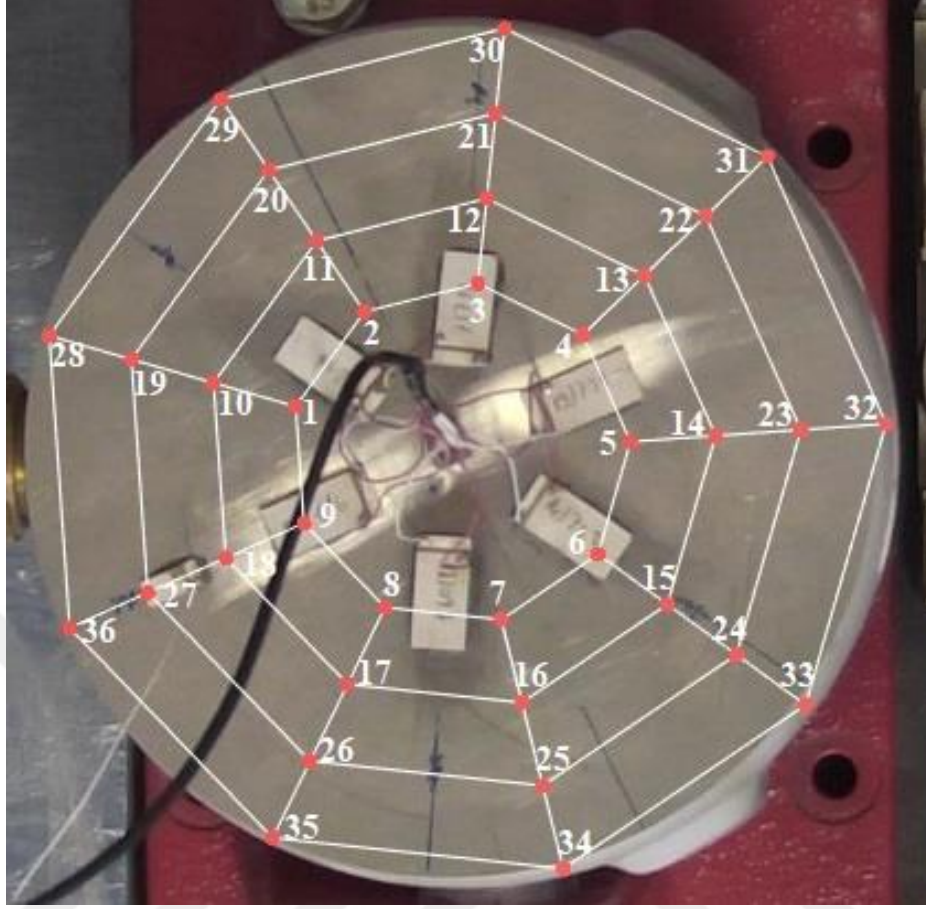
Şekil 6.33. 6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi

6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde faz açısı ayarlaması ile beraber voltaj eniyileştirme çalışması da yapılmıştır. Faz açısı 178 derece olarak belirlendikten sonra piezo elemanlara 125, 155 ve 215 V olmak üzere farklı voltaj değerleri uygulanmıştır. Piezoelektrik seramiklere 215 V voltaj verildikten sonra voltaj eniyileştirmesi yapılmıştır ve optimum seviye 180 V olarak elde edilmiştir. Voltaja göre deplasman değişimini gösteren grafik Şekil 6.34'te gösterilmiştir.



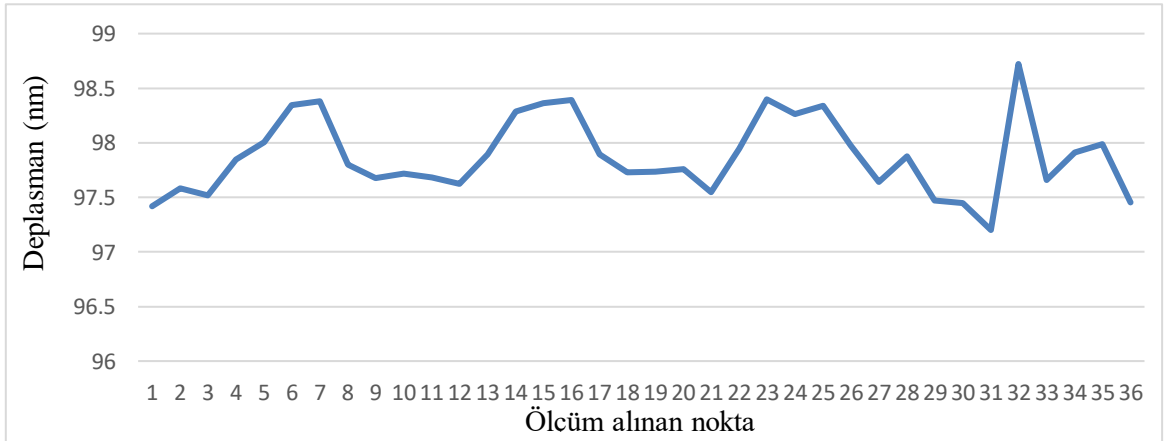
Şekil 6.34. 6 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan disk sisteminde voltaja göre deplasman değişimi

Disk üzerindeki 36 nokta üzerinden deplasman ölçümleri alınmıştır. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları Şekil 6.35'te gösterilmiştir.



Şekil 6.35. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları

178 derece faz açısında ve 180 V voltaj değerinde yapılan titreşim sönümlenme ile çalışmaları için elde edilen sonuçlar Şekil 6.36'da verilmiştir.



Şekil 6.36. Piezo elemanlara 180 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Tablo 6.15'te eniyileştirme sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Piezoelektrik seramiklere enerji verilmeden ölçülen 515 nm olan deplasman değeri, piezo elemanlara optimize edilmiş faz açısı ve voltaj değeri ile enerji verilmesiyle 97,87 nm mertebelerine düşürülmüştür. Yaklaşık olarak % 81 oranında titreşim sönümleme gerçekleşmiştir.

Tablo 6.15. Paslanmaz disk yapısı titreşim sönümleme sonrası deplasman sonuçları

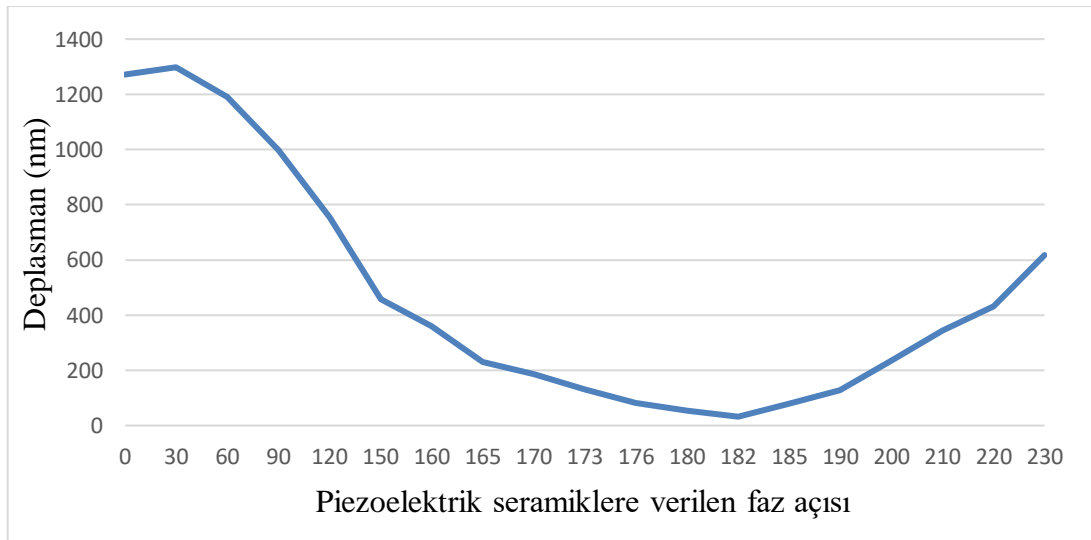
Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)
1	97,4163	19	97,7345
2	97,5842	20	97,7558
3	97,5179	21	97,5456
4	97,8446	22	97,9456
5	98,0051	23	98,3987
6	98,3468	24	98,2615
7	98,3812	25	98,3388
8	97,797	26	97,9769
9	97,6754	27	97,6383
10	97,7188	28	97,873
11	97,6821	29	97,4722
12	97,6245	30	97,4467
13	97,8938	31	97,2007
14	98,2835	32	98,7215
15	98,3625	33	97,6577
16	98,3894	34	97,9126
17	97,891	35	97,9892
18	97,7279	36	97,4554
Ortalama		97,87	

6.6. Kare Plaka Üzerindeki Aktif Titreşim Sönümleme Çalışmaları

Kare plaka üzerindeki aktif titreşim sönümleme çalışmalarında disk plaka yapısındaki yol takip edilmiştir. 4 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik kare plakanın titreşim hareketinin doğal frekansı, plakaya 4 noktadan uygulanan harici kuvvet ile belirlenmiş ve titreşim tarayıcı test cihazı ile ölçülmüştür. Harici kuvvet disk plakaya en az 5 defa uygulanmıştır ve optimum doğal frekans değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen değer 24,22 Hz'dir. ANSYS analizlerinde ise bu değer 30,46 Hz olarak hesaplanmıştır. Doğal frekanstaki bu farkın, paslanmaz çelik kare plakanın titreşim sistemine sabitlenmesi ve plaka üzerindeki piezoelektrik seramiklerden kaynaklanan ekstra ağırlıktan dolayı olduğu düşünülmektedir.

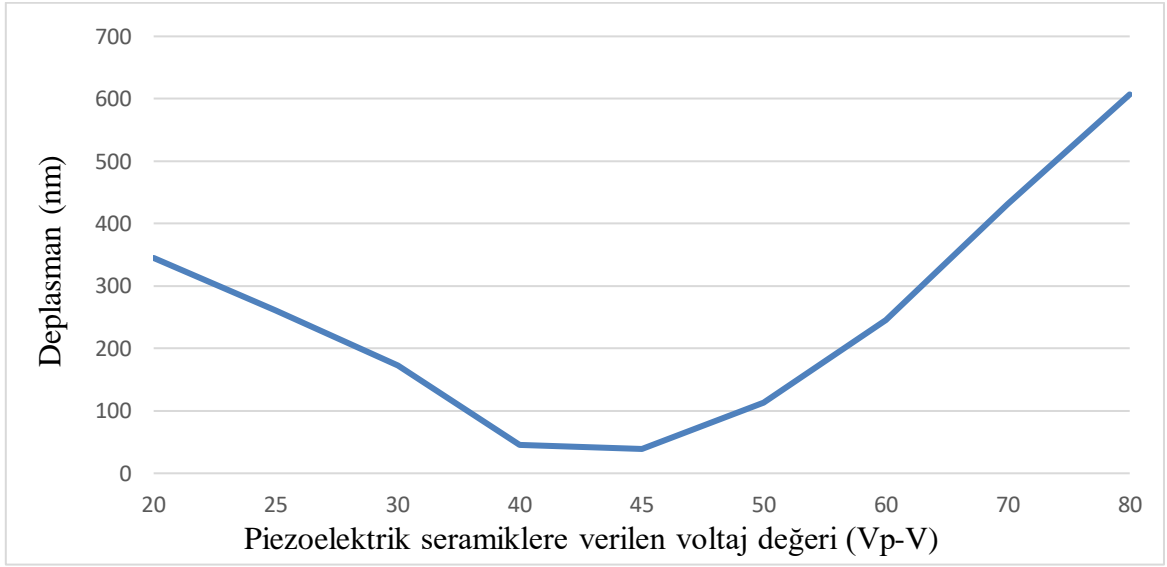
4 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik kare plakanın doğal frekansı belirlendikten sonra sinyal jeneratörünün 1. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen sinyal 24,22 Hz'de sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen sinyal titreştiriciye gönderilerek plaka üzerinde titreşim hareketi elde edilmiştir. Aynı şekilde piezoelektrik seramiklere de 24,22 Hz'de sinyal gönderilmiştir. Titreştiricinin ve piezo elemanların frekans değerleri eşitlendikten sonra faz açısı değiştirilerek belirli bir voltaj değerinde titreşimin en az olduğu değer elde edilmeye çalışılmıştır. Faz açısı belirlenirken uyarıcı piezolaraya verilen voltaj sabit tutulmuş ve sistem kararlı halde iken faz açısı değiştirilmiştir. Minimum titreşim hareketinin olduğu faz açısı değerinde, uygulanan voltaj değiştirilerek minimum titreşim elde edilmeye çalışılmıştır.

4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde titreşim kaynağından elde edilen deplasman miktarı 682 nm olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki aktif titreşim sönümlenme faz açısı ise yaklaşık olarak 182 derece olarak elde edilmiştir. Teoride bu değer 180 derece olması gerekmektedir. Faz açısındaki bu farkın yapıştırılan piezoelektrik seramiklerden ve paslanmaz metal diskin titreşim kaynağına sabitlenme koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Faz farkındaki fark önemli bir farklılık olarak kabul edilmemiştir. Aktif titreşim sönümlenme aşamasında faz farkı açısına göre elde edilen deplasman değerleri sonuçları Şekil 6.37'de gösterilmiştir.



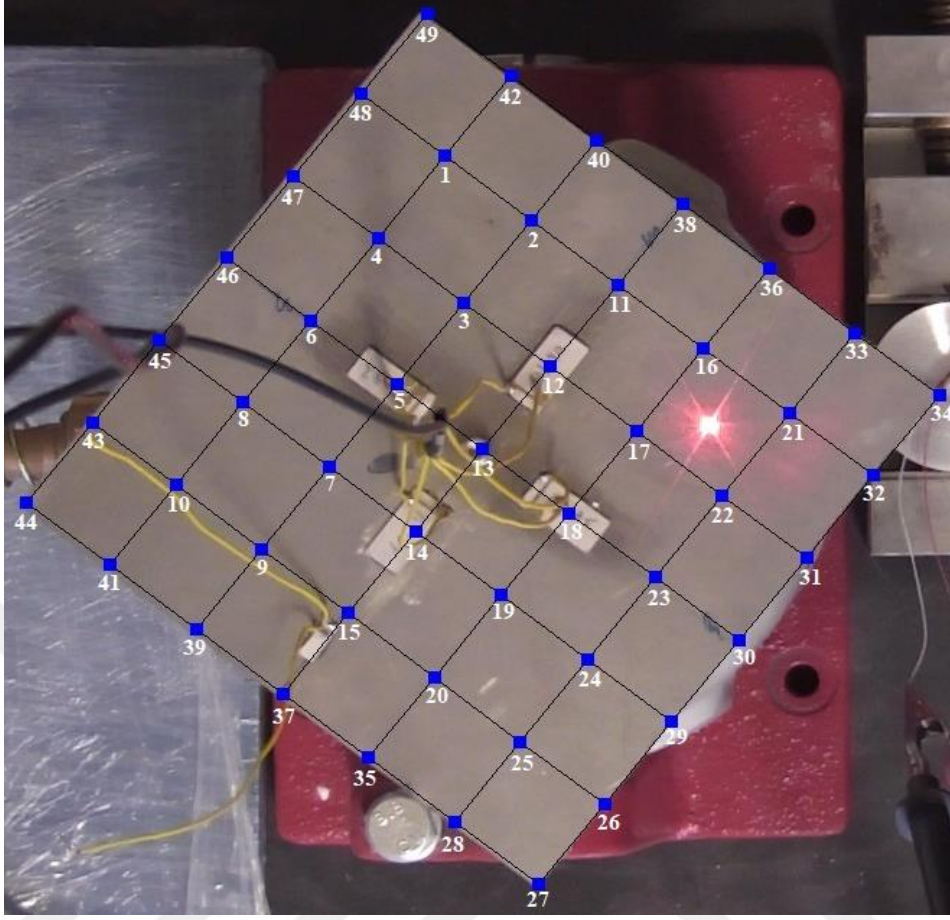
Şekil 6.37. 4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde faz açısına göre deplasman değişimi

4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde faz açısı ayarlaması ile beraber voltaj eniyileştirme çalışması da yapılmıştır. Faz açısı 182 derece olarak belirlendikten sonra piezo elemanlara 20, 40 ve 60 V olmak üzere farklı voltaj değerleri uygulanmıştır. Piezoelektrik seramiklere 60 V voltaj verildikten sonra voltaj eniyileştirmesi yapılmıştır ve optimum seviye 45 V olarak elde edilmiştir. Voltaja göre deplasman değişimini gösteren grafik Şekil 6.38’de gösterilmiştir.



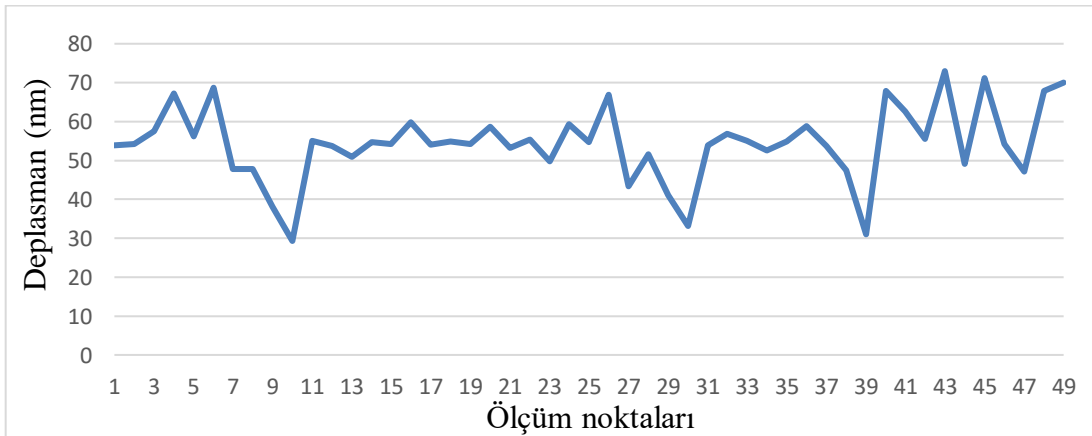
Şekil 6.38. 4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde voltaja göre deplasman değişimi

4 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka üzerindeki 49 nokta üzerinden deplasman ölçümleri alınmıştır. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları Şekil 6.39’da gösterilmiştir.



Şekil 6.39. Paslanmaz çelik kare plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları

182 derece faz açısında ve 45 V voltaj değerinde yapılan titreşim sönümleme ile çalışmaları için elde edilen sonuçlar Şekil 6.40'da verilmiştir.



Şekil 6.40. Piezo elemanlara 45 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Tablo 6.16’da eniyileştirme sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Piezoelektrik seramiklere enerji verilmeden ölçülen 682 nm olan deplasman değeri, piezo elemanlara optimize edilmiş faz açısı ve voltaj değeri ile enerji verilmesiyle 93,99 nm mertebelerine düşürülmüştür. Yaklaşık olarak % 86 oranında titreşim sönümleme gerçekleşmiştir.

Tablo 6.16. Paslanmaz çelik kare plaka yapısı titreşim sönümleme sonrası deplasman değerleri

Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)
1	53,8748	17	54,089	33	54,958
2	54,1925	18	54,905	34	52,622
3	57,517	19	54,23	35	54,861
4	67,2572	20	58,697	36	58,812
5	56,198	21	53,197	37	53,654
6	68,6383	22	55,311	38	47,438
7	47,869	23	49,749	39	30,948
8	47,7911	24	59,349	40	67,8384
9	38,072	25	54,643	41	62,6154
10	29,294	26	66,9452	42	55,4765
11	54,994	27	43,392	43	72,9602
12	53,678	28	51,633	44	49,0588
13	50,843	29	41,0558	45	71,2294
14	54,655	30	33,114	46	54,139
15	54,213	31	53,853	47	47,0625
16	59,761	32	56,917	48	67,9158
				49	70,0949
Ortalama			53,99		

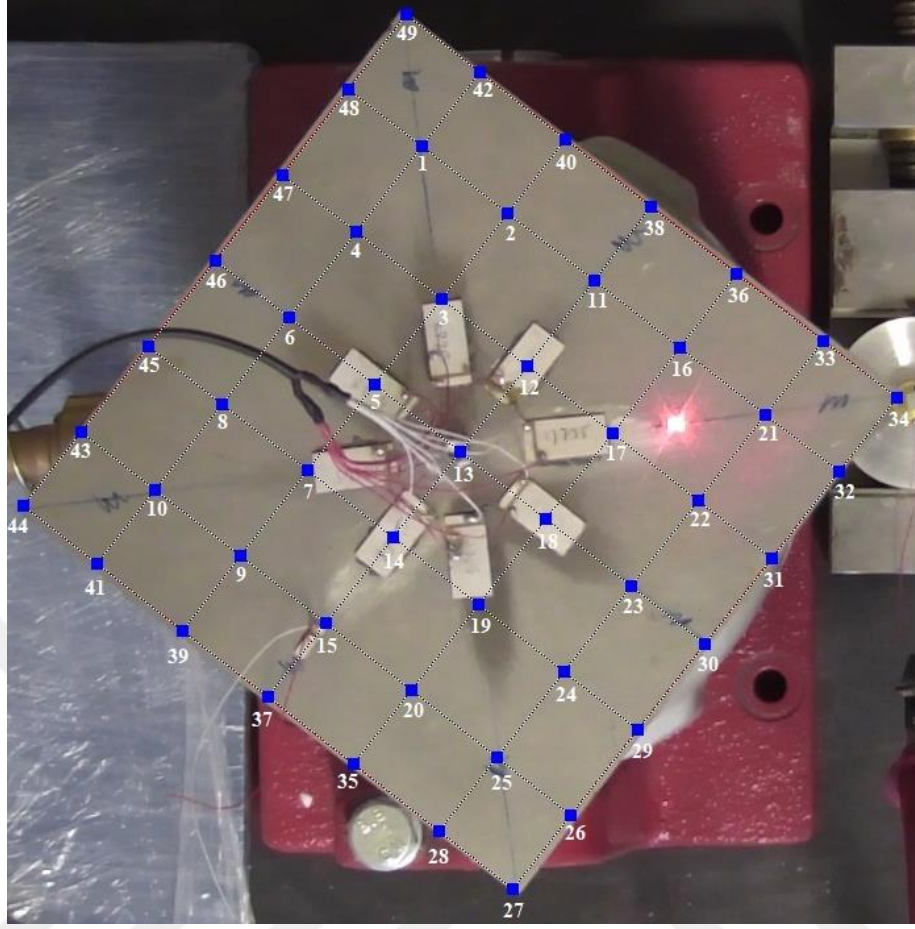
4 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik kare plaka yapısı aktif titreşim sönümleme çalışmalarından sonra 8 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik kare plakaya 4 noktadan uygulanan harici kuvvet ile sistemin doğal frekansı belirlenmiş ve titreşim tarayıcı test cihazı ile ölçülmüştür. Harici kuvvet disk plakaya en az 5 defa uygulanmıştır ve optimum doğal frekans değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçülen değer 20,31 Hz’dir. ANSYS analizlerinde ise bu değer 30,46 Hz olarak hesaplanmıştır. Doğal frekanstaki bu farkın, paslanmaz çelik diskin titreşim sistemine sabitlenmesi ve disk üzerindeki piezoelektrik seramiklerden kaynaklanan ekstra ağırlıktan dolayı olduğu düşünülmektedir.

8 adet piezoelektrik seramik yapıştırılmış paslanmaz çelik kare plakanın doğal frekansı belirlendikten sonra sinyal jeneratörünün 1. kanalından alınan ve frekansı ayarlanabilen sinyal 20,31 Hz'de sinyal güçlendiriciye yönlendirilmiştir. Güçlendirilen sinyal titreştiriciye gönderilerek plaka üzerinde titreşim hareketi elde edilmiştir. Aynı şekilde piezoelektrik seramiklere de 20,31 Hz'de sinyal gönderilmiştir. Titreştiricinin ve piezo elemanların frekans değerleri eşitlendikten sonra faz açısı değiştirilerek belirli bir voltaj değerinde titreşimin en az olduğu değer elde edilmeye çalışılmıştır. Faz açısı belirlenirken uyarıcı piezolaraya verilen voltaj sabit tutulmuş ve sistem kararlı halde iken faz açısı değiştirilmiştir. Minimum titreşim hareketinin olduğu faz açısı değerinde, uygulanan voltaj değiştirilerek minimum titreşim elde edilmeye çalışılmıştır.

8 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde titreşim kaynağından elde edilen deplasman miktarı 1224 nm olarak ölçülmüştür. Bu sistemdeki aktif titreşim sönümlenme faz açısı ise 175 derece olarak elde edilmiştir. Teoride bu değer 180 derece olması gerekmektedir. Faz açısındaki bu farkın yapıştırılan piezoelektrik seramiklerden ve paslanmaz metal diskin titreşim kaynağına sabitlenme koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Faz farkındaki fark önemli bir farklılık olarak kabul edilmemiştir.

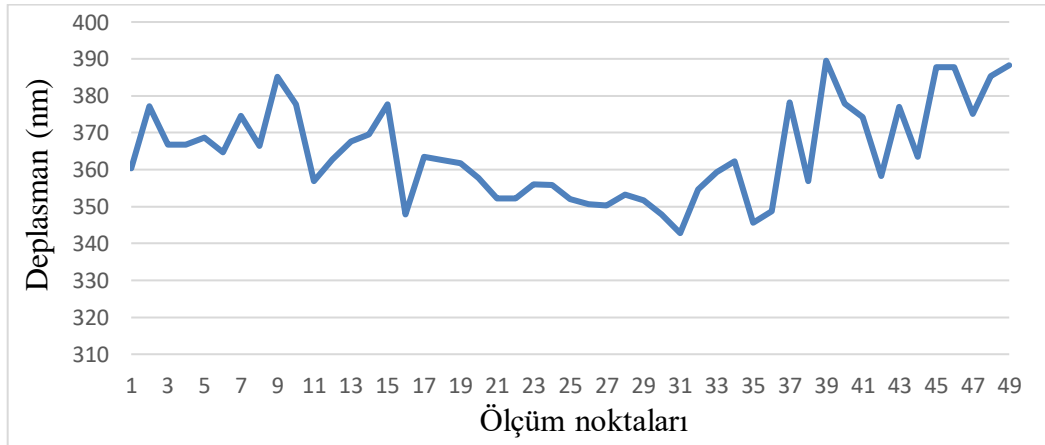
8 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka sisteminde faz açısı ayarlaması ile beraber voltaj eniyileştirme çalışması da yapılmıştır. Faz açısı 175 derece olarak belirlendikten sonra piezo elemanlara 50, 100, 150 ve 200 V olmak üzere farklı voltaj değerleri uygulanmıştır. Piezoelektrik seramiklere 200 V voltaj verildikten sonra voltaj eniyileştirmesi yapılmıştır ve optimum seviye 130 V olarak elde edilmiştir.

8 adet piezoelektrik seramik malzeme bulunan kare plaka üzerindeki 49 nokta üzerinden deplasman ölçümleri alınmıştır. Paslanmaz disk plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları Şekil 6.41'de gösterilmiştir.



Şekil 6.41. Paslanmaz çelik kare plaka üzerinden alınan ölçüm noktaları

175 derece faz açısında ve 130 V voltaj değerinde yapılan titreşim sönümleme ile çalışmaları için elde edilen sonuçlar Şekil 6.42’de verilmiştir.



Şekil 6.42. Piezo elemanlara 130 V verilerek elde edilen deplasman değerleri

Tablo 6.17’de eniyileştirme sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Piezoelektrik seramiklere enerji verilmeden ölçülen 1224 nm olan deplasman değeri, piezo elemanlara optimize edilmiş faz açısı ve voltaj değeri ile enerji verilmesiyle 364,73 nm mertebelerine düşürülmüştür. Yaklaşık olarak % 70,2 oranında titreşim sönümleme gerçekleşmiştir.

Tablo 6.17. *Paslanmaz çelik kare plaka yapısı titreşim sönümleme sonrası deplasman değerleri*

Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)	Nokta	Deplasman (nm)
1	360,358	17	363,402	33	359,29
2	377,167	18	362,687	34	362,292
3	366,705	19	361,782	35	345,639
4	366,818	20	357,697	36	348,784
5	368,731	21	352,232	37	378,307
6	364,689	22	352,232	38	356,967
7	374,606	23	355,939	39	389,521
8	366,485	24	355,886	40	377,826
9	385,109	25	352,119	41	374,317
10	377,722	26	350,561	42	358,206
11	356,879	27	350,302	43	377,02
12	362,874	28	353,258	44	363,483
13	367,639	29	351,62	45	387,685
14	369,537	30	347,954	46	387,683
15	377,776	31	342,801	47	375,072
16	347,843	32	354,6	48	385,388
				49	388,325
Ortalama			364,73		

7. SONUÇ

Aktif titreşim kontrolünde, sensörler ve eyleyiciler, titreşim tepkilerini bastırmak veya doğal frekansları diğer frekanslara kaydırarak ya da ilave sönümlenme uygulayarak yapısal rezonansları ayarlamak için bir yapı üzerinde geri bildirim kontrolü uygulamak için kullanılır. Bu tez çalışmasında kiriş yapısının, disk plaka yapının ve kare plaka yapının birincil titreşim hareketinde dinamik tepkilerini gözlemlemek ve oluşan titreşimi sönümlenmek amacıyla aktif titreşim kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Titreşim kontrolüne yönelik çalışmalar ilk olarak havacılık ve uzay teknolojileri üzerine olmuştur. Daha sonra otomotiv, savunma ve gündelik hayatımızda sıklıkla kullanılan beyaz eşya gibi sektörlerde de yaygınlaşmaya başlamıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle beraber basit titreşim kontrol sistemlerinden karmaşık titreşim kontrol sistemlerine kadar birçok çalışma gerek akademik gerekse endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Aktif titreşim kontrol sistemi kullanılmasının amaçları ise sistemin yapısal bütünlüğünü korumak, operatör ya da kullanıcılar için konforu arttırmak ve rahatsızlık veren gürültü ortamını en aza indirmektedir. Bu sebeplerden dolayı aktif titreşim kontrol sistemleri savunma sanayi alanında günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır.

Tezin 1. ana başlığında piezoelektrik malzemelerin tarihinden, 2. ana başlığında piezoelektrik malzemelerin yapısından, 3. ana başlığında piezoelektrik malzemelerden, 4. ana başlığında titreşim teorisinden, 5. ana başlığında titreşim kontrol yöntemlerinden bahsedilmiş, 6. ana başlığında ise aktif titreşim kontrol yöntemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Bu tez çalışmasında aktif titreşim sönümlenmede kullanılacak olan piezoelektrik seramik malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Bu seramikler kullanılarak kiriş yapı, disk plaka yapısı ve kare plaka yapısı üzerinde oluşturulan titreşimler sönümlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmaların amacı piezo seramiklerin geometriye yerleştirme biçimlerinin ve piezo eleman sayısının aktif titreşim kontrol sistemine etkisini incelemektir. Aktif titreşim kontrolü geri besleme yöntemiyle yapılmıştır. Titreşim kontrolü sabit frekansta ve sinüs dalgası durumunda gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistemlerdeki titreşim neredeyse tamamen rastgele ve farklı frekanslarda oluşmaktadır. Bu nedenle sanayi uygulamalarında çoklu disiplinler arası çalışmalar ile akıllı sistemlerin oluşturulması gerekmektedir.

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında kiriş yapı üzerinde aktif titreşim sönümlenme çalışmaları yapılmıştır. Sistemde oluşturulan titreşim miktarı % 70 oranında azaltılmıştır.

Bu durum üretilen piezoelektrik seramiklerin çalıştığını da göstermektedir. Bu çalışmanın ardından disk plaka yapısı üzerindeki titreşim kontrolü çalışmalarına başlanılmıştır. 3'lü ve 6'lı piezoelektrik seramik sistemleri oluşturulmuştur. Bu sistemlerin titreşim kontrolü; frekans ayarlaması, faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi ile yapılmıştır. 3'lü sistemde % 95, 6'lı sistemde ise % 81 oranında titreşim sönümlenme elde edilmiştir. Sonuç olarak faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi mükemmel şekilde yapılmazsa yüksek verimlilikte titreşim sönümlenme yapılamayacağı görülmüştür. Ayrıca kullanılan seramik malzemenin sayısının fazla olmasının titreşim sönümlenmede verimliliği arttırmadığı görülmüştür. Bu duruma ek olarak faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi yapılmayan sistemlerde piezo elemanların sistemdeki mevcut titreşim oranını arttırdığı görülmüştür.

Deneysel çalışmaların son aşamasında disk plaka yapısı üzerindeki titreşim kontrolü çalışmaları yapılmıştır. 4'lü ve 8'li piezoelektrik seramik sistemleri oluşturulmuştur. Bu sistemlerin titreşim kontrolü; frekans ayarlaması, faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi ile yapılmıştır. 4'lü sistemde % 86, 8'li sistemde ise % 70 oranında titreşim sönümlenme elde edilmiştir. Sonuç olarak faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi mükemmel şekilde yapılmazsa yüksek verimlilikte titreşim sönümlenme yapılamayacağı kare plaka yapısında da gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan seramik malzemenin sayısının fazla olmasının titreşim sönümlenmede verimliliği arttırmadığı bu sistemde de görülmüştür. Bu duruma ek olarak faz açısı ve voltaj eniyileştirmesi yapılmayan sistemlerde piezo elemanların sistemdeki mevcut titreşim oranını arttırdığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında da görüldüğü şekilde aktif titreşim kontrolü yapılması istenen cihaz, malzeme ve uygulamalarda hem piezo seramik sayısının, hem geometriye uygunluğunun hem de yerleştirme bölgelerinin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

7.1. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Yapılan çalışmalarda farklı geometrilerde oluşturulan titreşimlerin aktif olarak sönümlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmalar piezoelektrik seramikler ile yapılan iki boyutlu uygulamaların başlangıcı olarak görülebilir. Bir sonraki aşamada farklı disiplinlerin bir araya gelmesi ile oluşturulacak titreşim kontrol üniteleri ile rastgele titreşim olan yapıların titreşimi azaltılmalıdır. Burada sensör uygulamalarıyla algılanan titreşim sinyalleri, tasarlanan elektronik devreler yardımıyla kapalı çevrim olarak piezoelektrik malzemelere beslenecektir. Bu sistemler uçak, mühimmat ya da uydu gibi yapılar olabilir.

KAYNAKÇA

- [1] B. Jaffe, W. R. Cook Jr., and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, New York, A.B.D., 1971.
- [2] Cross, L.E. and R.E. Newnham, "History of Ferroelectrics," *Chapter in High Technology Ceramics*, edited by W.D. Kingery, III, 289-305, Amer. Ceram. Soc., Westerville, OH, 1986. H. Tong, *Materials Chemistry and Physics*, 40, 147, 1995.
- [3] APC International Ltd., 2002. "Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications", Pennsylvania, USA.
- [4] Kao K. C., "Dielectric Phenomena in Solids: With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes" Elsevier, Inc., 2004.
- [5] Ergün C, Yılmaz Ş, Özdemir E, Gül Ö, Kalenderli Ö, "Piezoelektrik malzemeler ve uygulamaları", *11. 'inci Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildirisi* (19–21 Nisan 2006).
- [6] Tressler J F, Alkoy S, Newnham R E, "Piezoelectric sensors and sensor materials", *Journal of Electroceramics* 2: 4, 257-272 (1998).
- [7] Newnham R. E., "Properties of Materials- Anisotropy, Symmetry and Structure", Oxford University Press, 2005.
- [8] Kong L.B, Zhang T.S, Ma J, Boey F, "Progress in Synthesis of Ferroelectric Ceramic Materials via High-Energy Mechanochemical Technique" *Materials Science* vol.53, pp.207–322 , 2008.
- [9] Jordan T.L. and Quanies Z., "Piezoelectric Ceramics Characterization", NASA/CR-2001-211225, ICASE Report No. 2001-28.
- [10] Ergun, C., Yılmaz, G., Özdemir, E., Gül, Ö., Kalenderli, Ö., 2006. Piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları, *Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı*, Pamukkale, Türkiye, Nisan 19-21.
- [11] Srinivasan, A.V., Mcfarland D.M., 2001. *Smart Structures, Analysis and Design*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] Journal of the American Ceramic Society—Haertling
- [13] Holman R.L., Johnson L.M.A. and Skinner D.P. "The desirability of electrooptic Ferroelectric Materials for Guided-Wave Optics" 6th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Lehigh University, PA, USA, 1986 IEEE p.32-41.
- [14] Schwartz, M., 2002. *Encyclopedia of Smart Materials*, Wiley, New York.
- [15] Chen, Y., 1999. Synthesis, characterization and transducer applications of piezoelectric ceramic/polymer composite materials, *PhD Thesis*, The Pennsylvania State University The Graduate School Intercollage Graduate Program in Materials, Pennsylvania.

- [16] Physik Instrumente (2009) Piezoelectrics in Positioning: Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications, Karlsruhe, Germany.
- [17] Piezo Systems Inc. (2013) Introduction to Piezo Transducers. İnternet sitesi: <http://piezo.com/tech2intropiezotrans.html>
- [18] Peel D. J., Stanway R., Bullough W.A., “Dynamic Modelling Of An ER Vibration Damper For Vehicle Suspension Applications”, *Journal of Smart Materials Structures*, 5, 591-606, 1996.
- [19] Piezo Systems Inc. (2013) Standard Quick Mount Piezoelectric Sensors. İnternet sitesi: <http://www.piezo.com/prodbg7qm.html>
- [20] Sensor Technology Ltd. (2009) Product Overview. Ontario, Canada.
- [21] Noliac A/S (2013) Plate Stacks, Standard Product. İnternet sitesi: http://www.noliac.com/Plate_stacks-59.aspx
- [22] Cedrat Technologies (2013) Amplified Piezoelectric Actuators. İnternet sitesi: <http://www.cedrat-technologies.com/en/mechatronicproducts/actuators/apa.html>
- [23] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.KG (2013) Piezo Actuator Catalog Site, Piezo Tube Actuators. İnternet sitesi: http://www.physikinstrumente.com/tutorial/4_28.html
- [24] Çay, C. İ. (2006). *Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümleme Elemanları Üzerine Bir Araştırma*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı Doktora Tezi, Ankara, Türkiye.
- [25] Hannah, J. and Stephens, R. C. 1956. Examples in Mechanical Vibrations. Edward Arnold (Publishers) Ltd, 152 p, London.
- [26] Sturk, M., Wu, M., and Wong, J. Y., “Development and Evaluation of a High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers” *Veh. Syst. Dyn.*, 24, 101–121, 1995.
- [27] Gül, M. (2012). *Çamaşır Makinelerinde Piezo-Aktif Titreşim Kontrolü Sistemi Geliştirilmesi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Sanatlar Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, Türkiye.
- [28] Kandagal, S. B., Venkatraman, K., (2006) Piezo-actuated Vibration and Flutter Control. *Defence Science Journal*, 56 (4), 615-626.
- [29] Facciano, A. B., Moore, R. T., Hlavacek, G. J., Seasly, C. D., (2011) missile airframe and structure comprising piezoelectric fibers and method for active structural response control. United States Patent US 8,049,148 B2 (Patent).
- [30] Evert, M. E., Janzen, P. C., Anderson, E. H., (2004) Active Vibration Isolation System for Launch Load Alleviation. In: *Proceedings of Smart Structures and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, March 2004, San Diego, CA.

- [31] Konstanzer, P., Enenkl, B., Aubourg, P. A., Cranga, P., (2008) Recent advances in Eurocopter's passive and active vibration control. In: Proceedings of American Helicopter Society 64th Annual Forum, April 29 – May 1, 2008, Montréal, Canada.
- [32] Browning, J. S., (2009) F-16 Ventral Fin Buffet Alleviation Using Piezoelectric Actuators, M.Sc. thesis, Wright-Patterson Air Force Base Ohio.
- [33] Maucher, C., Grohmann, B., Janke, P., Altmikus, A., Jensen, F., Baier, H., (2007) Actuator Design for the Active Trailing Edge of a Helicopter Rotor Blade. In: In 33rd European Rotorcraft Forum, Kazan, Russia.
- [34] Jaenker, P., Kloeppel, V., Konstanzer, P., Maier, R., (2008) Piezo Active Vibration and Noise Control in Helicopters. In: 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Alaska, USA.
- [35] Bachmann, F., (2012) Integration of Monolithic Piezoelectric Damping Devices into Adaptive Composite Structures, Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- [36] Jackson, P. B., (2010) Overview of Missile Flight Control Systems. Johns Hopkins Apl. Technical Digest, 29 (1).
- [37] Sohn, J. W., Choi, S.-B., Lee, C. H., (2009) Active vibration control of smart hull structure using piezoelectric composite actuators. Smart Materials Structures, 18.
- [38] Kwak, M. K., Heo, S., Jeong, M., (2009) Dynamic modeling and active vibration controller design for a cylindrical shell equipped with piezoelectric sensors and actuators. Journal of Sound and Vibration, 321, 510–524.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre ÜNEŞİ
Yabancı Dil : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Karabük / 1989
E-Posta : emre.unesi@tubitak.gov.tr & emreunesi@gmail.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2012, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Lisans)
2015, Bahçeşehir Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Fakültesi (Yüksek Lisans)
- 2012, ÇEMTAŞ, Çelikhane
2015, VESTEL AŞ., Ankara Bölge Satış Müdürlüğü
2015, TÜBİTAK SAGE, İleri Üretim Teknolojileri Birimi
2018, TÜBİTAK UZAY, Montaj Entegrasyon ve Test Grubu

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2012, TMMOB.