

PIEZOELEKTRİK ESASLI İVMEÖLÇER TASARIMI

Murat KARAER

Yüksek Lisans Tezi

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2021

ÖZET

PIEZOELEKTRİK ESASLI İVMEÖLÇER TASARIMI

Murat KARAER

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2021

Danışman: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

İvmeölçerler günümüzde otomotivden medikal sektöre ve uzay çalışmalarına kadar birçok alanda mekanik titreşimleri ve ivmelenmeyi ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisi ile ivmeölçerlerin çeşitli tiplerde üretimleri mümkün olsa da piezoelektrik esaslı ivmeölçerler sahip oldukları avantajlar bakımından yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışmasının amacı otomotiv ve havacılık gibi prototip ürün ve geliştirme testlerinin yüksek maliyet gerektirdiği sektörlerde hata algılama ve erken uyarı sistemlerinde de kullanılabilecek yeterlilikte piezoelektrik esaslı ivmeölçer tasarımı yapılması, elde edilen deneysel-teorik karşılaştırmalı verilerle bilgisayar destekli tasarım araçları da kullanılarak oluşturulan ivmeölçer prototip maliyetlerinin azaltılmasıdır.

Tez çalışmasında öncelikle literatür araştırmaları yapılmış ve öncül bir ivmeölçer tasarımı oluşturulmuştur. Belirlenen 14 değişken COMSOL sonlu elemanlar analiz programında oluşturulan modele yansıtılmış ve 93 varyans analiz edilmiştir. Değişkenlerden bazıları prototip ivmeölçere de yansıtılmış ve gerçel test düzeneklerinde 0-10 kHz frekans aralığında toplanan titreşim verileri COMSOL'un öngördüğü verilerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar kalibrasyonlu endüstriyel ivme sensörleri ile eş zamanlı olarak toplanan ivme verileriyle de desteklenmiştir. Hedeflenen tasarımın uygulama noktalarındaki fiziksel şartları, geometrisi, çalışma frekans aralığı, hassasiyet gereksinimi, ölçüm eksen ve maliyeti gözönünde bulundurularak nihai tasarıma karar verilmiştir. Geliştirilmiş tasarıma uygun olarak üretilen en iyileştirilmiş ivmeölçerlerin hedeflenen hassasiyet değerlerine yakın voltaj çıktıları ürettiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Piezo, Piezoelektrik, İvmeölçer, Sensör, Tasarım

ABSTRACT
PIEZOELECTRIC BASED ACCELEROMETER DESIGN

Murat KARAER

Department of Material Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2021

Supervisor: Prof. Dr. Aydın DOĞAN

Today, accelerometers are used to measure mechanical vibrations and acceleration in many fields from automotive to medical sector and space studies. Although it is possible to produce various types of accelerometers with today's technology, piezoelectric-based accelerometers are widely used due to their advantages. The aim of this thesis is to design a piezoelectric-based accelerometer that can be used in fault detection and early warning systems in industries such as automotive and aerospace where prototype product and development tests require high cost, and to reduce the cost of accelerometer prototypes created by using computer aided design tools with the obtained experimental-theoretical comparative data.

In the thesis study, first of all, literature research has been done and a preliminary accelerometer design has been created. Determined 14 variables were applied to the model created in the COMSOL - finite element analysis software- and 93 variances were analyzed. Some of these variables were applied on the prototype accelerometer as well. Vibration data collected in the real test setups in the frequency range of 0-10 kHz were compared with the data predicted by COMSOL. These studies were also supported by the acceleration data collected simultaneously with calibrated industrial acceleration sensors. The final design has been decided by considering the physical conditions, geometry, operating frequency range, precision requirement, measurement axis and cost at the application points of the targeted design. It has been observed that the optimized accelerometer produced in accordance with the improved design produces voltage outputs close to the targeted sensitivity values.

Keywords: Piezo, Piezoelectric, Accelerometer, Sensor, Design

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince hem literatür hem de deneysel çalışmalarında desteğini esirgemeyip yol gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Aydın DOĞAN'a, teknik destekleri ile çalışmalarında yol almamı sağlayan ve manevi olarak da destek olan Sayın Mert GÜL'e, ve Sayın Nebahat BIYIKLI'ya ayrı ayrı teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimime ve tez çalışmama destek olan şirketim Ford Otosan A.Ş.'ye, anlayış ve destekleri için değerli yöneticilerime ve iş arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim. Bu tez çalışmamda laboratuvar ve teknik imkanlarını kullandığım Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümüne saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca sürekli yanımda olan ve desteğini esirgemeyen değerli aileme ve sevgili eşime sonsuz teşekkür ederim.

Murat KARAER

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 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.

Murat KARAER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
1. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN TARİHİ	1
1.1. Dielektrik Malzemeler	2
2. PİEZOELEKTRİK KAVRAMI.....	4
2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Yapısı.....	4
2.2. Piezoelektrik Etki.....	5
2.2.1. Düz piezoelektrik etki.....	5
2.2.2. Ters piezoelektrik etki.....	6
2.3. Kutuplama.....	7
2.4. Piezoelektrik Özelliğın Kullanım Alanları.....	9
2.5. Piezoelektrik Etkinin İfade Edilmesi	9
2.6. Piezoelektrik Malzemelerde Ölçülen Temel Parametreler	10
2.7. Piezoelektrik Özelliğı Etkileyen Temel Faktörler.....	12
2.7.1. Yorulma ve yaşlanma	13
2.7.2. Mekanik sınırlamalar	13
2.7.3. Elektriksel sınırlamalar	13
2.7.4. Isısal sınırlamalar	14
3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER	15
3.1. Piezoelektrik Doğal Kristal Malzemeler.....	15
3.2. Piezoelektrik Seramikler	16
3.2.1. Piezoelektrik seramiklerin imalatı	17

3.2.2. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler	17
3.2.3. Baryum titanat ($BaTiO_3$).....	18
3.2.4. Kurşun zirkonat titanat (PZT)	20
3.3. Piezoelektrik Polimerler.....	25
3.4. Piezoelektrik Kompozitler	28
4. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI.....	31
4.1. Sensörler	32
4.2. Üreteçler	33
4.3. Aktüatörler (Eyleyiciler)	34
4.4. Transdüserler (Dönüştürücüler).....	35
5. İVME ve İVMENİN ÖLÇÜLMESİ.....	37
5.1. İvme.....	37
5.1.1. Ortalama ivme.....	37
5.1.2. Anlık ivme.....	37
5.1.3. Merkezci ivme	38
5.1.4. Yerçekimi ivmesi.....	38
5.2. Newton'un II. Hareket Kanunu	39
5.3. Newton'un II. Hareket Kanunu'nun Deneysel Yolla Sağlanması	40
5.4. Titreşim.....	40
5.5. İvmenin Ölçülmesi.....	40
5.5.1. İvmeölçerler.....	41
5.5.1.1. İvmeölçerlerin yapısı ve genel çalışma prensibi.....	41
5.5.1.2. İvmeölçer özellikleri.....	42
5.5.1.2.1. İvmeölçer tipi.....	42
5.5.1.2.2. İvme ölçüm eksenini.....	43
5.5.1.2.3. Ölçüm kapasitesi.....	43
5.5.1.2.4. Doğruluk	43
5.5.1.2.5. Hassasiyet.....	43
5.5.1.2.6. Çözünürlük.....	44
5.5.1.2.7. İvmeölçer çıkışı	44
5.5.1.2.8. Bant genişliği	44
5.5.1.2.9. Gürültü.....	45
5.5.1.2.10. Çalışma sıcaklığı aralığı.....	45

5.5.2. İvmeölçerler çeşitleri	46
5.5.2.1. Potansiyometreli ivmeölçerler.....	47
5.5.2.2. Kapasitif ivmeölçerler.....	48
5.5.2.3. Piezorezistif ivmeölçerler.....	49
5.5.2.4. Değişken empedanslı ivmeölçerler.....	49
5.5.2.5. Hall etkili ivmeölçerler	50
5.5.2.6. Manyetorezistif ivmeölçerler	50
5.5.2.7. Termal ivmeölçerler.....	51
5.5.2.8. Rezonans ivmeölçerler.....	51
5.5.2.9. Optik ivmeölçerler.....	51
5.5.2.10. Piezoelektrik ivmeölçerler.....	52
5.5.2.10.1. Piezoelektrik ivmeölçerlerin yapısı.....	52
5.5.2.10.2. Piezoelektrik esaslı ivmeölçerlerin avantajları.....	53
5.5.2.10.3. Piezoelektrik ivmeölçerler tipleri ve çalışma prensipleri.....	53
5.5.2.10.3.1. Sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçerler	53
5.5.2.10.3.2. Kesme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler	54
5.5.2.10.3.3. Bükülme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler	55
5.5.1.2.1.4. Piezoelektrik ivme sensörlerinin sinyal koşullama sistemleri....	56
5.5.1.2.1.4.1. IEPE tarzı ivme sensörleri	57
5.5.1.2.1.4.2. Yük tipi ivme sensörleri	58
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	60
6.1. Modelleme Çalışmaları	60
6.1.1. Model.....	60
6.1.2. Öncül tasarım ve alt parçalar	61
6.1.3. Alt parçaların hücrelendirilmesi (Meshleme)	62
6.1.4. Alt parçaların montajlanması.....	62
6.1.5. Sonlu elemanlar yazılımı ile analiz.....	63
6.1.5.1. Yapısal analiz.....	63
6.1.2.2. Modal analiz ve rezonans frekans spektrumu	63
6.2. Pototipleme-Alt Parçalar ve Montaj.....	65
6.2.1. Alt parçaların imalatı.....	65
6.2.1.1. Civata.....	67
6.2.1.2. Yay elemanı.....	67

6.2.1.3. Sismik kütle.....	67
6.2.1.4. Yalıtkan diskler.....	68
6.2.1.5. İletken levhalar.....	68
6.2.1.6. Alt tabla.....	69
6.2.1.7. Piezoseramik Diskler.....	69
6.2.1.7.1. Piezoelektrik seramik üretimi.....	70
6.2.2. Montajlama	76
6.3. Deney Düzenegi.....	78
6.4. Gürültü Ölçümü	83
6.5. İlk Prototipin Değerlendirilmesi	84
6.6. En iyileştirmeye Çalışmaları	86
6.6.1. Değişkenler	86
6.6.2. COMSOL analizleri.....	87
6.6.2.1. Piezodisk çapına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	87
6.6.2.2. Piezodisk delik çapına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	89
6.6.2.3. Piezodisk kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	90
6.6.2.4. Yay elemanı çapına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	91
6.6.2.5. Yay elemanı yüksekliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	93
6.6.2.6. Yay elemanı kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	95
6.6.2.7. Sismik kütle yüksekliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	96
6.6.2.8. Yalıtkan disk kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi.....	97
6.6.2.9. Yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı voltaj çıktısı değişimi	99
6.6.3. Referans veri kaydı.....	102
6.6.3.1. Kararlı frekans aralığı	103
6.6.4. Değişkenlerin prototipe yansıtılması.....	103
6.6.4.1. Sismik kütlenin değiştirilmesi	104
6.6.4.1.1. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,1mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi.....	104
6.6.4.1.2. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi.....	106
6.6.4.1.3. Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi	107

6.6.4.2. Piezodisk kalınlığının değiştirilmesi	108
6.6.4.2.1. Yay elemanı sismik kütle üzerinde iken piezdosik kalınlığının hassasiyete etkisi	109
6.6.4.2.2. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve altında iken piezdosik kalınlığının hassasiyete etkisi	110
6.6.4.3. Yay elemanının kalınlığının değiştirilmesi	112
6.6.4.3.1. Yay elemanının sismik kütle üzerinde bulunduğu durumda yay kalınlığının hassasiyete etkisi	112
6.6.4.3.2. Yay elemanının sismik kütlenin altında ve üstünde bulunduğu durumda yay kalınlığının hassasiyete etkisi	113
6.6.4.4. Yay elemanının konumunun değiştirilmesi.....	114
6.7. Gerçel Test Ortamlarında Ölçümler.....	116
7. SONUÇ	120
KAYNAKÇA	122
ÖZGEÇMİŞ	127

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Keşfedilen ilk ferroelektrik kristaller	2
Tablo 3.1. Yaygın kullanılan piezoelektrik kristallerin oda sıcaklığındaki özellikleri ..	16
Tablo 3.2. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması	17
Tablo 3.3. Yaygın kullanılan piezoelektrik seramiklerin piezoelektrik özellikleri	18
Tablo 3.4. Yumuşak ve sert PZT’de piezoelektrik özelliklerin karşılaştırılması	23
Tablo 3.5. PZT türlerinin piezoelektrik özellikleri	24
Tablo 3.6. Yaygın kullanılan piezoelektrik polimerlerin elektriksel özellikleri	26
Tablo 3.7. PVDF’nin bazı piezoelektrik özelliklerinin piezoelektrik seramikler ile karşılaştırılması	28
Tablo 3.8. Kompozit piezoelektrik malzemelerin bileşenleri ve piezoelektrik gerinim katsayısı	29
Tablo 5.1. Piezoelektrik ivmeölçerlerin karşılaştırılması	56
Tablo 5.2. IEPE ve yük tipi ivme sensörlerinin karşılaştırılması	57
Tablo 6.1. Protitp ivmeölçer alt parçalarının özellikleri	66
Tablo 6.2. Farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen numunelerin karakterizasyon sonuçları	74
Tablo 6.3. Elde edilen PZT-5A’nın piezoelektrik özellikleri	75
Tablo 6.4. Brüel Kjaer 4513-001 model ivme sensörünün teknik özellikleri	80
Tablo 6.5. Prototip ivmeölçer alt parçalarının özellikleri	81
Tablo 6.6. WF 1966 sinyal jeneratörü teknik özellikleri	81
Tablo 6.7. Titreştirici teknik özellikleri (Bruel Kjaer LDS V400)	82
Tablo 6.8. Sinyal güçlendirici teknik özellikleri (Frank Bacon LDS 500PA)	82
Tablo 6.9. İnfiniivision 3014-A osiloskop teknik özellikleri	83
Tablo 6.10. En iyileştirme çalışmaları için belirlenen değişkenler ve ivmeölçer varyansları	87
Tablo 6.11. Yay elemanı konum, adet ve pozisyonlarına göre varyanslar	100

Tablo 6.12. Belirlenen varyanslarda COMSOL analizleri ile elde edilen voltaj	
çıktıları	101
Tablo 6.13. Baz tasarıma göre üretilen prototip ivmeölçer alt parçalarının	
geometrik özellikleri	102
Tablo 6.14. Yay elemanı et kalınlığı 0,1mm iken sismik kütle değişikliği yapılan	
tasarımın geometrik özellikleri	104
Tablo 6.15. Deneysel veri-COMSOL verisi karşılaştırma tablosu; Yay elemanı	
sismik kütle üzerinde ve et kalınlığı 0,1mm	105
Tablo 6.16. Yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişikliği yapılan	
tasarımın geometrik özellikleri	106
Tablo 6.17. Deneysel veri-COMSOL verisi karşılaştırma tablosu; Yay elemanı	
sismik kütle üzerinde ve et kalınlığı 0,3mm	107
Tablo 6.18. 0,3mm et kalınlığına sahip yay elemanları sismik kütlelerin altında ve	
üstünde iken sismik kütle değişikliği yapılan tasarımın geometrik	
özellikleri	107
Tablo 6.19. Deneysel veri-COMSOL verisi karşılaştırma tablosu; Yay elemanı	
sismik kütle üstünde ve altında, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm	108
Tablo 6.20. 3gr ve 10gr sismik kütlelere sahip ivmeölçer sistemlerinde farklı	
kalınlıklarda piezdosikler kullanılarak 0-5 kHz aralığında elde edilen	
ortalama hassasiyet değerleri	110
Tablo 6.21. 3gr ve 5gr sismik kütlelere sahip ivmeölçer sistemlerinde farklı	
kalınlıklarda piezdosikler kullanılarak 0-5 kHz aralığında elde edilen	
ortalama hassasiyet değerleri	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması.....	3
Şekil 2.1. Perovskit yapısı	4
Şekil 2.2. Perovskit Yapı (a) Curie sıcaklığının üstündeki kristal görünüm, (b) Curie sıcaklığının altındaki kristal görünüm	6
Şekil 2.3. Düz (direkt) piezoelektrik etki	6
Şekil 2.4. Düz ve ters piezoelektrik etki	6
Şekil 2.5. Tek ve çok kristal piezoelektrik malzemeler arasındaki fark	7
Şekil 2.6. Piezoelektrik seramiklerin kutuplama işlemi	8
Şekil 2.7. Elektrik alana bağlı polarizasyon ve deformasyon eğrileri	8
Şekil 2.8. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri	10
Şekil 3.1. Kuvars kristalleri	15
Şekil 3.1. Baryum titanatın dielektrik sabitesinin sıcaklığa bağlı değişimi	19
Şekil 3.3. PZT faz diyagramı	22
Şekil 3.4. Morfotropik faz yapısına sahip PZT'nin Curie sıcaklıklarında yapısal dönüşümü	23
Şekil 3.5. PZT'de piezoelektrik yük sabitlerinin kompozisyona bağlı değişimi	24
Şekil 3.6. Poliviniliden diflorürün moleküler yapısı	26
Şekil 3.7. Mekanik gerdirme ile PVDF'nin α fazından β fazına dönüşüm süreci	27
Şekil 3.8. PVDF'te β fazının moleküler dizilimi	28
Şekil 3.2. Kompozit aktüatörler	30
Şekil 4.1. Kullanım alanlarına göre piezoelektrik malzemeler	31
Şekil 4.2. Piezo sensör uygulamaları (a) Eksenel sensör (b) Fleksör sensör	33
Şekil 4.3. (a) Ark üretimi (b) Şarj üretimi	34
Şekil 4.4. Temel aktüatör (eyleyici) çeşitleri	35
Şekil 5.1. Bir cismin ortalama ivmesi	37
Şekil 5.2. Bir cismin anlık ivmesi	38

Şekil 5.3. Çembersel yörüngede hareket eden cismin merkezci ivmesi	38
Sekil 5.4. İvme deney sistemi	40
Sekil 5.5. İvme sensörü	41
Şekil 5.6. Kütle yay sitemi	41
Şekil 5.7. Voltaj çıkışlı ivme sensörlerinde frekans-hassasiyet ilişkisi	44
Şekil 5.8. Tipik bir ivmeölçerin şematik yapısı	46
Şekil 5.9. Sismik kütlenin hareketine bağlı olarak ivmenin ölçülmesi	46
Şekil 5.10. Potansiyometreli ivmeölçerin şematik yapısı	48
Şekil 5.11 Kapasitif ivmeölçerin şematik yapısı	48
Şekil 5.12. Piezorezistif ivmeölçerin şematik yapısı	49
Şekil 5.13. Değişken empedasnlı ivmeölçerin şematik yapısı	50
Şekil 5.14. Hall etkili ivmeölçerin şematik yapısı	50
Şekil 5.15. Gaz ısıtılmalı ivmeölçerin şematik yapısı	51
Şekil 5.16. Piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı	52
Şekil 5.17. Sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı	54
Şekil 5.18. Kesme tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı (a) Düzlemesel kesme tarzı (b) Delta kesme tarzı	55
Şekil 5.19. Bükülme tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı	56
Şekil 5.20. Tipik iki IEPE sistemin kurulum şematiği	58
Şekil 5.21. Tipik hat girişli yük dönüştürücü sistem şematiği	59
Şekil 5.22. Yük amplifikatör devresi şematiği	59
Şekil 6.1. (a) Öncül olarak tasarlanan ivmeölçerin 3 boyutlu görseli, (b) nümerik analiz için belirlenen 13 geometrik parametre, (c) sonlu elemanlar analizi için ivmeölçerin hücrelendirilmiş görseli	60
Şekil 6.2. Öncül tasarım ivmeölçerin alt parçaları. (a) civata, (b) yay elemanı, (c) sismik kütler, (d) alt ve üst yalıtkan diskler, (e) iletken levhalar, (f) alt tabla, (g) piezodiskler	61

Şekil 6.3. Sonlu elemanlar analizi için öncül tasarımın alt parçalarının hücrelendirilmiş görseli. (a) alt tabla, (b) alt ve üst yalıtkan diskler, (c) piezodiskler, (d) sismik kütle, (e) yay elemanı, (f) cıvata	62
Şekil 6.4. Öncül tasarım stres analizi. (a) 1g ivmelenmede stres dağılımı, (b)100g ivmelenmede stres dağılımı	63
Şekil 6.5. Öncül tasarımın 0-50kHz aralığında frekansa bağlı voltaj çıktısı	64
Şekil 6.6. Öncül tasarımın 0-10kHz'deki doğal frekansı	64
Şekil 6.7. Öncül tasarımın 5889,8 Hz'deki modal görünümü	65
Şekil 6.8. İvmeölçer cıvatası	67
Şekil 6.9. İvmeölçer yay elemanı	67
Şekil 6.10. İvmeölçer sismik kütlesi	68
Şekil 6.11. İvmeölçer yalıtkan diskleri	68
Şekil 6.12. İvmeölçer iletken levhaları	69
Şekil 6.13. İvmeölçer alt tablası	69
Şekil 6.14. İvmeölçer piezodiskleri	69
Şekil 6.15. Presleme için kullanılan metal kalıplar	70
Şekil 6.16. Hidrolik pres	70
Şekil 6.17. Sinterlenmiş ve sinterlenmemiş seramik peletlerin görüntüsü	71
Şekil 6.18. Piezoseramiklerin yapıştırıldığı metal plakalar	71
Şekil 6.19. Taşlama cihazı	72
Şekil 6.20. Yüzey finişleme işlemi	72
Şekil 6.21. Elektrotlama düzeneği	73
Şekil 6.22. Seramik kutuplama düzeneği	73
Şekil 6.23. Yüzey paralellliği ölçüm ünitesi	74
Şekil 6.24. İletken levhaların kesilmesinde kullanılan lazer kesim cihazı	75
Şekil 6.25. Piezoseramik disklere delik delme işlemi için kullanılan tezgah	76
Şekil 6.26. Piezoseramik diskler; (a) Delik delme işlemi öncesi, (b) Delik delme işlemi sonrası	76

Şekil 6.27. Piezoelektrik ivmeölçer montaj şematiği	77
Şekil 6.28. Montajı tamamlanmış prototip ivmeölçer	77
Şekil 6.29. Kablo bağlantısı yapılmış BNC konnektörlü prototip ivmeölçer	78
Şekil 6.30. Deney düzeneği; a) Sinyal jeneratörü, b) Sinyal güçlendirici, c) Titreştirici, d) İvme sensörleri, e) Titreşim tarayıcı, f) Osiloskop	79
Şekil 6.31. Titreştirici üzerine yerleştirilen ivme sensörleri; a) Prototip ivme sensörü b) Eş zamanlı ölçüm yapan kalibrasyonlu Brüel Kjaer ivme sensörü	79
Şekil 6.32. Brüel Kjaer 4513-001 model ivme sensörü	80
Şekil 6.33. Sinyal okumada kullanılan osiloskop (İnfiniivision 3014-A)	82
Şekil 6.34. Osiloskopla sistemdeki gürültünün ölçülmesi	84
Şekil 6.35. Sismik kütle değişiminin voltaj çıkışına etkisinin COMSOL ile araştırılması. (a) Sismik kütle yüksekliğinin 3mm olduğu sistem, (b) Sismik kütle yüksekliği 3mm iken sistemin voltaj üretimi, (c) Sismik kütle yüksekliğinin 3mm olduğu sistem, (d) Sismik kütle yüksekliği 8mm iken sistemin voltaj üretimi	85
Şekil 6.36. Sismik kütle değişiminin voltaj çıkışına etkisinin araştırılması. 0-10kHz bandında değişimi	85
Şekil 6.37. Eniyileştirme çalışmaları kapsamında belirlenen geometrik değişkenler....	86
Şekil 6.38. Piezodisk çap değişiminin voltaj çıkışına etkisinin araştırılması. (a) Piezodisk çapı en küçük değerde, (b) Piezodisk çapı en büyük değerde, (c) Piezodisk çapı optimum değerde	88
Şekil 6.39. Voltaj çıkışının piezodisk çapı ile değişimi	88
Şekil 6.40. Piezodisk delik çapı değişiminin voltaj çıkışına etkisi. (a) Piezodisk delik çapı en küçük değerde, (b) Piezodisk delik çapı en büyük değerde	89
Şekil 6.41. Voltaj çıkışının piezodisk delik çapı ile değişimi	89
Şekil 6.42. Piezodisk kalınlık değişiminin voltaj çıkışına etkisi. (a) Piezodisk kalınlığı en küçük değerde, (b) Piezodisk kalınlığı en büyük değerde, (c) Piezodisk kalınlığı optimum değerde	90

Şekil 6.43. Voltaj çıktısının piezodisk kalınlığı ile değişimi	91
Şekil 6.44. Çeşitli konumlardaki yay elemanlarının çap değişimlerine bağlı en büyük voltaj çıktılarının elde edildiği çap, konum ve pozisyonlar	92
Şekil 6.45. Yay elemanı çeşitli konumlarda iken çap değişimine bağlı voltaj değişimleri	93
Şekil 6.46. Yay elemanı yüksekliğinin voltaj çıktısı üzerindeki etkisi	94
Şekil 6.47. Yay elemanı yükseklik değişimine bağlı voltaj çıktısı değişimi	94
Şekil 6.48. Yay elemanı kalınlığının voltaj çıktısına etkisi (a) Yay elemanı kalınlığı en küçük değerde, (b) Yay elemanı kalınlığı en büyük değerde	95
Şekil 6.49. Yay elemanı kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi	95
Şekil 6.50. Sismik kütle yüksekliğinin voltaj çıktısına etkisi (a) Sismik kütle yüksekliği en küçük değerde, (b) Sismik kütle yüksekliği en büyük değerde	96
Şekil 6.51. Sismik kütle yüksekliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi	97
Şekil 6.52. Yalıtkan disk kalınlıklarının voltaj çıktısına etkisi. (a) Üst yalıtkan disk kalınlığı en yüksek değerde, (b) Alt yalıtkan disk kalınlığı en düşük değerde	98
Şekil 6.53. Yalıtkan disk kalınlıklarına bağlı voltaj çıktısı değişimi	98
Şekil 6.54. Yay elemanı adet, konum ve pozisyonlarına göre voltaj çıktısı. (a) en yüksek voltaj çıktısının elde edildiği durum, (b) en düşük voltaj çıktısının elde edildiği durum, (c) ilk prototipteki durum	99
Şekil 6.55. Yay elemanı konum, adet ve pozisyonlarına göre belirlenen varyansların voltaj çıktıları	100
Şekil 6.56. Baz tasarımı göre üretilen prototip ivmeölçerle elde edilen referans veri..	102
Şekil 6.57. Referans veri kaydının yapıldığı baz tasarım	103
Şekil 6.58. İvmeölçer sistemi içerisinde sismik kütle	104

Şekil 6.59. 0,1mm et kalınlığındaki yay elemanı sismik kütlenin üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklüklerde sismik kütleyle sahip sistemlerin 0-10kHz aralığındaki hassasiyet değişimi	105
Şekil 6.60. 0,3mm et kalınlığındaki yay elemanı sismik kütlenin üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklüklerde sismik kütleyle sahip sistemlerin 0-10kHz aralığındaki hassasiyet değişimi	106
Şekil 6.61. 0,3mm et kalınlığındaki yay elemanları sismik kütlenin hem altında hem üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklüklerde sismik kütlelerle 0-10kHz aralığındaki hassasiyet değişimi	108
Şekil 6.62. İvmeölçer sistemi içerisinde piezodiskler	109
Şekil 6.63. Sismik kütlenin 3 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi	109
Şekil 6.64. Sismik kütlenin 10 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi	110
Şekil 6.65. Sismik kütlenin 3 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi	111
Şekil 6.66. Sismik kütlenin 5 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi	111
Şekil 6.67. İvme ölçer sistemi içerisinde yay elemanı	112
Şekil 6.68. Sismik kütle 3 gr, piezodisk kalınlığı 1mm iken yay elemanı kalınlığının hassasiyete etkisi	113
Şekil 6.69. Sismik kütle 3 gr, piezodisk kalınlığı 2mm iken yay elemanı kalınlığının hassasiyete etkisi	113
Şekil 6.70. Yay elemanının sismik kütle altında ve üstünde konumlandırıldığı durumda yay elemanı et kalınlığının hassasiyete etkisi	114
Şekil 6.71. Yay elemanı konumlandırmaları; a) Baz tasarım(yay elemanı sismik kütle üzerinde), b) Yay elemanının sismik kütlenin altında, c) Yay elemanı sismik kütle altında ve üstünde, d) Yay elemanı sismik kütle altında ve referans pozisyona ters pozisyonda	115

Şekil 6.72. 3gr sismik kütle kullanılan sistemde yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı olarak elde edilen hassasiyet değerleri	115
Şekil 6.73. 8gr sismik kütle kullanılan sistemde yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı olarak elde edilen hassasiyet değerleri	116
Şekil 6.74. Kistler ve prototip ivme sensörleri ile ölçülen yapay titreşim verisi eğrileri	117
Şekil 6.75. Kistler ve prototip ivme sensörleri tarafından kaydedilen eş zamanlı ivme verilerinin küçükten büyüğe doğru sıralanması ile elde edilen eğriler	117
Şekil 6.76. Kistler 8766A500BH model 3 eksenli ivme sensörü	117
Şekil 6.77. Kistler ivme sensörü ve prototip ivmeölçerle eş zamanlı alınan titreşim verisi	118
Şekil 6.78. Kistler ve prototip ivmeölçerle alınan verinin daha büyük ölçekli grafiği	119
Şekil 6.79. Kistler ve prototip ivmeölçerlerin içten yanmalı motor ve şanzıman gibi aktarma organları üzerine bağlanarak eş zamanlı titreşim datası alınan veri toplama düzenekleri	119

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	: Antirezonans frekansı
f_r	: Rezonans frekansı
g	: Yerçekimi ivmesi
g_{ij}	: Piezoelektrik voltaj katsayısı
gr	: Gram
Hz	: Hertz

K	: Kelvin
k_{eff}	: Elektromekanik bağlaşma faktörü
kg	: Kilogram
kHz	: Kilohertz
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	: Megapascal
m/V	: Metre/volt
mV	: Milivolt
mV/g	: Milivolt/Yerçekimi ivmesi
mN-kN	: Milinewton – Kilonewton
m/s^2	: metre/saniye ²
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
°C	: Santigrad derece
ρ	: Yoğunluk

1. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN TARİHİ

Yunanca piezen ve elektrik kelimelerinin bir araya gelmesiyle türetilmiş olan piezoelektrik kavramı sıkıştırmak, belli bir bölgeye baskı uygulamak anlamlarına gelmektedir. Kristal yapıdaki malzemeler, üzerlerine basınç uygulandığında elektrik yükü üretebilme kabiliyetine sahiptirler. Kristal malzemelerin bu özelliğine piezoelektrik özellik, bu özelliği yansıtan malzemelere ise piezoelektrik malzemeler denir. Piezoelektrik özellik düz ve ters piezoelektrik etki olmak üzere iki farklı şekilde kendisini göstermektedir. Üzerine basınç uygulandığında malzemenin elektrik yükü üretmesine düze piezoelektrik etki, malzemeye elektrik akımı uygulandığında şekil değişimine uğramasına ise ters piezoelektrik etki denmektedir [1].

Piezoelektrik malzemelerin bilinirliği günümüzden çok öncesine dayanmaktadır. Piezoelektrik özelliğinin dışında farklı amaçlar için kullanılmış olsa da bilinen ilk piezoelektrik özellikteki malzeme olan Rochelle tuzu 1655'te Elie Seignette tarafından bulunmuştur. Rochelle tuzunun piezoelektrik özelliği ise bundan 225 yıl sonra Pierre ve Jaques Curie tarafından keşfedilmiştir. Thomas Edison ise 1899 yılında İkinci piezoelektrik malzeme buluşu olarak sayılabilecek kuvarz kristalini fonograflarda kullanmıştır.

Nicholson ve Paul Langevin, kuartz kristallerinin piezoelektrik özelliğinden faydalanarak denizaltı sistemlerinde ultrasonik transdüser geliştirmiş ve 1. Dünya Savaşı sırasında kullanılmalarına olanak sağlamışlardır. Bundan birkaç yıl sonra Joseph Valasek 1920'li yıllarda piezoelektrik özelliğin histeris eğrisinin çıkarılması ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Takip eden yıllarda malzemelerin piezoelektrik özelliğine ilave olarak piroelektrik ve dielektrik gibi bazı elektriksel özelliklerin araştırıldığı çalışmalar yapılmıştır. 1935'te Busch ve Scherer özellikle sonar uygulamalarda kullanılan Potasyum Dihidrojen Fosfat (PDF) ve Dihidrojen Arsenat gibi malzemelerin ferroelektrik özelliğini keşfetmiştir.

1940'lı yıllarda ise ferroelektrik malzemelerin genel hücre yapısının perovskit olduğu anlaşılmıştır. Baryum Titanat ($BaTiO_3$) transdüser uygulamalarında kullanılmaya başlanmış olsa da bu malzemenin Curie sıcaklığının düşük olması yani piezoelektrik özelliğini düşük denebilecek sıcaklıklarda kaybetmesi bilim insanlarını yeni piezoelektrik malzemeler bulmaya zorlamıştır. Diğer yandan Baryum Titanat ($BaTiO_3$) çok yüksek dielektrik sabitine sahip olduğundan kapasitör uygulamalarında sıklıkla kullanılmaya devam etmiştir.

Ferroelektrik malzemeler üzerine yapılan çalışmalara 1950'li yıllarda devam edilmiştir. Üniversite ve özel kuruluşlarda yapılan araştırmalar ile ferroelektrik özellikteki malzeme sayısı 25'e kadar genişletilmiştir. Günümüzde birçok uygulamada sıkça kullanılan ve piezoelektrik özellikler bakımından yüksek performans gösteren PZT Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) seramikleri ile ilgili çalışmalara da yine bu yıllarda başlanmıştır.

Kurşun Zirkonat Titanat'ın ferroelektrik özelliği Japon bilim insanları Shirane, Hoshino ve Suzuki tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu keşif sonrasında PZT özelinde katı çözeltili araştırmaları ve elektriksel özelliklerin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yoğun şekilde sürdürülmüştür. Teknolojinin gelişimine paralel olarak ihtiyaçlar doğrultusunda piezoelektrik malzemelere olan ilgi artmaya devam etmektedir [2].

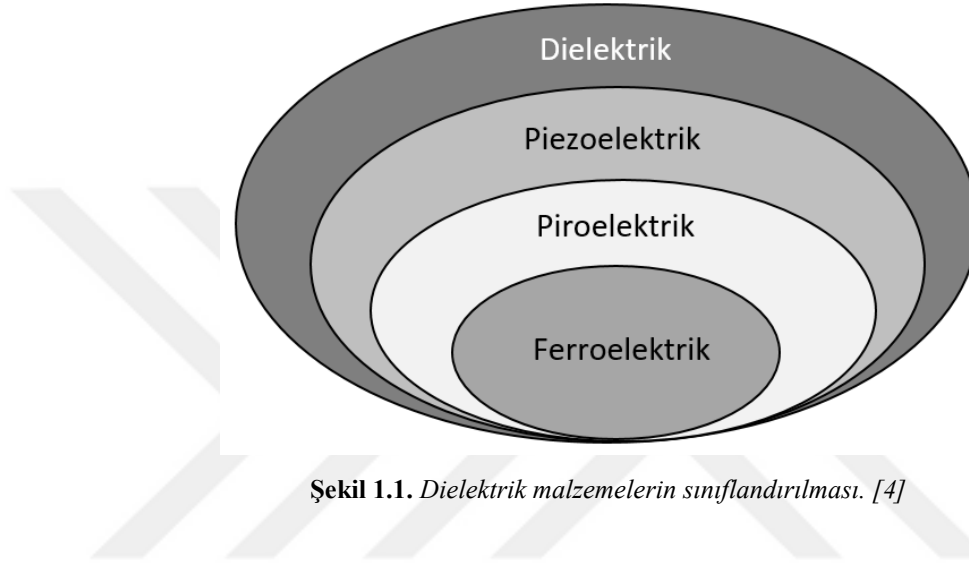
Tablo 1.1. Keşfedilen ilk ferroelektrik kristaller [10]

Adı	Kimyasal Formülü	T _c (°C)	P _s (μC/cm ²)	Yıl
Rochelle Tuzu	NaKC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O	23	0,25	1921
Potasyum Dihidrojen Fosfat	KH ₂ PO ₄ (KDP)	-150	4	1935
Potasyum Dihidrojen Arsenat	KH ₂ AsO ₄	-177	5	1938
Potasyum Didöteryum Fosfat	KD ₂ PO ₄	-60	5,5	1942
Baryum Titanat	BaTiO ₃	120	26	1945
Kurşun Titanat	PbTiO ₃	490	>50	1950
Potasyum Niyobat	KNbO ₃	415	30	1951
Kurşun Zirkonat Titanat (PZT)	Pb(Zr _x Ti _{1-x})O ₃	~350	>40	1952

1.1. Dielektrik Malzemeler

Elektriksel yalıtkanlık ve kutuplanma (polarizasyon) özelliği seramik ve polimer malzemelerde görülüp metallerde görülmez. Elektriği iletmeyen ve elektrostatik alanlardan etkilenen malzemelere dielektrik malzemeler denir. Dielektrik malzemeler elektriği iletmeyen yalıtkan malzemelerdir. Ancak elektrik alan uygulandığında malzemede yük birikmesi meydana gelir, malzemenin şeklinde ve boyutunda değişiklik olur [3]. Dielektrik malzemeler, uygulanan çeşitli kuvvetlere verdikleri tepkiye göre sınıflandırılır. Bu temel özelliklerindeki farklılıktan doğan sınıflandırmada, malzemeler arasındaki ilişki Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Dielektrik malzemeler, piezoelektrik,

piezoelektrik, ferroelektrik malzemeler olarak sınıflandırılır. Ferroelektrik malzemeler, doğal olarak kendiliğinden elektriksel polarizasyon özellik gösteren malzemelerdir. Piezoelektrik malzemeye basınç uygulaması ile malzemede elektrik kutuplanmanın indüklenmesidir. Piroelektrik malzemeler ise termal olarak polarizasyonun gerçekleştiği malzemelerdir. Piezoelektrik mekanik, piezoelektrik termal, ferroelektrik elektrik olarak şarj üretimi yapar [4].



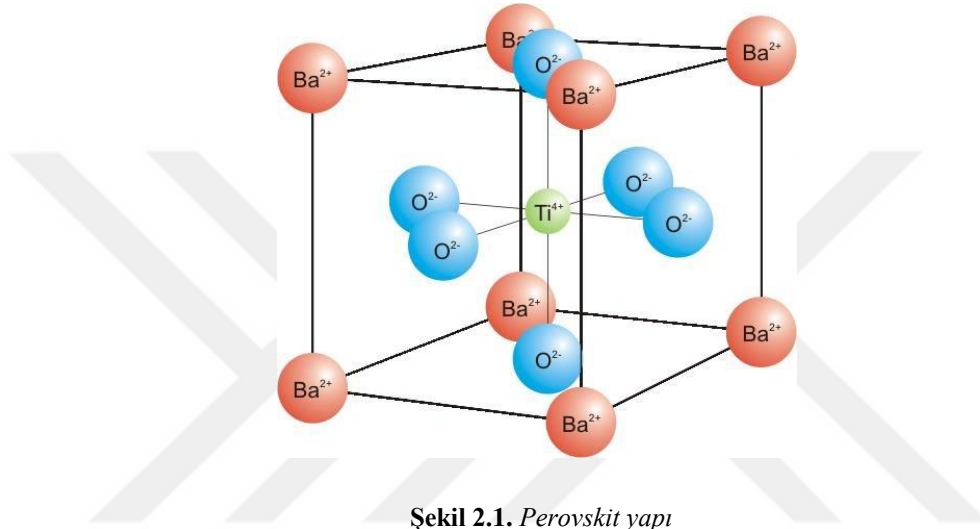
Şekil 1.1. Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması. [4]

Piezoelektrik malzemeler, dielektrik malzemeler içindedir, ancak; bütün dielektrik malzemeler, piezoelektrik özellik göstermezler. Dielektrik malzemeler özelliklerine sahip oldukları yeteneklere göre kullanılırlar. Örneğin; dielektrik özelliği yüksek olan bir malzeme kapasitör olarak kullanılırken piezoelektrik katsayıları yüksek olan malzemeler; ultrasonik jeneratör, dedektör, basınç sensörü, aktuatör olarak, piezoelektrik özellikli malzemeler kızıl ötesi dedektörlerde ve kızıl ötesi görüntüleme gibi daha birçok alanda kullanılır. Piezoelektrik özellik malzemenin kristal yapısından dolayı ortaya çıkar. Mekanik gerilmelere maruz kaldığında elektrik akımı üretir, elektrik alan uygulandığında şekil değişikliği veya mekanik bir hareket üretebilmektedir. Bu özelliklere sahip, belirli kristal yapılarıdaki malzemelere piezoelektrik malzemeler denir. Dielektrik malzemelerin karakteristik özelliklerini dielektrik sabiti, küri sıcaklığı, dipol moment, polarizasyon ve histerzis döngüsü gibi kavramlar ile tanımlanmaktadır [5].

2. PİEZOELEKTRİK KAVRAMI

2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Yapısı

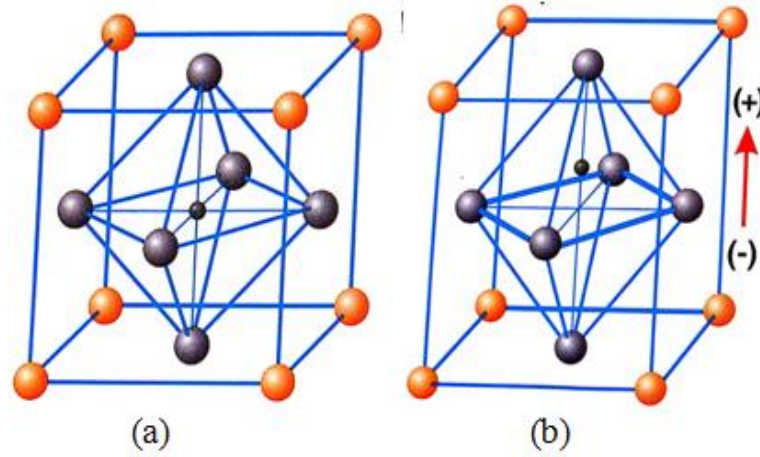
Geleneksel piezoelektrik seramiklerin ve ferroelektrik malzemelerin kristal yapısı ABO_3 şeklinde olan perovskittir. Perovskit hücre yapısının görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Perovskit yapıya sahip malzemelerde atom dizilimleri aşağıda belirtildiği şekildedir;

- Köşelerde +3 valans değerlikli büyük boyutlu (Ca, Ba, Pb, Na, Bi) atomlar bulunur
- Merkezde +4 valans değerlikli küçük boyutlu atomlar bulunur (Ti, Zr)
- Yüzeylerde -2 valans değerlikli oksijen atomları bulunur [6]

Bu yapıya sahip piezoelektrik malzemeler Curie sıcaklığı üzerine çıkarıldığında Şekil2.2(a)'da da gösterildiği gibi içerdikleri pozitif ve negatif yükler simetrik bir pozisyonda yer almaktadır. Curie sıcaklığının altında çalıştıkları zaman ise bu malzemelerin kristal yapılarında elektriksel dipol görülmektedir. Başka bir ifade ile Curie sıcaklığının üzerinde pozitif ve negatif yükler Şekil2.2 (b)'de gösterildiği gibi simetrik olmayan bir pozisyonda bulunmaktadır.



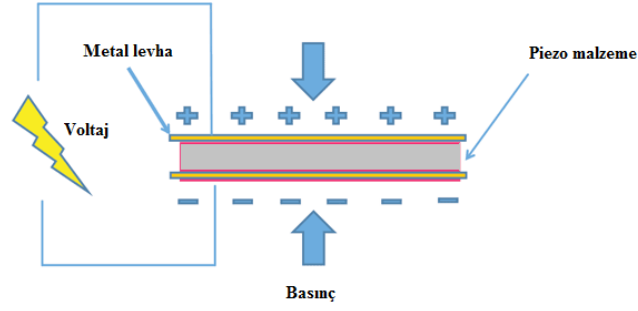
Şekil 2.2. Perovskit Yapı (a) Curie sıcaklığının üstündeki kristal görünüm (b) Curie sıcaklığının altındaki kristal görünüm [7]

2.2. Piezoelektrik Etki

Kutuplaşmış yapıdaki bir iyon sal kristale basınç uygulandığında kutuplar arası uzaklık azalır, yüzeydeki yük artar, böylece iki uç arasında bir gerilim farkı oluşur. Bu uçlar bir iletkenle birleşirse elektriksel akım meydana gelir. Bu, mekanik etkinin elektriksel bir büyüklüğe dönüşmesidir. Diğer yandan, bu kristalin iki ucu arasında ‘-’ yükler ‘+’ elektroda, ‘+’ yükler ‘-’ elektroda doğru yönelir. ‘+’ ve ‘-’ yük merkezleri arasındaki mesafe artar ve kristalde bu doğrultuda boyutsal bir genişleme sağlar. Elektrik alanın yönü değişirse aynı yüklü işaretler birbirini iter ve kristalin boyu kısalmır. Böylece ilk durumun tersine elektriksel etki mekanik bir büyüklüğe dönüşür. Malzemenin bu davranışlarına piezoelektrik özellik denir [8]. Malzemede görülen bu etkiler düz ve ters piezoelektrik etki olarak adlandırılmıştır.

2.2.1. Düz piezoelektrik etki

Düz veya direkt piezoelektrik etki, elektriksel polarizasyonun malzemenin maruz kaldığı gerilmeyle orantısal olarak değişmesi olarak tanımlanabilir. Dışarıdan mekanik bir stresin uygulanması malzemede dielektrik yer değiştirmeye yol açarsa bu malzemenin piezoelektrik malzeme olduğu söylenebilir. Bu yer değiştirme kendini iç elektrik polarizasyonu olarak gösterir. Piezoelektrik etkinin büyük ölçüde kristalin simetrisine bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Yeterince düşük simetriye sahip bir kristal, harici mekanik kuvvetin etkisi altında elektrik polarizasyonu üretir [9]. Şekil 2.3.’te düz piezoelektrik etki şematik olarak verilmiştir.



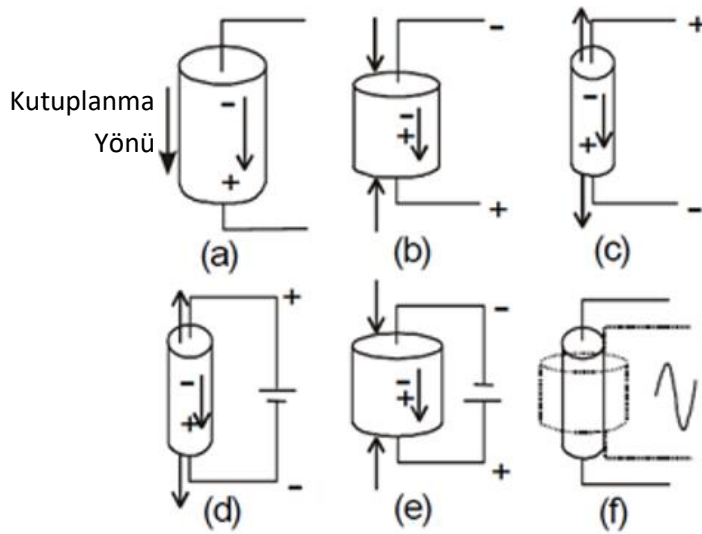
Şekil 2.3. Düz (direkt) piezoelektrik etki [10]

2.2.2. Ters piezoelektrik etki

Malzemeye bir elektrik alanı uygulandığında mekanik bir deformasyon meydana gelmesi (maddenin kısalıp genişlemesi) ise ters piezoelektrik etki olarak adlandırılır. [11]

Her iki etki de, simetri merkezi olmayan kristallerin aynı temel özelliğinin yani piezoelektrikliğinin bir sonucudur.

Düz ve ters piezoelektrik etki Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Şekil 2.4 (a), gerilim veya yük olmadan piezoelektrik malzemeyi göstermektedir. Malzeme sıkıştırılırsa, elektrotlar (b) arasında kutuplama voltajıyla aynı polariteye sahip bir voltaj görünecektir. Gerilirse, karşıt kutup voltajı görünecektir (c). Tersine, bir voltaj uygulanırsa malzeme deforme olur. Kutup voltajı ile ters polariteye sahip bir voltaj, malzemenin genişlemesine neden olur, (d) ve aynı polariteye sahip bir voltaj malzemenin (e) sıkışmasına neden olur. Bir AC sinyali uygulanırsa, malzeme sinyal (f) ile aynı frekansta titreşir.



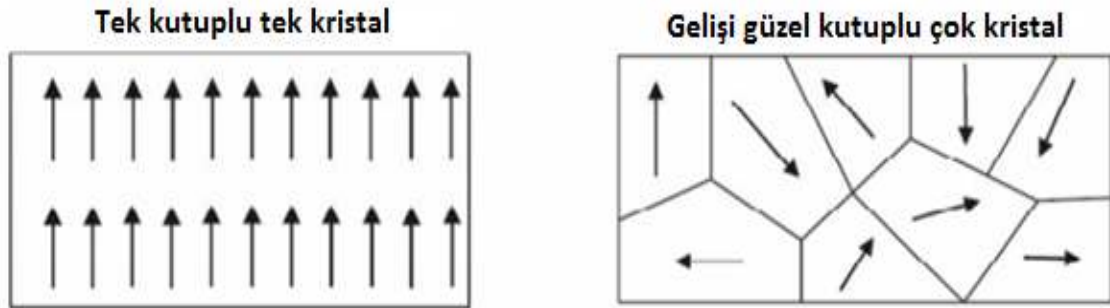
Şekil 2.4. Düz ve ters piezoelektrik etki [11]

2.3. Kutuplama

Piezoelektrik etki 32 kristal sınıfından 20'si tarafından sergilenir ve her zaman merkezi olmayan kristaller ile ilişkilendirilir. Kuvars gibi doğal olarak oluşan malzemeler, kristal yapılarının bir sonucu olarak bu etkiyi zaten gösterirler. Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi mühendislik ürünü malzemeler, piezoelektrik davranış sergilemek için kutuplama adı verilen bir işleme tabi tutulur (http-1).

Doğal piezoelektrik malzemeler tek kristalli yapıya sahiptirler ve tüm kristal yapı boyunca yük dağılımları dengede halindedir. Bu tür malzemeler yük dağılımlarının dengede olmasından dolayı herhangi bir kutuplama işlemine gerek kalmadan doğal olarak piezoelektrik özellik yansıtırlar. Yapay piezoelektrik malzemeler ise imalat aşamasındaki sinterleme işleminden dolayı çok kristalli yapıda olurlar. Çok kristalli malzemeler gelişigüzel yük dağılımından ve çok taneden oluştuğu için malzemede makroskopik ölçekte piezoelektrik özellik sıfırlanmaktadır.

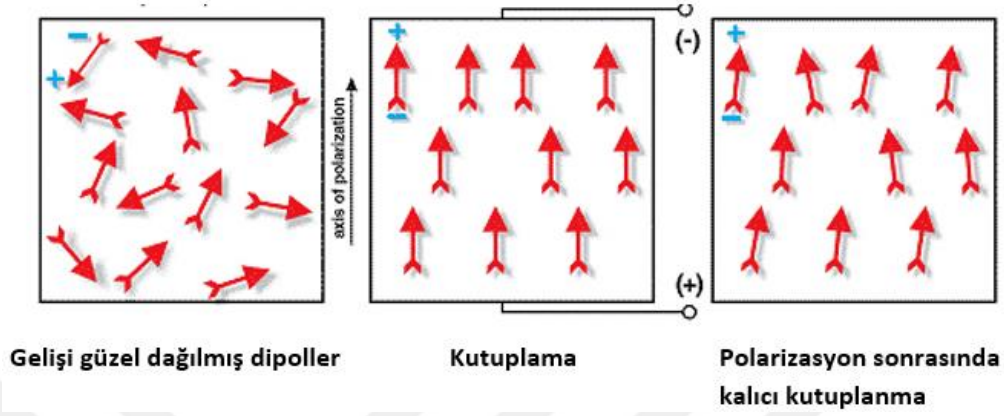
Şekil 2.5'te tek kristalli ve çok kristalli piezoelektrik malzemelerin yük dağılımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tek ve çok kristal piezoelektrik malzemeler arasındaki fark

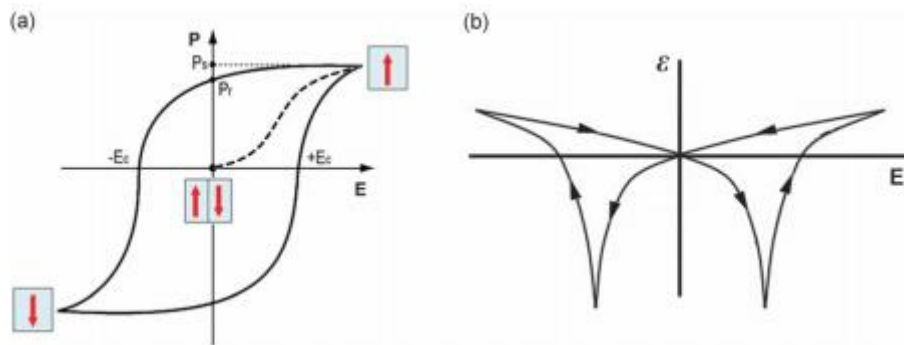
Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda piezoelektrik kristallerdeki kutuplanma bozulur ve birim hücre yük dağılımı bakımından yeniden simetrik yapı hale dönüşür. Yapay piezoelektrik malzeme üretilebilmesi için malzemeye kutuplama prosesinin uygulanması gerekmektedir. Kutuplama, piezoelektrik malzemelerin Curie sıcaklığının üzerine ısıtılması ve kutuplanma yönünde güçlü bir elektriksel alan uygulanması ile sağlanır. Uygulanan elektrik alanının etkisiyle, rastgele dağılmış olan kutuplar elektriksel alanın yönüne bağlı olarak yönlenmektedir. Bütün tanelerde tam bir yönlenme söz konusu olmayabilir. Tanelerdeki yönlenmenin ardından, elektrik alan uygulanmaya devam edilerek malzemenin soğumasına kontrollü olarak izin verilir. Böylelikle malzemede

kutuplanma kalıcı hale gelmiş olur. Malzemede Curie sıcaklığın altında piezoelektrik özelliğin kalıcılığı bu yöntemle sağlanmaktadır. Kutuplama işlemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Piezoelektrik seramiklerin kutuplama işlemi (<http-2>)

Malzemeye belirli bir elektrik alan uygulanmasıyla kutuplanma meydana gelir ve bu küçük boyuttaki atomlar, elektrik alanın yönüne göre yer değiştirirler. Atomların bu yer değiştirmesi makro boyutta en fazla %0.5'lik boyutsal bir değişime olanak sağlar. Malzemeler ise elektrik alanın yönüne ve şiddetine bağlı olarak polarizasyon durumlarını değiştirip histeresis döngüsü adı verilen bir döngü oluştururlar. Bu döngü Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Elektrik alana bağlı polarizasyon ve deformasyon eğrileri [12]

Şekil 2.7 (a)'da Malzemeye E elektrik alanı uygulandığında yönlenme maksimuma ulaşır (Ps). Elektrik alan kaldırıldığında domainler gevşer ve piezoelektrik malzeme, kararlı olan kalıcı polarizasyon değerine (Pr) ulaşır. Elektrik alan ters yönde verildiğinde ise

malzeme benzer şekilde bu defa da ters yönde maksimum polarizasyona ulaşır. Ters yöndeki elektrik alan kaldırıldığında domainler yine gevşer. Bu bir döngüdür. Şekil 2.7 (b)'de ise elektrik alan piezoelektrik malzemeye uygulandığında malzeme deformasyona uğrar. Elektrik alan kaldırıldığında malzeme eski haline döner. Elektrik alan tersine uygulandığında malzeme ters yöne deformasyona uğrar. Bu deformasyon genellikle ilk deformasyon değeri kadar olmaz. Burada da kelebek eğrisi (butterfly curve) adı verilen bir döngü oluşur.

2.4. Piezoelektrik Özelliğin Kullanım Alanları

Malzemelerin düz piezoelektrik özelliği transdüserlerde, gerilme değişim algılayıcılarında ve ani basınç değişimi algılama sistemleri gibi aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ters piezoelektrik özellik ise genel olarak eyleyicilerde kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin amaçlanan uygulamaya uygunluğu için gerekli piezoelektriksel özelliklere sahip olup olmadıkları hem deneysel hem de teorik yöntemlerle araştırılmaktadır.

Uygun tasarım ve malzeme seçimi ile piezoelektrik malzemeler 1Hz ile birkaç MHz frekans aralığında kuvvet veya malzemedeki boyutsal değişimleri tespit edebilmektedir. Boyutsal değişimler mikrometre mertebesinde tespit edilebilirken kuvvet ölçümleri mN-kN aralığında hassas olarak yapılabilir [6].

2.5. Piezoelektrik Etkinin İfade Edilmesi

Piezoelektriklik anizotropik bir özellik olduğundan düz ve ters piezoelektrik özellik farklı eşitliklerle ifade edilir. Düz piezoelektrik etki (2-1) numaralı eşitlik ile ifade edilirken ters piezoelektrik etki ise (2-2) numaralı eşitlik ile ifade edilir.

(2-1)

$$P_i = d_{ijk} X_{jk}$$

$$X_{ij} = d_{kij} E_k \quad (2-2)$$

Bu eşitliklerde yer alan terimler ve alt indisleri aşağıdaki gibidir:

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

d_{ij} = Piezoelektrik katsayı, C/N

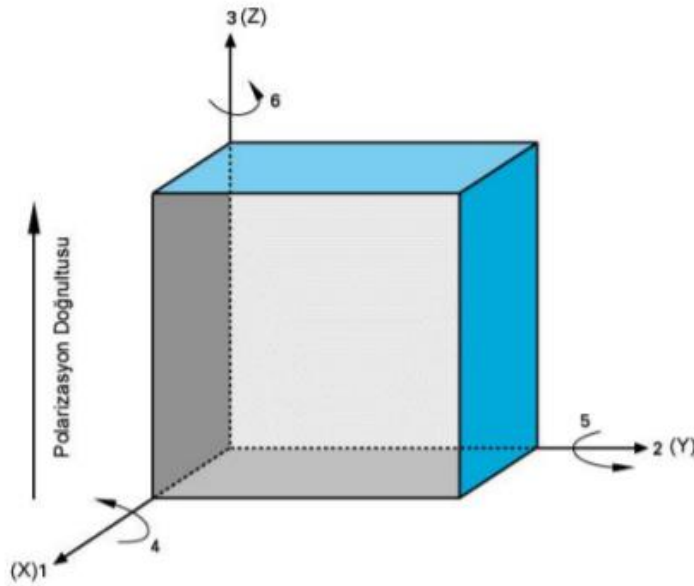
X_{jk} = Gerilim, N/m²

X_{ij} = “k” yönünde uygulanan elektrik alan ile kristalin şekil değişikliği sonucu oluşan gerinme, m/m

E_k = Elektrik alan, V/m

2.6. Piezoelektrik Malzemelerde Ölçülen Temel Parametreler

Piezoelektrik özellikler yöne bağlı olarak değişebildiği için bu özellikler tensörlerle ifade edilmektedir. Tensörlerde alt indisler belirli anlamlar ifade etmektedir., X-Y-Z koordinat sisteminin çoğunlukla Z doğrultusu pozitif polarizasyon doğrultusunu belirtir. X-Y-Z doğrultuları sırasıyla 1, 2, 3 alt indisleriyle temsil edilir ve bu doğrultuların herhangi birinden gerçekleşen kayma sırasıyla 4, 5, 6 alt indisleriyle verilir ve bu indisleme sistemi her bir piezoelektrik sabiti için geçerlidir. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Polarize edilmiş piezoelektrik malzemelerin anizotropik davranışlarını ifade etmek için kullanılan alt indis sembolleri [14]

Piezoelektrik malzemelerde fonksiyonellik aşağıdaki temel denklemlerle tanımlanmıştır.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2-3)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2-4)$$

D dielektrik yerdeğiştirme, d piezoelektrik katsayısı, T stres, ϵ dielektrik sabitesi (geçirgenlik), E elektrik alanı, S deformasyon, s malzeme uyumu (elastisite modülünün tersi) [1].

Aşağıdaki temel denklemler direkt (2-5) ve ters piezoelektrik etkiyi (2-6) tanımlamaktadır.

$$D_3 = d_{33}T_3 \text{ (direkt piezoelektrik etki)} \quad (2-5)$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \text{ (ters piezoelektrik etki)} \quad (2-6)$$

Piezoelektrik uygulamalardaki verimlilik hesaplamaları açısından malzemeye uygulanan elektriksel ve mekanik kuvvetlerin yönleri önemlidir.

Piezoelektrik malzemelerde sabiteler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Constant stres, serbest (stres free),

Constant field (kısa devre)

Constant displacement (açık devre)

Constant strain (kısıtlanmış) olarak tanımlanmıştır. [1]

d sabiti, yöne bağılı olup kısa devre koşullarında sabit kuvvet uygulandığında birim alanda ölçülen yük değerini ifade eder. Örnek olarak d_{31} ifadesi 1 yönündeki kuvvete karşılık 3 yönünde elde edilen elektriksel yük değerini ifade eder. Birimi C/N veya m/V dur.

g sabitesi yine yöne bağılı olup açık devre koşullarında sabit kuvvet uygulandığında birim alanda ölçülen yük değerini ifade eder. Birimi V/N'dur.

Dielektrik sabite, esasen bir oranı ifade eder. Bu sabite, iki iletken levha arasındaki bölgenin dielektrik geçirgenliğinin havanın dielektrik geçirgenliğine oranıdır.

$$K = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (2-7)$$

Formülde K dielektrik sabiteyi, C bölgenin kapasitansını (F), t kalınlığı (m), ϵ_0 havanın dielektrik geçirgenliğini ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), A ise elektrotlu bölgenin alanını (m^2) ifade eder.

Dielektrik kayıp, dielektrik malzemelerde alternatif gerilimde malzeme içerisinde sızıntı direnci veya dielektrik absorpsiyondan kaynaklanan yük birikmesinin neden

olduğu kayıplara denilmektedir. Kayıp faktörü, $\tan \text{ loss}$, $\tan \delta$ olarak ifade edilebilmektedir.

Mekanik kalite faktörü, resonator ya da osilatör uygulamalarında titreşim direnci olarak bilinir. Bu değerin yüksek olması daha kararlı bir çalışma performansı sergilendiğini gösterir [15].

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi C Z_m f_r (f_a^2 - f_r^2)} \quad (2-8)$$

Formülde Q_m mekanik kalite faktörünü, f_a antirezonans frekansını, f_r rezonans frekansını, Z_m rezonans anındaki direnci ifade etmektedir. Sert PZT’lerde Q_m değerinin yüksek olduğu görülmekte ve bu malzemeler yüksek güç uygulamalarında özellikle tercih edilmektedirler.

Piezoelektrik malzemeler belirli koşullar altında piezoelektrik özelliklerini kaybederler. Buna **depolarizasyon** denir. Depolarizasyon, malzemenin maruz kaldığı sıcaklığa, kuvvete veya yaşlanmasına bağlı olarak görülebilir. Çok kristalli piezoelektrik malzemelerin, karakteristik bir kritik bir sıcaklığın üzerine çıkılmasıyla domain yönelmelerinin başlangıç haline döndüğü sıcaklığa **Curie Sıcaklığı** denilmekte ve T_c olarak gösterilmektedir [16].

Histeris eğrisinin kareselliği aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$R_{sq} = \frac{P_r}{P_s} + \frac{P_{1,1} E_c}{P_s} \quad (2-9)$$

Hesaplama histeris eğrisindeki değerler kullanılarak yapılmaktadır. İdeal karesellik değeri 2 olmakta ancak bu değer malzemenin malzemeye değişkenlik gösterebilmektedir [17].

2.7. Piezoelektrik Özelliği Etkileyen Faktörler

Malzemelerin piezoelektrik özelliğini etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Yorulma, yaşlanma, mekanik sınırlamalar, elektriksel sınırlamalar ve ısısal sınırlamalar bu etkenler arasında sayılabilir. Bahsedilen etkenlerin malzemelerin piezoelektrik özelliğine etkisi aşağıda açıklanmıştır.

2.7.1. Yorulma ve yaşlanma

Birçok piezoelektrik malzeme, üzerine tesir eden elektrik alanının çevrim sayısına bağlı olarak elektriksel özelliklerinde kayıplar yaşar. Bu durum **yorulma** olarak tanımlanmaktadır [18].

Yaşlanma ise dış koşullardan bağımsız olarak piezoelektrik malzeme özelliklerinde zaman içerisinde yaşanan kayıp veya azalma olarak tanımlanabilir. Yaşlanma, herhangi bir zorlanma olmaksızın normal şartlarda performans gösteren bir piezoelektrik malzemede bile görülebilirken yaşlanmanın hızı seramik elemanın kompozisyonuna ve seramik elemanın üretimi için seçilen imalat yöntemine göre değişebilmektedir. Dolayısıyla piezoelektrik özellikleri ifade eden değerler belli süreler için geçerlidirler. [19].

Piezoelektrik özelliklerden daha uzun süre faydalanılabilmesi için seramik malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal limitleri dahilinde kullanılması gerekmektedir.

2.7.2. Mekanik sınırlamalar

Piezoelektrik malzemede, piezoelektrik özellik malzemeye uygulanan mekanik yükün büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Bununla birlikte piezoelektrik malzemeye uygulanan mekanik gerilme büyüklüğü bölgelerin yönlenmelerini bozmaya yetecek büyüklüğe ulaşması veya geçmesi malzemenin piezoelektrik özelliği üzerinde olumsuz etki yaratacak ve bu durum malzemeye kutuplanma ile kazandırılan piezoelektrik özelliğin kısmen veya tamamen ortadan kalkmasına sebep olacaktır. Piezoelektrik malzemenin mekanik gerilmeye dayanma gücü malzemenin malzemeye değişmektedir [7].

2.7.3. Elektriksel sınırlamalar

Kutuplanmış bir piezoelektrik malzemeye, kutuplanma işleminden sonra kutuplanma yönüne zıt yönde ve güçlü bir elektrik alan uygulanırsa malzeme depolarize olur. Depolarizasyonun derecesi, malzemeye uygulanan ters elektrik alanının uygulanma süresine, malzemenin bulunduğu ortamın sıcaklığına ve çevresel etkenlere bağlıdır. Örnek olarak, 200-500 V/mm aralığında veya daha büyük değerlerde elektrik alan

uygulanması piezoelektrik malzemelerde önemli derecede depolarizasyona sebep olmaktadır [20]

Malzemelerin piezoelektrik özelliklerine alternatif akımın da etkisi olmaktadır. Piezoelektrik malzemelere alternatif akım uygulanması durumunda, piezoelektrik malzemenin kutuplaşmasının alternatif akıma ters olduğu durumlarda depolarizasyon görülecektir. Bu yüzden piezoelektrik malzemeler alternatif akıma maruz bırakılmamalıdır [21].

2.7.4. Isısal sınırlamalar

Malzemelerin piezoelektrik özelliği çalışma sıcaklığından etkilenmektedir. Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik özellikler bu sıcaklık artışına sıcaklığa bağlı olarak azalır. Piezoelektrik malzemeler, bu özellikteki malzemeler için kritik sıcaklık değeri olan Curie sıcaklığına ısıtılacak olursa, malzeme içerisindeki domainler (bölgeler) yok olacak ve malzeme depolarize olacaktır. Bunun ardından piezoelektrik malzeme oda sıcaklığına veya uygun çalışma sıcaklığına getirilse dahi piezoelektrik özellik göstermeyecektir. Bu sebeple piezoelektrik malzemelerin çalışma sıcaklıkları Curie sıcaklıklarının altında olmak zorundadır. Piezoelektrik seramik malzemeler için genel olarak tavsiye edilen üst çalışma sıcaklığı, Curie sıcaklığının yarısıdır. Tavsiye edilen bu sıcaklık değerlerindeki kullanımlarda, malzeme domainlerinin dizilimindeki değişimler geri dönüştürülebilir. İlave olarak malzemenin maruz kalacağı sıcaklık dalgalanmalarına dikkat edilmelidir. Ani sıcaklık değişimleri piezoelektrik seramik bir elemanı depolarize edebilecek nispeten yüksek voltajlar üretebilirler [7].

Sonuç olarak, piezoelektrik bir malzemenin piezoelektrik özellikleri yukarıda belirtilen etkenlerin etkisiyle azalabilir veya hepten kaybolabilir. Bu sebeple piezoelektrik malzeme seçimi, çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Çalışma koşulları altında bozulma veya değişime uğrama süresi ne kadar uzunsa malzemenin o kadar kararlı olduğu ifade edilebilir.

3. PIEZOELEKTRİK MALZEMELER

Piezoelektrik malzemeler, doğal piezoelektrik malzemeler (rochelle tuzu, kuvars, vb.), piezoelektrik seramik malzemeler (PZT, baryum titanat, kurşun titanat, vb.), polimer piezoelektrik malzemeler (vinilidin florür, naylon, trifloretilen, tetrafloretlen vb.) ve kompozit piezoelektrik malzemeler olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir.

3.1. Piezoelektrik Doğal Kristal Malzemeler

Doğal piezoelektrik malzemelerden, en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için mevcut kristalleri belirli kristalografik doğrultuları göz önünde bulundurarak kesmek ve şekillendirmek gerekir [13].

Kuvars kristali piezoelektrik doğal kristaller içerisinde en yaygın kullanılanıdır. Günümüzde kuvarslar sentezlenmiş olarak kullanılırlar. Bu kristaller yüksek eğilmezlik ve dielektrik özelliklere sahip olduklarından frekans oluşturmada ve frekans sabitleyici olarak geniş kullanım alanına sahiptirler. Kuvars kristali günümüzde hızlandırıcılarda da kullanılsa da bu kristalin özellikle elektromekanik enerji dönüşümünün esas olduğu uygulamalarda sıklıkla kullanılmasının nedeni elektromekanik çift katsayısının düşük olmasıdır. Bir kuvars kristali grubu Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Turmalin ve lityum sülfat, yüksek voltaj sabitlerinden (gh) dolayı ticari hidrofonda günümüzde bile kullanılan iki kristal piezoelektrik malzemedir. Bu kristaller şok ve hava akımı ölçümleri için de kullanılmışlardır. 4000C’ye kadar yüksek hassasiyetlerine korumalarından dolayı Lityum tantalat (LiTaO_3) ve lityum niyobat (LiNbO_3), yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde kullanılmaktadır. Bu iki kristalin (LiTaO_3 - LiNbO_3) dışında yüksek sıcaklıklarda kararlı olmaları sebebi ile tercih edilen diğer kristaller; $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ve $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ kristalleridir [13].



Şekil 3.1. Kuvars kristalleri (<http-3>)

Doğal kristaller, yüksek kararlılık sergilemeleri sebebiyle sensör uygulamaları için en uygun piezoelektrik malzemeler olarak kabul edilirler. Kararlı olmaları sistemde kullanılan sensörün daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Diğer yandan en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için kristal doğrultular göz önüne alma zorunluluğu en büyük dezavantajlarıdır. Yaygın kullanılan piezoelektrik kristallerin oda sıcaklığındaki özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Yaygın kullanılan piezoelektrik kristallerin oda sıcaklığındaki özellikleri [13]

Kristal	Kimyasal Formülü	$d(pC/N)$	K_{11}^T	K_{33}^T
Rochelle Tuzu	$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	2300 (d_{14})	1100	6,2
Turmalin	$CaAl_3Mn_6(BO_3)_3(SO_3)_6(OH)_4$	3,6 (d_{15})	8,2	7,5
Kuvarz	SiO_2	2,3 (d_{11})	4,6	4,7
Lityum Niobat	$LiNbO_3$	68 (d_{15})	84,0	30
Lityum Tantalat	$LiTaO_3$	26 (d_{15})	51	45

3.2. Piezoelektrik Seramikler

Seramik piezoelektrik malzemeler korozyon ve atmosferik etkiler gibi bozucu şartlara karşı daha yüksek dayanıma sahiptirler ve aynı zamanda kimyasal olarak tepkimeye girmemektedirler. Bu özellikleri değişken iklim ve atmosfer koşullarında kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Doğal piezoelektrik malzemelere nispeten piezoelektrik seramiklerin sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler daha yüksektir. Bunun yanında seramik piezoelektrik malzemelerin farklı şekil ve boyutlarda üretilibilmeleri, bu malzemeleri, farklı kullanım alanları ve fonksiyonlar için uygun kılmaktadır [20, 22].

Piezoelektrik seramikler, genelde perovskit kristal yapısına sahiptirler. Bu malzemeler genel olarak yapıyı oluşturan elementlerin oksitlerinin tozları kullanılarak imal edilirler.

3.2.1. Piezoelektrik seramiklerin imalatı

Piezoelektrik seramikler metal oksit tozları ve organik bağlayıcıların karıştırılıp kalıp içerisine konulması ve ardından sinterlenmesi ile imal edilmektedir. Kalıpların şekilleri amaçlanan kullanıma göre çok farklı olabilmektedir. Bunun yanında ince filme döküm yöntemiyle ince piezoelektrik levhalar da üretilebilmektedir [23]. Yaygın olarak plaka, disk ve çubuk şeklinde kullanılırlar. Piezoelektrik seramikler, seramik üretiminin son aşamasından sonra kuvvetli bir DC elektrik alanına maruz bırakılarak piezoelektrik özellik kazanmaları sağlanmaktadır. Günümüzde zehirleyici ve zararlı etkilerinden kaçınmak için kurşunsuz malzeme kullanımına önem verilmektedir. Bu amaçla NaKNb gibi piezoelektrik malzemeler geliştirilmektedir [24].

3.2.2. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler

Piezoelektrik seramikler yumuşak ve sert piezoelektrik olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Piezoelektrik seramiğin bileşimine donör katkılar eklendiğinde elde edilen seramik malzeme yumuşak piezoelektrik seramik olarak isimlendirilirken, akseptör katkılar eklendiğinde elde edilen seramik malzeme sert piezoelektrik seramik olarak isimlendirilmektedir. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramik malzelerin birbirlerine göre farklılıkları Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması [7]

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

İnsan yapımı ilk piezoelektrik seramik Baryum Titanat (BaTiO_3)'tır. Lityum Niyobat (LiNbO_3), Lityum Tantalat (LiTaO_3) ve PZT de günümüzde yaygın kullanılan piezoelektrik seramik malzemeler arasında yer almaktadır [20].

Bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Yaygın kullanılan piezoelektrik seramiklerin piezoelektrik özellikleri [13]

Piezoelektrik Seramik	Curie Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/N)	K^T_{33}	k_{33}	k_{31}
BaTiO_3	115	190	-78	1700	0,5	0,21
PbTiO_3	470	56	-	190	0,45	-
PbNb_2O_6	570	85	9	225	0,38	0,045
KNaNb_2O_6	420	127	-51	495	0,6	-0,27
$\text{Ba}_{0,4}\text{Bi}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$	260	220	-90	1500	0,55	0,22
LiNbO_3	1150	6	-	25	0,23	0
$\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Ti}_2\text{O}_5$	320	70	15	300	0,4	0,1

3.2.3. Baryum titanat (BaTiO_3)

Baryum titanat birçok piezoelektrik seramik gibi perovskit yapıya sahiptir. Bunun bir sonucu BaTiO_3 olarak piezoelektrik özellik göstermektedir ve bulunan ilk piezoelektrik malzemedir. Dielektrik sabitinin oldukça yüksek olması sebebi ile BaTiO_3 yüksek kapasiteli kapasitörler uygulamalarında sıkça kullanılan bir seramik malzemedir. Diğer yandan BaTiO_3 'ün Curie sıcaklığının yaklaşık 120°C ' olması sebebiyle bu malzemenin yüksek güç kapasitörleri gibi birçok uygulama için kullanımı sınırlanmış olur. BaTiO_3 'ün diğer bir dezavantaj enerji dönüştürme oranının da oldukça düşük olmasıdır. Bu özelliği sebebiyle BaTiO_3 transduser uygulamalarında da tercih edilmez. Kurşun Zirkonyum Titanat'tan (PZT) farklı olarak BaTiO_3 kararlı oksitlerden üretilir ve sinterlenmesi PZT sinterleme sürecine göre daha kolaydır [13, 19].

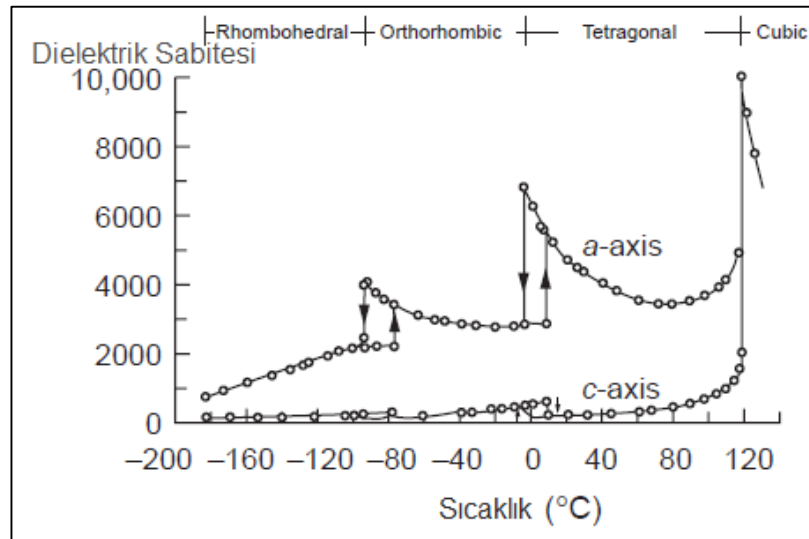
Piezoelektrik seramiklerin kompozisyonuna bazı katkı maddelerin eklenmesi ile piezoelektrik özelliklerin iyileştirilmesi mümkündür. Aynı amaçla BaTiO_3 için de bazı katkı malzemeleri kullanılabilmektedir. Örnek olarak Sr ilavesi edilmesiyle, BaTiO_3 'ün Curie sıcaklığında artış sağlanabilir ve kullanım alanı genişletilebilir. Ca ilave edilmesi ise tetragonal fazdaki sıcaklık aralığının genişletilmesi sağlanabilir. Yüksek elektrik alan

altında dielektrik sabiti piezoelektrik katsayılarının olumsuz yönde etkilemeden artırılması için Co takviyesi yapılmaktadır [13].

Yüksek dielektrik sabitine sahip olması, BaTiO_3 'ü kapasitör uygulamaları için uygun kılmaktadır fakat BaTiO_3 'ün kapasitör uygulamaları ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. BaTiO_3 çözeltisi içine uygun katkı malzemeleri eklenmesi ile ferroelektrik ve piezoelektrik özellikler korunmaya çalışılır. Curie sıcaklığını istenen özelliklere göre değiştirmek için BaTiO_3 çözeltisine PbTiO_3 , SrTiO_3 , CaZrO_3 , BaSnO_3 gibi malzemeler eklenir. Çözeltiye CaTiO_3 , $\text{Bi}_2(\text{SnO}_2)_3$, MgZrO_3 , NiSnO_3 gibi malzemeler eklendiğinde ise BaTiO_3 'ün Curie sıcaklığı aşağıya çekilebilir. Eklenen katkı malzemelerinin oranına göre yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeleri oda sıcaklığında elde etmek mümkündür [13].

Son yıllarda baryum titanat, 120°C civarlarında, pozitif sıcaklık katsayısı olarak bilinen PTC (ing. Positive Temperature Coefficient) termistör uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. BaTiO_3 'e Yitriya veya Lantan gibi bir katyonlar eklenmesiyle malzemenin ferroelektrik özellikleri olumsuz yönde etkilemeden yarı iletken malzeme elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Kurşunsuz piezoelektrik malzemelerin en önemlilerinden birisi olan Baryum titanat dielektrik özelliklerinden dolayı kapasitör uygulamalarında kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında tetragonal yapıda olan bu malzemenin dielektrik sabitesi sıcaklığa bağlı polimorfik dönüşümlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Baryum titanatın dielektrik sabitesinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Baryum titanatın dielektrik sabitesinin sıcaklığa bağlı değişimi [25]

Baryum titanatın Curie sıcaklığı 120°C'dir. Bu sıcaklığın üzerinde kübik yapıda olup dielektrik sabitesi 10000'in üzerindedir. 5°C-120°C arasında tetragonal yapıda, (-90)°C ve (+5)°C arasında merkezdeki titanyum atomunun polarizasyonundan kaynaklanan oksijen oktahedrasının distorsiyonu sebebiyle ortorombik kristal yapıdadır. Baryum titanat (-90)°C'nin altında ise rombohedral yapıdadır [25].

3.2.4. Kurşun zirkonat titanat (PZT)

PZT ilk olarak Tokyo Teknoloji Enstitüsünde Yutaka Tagaki, Gen Shirane ve Etsuro Sawaguchi isimindeki bilim insanları tarafından geliştirilmiş bir piezoelektrik malzemeledir. En sık kullanılan piezoelektrik malzemelerden biri olan PZT (ing. Lead Zirconate Titanate), veya kurşun zirkonyum titanat ($Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ $0 < x < 1$), kurşun ve zirkonyum kimyasal elementlerinin ve titanatın yüksek sıcaklıklarda birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Curie sıcaklığı altında (bu sıcaklık malzemeye bağlı olarak 150 °C - 250 °C aralığında değişmektedir) kübik bir yapıda dizilmiş olan atomlardan titanyum atomlarının kendi merkez konumlarından hareket etmesiyle elektriksel olarak nötr olan kafes, dipol bir hal alır. Titanyum atomlarının hareketi dipol kafesin piezoelektrik etki göstermesini sağlar.

PZT'nin saf olarak yaygın bir kullanım alanı yoktur. Çeşitli katkılarla bu malzemenin dayanım ve Curie sıcaklığı gibi özellikleri geliştirilerek kullanılmaktadır [21].

Fiziksel olarak güçlü, kimyasal olarak inert ve imalatı nispeten ucuz olduğu için tercih edilen PZT, belirli bir amaca yönelik gereksinimleri karşılaması için kolayca uyarlanabilir (http-4). Bu piezoelektrik seramikler işlenebilir olmaları bakımından tüp, yüzük, disk ve daha karmaşık geometrilerde hassas işlenebilirler. PZT'nin diğer piezo seramiklere göre daha fazla ilgi görmesinin başlıca nedenleri, yüksek hassasiyete, nispeten daha yüksek çalışma sıcaklığına, yüksek kararlılığa ve elektromanyetik iletim verimine sahip olmasıdır.

Doğal piezoelektrik malzemelerle karşılaştırıldığında PZT mekanik, fiziksel, kimyasal ve piezoelektrik özellikler bakımından daha üstündür. Bunlara ilave olarak, kimyasal kararlılığı da doğal piezoelektrik seramiklere göre daha iyidir. PZT, nem ve atmosferik koşullara karşı dayanıklı yapıdadır ve özel uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilir [13].

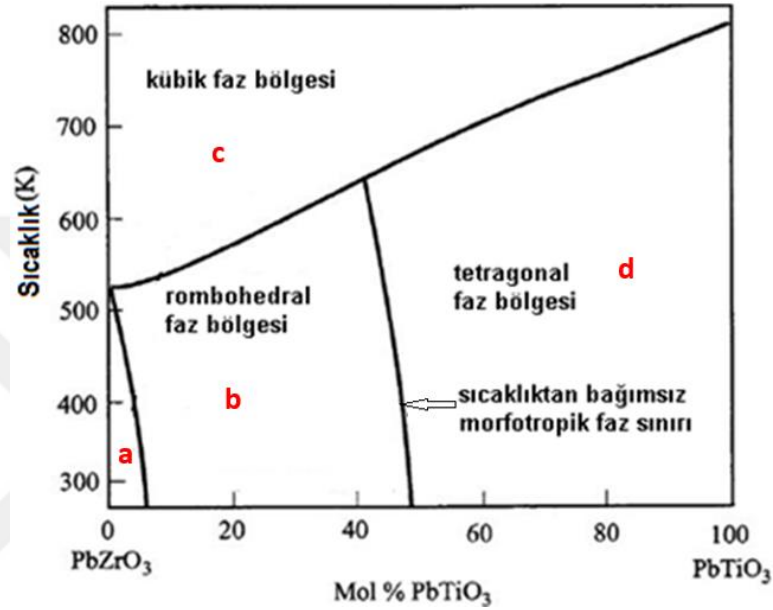
PZT üretimi için, başlangıçta toz halindeki PbZrO_3 ve PbTiO_3 metal oksitleri belirli oranlarda hassas şekilde ölçülerek karıştırılır ve homojen bir karışım elde edilir. Toz haldeki bu karışım bu formda saklanabileceği gibi karışıma bazı bağlayıcılar eklenerek farklı geometriler de elde edilebilir. Farklı geometrilerdeki seramik parçalar uygun sürelerde önceden belirlenmiş uygun pişirme programlarına göre fırınlanırlar. Bu işleme sinterleme denir. Bu prosesin amacı toz parçacıkların birbirine bağlanması ve yoğun kristal yapı elde edilmesidir. Sinterlemenin ardından elde edilen kristal yapıya çeşitli elektriksel işlemler uygulanarak piezoelektrik özellikler elde edilir [7, 13].

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

1950’li yıllarda yapılan çalışmalarda kurşun zirkonat titanat katı solüsyonunun üstün özellikleri olduğu ortaya atılmıştır. Tetragonal yapıya sahip olan kurşun titanat, (PbTiO_3) Baryum Titanat (BaTiO_3) ile benzerliği ve Curie sıcaklığının yüksek olmasıyla (500°C) bilinmektedir. Diğer yandan 1953 yılında kurşun zirkonatın ferroelektrik özellikler gösterdiği ortaya konmuştur ve bu malzeme ortorombik kristal yapıdadır. Kurşun zirkonat titanatta; kurşun atomları köşelerde kafesin iskeletini oluştururken, oksijen atomları yüzey merkezlerinde, titanyum veya zirkonyum atomları ise oksijen oktahedrasının merkezinde yer alır. Zr^{4+} katyonu tetragonal yapı içerisine girmesiyle kurşun titanat tetragonal yapısı rombohedral yapıya dönüşmeye başlar. Bahsedilen iki bileşik birbiri içerisinde çözünebilir [1].

Kompozisyon (PbTiO_3 ve PbZrO_3 tozlarının birleştirilme oranı) ve sıcaklığa göre farklılık gösteren kristal yapı, kübik, rombohedral ya da tetragonal yapıda olabilir. PZT’ye ait faz diyagramı Şekil 3.3’te gösterilmiştir. “a” bölgesi çözeltinin ferroelektrik özellik göstermediği bölgedir. “b” bölgesinde kristal yapı rombohedral, “c” bölgesinde kübik ve “d” bölgesinde de tetragonal’dır. Rombohedral ve tetragonal bölgeleri ayıran çizgi özel bir faz sınırı olup sıcaklıktan bağımsız morfotropik faz sınırı olarak adlandırılmaktadır.

Kullanım alanlarında farklı özelliklere ihtiyaç duyulması sebebiyle PZT çeşitli katkılarla modifiye edilmektedir. Bu katkıların eklenmesi sonucu değişen piezoelektrik özelliklere göre sert PZT veya yumuşak PZT olarak adlandırılır. Katkılanan atom girdiği bölgedeki atomun değerliğinden daha büyük değerlikli atomla yer değiştirir, birim hücrenin hareketine izin veriyorsa bu katkı donör katkı olarak adlandırılır. La^{3+} , Nb^{5+} vb. donör katkıların kullanıldığı kompozisyonlara **yumuşak PZT** denir.



Şekil 3.3. PZT faz diyagramı [26]

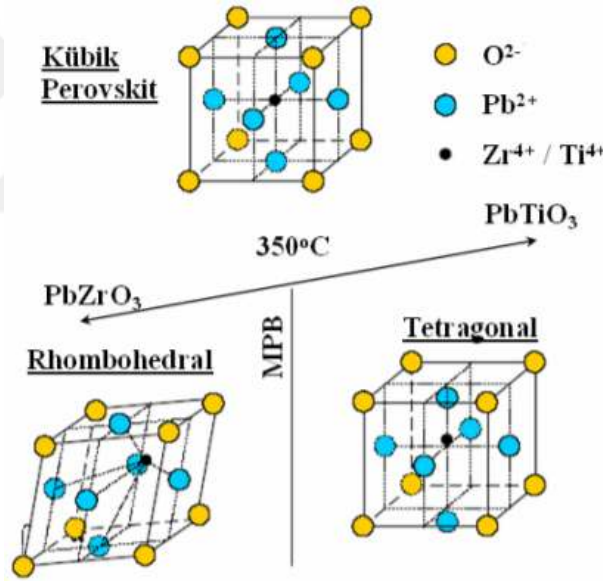
Bundan farklı olarak katkılanan atom, girdiği bölgedeki atomdan daha düşük valans değerliğine sahip olup, oksijen boşluğu oluşturuyorsa bu katkı akseptör katkı olarak adlandırılır. ABO_3 perovskit yapısında A yerleşimine yapılan donör katkılar La^{3+} , B yerleşimine yapılan akseptör katkılar ise Fe^{3+} , Mg^{2+} , Mn^{3+} , Co^{3+} vb. olup, sistemdeki çözünürlükleri sınırlıdır. Bunların değerlikleri Zr^{4+} ve Ti^{4+} atomlarından daha düşüktür ve sisteme eklendiklerinde oluşturdukları oksijen boşluğundan dolayı latis deformasyonuna sebep olurlar. Bu domain hareketini sınırlandırması ve seramiğin daha zor polarize olmasına neden olur. Bundan dolayı Fe^{3+} , Mg^{2+} , Mn^{3+} , Co^{3+} gibi katkıların kullanıldığı kompozisyonlara **Sert PZT** denir. Sert veya yumuşak olmalarına göre PZT seramiklerinin değişen piezoelektrik özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir [1].

Yüksek sıcaklıktaki bir PZT soğutulduğunda, PZT'de yaklaşık olarak 0.1Å^0 'lük atomik hareketlerin gerçekleştiği bir faz dönüşümü gözlemlenir. Curie sıcaklığında titanyum bakımından zengin olan PZT kompozisyonlarında, kübik $m3m$ yapının

tetragonal 4mm yapıya dönüştüğü görülür. Bu dönüşümle tetragonal yapıda [001] doğrultusunda oluşan polarizasyon, Curie sıcaklığı ile 0 K⁰ arasında kendisini korur [27].

Tablo 3.4. Yumuşak ve sert PZT’de piezoelektrik özelliklerin karşılaştırılması [1]

Sert PZT	Özellik	Yumuşak PZT
Düşük (<350)	d ₃₃ sabite değeri (pC/N)	Yüksek (>350)
Düşük (<1500)	Dielektrik sabiti	Yüksek (>1500)
Düşük (~0,6)	Dielektrik kayıp (%)	Yüksek (~2,0)
Yüksek (>150)	Mekanik Kalite Faktörü	Düşük (<100)
Düşük (~0,59)	Kapling sabitesi	Yüksek (>0,6)
Düşük	Direnç (rezonans anındaki)	Yüksek
Yüksek	Bozulma voltajı	Düşük
Düşük (~13)	Elastik Sabite (10 ⁻¹² m ² /N)	Yüksek (>16)
Yüksek	Yaşlanma etkisi	Düşük

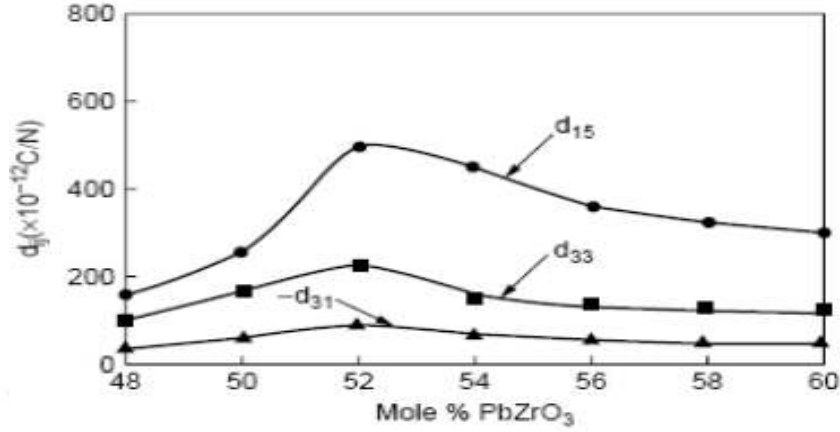


Şekil 3.4. Morfotropik faz yapısına sahip PZT’nin Curie sıcaklıklarında yapısal dönüşümü. [27]

PZT’ler genelde % 52-54 mol kurşun zirkonat, % 46-48 mol kurşun titanat içerirler ve perovskit (Preovskite) yapıya sahiptirler. Ancak farklı piezoelektrik özelliklere sahip PZT’ler elde edilmek istenirse farklı kompozisyonlar kullanmak gerekir. Örnek olarak Şekil 3.5’te kurşun zirkonat (PbZrO₃) miktarının piezoelektrik yük sabitlerine etkisi grafiksel olarak verilmiştir [28].

Katkı olarak kullanılan Ba, Sr, Ca ve La gibi elementler PZT’nin Curie sıcaklığı, malzeme kararlılığı ve dayanımı gibi karakteristik özelliklerini etkileyerek daha geniş bir

aralıkta çalışma imkanı sağlamaktadır [13]. Farklı kompozisyonlardaki PZT seramiklerin piezoelektrik özellikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. PZT'de piezoelektrik yük sabitlerinin kompozisyona bağlı değişimi

Tablo 3.5. PZT türlerinin piezoelektrik özellikleri [13]

PZT Türü	Curie Sıcaklığı (°C)	d ₃₃ (pc/N)	d ₃₁ (pc/N)	K ^T ₃₃	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

Son yıllarda kurşun içeriğinin azaltılması ve PZT'ye alternatif olabilecek kurşunsuz piezoelektrik malzeme kompozisyonları üretilmesi için bir takım çalışmalar başlatılmıştır. Bu kompozisyonlar KNN ve NBT olmak üzere iki ana perovskit ailesi olarak sınıflandırılabilir[29]. Yapılan bu çalışmalarda NBT-BT, KNN gibi

kompozisyonların geliştirilmesinin yanında bu malzemelerin birbirleriyle oluşturdıkları katı çözeltilerin iyi elektriksel ve ısı özellikler sergilediği de görülmüştür.

3.3. Piezoelektrik Polimerler

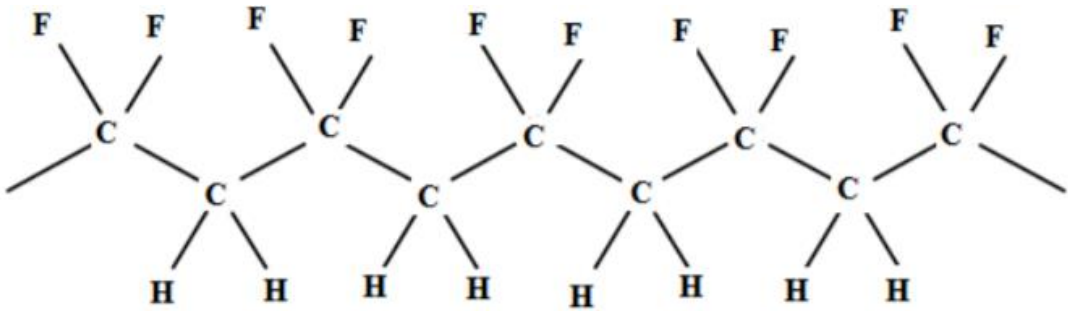
Seramik malzemelerin üretimi polimerlere göre daha zor ve maliyetli olduğu için polimerlerin önemi artmıştır. Büyük ve karmaşık şekillerdeki uygulamalar için polimerler daha uygundur. Piezoelektrik polimerlerin elektriksel özellikleri genel olarak endüstriyel seramiklerin çok altında olsa da seramik malzemelerin kullanımının sınırlı olduğu esnek yapılarda kullanılırlar. Piezoelektrik polimer bir malzemeye elektriksel potansiyel uygulandığında malzeme, uygulanan potansiyelin büyüklüğü ile orantılı olarak şekil değiştirir (incelir, uzar veya genişler). Bu malzemeye mekanik bir kuvvet uygulandığında (sıkıştırıldığında, gerildiğinde veya esnetildiğinde) ise uygulanan kuvvetin büyüklüğü ile orantılı bir voltaj çıktısı verir. Bir polimerin piezoelektrik olarak tanımlanabilmesi için kalıcı moleküler dipollere sahip olması, moleküler dipolleri yönlendirebilmesi, dipol yönlenmesini koruyabilmesi ve mekanik stres altında yüksek deformasyona dayanabilmesi gerekir. Piezoelektrik polimerler yarıkristal yapıda olup kendi moleküler yapıları içinde polarizasyonları vardır. Piezoelektrik polimerlerin önemli bir kısmı florakarbon esaslı polimerlerden oluşur.

Keşfedilen ilk piezoelektrik özellikli polimer PVDF'dir. PVDF'nin piezoelektrik özelliğinin keşfedilmesinden sonra araştırmacılar diğer polimerleri de piezoelektrik özellik kazandırılabilmesi açısından incelemişlerdir. Piezoelektrik özellik kazandırılabilen diğer 64 polimerden bazıları; poli tetra floro etilen (PTrFE), polivinil florid (PVF), polipropilen (PP), poliamid (PA), floro etilen epropilen (FEP), siklo olefinler (COC), polietilen tereftalat (PETP), poliparaksilen, poli bisklorometil oksetan polistiren, polimetil, polimetakrilat, polivinil, asetat ve naylonlar piezoelektrik özellik sergileyen polimer malzemelerdir [30]. Tablo 3.6'da yaygın kullanılan bazı piezoelektrik polimerlerin elektriksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.6. Yaygın kullanılan piezoelektrik polimerlerin elektriksel özellikleri [31]

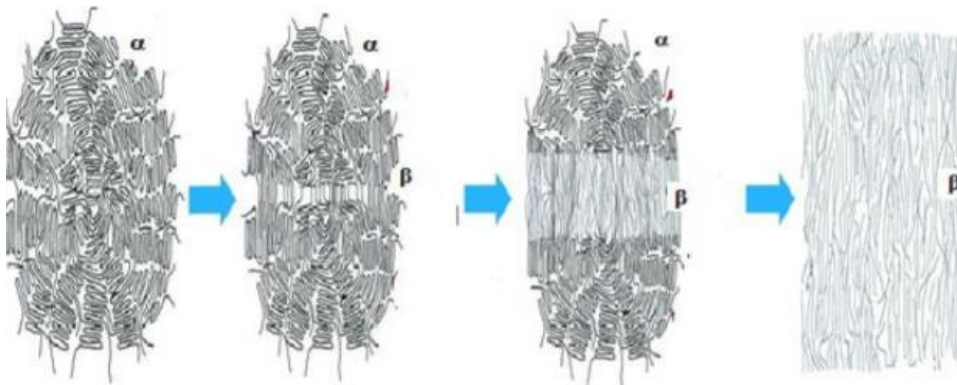
Polimer	Yapı	T _g (°C)	T _m (°C)	Azami Kullanım Sıcaklığı	d ₃₁ (pC/N)	Ref.
PVDF	$\left(\begin{array}{c} \text{F} \\ \\ \text{---C---CH}_2\text{---} \\ \\ \text{F} \end{array} \right)_n$	-35	175	80	20-28	2
PTrFE	$\left(\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ \text{---C---CH---} \\ \\ \text{F} \end{array} \right)_n$	32	150	90-100	12	2
Naylon-11	$\left(\text{NH---CH}_2\text{---C(=O)} \right)_n$	68	195	185	25 °C'de 3 107 °C'de 14	22
Poliüre-9	$\left(\text{CH}_2\text{---HN---C(=O)---HN} \right)_n$	50	180	-		28

Yukarıda bahsedilen polimerler arasında PVDF, ilk keşfedilen piezoelektrik polimer olmasının yanında en çok bilinen ve üzerine en çok çalışma yapılan piezoelektrik polimerdir. Poliviniliden florür (ing. Polyvinylidene fluoride) veya basitçe PVDF, üzerine bir basınç veya mekanik kuvvet uygulandığında piezoelektriklik üreten en önemli yarı kristalli polimerlerden biridir. PVDF'nin moleküler yapısı (-CF₂-CH₂-) şeklinde tekrarlanan bir monomer yapıda olup Şekil 3.6'da gösterildiği gibi flor -hidrojen atom çiftlerini içeren bir karbon iskeleti şeklindedir [32].



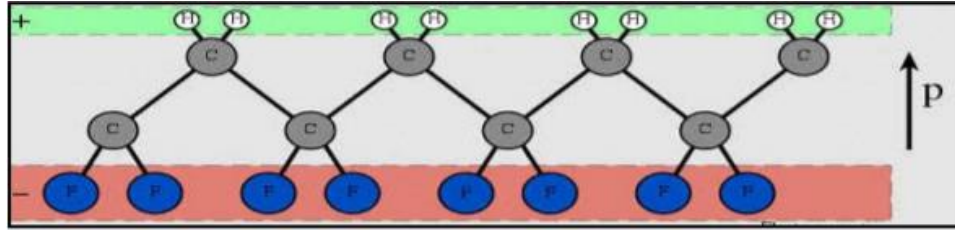
Şekil 3.6. Poliviniliden diflorürün moleküler yapısı [32]

PVDF'nin α , β , γ , δ ve ϵ olma üzere beş farklı kristal faz yapısı bulunmaktadır. Yapıdaki kristallik %50 ile %70 arasında değişmektedir. Bunun sebebi fazlar arasında çeşitli kimyasal ve fiziksel teknikler kullanılarak dönüşüm gerçekleştirilebilmesidir. Üzerine en fazla araştırma yapılan fazları α , β , γ şeklinde gösterilmiştir. α fazı PVDF'nin en kararlı yapıda olduğu faz olsa da birim hücresinin merkezi simetrik olması sebebiyle malzeme bu fazda piezoelektrik özellik göstermez. PVDF'nin piezoelektrik özellik sergileyebilmesi için sahip olduğu monomerin güçlü dipol momentine sahip olması gerekir. Hidrojen ve karbon atomları pozitif elektrona, flor atomu ise negatif elektrona sahiptir. Flor atomlarının polimer zincirinde dik olduğu durumda her bir zincir dipol momente sahip olur. β , γ ve δ fazlarında dipol moment görülür. Yani bu fazlarda birim merkez hücre simetrik değildir. Dipol momentinin en yüksek görüldüğü faz β fazıdır ve birim hücresinde $8 \times 10^{-30} \text{Cm}$ dipol momentini bulunur. α fazındaki PVDF β fazına geçince piezoelektrik özellik kazanır. α fazından β fazına geçiş için PVDF'ye çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler, yüksek basınç uygulanması, α fazının gerilmesi, elektrik alan uygulanması, baryum titanat, kil, hidratlanmış iyonik tuz, polimetil metakrilat (PMMA), titanyum oksit (TiO_2 dolgu maddelerinin eklenmesi, özel α fazının koşullar altında ultra hızlı soğutma veya 70°C 'nin altındaki sıcaklıklarda çözelti kristalleşmesi veya ferrit, paladyum veya altın gibi nanopartiküller ilave edilmesi olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar PVDF'ye gerdirme veya kutuplama işlemi uygulanmasıdır. Gerdirme ile polimer zincirleri, uygulanan gerilme yönünde hizalanır. Mekanik olarak gerdirme ile PVDF'nin α fazından β fazına dönüşüm aşamaları Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Katlanmış zincirlere sahip PVDF'nin α fazına mekanik gerdirme uygulandığında, kristal yapı, molekül zincirlerinin yönü boyunca uzanır. α -fazının deformasyonu β fazına evrilmeye sonuclanır.



Şekil 3.7. Mekanik gerdirme ile PVDF'nin α fazından β fazına dönüşüm süreci [33]

Dışarıdan elektrik alan uygulanarak yapılan kutuplama işleminde ise rastgele olan dipol momentleri belirli bir doğrultuda yönlendirilir ve bunun sonucunda PVDF, β fazına geçer. α fazındaki PVDF, bu malzeme için $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan Currie sıcaklığının altında, 90°C 'de 50MV/m elektrik alanı uygulanarak kutuplanır ve böylelikle β fazına dönüşüm sağlanır. Malzemede piezoelektrik özelliğin en güçlü görüldü β fazının kristal yapısı Şekil 3.8'de verilmiştir [34].



Şekil 3.8. PVDF'te β fazının moleküler dizilimi

Piezoelektrik polimerler esnek, tok ve hafif olup düşük akustik impedans, yüksek darbe direnci ve imalat kolaylığı gösteren malzemelerdir. Oldukça farklı ve karmaşık geometrilerde üretilebilmeleri sebebiyle uygulama alanlarında büyük avantajlara sahiptirler. Ancak bu gibi özelliklerine rağmen polarizasyon zorluğu sebebiyle PVDF'in piezoelektrik özellikleri piezo seramikler kadar iyi değildir. Bu malzemeleri polarize edebilmek için 120MV/m mertebesine kadar yüksek bir elektrik alanı oluşturmak gerekir. PVDF'nin bazı piezoelektrik özelliklerinin BaTiO_3 ve PZT ile karşılaştırılması Tablo 3.7'de gösterilmiştir [7, 34].

Tablo 3.7. PVDF'nin bazı piezoelektrik özelliklerinin piezoelektrik seramikler ile karşılaştırılması [7]

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

3.4. Piezoelektrik Kompozitler

Hem seramik esaslı hem de polimer esaslı piezoelektrik malzemelerin avantajlı yönlerinden faydalanmak amacıyla kompozit yapılı daha üstün özellikli piezoelektrik malzemeler geliştirilebilir. Bu tür malzemelere piezoelektrik kompozit veya piezokompozit malzeme denir. Bu tür malzemeleri üretmedeki temel amaç mekanik,

elektiriksel, fiziksel, kimyasal ve diğerk özellikler yönünden hem seramik hem de polimer malzemeden daha üstün bir malzeme elde etmektir. Piezoelektrik özellik gösteren veya göstermeyen polimer matris yapılar vardır. Piezoelektrik olmayan ana matris polimerler, örneğın ısıyla sertleşebilen epoksiler, akrilikler veya kauçuk ile piezoelektrik özellikli seramikler kullanılarak yapılan kompozitler başarılı olmuştur. Kurşun zirkonat titanat (PZT), kurşun titanat (PT), kurşun kalsiyum titanat (PTCa), ve kurşun titanyum oksit (PbTiO_3) seramikleri ve PVDF, epoksi, P(VDF-TrFE), kauçuk, ve akrilik kullanılarak oluşturulan kompozit yapılara ait d_{33} değerkleri Tablo 3.8’de verilmiştir. PZT seramiğı ve PVDF polimeri ile yapılan kompozitlerde d_{33} katsayısında önemli artışlar olduğu görölmüştür. Diğerk yandan kompozitleri polarize etmek daha kolaydır. Piezoelektrik özellikleri geliştirmek için karbon nanotüpleri (CNT’ler) kullanılmış ve PVDF’nin elastisite modülünde bir artış görölmüştür. Güçlü sensörlere ve vericilere olan talep kablosuz teknoloji uygulamalarının yaygınlaştığı günümüzde giderek artmaktadır. Kompozit yapıli piezoelektrik özellikli sensörler bu talebi karşılama potansiyeline sahiptir. [35]

Tablo 3.8. Kompozit piezoelektrik malzemelerin bileşenleri ve piezoelektrik gerinim katsayısı [35]

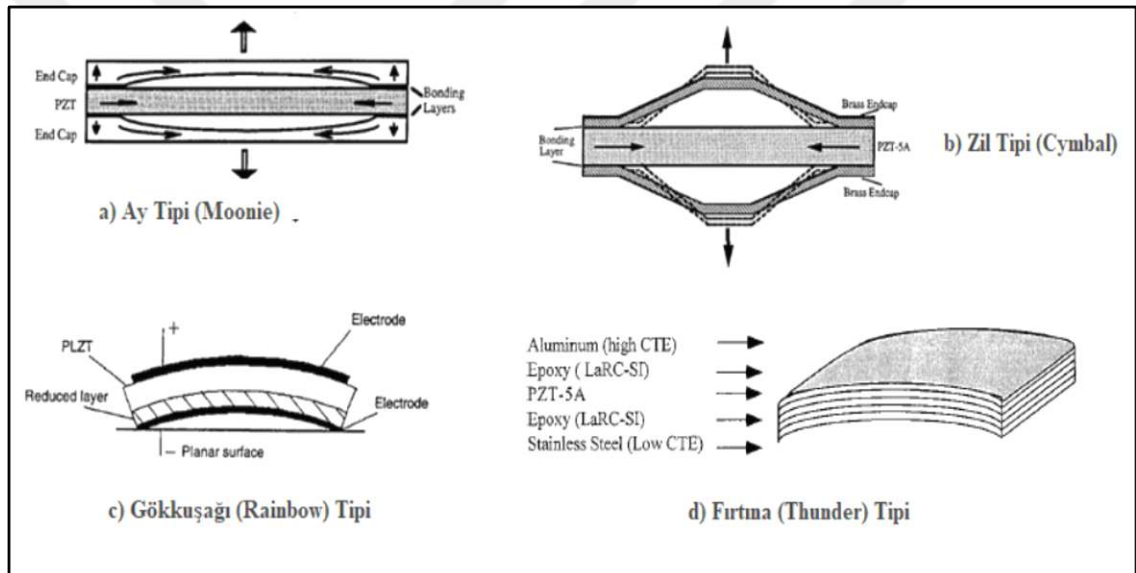
Seramik	Polimer	d_{33} (pc/N)
PTCa	Epoksi	22
PTCa	P(VDF-TrFE)	28
PTCa	Kauçuk	17-44
PT	Akrilik	32
PZT	PVDF	48
PZT	P(VDF-TrFE)	10
PZT	Epoksi	41

Seramiklerin ve polimerlerin güçlü yanları alınarak bu iki bileşenden daha iyi performans gösteren kompozit yapıda yeni malzemeler elde edilebilir. Piezokompozit, bir piezoelektrik seramikle bir polimerden oluşur ve üstün özellikleri sebebiyle önemli malzemeler arasında sayılır.

Piezoelektrik kompozitlerde başarılı bir polarizasyon ve buna bağılı olarak iyi piezoelektrik özellikler sağlamak için parçacıklar ile matrisin arabağı kuvvetli olmalıdır. Kuvvetli bir bağı oluşturmanın yanında piezoelektrik seramik tozlarını matrise homojen bir şekilde dağıtmak, kompozitin çok daha verimli bir piezoperformans sergilemesine imkan sağlar. Piezoelektrik kompozit üretiminde yüksek ısıl direnç katsayısına sahip

polimer kullanılması kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini mümkün kılar. [13].

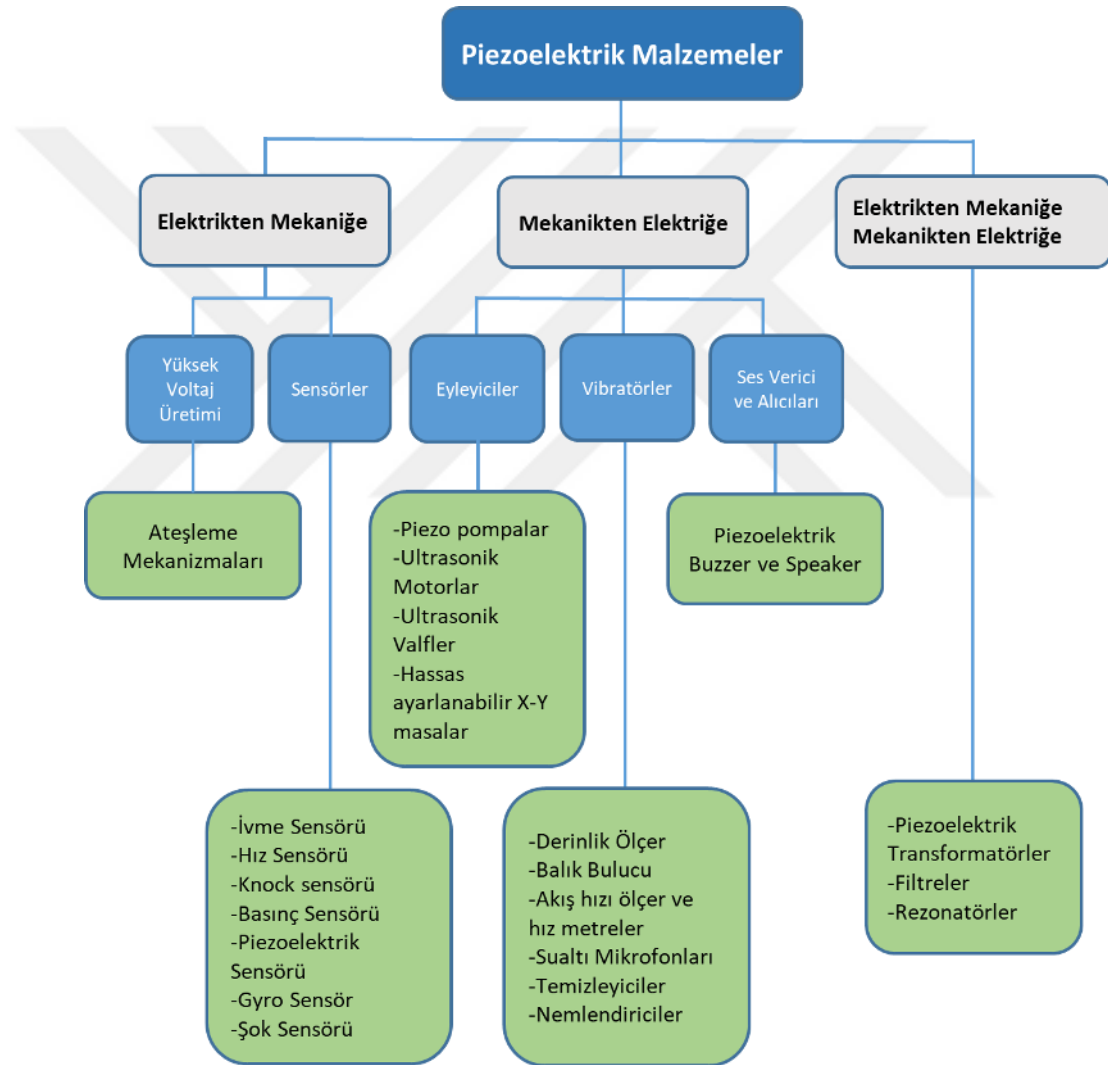
Kompozit piezoelektrik malzemeler polimer-seramik olduğu gibi metal-seramik de olabilmektedir. Bu malzemelerde temel amaç sınırlı uygulama alanlarında seramik tabanlı malzemelerin kullanılmasıdır. Dikey doğrultudaki deformasyonun radyal deformasyonla birleştirilip, mekanik yükselteç olarak kullanılması amacıyla aktüatörler geliştirilmiştir. Bu aktüatörler ay tipi dönüştürücü (Moonie), Zil tipi dönüştürücü (Cymbal), Gökkuşağı (Rainbow) ve Fırtına (Thunder) tipi olarak isimlendirilmişlerdir. Bunların yapıları ve geometrileriyle ilgili açıklamalar Şekil 3.9’da verilmiştir



Şekil 3.9. Kompozit aktüatörler [36]

4. PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Piezoelektrik malzemelerin üretimi birçok üretim basamağı içermesi sebebiyle zahmetli ve maliyetlidir. Piezoelektrik malzemelerin özellikleri hedeflenen kullanım alanlarına göre belirlenmektedir. Bir sınıflandırmaya göre bu malzemelerin kullanım alanlarının sınıflandırılması enerji dönüşümüne göre yapılmaktadır. Enerji dönüşümüne göre piezoelektrik malzemelerin sınıflandırılması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kullanım alanlarına göre piezoelektrik malzemeler [37]

Elektromekanik dönüşüme ihtiyaç duyulan her uygulamada piezoelektrik malzemeler kullanılabilir. Piezoelektrik malzemeler üzerlerine basınç uygulandığında uygulanan basıncın büyüklüğü ile orantılı bir voltaj çıktısı verirler. Diğer yandan bu malzemelere voltaj uygulandığında şekil değişimine uğrayarak mekanik hareket üretirler.

Başka bir ifadeyle piezoelektrik malzemeler, direkt piezoelektrik etki durumunda mekanik enerjiden elektriksel enerji, ters piezoelektrik etki durumunda ise elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler.

Piezoelektrik malzemeler, doğrudan etki özelliği ile basınç değişimlerini, şok ve titreşimleri algılar, titreşime maruz kaldıklarında elektrik sinyali üretirler. Bu malzemelerin doğrudan piezoelektrik etki özelliği algılayıcılarda (sensör) ve üreteçlerde kullanılır. Dolaylı piezoelektrik etki özelliğinde ise elektriksel enerji uygulandığında şekil değişimi sonucu mekanik hareket elde edildiği için, piezoelektrik malzemeler bu etki sayesinde eyleyici, tetikleyici veya aktüatör olarak kullanılabilirler. Transdüserler (dönüştürücüler) hem direkt hem ters(dolaylı) piezoelektrik etki ile çalışır. Sensör, aktüatör ve dönüştürücülerde tercih edilmelerinin sebebi, hızlı ve hassas algılama, hızlı cevap verme ve düşük enerji tüketme gibi gereksinimleri karşılayabilmeleridir [38].

Piezoelektrik malzemelerin otomotiv, elektronik, sağlık, ulaşım (deniz ve hava araçları) gibi birçok alanda çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Bu malzemeler kuvvet, titreşim, gerinme, gerinim, basınç, hız ve ivmenin ölçülmesinde, rezonatörlerde, saatlerde, kristal ve seramik filtrelerde, ultrasonik transdüserlerde, akustik cihazlarda, mikrofonlar ve hoparlörlerde, balık bulucularda, tanısal akustik cihazlarda, transformatörlerde, algılayıcılarda, aktüatörlerde, tıbbi transdüserlerde, titreşim sazlarında, alarm sistemlerinde, uzaktan kumanda sistemlerinde, ultrasonik motorlarda, enstrümanlarda, imalat ve makatronikte, amplifikatörde, dedektörlerde, konum sensörlerinde kullanılmaktadır. Piezoelektrik teknolojisi geliştikçe bu malzemelerin kullanımını daha da yaygınlaştırmaktadır [9].

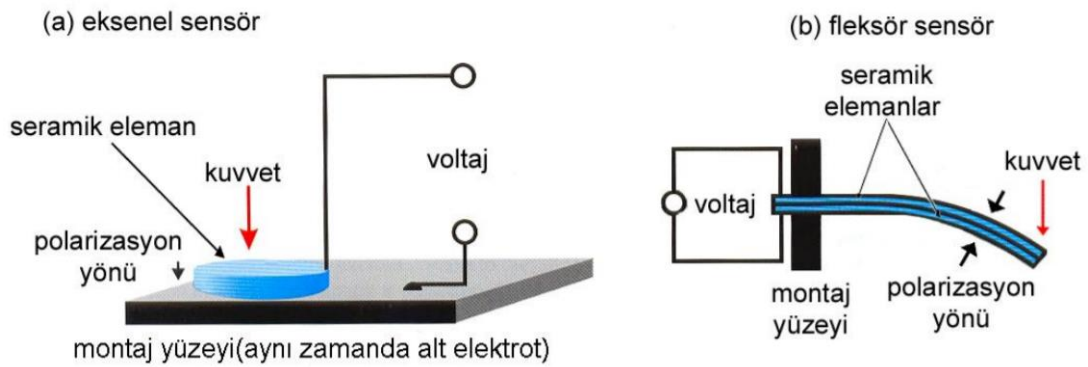
Çok farklı uygulama noktası olsa da piezoelektrik malzemeler günlük yaşamda esas olarak; sensörler (algılayıcılar), üreteçler(jeneratörler), eyleyiciler (öteleyiciler ya da aktüatörler) ve dönüştürücüler (transdüserler) olmak üzere dört ana uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

4.1. Sensörler

Sensörler; fiziksel ortamlardan, elektronik olarak çalışan sistemlere bu sistemlerin işlevlerini yerine getirebilmesi için veri akışı sağlayan elemanlardır. Bir sensör belirli bir fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkiyi algılayarak kendi çalışma prensibine göre bir elektrik sinyali dönüştürür ve bu sinyali tanıyarak işleyebilecek bir sistemine gönderir.

sensörler yardımıyla kontrol edilen sistemlerde sensörün algıladığı girdiye genellikle bir çıktı ile cevap verilir. Sıcaklık, mesafe, kuvvet, ivme ölçümleri vb. algılanan fiziksel etkilere örnek olarak verilebilir. Doğrudan fiziksel etkinin ölçülmesinin yanında nesnelerin yerinin belirlenmesi, uzaklık ve derinlik, akış, hız ölçümü gibi uygulamalar için işitilebilir ses sinyalleri veya ultrasonik sinyaller üreten ve algılayan dönüştürücü sistemlerde de sensör elemanlardan yararlanılır. Sensör malzemesi olarak piezoelektrik seramik eleman veya elemanların kullanıldığı uygulamalar piezo sensör veya **piezoelektrik sensör** olarak adlandırılmaktadır. Piezoelektrik sensörler, ivme veya basınç gibi fiziksel bir parametreyi bu parametrenin büyüklüğü ile orantılı bir elektrik sinyaline çeviren algılayıcılardır. Piezo sensör uygulamalarında bazı durumlarda fiziksel parametre piezoelektrik elemana doğrudan etki ederken bazı uygulamalarda akustik bir sinyal piezo elemanda titreşim oluşturur ve bu titreşimler bir elektrik sinyali oluşturur. Piezoelektrik eleman tarafından üretilen bu sinyaller, sistemde bulunan yazılım ve donanımlar yardımıyla analiz edilir ve anlamlı verilere dönüştürülür. Alıcı-verici uygulamalarında ise, gönderilecek sinyalin iletilmesinde ve yansıyan sinyalin alınmasında tek piezoelektrik eleman kullanılabildiği gibi bu işlemler için birden fazla piezoelektrik seramik eleman da kullanılabilmektedir [7].

Şekil 4.2’de gösterilen eksenel ve fleksör sensörler piezoelektrik elemanların kullanıldığı iki farklı piezo sensör uygulamasıdır.

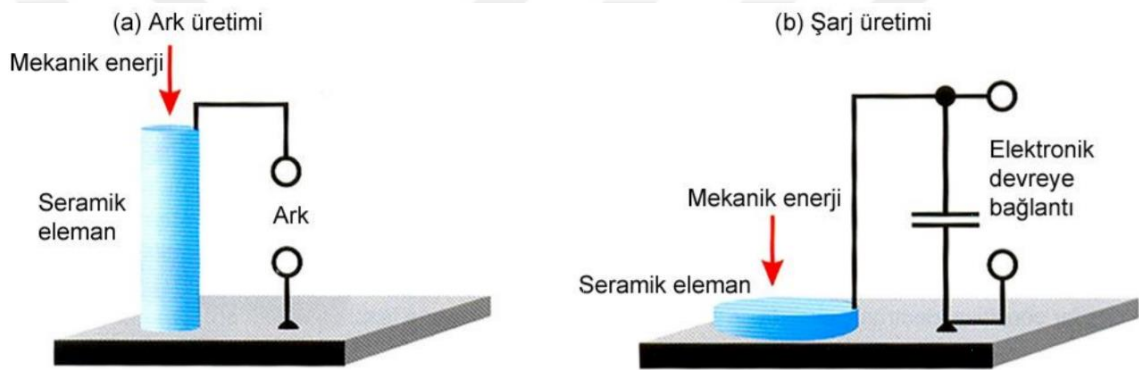


Şekil 4.2. Piezo sensör uygulamaları (a) Eksenel sensör (b) Fleksör sensör [7]

4.2. Üreteçler

Piezoelektrik malzemelerin bir diğer kullanım alanı üreteçler yani jeneratörlerdir. Bu uygulamalar için tasarlanan piezoelektrik malzemeler bir etki karşısında voltaj üreterek iki elektrot arasında ark oluşturabilirler. Bu özellikleri sayesinde en bilineni

çakmak olmak üzere, yakıt ateşleme sistemleri(bujiler) , kombi ve ocaklar ve ateşleme aparatı olarak kaynak cihazları gibi uygulamalarda kullanılırlar. Özellikle elektronik devreler için piezo jeneratörler mükemmel katı hal pillerdir. Piezoelektrik elmanlardan elde edilen elektrik enerjisini anlık olarak kullanmanın yanında depolamak mümkündür. Çok katlı kapasitör oluşturmak için kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteç yapımında da kullanılmaktadır. Bu şekilde elde edilen üreteçler elektronik devreleri beslemede kullanılan katı hal pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok uygundur. Piezoelektrik eleman kullanılarak oluşturulan ark ve şarj üreteçlerinin şematik görünümü Şekil 4.3'te verilmiştir.



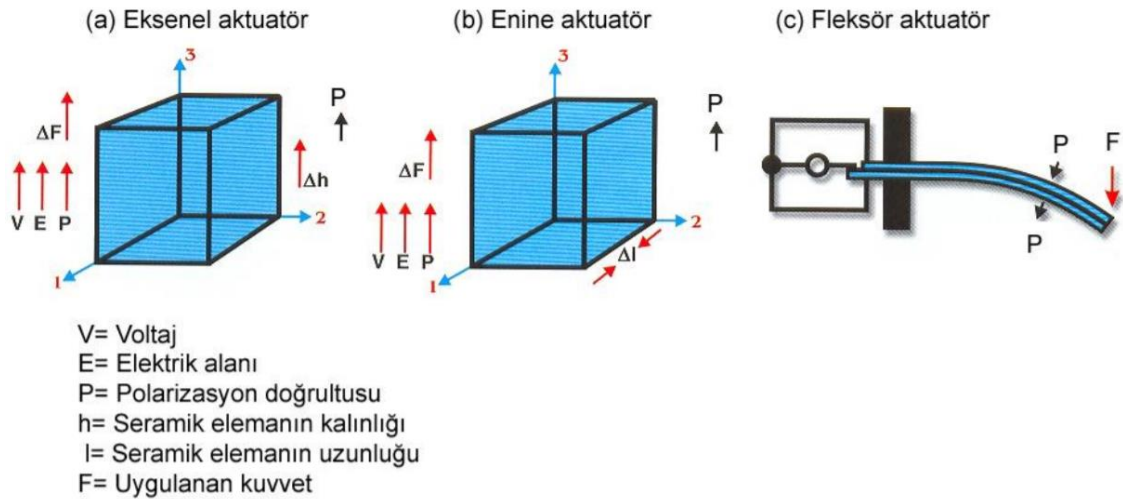
Şekil 4.3. (a) Ark üretimi (b) Şarj üretimi [7]

4.3. Aktuatörler (Eyleyiciler)

Piezo eyleyici (aktuatör veya öteleyici), elektriksel bir sinyali fiziksel yer değiştirmeye dönüştürür. Bu aygıtlar esas olarak bir mekanizmayı kontrol eden veya bazı uygulamalarda hareket ettiren motorlardır. Elektrik, hidrolik veya pnömatik bir enerji kaynağı tarafından çalıştırılırlar. Piezoelektrik yakıt enjektörü, içerisinde iki farklı piezo aktuatör uygulaması barındıran iyi bir piezo eyleyici örneğidir.

Piezoelektrik eyleyiciler yüksek dayanıklılık, hareket çözünürlüklerinin yüksek olması, hızlı tepki verme ve manyetik alandan etkilenmeme gibi çok önemli ve eşsiz özelliklere sahiptirler [39]. Piezo malzemeye uygulanan elektrik alanı piezoelektrik eyleyiciden ne kadarlık hareket elde edileceğini belirler. Ancak hareket birim hücrede meydana gelen deformasyondan kaynaklandığı için elektrik alan uygulanırken piezoelektrik malzemelerin hareket limitinin olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Piezoelektrik eyleyiciler(aktüatörler) genelde işleme tezgahlarında kullanılan yüksek hız takımlarının kalibrasyonu ve optik lens ve aynaların kalibrasyonu gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Bu eyleyicilerin diğer avantajları ise piezoelektrik esaslı motor gibi çalışmaları sebebiyle çalışmaları sırasında elektromanyetik gürültü oluşturmazlar. Piezoelektrik eyleyicilerin bir dezavantajı ise genel olarak yüksek voltajlı piezoelektrik güçlendiriciye ihtiyaç duymalarıdır. Bu ihtiyaç hava taşıtları ve uzay uygulamaları gibi aktif titreşim kontrolü yapılan sistemlerde yer ve yerleşim probleminden dolayı sıkıntılar yaratabilmektedir. Aktüatörlerde temel uygulamalar Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Yama eyleyiciler, bimorf eyleyiciler, katmanlı eyleyiciler, makro fiber kompozit eyleyiciler ve piezo motor eyleyiciler piezoelektrik esaslı eyleyici çeşitleri olup özel geometrilerde tasarlanmış piezo eyleyiciler de bulunmaktadır [7].



Şekil 4.4. Temel aktüatör (eyleyici) çeşitleri

4.4. Transdüserler (Dönüştürücüler)

Transdüserler (dönüştürücüler), enerjiyi bir formdan diğerine dönüştürmekte kullanılırlar. Piezoelektrik transdüserler, elektrik enerjisini sese veya ses üstü titreşen mekanik enerjiye dönüştürebilen elektro akustik dönüştürücülerdir. Bu cihazlar direkt ve dolaylı piezoelektrik etkiyi tersinir olarak kullanabilirler. Bu özellikleri sayesinde hem elektrik enerjisinden ultrasonik sinyaller üretebilmekte hem de ses dalgasını elektrik sinyaline dönüştürebilmektedirler [7].

Piezoelektrik dönüştürücülerin oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Bu dönüştürücüler, insan kulağı tarafından algılanamayan frekanslarda ses dalgaları üreten cihazlarda, mesafe, derinlik ve akış sensörlerinde, hareket ve nesne detektörleri gibi algılayıcılarda, (ses dalgası ile)temizleme, sıvıları atomize etme, seramik gibi zor malzemeleri delme veya öğütme gibi proseslerde, tıbbi teşhisler ve çeşitli amaçlar için ultrasonik vibratörlerde, alarmlar sistemleri, haşere caydırıcıları, oyuncaklar ve uzaktan kumanda üniteleri gibi elektronik ürünlerde kullanılmaktadır.

Piezoelektrik seramik transdüserler düşük voltajlarda ve 300 °C'ye kadar sıcaklıklarda verimli ve fonksiyonel olarak çalışabilirler. Kompakt ve sade yapıda olmaları, güvenilirlikleri ve az enerji gereksinimleri transdüserlerin diğer avantajları arasında sayılabilir.

Piezoelektrik transduser uygulamalarında malzeme olarak genelde kurşun zirkanat titanat, piezo-polimerler ve piezo-kompozitler kullanılmaktadır.

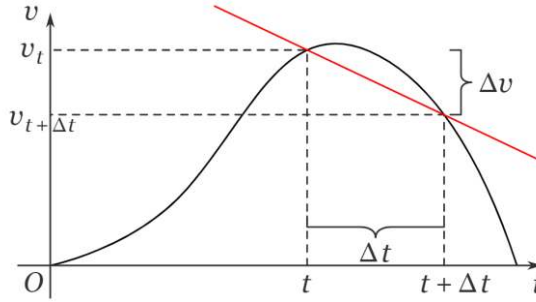
5. İVME VE İVMENİN ÖLÇÜLMESİ

5.1. İvme

İvme, hızın zamana göre türevi olarak tanımlanır. Yani hızın değişim hızıdır. İvme yolun ikinci türevi olarak da ifade edilir. Büyüklüğü, yolun zamanın karesine bölünmesiyle bulunan ivme, vektörel bir nicelik olup cismin hem hız hem de yön değişimini belirtir. SI birim sisteminde metre/saniye² olarak gösterilen ivme birimi zaman zaman yer çekimi ivmesi olan “g” cinsinden de ifade edilir.

5.1.1. Ortalama ivme

Bir cismin ortalama ivmesi cismin hızının belli bir zaman aralığında değişim miktarıdır. Matematiksel olarak ifadesi (4-1) formülüyle verilmiştir.



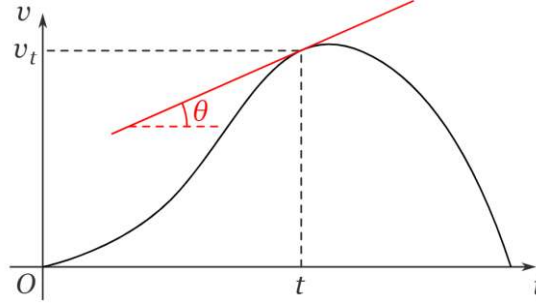
Şekil 5.1. Bir cismin ortalama ivmesi (http-5)

Hız-zaman eğrisi üzerindeki herhangi iki noktayı birleştiren doğrunun eğimi cismin bu iki zaman aralığındaki ortalama ivmesini verir.

$$a_{ort} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4-1)$$

5.1.2. Anlık ivme

Bir cismin anlık ivmesi cismin anlık zamanda sahip olduğu hız değişimine eşittir. Matematiksel olarak ifadesi (4-2) formülüyle verilmiştir.



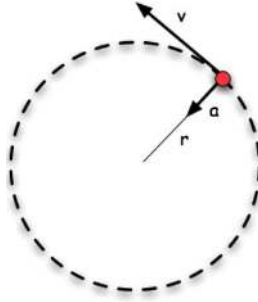
Şekil 5.2. Bir cismin anlık ivmesi (http-5)

Anlık ivme hızın zamanla değişim hızıdır ve cismin hız-zaman eğrisindeki herhangi bir noktaya teğet doğrunun eğimi olarak tanımlanır.

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (4-2)$$

5.1.3. Merkezci ivme

Merkezcil ivme, çembersel yörüngede hareket eden cisimlerin sahip olduğu ivmedir. Hız vektörel bir büyüklük olduğu için çembersel yörüngede hareket eden bir cismin çizgisel hızının büyüklüğü değişmese bile iki zaman aralığında hız vektörünün yönü değişeceği için cismin ivmeli bir hareket içerisinde olduğu söylenebilir. Cismin sahip olduğu merkeze yönelik ve kuvvetle aynı yönlü bu ivmeye merkezcil ivme denir. Merkezci İvmenin (a_m), matematiksel olarak ifadesi (4-3) formülüyle verilmiştir.



Şekil 5.3. Çembersel yörüngede hareket eden cismin merkezci ivmesi (http-6)

$$a_m = \frac{v^2}{r} \quad (4-3)$$

5.1.4. Yer çekimi ivmesi

Yer kürenin cisimler üzerinde yer çekiminden kaynaklanan bir etkisi mevcuttur. Bu etki bir cismin kütlesinden, hacminden, yoğunluğundan, şeklinden veya sahip olduğu

herhangi bir özellikten bağımsız olup bütün cisimler cisimler için aynıdır. Yer çekimi olarak adlandırılan bu etki cisimler üzerinde “g” büyüğünde bir statik ivmeye sebep olur. Bir cismin ağırlığı işte bu yer çekimi ivmesinin cismin kütlesi ile çarpımı ile hesaplanır. Dünyanın şeklinin tam küre olmaması sebebiyle yer çekimi ivmesi ekvatorun kutuplara doğru bir miktar değişir. Ekvatorun dünyanın merkezine uzaklığının daha fazla olması sebebiyle ekvator üzerindeki bir noktada 9,764 m/s² olan yer çekimi ivmesi, kutuplarda 9,863 olarak bulunur (http-10). Yer çekimi ivmesi bir cisme dünyanın merkezi doğrultusunda ve sürekli olarak etki eder. Cismin hareketsiz olduğu bir durumda ivmeölçer z ekseninde ‘ 1 g ’ (yerçekimi) ivme ölçmektedir. Bu sebeple cismin dikey eksene (z eksen) göre ivmesi hesaplanırken yer çekimi ivmesi hesaba katılmalıdır. İvme değerleri x, y ve z eksenlerinde ayrı ayrı ölçülebilmektedir. Cisim hareket ettiğinde ise hareket yönüne hız değişimine bağlı olarak ivmesi değişmektedir.

5.2. Newton’un II. Hareket Kanunu

Isaac Newton’un ilk olarak 1686’da "Principia Mathematica Philosophiae Naturalis" adlı kitabında hareket yasalarını sundu. Bu hareket yasalarından ikincisi, bir cisme etkiyen kuvveti (F) belirli bir zaman dilimi içerisinde momentumun değişiminin geçen süreye oranı olarak tanımlar. Momentum (P) ise bir cismin kütlesi (m) ile hızının (v) çarpımına eşit olup hız ve kuvvet gibi vektörel bir büyüklüktür.

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (4-4)$$

$$\Delta p = m\Delta v = m_2 v_2 - m_1 v_1 \quad (4-5)$$

Cismin kütlesinin (m) sabit olduğu kabul edilirse;

$$F = \frac{m v_2 - m v_1}{t_2 - t_1} \quad (4-6)$$

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (4-7)$$

(4-1) nolu eşitlikte $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ olduğu verilmişti.

Bu durumda cisme etkiyen kuvvetin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi bulunabilir.

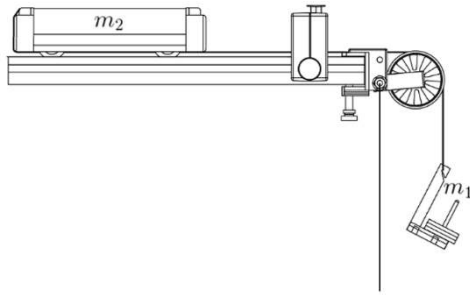
$$F = ma \quad (4-8)$$

Kütlesi sabit olan bir cismin ivmesi, cisme etkiyen net kuvvetin bir fonksiyonudur.

$$a = \frac{F}{m} \quad (4-9)$$

5.3. Newtonun II. hareket kanununun deneysel yolla sağlanması

Newtonun ikinci hareket kanununun sağlanımı tamamen deneyseldir. İdeal deney sisteminde kuvvet ve ivmenin hata olmadan ölçüldüğü varsayılır (http-7).



$$a = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right) g \quad (4-10)$$

Şekil 5.4. İvme deney sistemi (http-8).

Kütlesiz ip ve sürtünmesiz bir kasnak içerdüğü varsayılan Şekil 5.4'teki sistemde askıda olan m_1 kütlesi ve yatay düzlemde hareket eden m_2 kütlesi sistemin a ivmesiyle hızlanmasına neden olur. Geçen süre ve bu süre içerisinde kütlelerin aldıkları yollar ölçülerek gerçek ivme değerine ulaşılabilir. Bu değerin (4-10) denkleminle hesaplanan değere çok yakın olduğu görülecektir.

5.4. Titreşim

Bir kütlenin referans bir pozisyon etrafında yapmış olduğu salınım hareketi titreşim olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle titreşim, bir kütlenin belirli bir merkez etrafında çevrimsel olarak hareket etmesidir. Bir titreşim hareketinin nicelikleri; yer değiştirme, hız ve ivmedir. Titreşim hareketinin değerlendirilebilmesi için genellikle ivme ölçülür. Bunun nedeni titreşim hareketi içerisindeki en büyük etkinin ivme olmasıdır [50].

5.5. İvmenin Ölçülmesi

Bir cismin veya sistemin ivmesi günümüzde ivme sensörleri (ivmeölçerler) yardımıyla çok geniş frekans aralığında, hassas şekilde ve yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir.



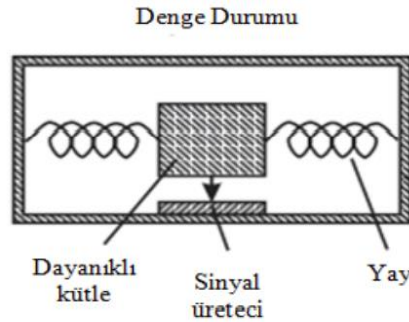
Sekil 5.5. *İvme sensörü (http-9)*

5.5.1. İvmeölçerler

İvme sensörleri veya ivmeölçerler, bir nesnenin eylemsizlik veya maruz kaldığı mekanik etki nedeniyle sahip olduğu ivmeyi ölçen sistemlerdir. Bir ivmeölçerin ivmeyi algılama yeteneği, eğim, titreşim, dönüş, çarpışma, yerçekimi vb. gibi çeşitli etki ve fiziksel büyüklükleri ivme cinsinden ölçmek için kullanılabilir. Yönü ve büyüklüğü olan, yani vektörel bir nicelik olan ivme, m/s^2 birimi veya yer çekimi ivmesi olan 'g' büyüklüğü cinsinden ölçülür [40].

5.5.1.1. İvmeölçerlerin yapısı ve genel çalışma prensibi

İvmeölçerler genel olarak kütle yay mekanizmasını baz alan bir çalışma prensibine göre çalışırlar. Bu mekanizmada ivme ölçümü Hooke Yasası ve Newton'un ikinci hareket kanununa dayanır. Newton'un ikinci hareket kanununa göre hareketsiz cisimler hareketsiz kalma, hareketli cisimler ise hareket etme eğiliminde olurlar. Şekil 5.6.'de kütle yay sistemi prensibine göre çalışan bir ivmeölçerin yapısı şematik olarak verilmiştir. Bu prensibe göre çalışan ivmeölçerler yapılarında basit olarak sismik kütle olarak da adlandırılan bir dayanıklı kütle, yay ve sinyal üretici bulundurulur. Bu elemanlar çevresel etkilerden korunmak için bir kutu(muhafaza) içerisinde yer alırlar.



Şekil 5.6. *Kütle yay sistemi [8]*

Newton'un ikinci hareket kanununa göre sismik kütle, üzerine etkiyen ivme ile kütesinin büyüklüğü ile orantılı bir F kuvvetine maruz kalır. Bu F kuvveti yukarıda (4-8) nolu denklem ile verilmişti:

$$F = ma$$

Sistemdeki yaya da aynı kuvvet etki eder. Hooke Yasası'na göre ise, yayın maruz kaldığı kuvvet aşağıdaki gibi verilir:

$$F = kx \quad (4-11)$$

Bu durumda (4-8) ve (4-10) nolu eşitliklerden:

$$ma = kx \quad (4-12)$$

elde edilir.

Cismin kütlesi (m) ve yay özgül olan yay uzama katsayısı (k)nın sabit olduğu düşünülürse yayın uzama miktarı ile cismin ivmesinin doğru orantılı olduğu bulunur.

$$a = x \frac{k}{m} \quad (4-13)$$

İvmeölçerler genel prensip olarak yukarıda bahsedilen kütle yay sistemine göre çalışsalar da ivme değerine ulaşmak için içerdikleri mekanizmalar ivmeölçerin tipine göre farklılık gösterir. Bu farklılık esas olarak yayın uzama miktarını (x) tespit etme yönteminden kaynaklanır. İvmeölçerler kendi çalışma prensibine göre, yayın uzama miktarını yapılarında bulunan çeşitli algılayıcılar kullanarak elde ederler ve böylelikle ivme bilgisine ulaşırlar. Yay yerine yay görevi görececek esnek ve bükülebilen başka araçlar da kullanılabilir.

5.5.1.2. İvmeölçer Özellikleri

İvmeölçerler, performans ve çalışma mekanizmaları bakımından birçok farklı özelliğe sahiptirler. Kullanım amaçları gözetilerek ivmeölçerlerin aşağıda sıralanan bu özelliklerine göre seçim yapılabilir.

5.5.1.2.1. İvmeölçer tipi

İvmeölçerin, ölçeceği ivme büyüklüğünü hangi mekanizmayı kullanılarak algıladığını belirten özelliktir. Seçilecek ivmeölçer tipine performans parametrelerinin

yanı sıra sıcaklık, basınç, manyetik alan ve elektrik alan gibi ivmeölçerin çalışma mekanizmasına etki edebilecek çevresel faktörler de göz önünde bulunularak karar verilmelidir.

5.5.1.2.2. İvme ölçüm eksen

İvme sensörleri başlangıçta tek eksende ölçüm yapabilecek şekil tasarlanırken günümüzde iki veya üç eksende ölçüm yapabilen ivme sensörleri de üretilmektedir. İvme ölçüm eksenini özelliği ivmeölçerlerin, hangi ekseninde veya eksenlerde ölçüm yapabildiğini belirtir.

Eksen seçimine uygulama noktası ve ihtiyaca göre karar verilmelidir. Tek eksende hareketin önemsendiği bir noktada üç boyutlu ölçüm yapabilen ivme sensörü kullanılması maliyet artışına sebep olabilir.

5.5.1.2.3. Ölçüm kapasitesi

İvmeölçerin sağlıklı şekilde ölçebileceği maksimum ivme değerini belirtir. Kapasite seçimi uygulamaya bağlıdır. Şok dalgası, deprem gibi yüksek ivmeli olayların ölçümü için yüksek ölçüm kapasitesine sahip ivmeölçerler kullanılır. Hassas ölçüm yapılması ve hareket yönünün belirlenmesi gibi uygulamalarda düşük ölçüm kapasitesine sahip ivmeölçerler kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ölçüm kapasitesi düştükçe doğruluk ve çözünürlüğün artıyor olmasıdır. Dolayısıyla ivme ölçüm aralığının başlangıçta doğru öngörülmesi daha doğru ölçüm sonuçları elde edilmesine olanak sağlar.

Günümüzde $\pm 1g$ 'den $\pm 1000g$ 'ye kadar ölçüm kapasitesine sahip ivmeölçerler rahatlıkla temin edilebilmektedir.

5.5.1.2.4. Doğruluk

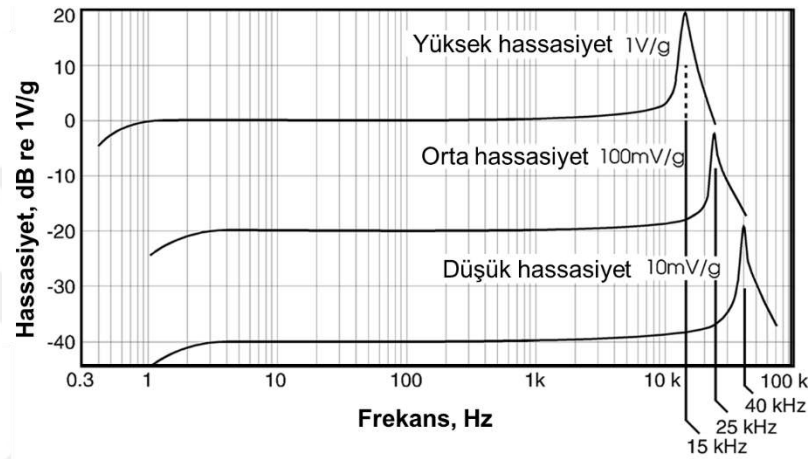
Ölçülen bir ivme değerinin gerçek ivme değerine ne kadar yakın olduğunu belirten özelliktir. Bir ivme ölçümünün anlamlı olabilmesi için kullanılan ivmeölçerin ölçüm hata oranının sıfıra olabildiğince yakın olması gerekir.

5.5.1.2.5. Hassasiyet

İvmeölçerin verdiği çıkış ile ölçtüğü ivme arasındaki bağıntı olup bir ivmeölçerde dikkat edilmesi gereken en önemli özelliklerden birisidir. Hassasiyet, kullanım aralığı

içerisinde sabit bir değerde olduğu sürece doğrusal ve güvenilirdir. Bu sebeple doğrusal ivmeölçerler daha çok tercih edilir.

Hassasiyet ve frekans arasında bir denge vardır. Yüksek hassasiyetli ivmeölçerler daha düşük frekansları ölçmek için daha iyidir ve düşük hassasiyetli ivmeölçerler daha yüksek frekansları yakalar. Şekil 5.7’de frekans ve hassasiyet arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 5.7. Voltaj çıkışlı ivme sensörlerinde frekans-hassasiyet ilişkisi ([http-11](http://11))

5.5.1.2.6. Çözünürlük

Sensörlerde çözünürlük, ölçülebilen en küçük değer olarak tanımlanır. Bir ivmeölçerde çözünürlüğün yüksek olması o ivmeölçerin ölçebileceği minimum ivme değerinin düşük olması anlamına gelir. İvmeölçerler genel olarak hassas uygulama alanlarında kullanıldıklarından yüksek çözünürlüğe sahip olmaları istenir.

5.5.1.2.7. İvmeölçer çıkışı

Bu özellik, bir ivmeölçerin ivme ile ilintili ne tip bir çıkış verdiğini belirtir. Bu çıkış analog, sayısal veya PWM (Pulse width modulation-darbe genişliği modülasyonu) olabilir.

5.5.1.2.8. Bant genişliği

Bir ivmeölçerlerin doğru şekilde ölçüm yapabildiği en geniş frekans aralığıdır. Özellikle yüksek salınımlı hareketlerin ölçümünde bu özellik önemli bir yere sahiptir. Ancak yüksek bant genişliğine sahip ivmeölçerlerde filtre kullanılması gerekir. Filtre

kullanılmadan yapılacak ölçümlerde elektriksel gürültüler de algılanacağı için yanıltıcı sonuçlar elde edilebilir.

Hassasiyet frekansa bağlı olarak verilir. Hassasiyetin sabit olduğu frekans aralığına kullanılabilir frekans aralığı nedir. Bu aralığın ivmeölçerin çalışma frekans aralığını içine alması gerekir. Çalışma frekansı, sensörün ölçebildiğinden daha yüksekse, sinyal bozulur ve okumalar güvenilir olmaz.

5.5.1.2.9. Gürültü

Gürültü, piezoelektrik ivmeölçerlerin geliştirilmesinde dikkate alınması gereken kritik bir faktördür. Gürültü kaynağını anlamak, tasarımcının gürültü tabanını daha da düşürmesine ve sensörlerin minimum algılanabilir ivmesini iyileştirmesine yardımcı olacaktır. Bu, özellikle 0.001 Hz ila 100 Hz frekans aralığında sismik titreşim algılama gibi küçük sinyal uygulamaları için önemli olmaktadır. Çoğu durumda, genel gürültü, amplifikatör gibi elektroniklerden gelen gürültü tarafından belirlenir [41].

Gürültü yoğunluğu ise gürültünün, spektruma göre ortalama dağılımını gösteren bir ölçüttür. İvmeölçerlerde bu birim $\mu g/\sqrt{Hz}$ 'dir. Bu ifade enerji spektrumun sinyalin genliğinin karesinin frekansa oranı olmasından kaynaklanmaktadır. Her iki tarafın karekökü alınarak bu birime ulaşılır [8].

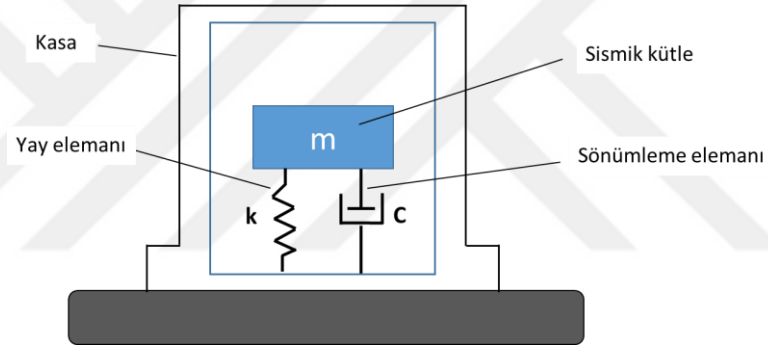
5.5.1.2.10. Çalışma sıcaklığı aralığı

Piezoelektrik esaslı ivme ölçerlerde olduğu gibi dahili elektroniğe sahip standart endüstriyel ivmeölçerler 120 ° C'ye kadar sıcaklıklara dayanabilirler. İvmeölçerin maruz kalacağı sıcaklığın daha yüksek olması sensörün elektronik bileşenlerinin zarar görmesi olasılığını arttırır. Bu durumda veriler güvenilir olmaz ve sensörün ömrü beklenenden kısa olur. Ortam sıcaklığının 120 °C'yi aşacağı ölçümler için yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun olarak tasarlanmış ivmeölçerler kullanılmalıdır. İvmeölçerin sahip olduğu özelliklerde performans sergileyebilmesi için sensörün montaj noktasının yakınında herhangi bir termal geçiş olup olmadığı kontrol edilmelidir. Termal etkilerle sensörün çalışma mekanizması etkilenebilir ve yanlış ölçüm sonuçları elde edilebilir.

İvmeölçer hassasiyeti sıcaklıkla değişebilmektedir. Bu sebeple sensör seçiminde hedeflenen çalışma sıcaklık aralıklarında hassasiyetin ne oranda değiştiği kontrol edilmelidir (http-12).

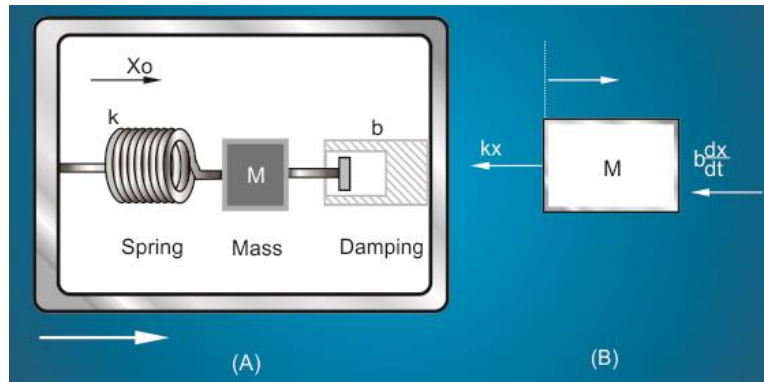
5.5.2. İvmeölçer çeşitleri

"İvmeölçer" terimi, bir algılama elemanı içeren ve esasen mekanik enerjiyi bir elektrik çıktısına çeviren bir tür dönüştürücü mekanizmayı ifade eder. Bu dönüştürücülerin çalışmasının arkasındaki teori, Newton mekaniği yardımıyla mekanik modellerinden anlaşılabilir. Sistemdeki sismik kütle mekanizmanın içerdiği yaya tutturulur ve bu yay da ivmeölçerin kasasına tutturulur. Bu kütle diğer ucundan da sistemdeki sönümleme elemanına tutturulur. Sönümleme elemanı sisteme, sistemin kendi doğal frekansında salınım yapmasını önlemek amacıyla ilave edilir. Yay ve sönümleme elemanı birbirine seri olarak bağlanabileceği gibi paralel olarak da bağlanabilir. Tüm bunlar ivmeölçeri dış etkilere koruyan bir kasa içerisine, ivmeölçer kasası ise ivmenin ölçüleceği gövdeye sağlam bir şekilde monte edilir. Bu mekanizma şematik olarak Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Tipik bir ivmeölçerin şematik yapısı

Sistem doğrusal ivmeye maruz kaldığında, sismik kütle ivmenin büyüklüğü ile orantılı bir F kuvveti ($F = ma$) etki eder. Bu kuvvet kütle konumunun değişmesine neden olur. Bu değişiklik çalışma prensibine göre sistemdeki algılayıcı tarafından algılanır ve eşdeğer bir elektrik sinyaline dönüştürülür.



Şekil 5.9. Sismik kütle hareketine bağlı olarak ivmenin ölçülmesi (http-12)

İvmenin sebep olduğu kuvvet sismik kütleyi hareket ettirir. Bu hareket yay ve sönümleme elemanı tarafından karşılanır ve sismik kütlenin maruz kaldığı ivme değeri bu elamanlar yardımıyla belirlenir.

İvme ölçümü için sönümleme katsayısı (c) bilinen bir damper, sertliği (k) bilinen bir yay elemanı ve sensör kasası içerisinde hareket etmeye uygun kütlesi bilinen bir sismik kütle (m) ile bu hareketi algılayacak bir araç sağlanması yeterlidir. Yayın sıkışma miktarı (aynı zamanda sismik kütlenin hareket miktarı) x iken;

Fa : İvmesel kuvvet;

$$F_a = ma \quad (4-15)$$

Fd: Damper'in sönümleme kuvveti;

$$F_d = c\dot{x} \quad (4-16)$$

Fy: Yay kuvveti

$$F_y = kx \quad (4-17)$$

Sismik kütle üzerine etki eden kuvvetlerin toplamı sıfırdır.

$$F_a + F_d + F_y = 0 \quad (4-18)$$

Bu durumda;

$$ma + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4-19)$$

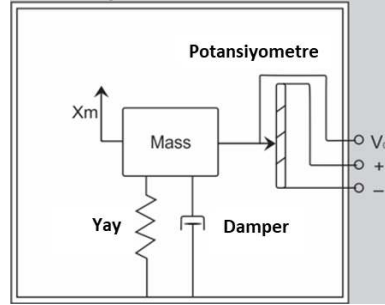
olur. İvme büyüklüğü ise (4-20) nolu eşitlikle bulunur.

$$a = -\left(\frac{c}{m}\right)\dot{x} - \left(\frac{k}{m}\right)x \quad (4-20)$$

5.5.2.1. Potansiyometreli ivmeölçerler

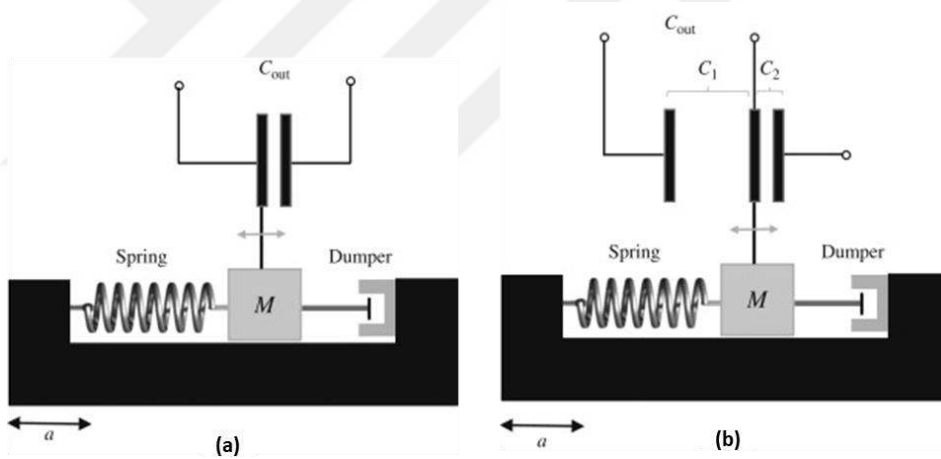
En basit yapıdaki ivmeölçerlerden biridir. Bir ucu sismik kütleye iliştilirilmiş olan potansiyometre kolu diğer ucunda bir dirence bağlıdır. Hareketi bir yay mekanizması ile serbestleştirilen fakat bir damperle sönümlenen sismik kütle üzerine etkiyen ivme ile konumunu değiştirir. Bu konum değişikliği elektriksel devrenin direncini de değiştirir ve

böylece ivme büyüklüğü direnç değişimi yardımıyla ölçülmüş olur. Bu tip ivmeölçerlerin doğal frekansının genellikle 30 Hz'den düşüktür. Bu sebeple kullanımları düşük frekanslı titreşim ölçümleriyle sınırlanır fakat diğer yandan düşük frekanslı ölçümlerde 0 Hz'e kadar ölçüm yapabilirler.



Şekil 5.10. Potansiyometreli ivmeölçerin şematik yapısı (http-12)

5.5.2.2. Kapasitif ivmeölçerler



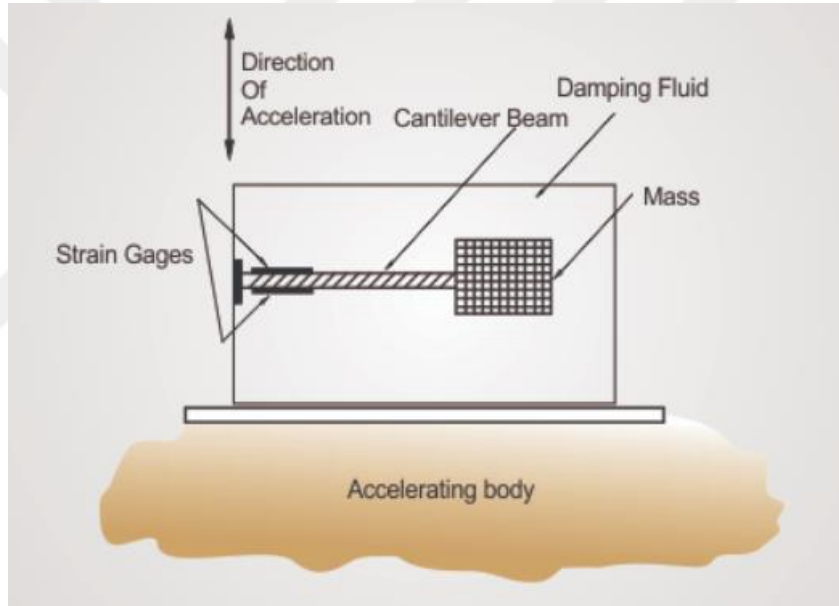
Şekil 5.11 Kapasitif ivmeölçerin şematik yapısı (http-12)

Şekil 5.11 (a) sismik kütlenin bir düzlem plaka kapasitörünün plakalarından birine ve Şekil 5.11 (b) sismik kütlenin bir diferansiyel kapasitörün merkezi plakasına eklendiği kapasitif ivmeölçerleri göstermektedir. Her iki örnekte de, kütle bir yay ve aynı zamanda ivmeölçer kasasına sabitlenmiş bir dampere bağlıdır. Kapasitif ivmeölçerlerde ivmenin sebep olduğu kütle yer değiştirmesi kapasitansı değiştirir. Bu kapasitans değişimi ile Wheatstone köprüsü veya LC osilatörü gibi ölçüm devreleri kullanılarak ivme ile orantılı bir elektrik sinyali, voltaj veya akım üretilir. Kapasitif ivmeölçerlerin tipik çalışma aralığı 0-40 g, doğruluğu ±% 0,25 FS (İng. Full Scale-Tam Ölçek) , çözünürlüğü 10^4 g ve çapraz

hassasiyeti % 0,5'dir [42]. Kapasitif ivmeölçerler MEMS (İng. Micro-Electro-Mechanical Systems) ivmeölçerler içerisinde en yaygın kullanılanıdır.

5.5.2.3. Piezorezistif ivmeölçerler

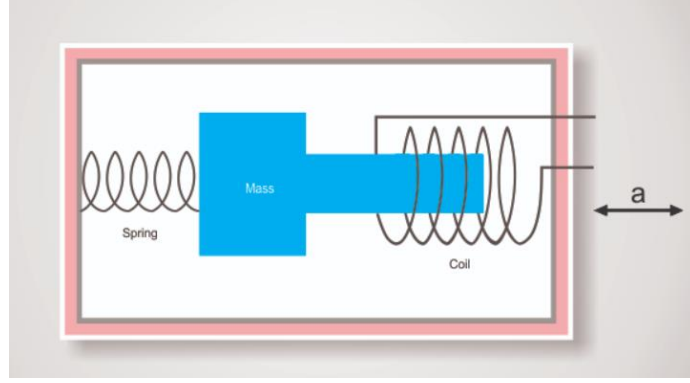
Bu tip ivmeölçerlerde, gerinim ölçer gibi piezo dirençli malzemeler kullanılır. İvmeölçer kasasına sabitlenmiş ankastre kiriş ucuna bağlı sismik kütle ivmenin etkimesiyle konumunu değiştirir. Sismik kütlenin konumunun değişmesi ankastre kiriş üzerinde bulunan gerinim ölçerlerde direncin değişmesine sebep olur. Bu direnç değişimi etkileyen ivmenin büyüklüğünü hesaplamada kullanılır. Hareketin sönümlenmesi ivmeölçer kaası içerisindeki sönümleyici sıvı yardımıyla sağlanır. Piezorezistif ivmeölçerler $\pm 1000g$ 'ye kadar ölçüm yapabilirler.



Şekil 5.12. Piezorezistif ivmeölçerin şematik yapısı ([http-12](http://12))

5.5.2.4. Değişken empedanslı ivmeölçerler

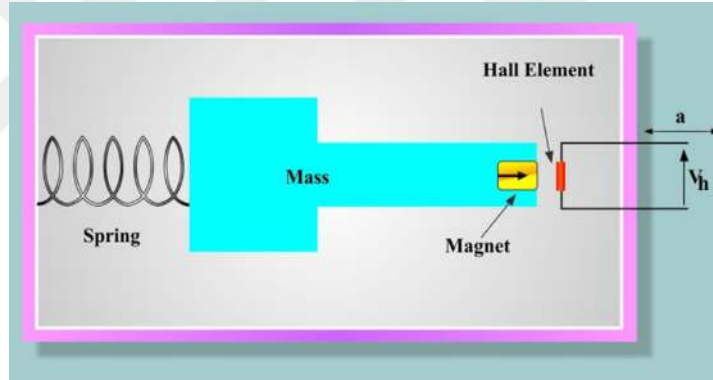
Değişken empedanslı ivmeölçerlerde, ferromanyetik malzemelerden üretilmiş olan sismik kütle bir bobinin içinde hareket edebilecek bir çekirdek şeklinde tasarlanmıştır. İvme etkiğinde çekirdek yani sismik kütle bobin içerisine veya dışına doğru hareket eder. Bu yer değişimi bobin empedansının değişmesine sebep olur. Sisteme etkileyen ivme empedanstaki bu değişimle ölçülür.



Şekil 5.13. Değişken empedasnlı ivmeölçerin şematik yapısı (<http-12>)

5.5.2.5. Hall etkili ivmeölçerler

Bu tip ivmeölçerler manyetik alan değişiminden kaynaklanan voltaj değişimlerini ölçerek ivme bilgisine ulaşırlar.



Şekil 5.14. Hall etkili ivmeölçerin şematik yapısı (<http-12>)

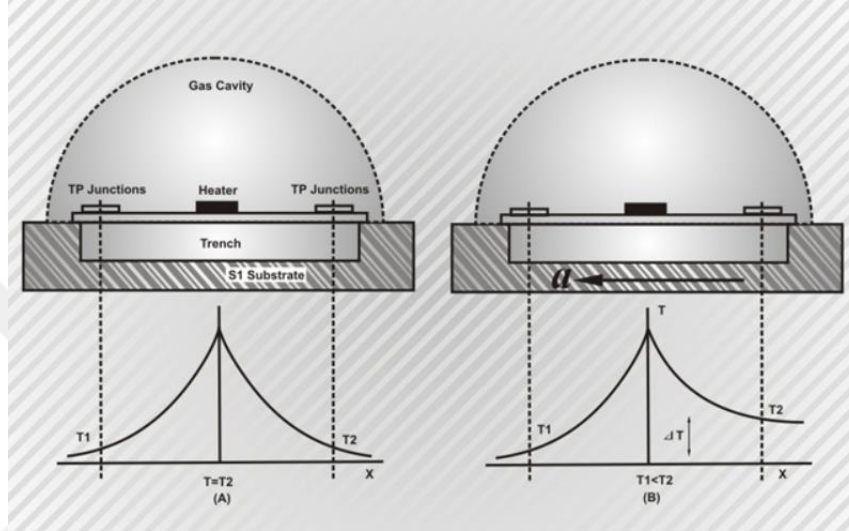
Sismik kütle üzerine sabitlenmiş bir mıknatıs sismik kütlenin ivmenin etkisiyle hareket etmesi sonucu hall elemana göre konumunu değiştirir.

5.5.2.6. Manyetorezistif ivmeölçerler

Manyetik malzemelerin direnci, maruz kaldıkları manyetik alana bağlı olarak değişir. Manyetorezistif ivmeölçerlerin çalışma prensibi, Hall Etkili ivmeölçerlerinkine benzer. Tek fark, hall elemanı yerine manyetik dirençli malzemenin kullanılmasıdır. Manyetorezistif ivmeölçerlerde uygulanan ivme, manyetik dirençteki değişim ile ölçülür.

5.5.2.7. Termal ivmeölçerler

Termal ivmeölçerlerde, ivme ısı transferindeki değişikliklerle ölçülür. Bu ivmeölçerlerde, sismik kütle olarak gaz kullanılır. Gaz bir boşluk içine alınır ve merkezde bir ısı kaynağı asılır. İki (veya daha fazla) termistör, asılı ısı kaynağından eşit mesafelere yerleştirilir. İvmesiz koşulda, gaz bir denge sıcaklığına ısıtılır. Isı gradyanı simetrik olduğundan bu koşulda iki termistör aynı sıcaklıktadır.



Şekil 5.15. Gaz ısıtmalı ivmeölçerin şematik yapısı (http-12)

İvmelenme koşulunda, ısı gradyanı, konvektif ısı transferi nedeniyle asimetrik hale gelir. Gaz, hareketin tersi yönünde kayar ve bu da bir sıcaklık gradyanına sebep olur. İvme sıcaklık gradyanının bir fonksiyonu olarak elde edilir.

5.5.2.8. Rezonans ivmeölçerler

Rezonans ivmeölçerlerde sismik kütle doğal rezonans frekansında titreştirilir. Bir ivme etkidiğinde kazanılan atalet kuvveti sistemin rezonans frekansını değiştirir. Rezonans frekansındaki değişimi bulunarak ivme ölçülebilir [43].

5.5.2.9. Optik ivmeölçerler

Fiber optik Bragg ızgarası(FBG-İng. Fiber optic Bragg Grill) küçük bir fiber optik parçasından üretilen bir dağınık Bragg yansıtıcısı türüdür. FBG esaslı ivmeölçerlerde, ivme FBG 'deki sismik kütleyi etkiler. İvme sonucu FBG 'ye uygulanan zorlama Bragg dalga boyunda kaymaya neden olur ve bu kayma da ivmenin seviyesiyle ölçülendirilir. Bu tip ivmeölçerlerde çözünürlük düşük olduğu için kritik uygulama alanlarında tercih edilmezler.

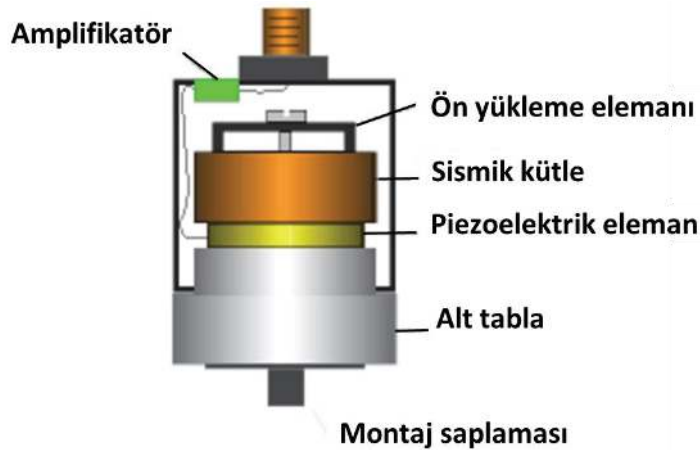
5.5.2.10. Piezoelektrik ivmeölçerler

Bu sensörler içerdikleri seramiklerin piezoelektrik etkilerini kullanarak bir yük çıkışı üretirler. Piezoelektrik İvmeölçer içerisindeki piezoelektrik eleman üzerine bir basınç etkiğinde, bu eleman üzerinde meydana gelen mekanik deformasyon, uygulanan basınçla orantılı bir elektrik yükünün ortaya çıkmasını sağlar. Piezoelektrik elemanın alt ve üst yüzeyine iletken levha yerleştirilmesi halinde bu yük dışarıya aktarılabilir. Böylece mekanik hareket elektriksel sinyale çevrilmiş olur. Piezoelektrik ivmeölçerler çalışabilmeleri için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadıklarından kendi enerjilerini oluşturdıkları kabul edilir.

Piezoelektrik ivmeölçerler hedeflenen uygulama noktası veya nesnenin ivmesini ölçerken sağladıkları sinyallerin hız veya konum belirlemek için de kullanılabilir. Olması bu tip ivmeölçerleri cazip hale getirmektedir.

5.5.2.10.1. Piezoelektrik ivmeölçerlerin yapısı

Bu tipteki ivmeölçerlerin aktif elemanı, piezoelektrik bir malzemedir. Piezoelektrik malzemenin bir tarafı sensör tabanında rijit bir dayanağa bağlanmıştır. Diğer tarafına ise sismik kütle bağlanmıştır. Sismik kütle bir ivmeye maruz kaldığında Newton'un ikinci hareket yasası gereği bu kütle piezoelektrik eleman üzerine etkiyen bir kuvvet üretir. Üretilen kuvvet sismik kütle ve onun maruz kaldığı ivmenin büyüklüğü ile orantılıdır. Diğer yandan piezoelektrik etki nedeniyle, uygulanan kuvvetle orantılı bir yük çıkışı elde edilir. Sismik kütle sabit kabul edildiğinden, yük çıkış sinyalinin etkiyen ivme ile orantılı olduğu söylenebilir [44].



Şekil 5.16. Piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı [45]

5.5.2.10.2. Piezoelektrik esaslı ivmeölçerlerin avantajları

Piezoelektrik ivmeölçerler, mutlak titreşimi ölçmek için en iyi seçenek olarak kabul görürler. Diğer sensör türleriyle karşılaştırıldığında, piezoelektrik ivmeölçerler aşağıdaki avantajları bakımından öne çıkmaktadırlar:

- Son derece geniş aralıkta ve dinamik ivme ölçümü için uygundur.
- Düşük çıkış gürültüleri sayesinde şok ölçümünün yanı sıra neredeyse algılanamayan titreşim için de uygundur.
- Dinamik çalışma şartlarında mükemmel doğrusallığa sahiptirler.
- Geniş frekans aralığında çalışabilirler.
- Kompakt yapıya sahiptirler ve sayede zor geometrik şartlarda kullanılabilirler.
- Hassasiyetleri yüksektir.
- Rijittirler. Hareketli parçalarının olmaması sebebiyle aşınma gözlenmez.
- Kendi enerjilerini üretirler. Bu sayede bir harici enerji beslemesine ihtiyaç duymazlar.
- Farklı amaçlara uygun değişik çalışma aralıklarında çalışabilen çeşitli modelleri mevcuttur.
- İvme sinyali hız ve konum değişikliklerinin ölçülmesi için de kullanılabilir [44].

5.5.2.10.3. Piezoelektrik ivmeölçer tipleri ve çalışma prensipleri

Piezoelektrik ivmeölçerler polarizasyon yönüne göre farklı tiplerde tasarlanmakta ve üretilmektedir. Genel olarak çalışma prensipleri sismik kütlenin piezo eleman üzerine uyguladığı kuvvetten kaynaklanan yük çıkışı elde edilmesi şeklinde olsa da sahip oldukları özellikler ve avantajlar bakımından birbirlerinden farklılık gösterebilmektedirler [46].

5.5.2.10.3.1. Sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçerler

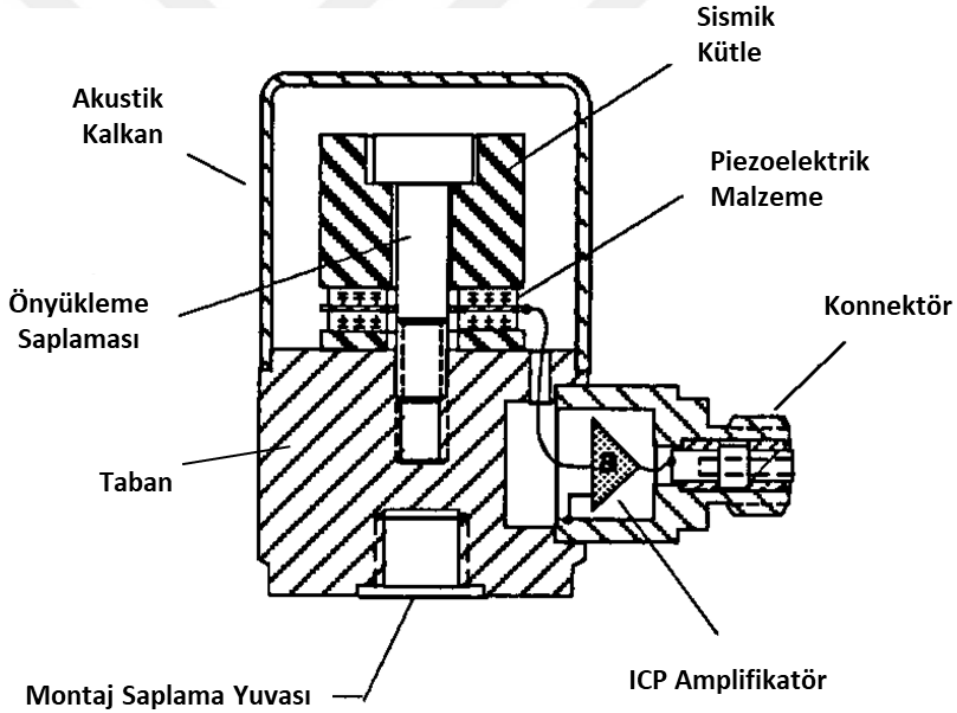
Piezoelektrik elemanın sismik kütle ve sabit kaide arasına sandviç edildiği dizayndır. Geleneksel olarak bu dizayn kullanılır. Elastik saplama (ya da kimi zaman vida) piezoelektrik seramiği tabandan korur. Transdüser ivmelendirildiği zaman, sismik kütle piezoelektrik kristal üzerine artan ya da azalan bir kuvvet uygular. Elde edilen elektriksel çıktı uygulanan bu kuvvetle orantılıdır. Sismik kütlenin artırılması Newton'un ikinci kanunu gereği piezoelektrik eleman üzerine daha büyük kuvvet ve

basınç etkimesi ile sonuçlanır. Bu da daha büyük elektriksel çıktı oluşması anlamına gelir [47].

Sıkıştırma kuvvetini temel alan piezoelektrik ivmeölçer tasarımında rijitlik yüksektir. Bu özellikleri sayesinde sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçer yüksek frekanslı basınç ve kuvvet ölçümlerinde kullanılırlar. Sıcaklık değişimlerine gösterdikleri duyarlılık bu tip ivmeölçerlerin olumsuz bir özelliğidir [47].

Sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçerler 3 tiptir:

- Dikey Sıkıştırma Tarzı Piezoelektrik İvmeölçerler
- Tersine Sıkıştırma Tarzı Piezoelektrik İvmeölçerler
- Yalıtılmış Sıkıştırma Tarzı Piezoelektrik İvmeölçerler

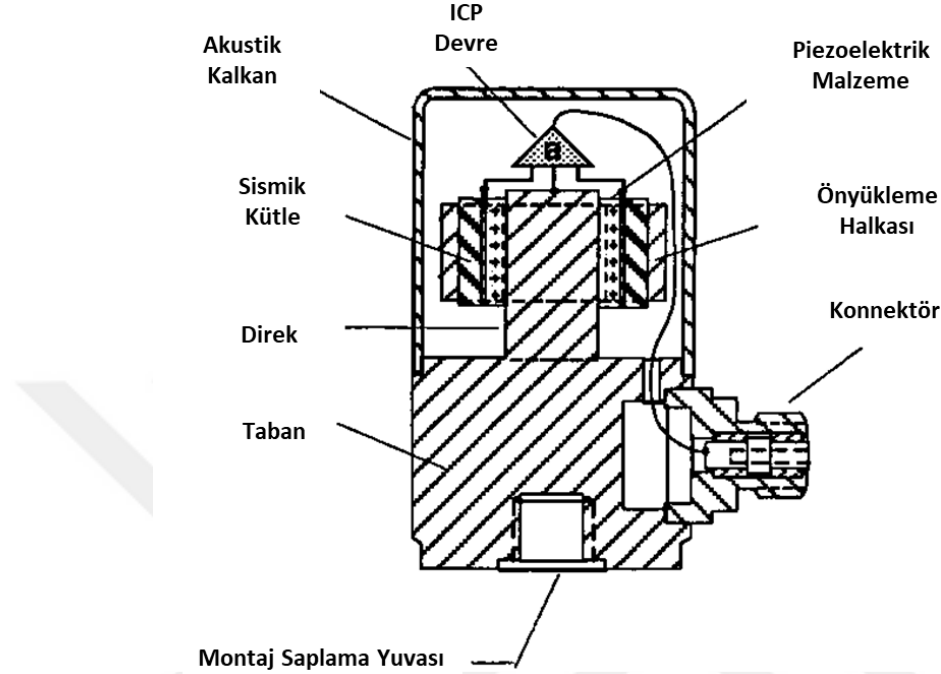


Şekil 5.17. Sıkıştırma tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı [47]

5.5.2.10.3.2. Kesme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler

Kesme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler, bir orta dikme (post) ile sismik kütle arasında piezoelektrik elemanlar bağlanarak ya da sandviç edilerek dizayn edilir. Yay elemanı vazifesi gören sıkıştırma çemberi ya da saplama (stud) yardımıyla sert lineer yapıyı meydana getirmek için gerekli olan ön yükleme (preload) kuvveti uygulanır. İvme altında, sismik kütle piezoelektrik elemana kuvvet uygulayabilmek için kesme gerilimine

(shear stress) neden olur. Kesme tipi ivmeölçerler, taban (base) ve muhafazanın (housing) piezeolekerik seramiği mükemmel şekilde izole etmesiyle, termal ve taban bükülme etkilerinden etkilenmezler ve diğer ivme sensörlerine karşı avantajlı olurlar.

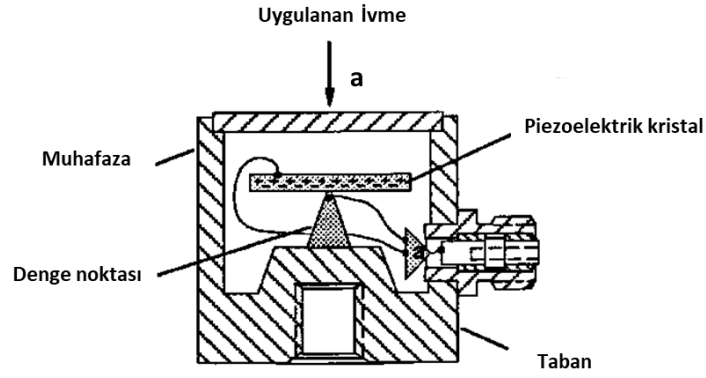


Şekil 5.18. Kesme tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı (a) Düzlemsel kesme tarzı (b) Delta kesme tarzı [47]

Kesme tarzı tasarımı, geniş frekans aralığında kullanılabilmesi, eksen kaçıklığı hassasiyetinin düşük olması, termal değişimlerden az etkilenmesi gibi olumlu özellikleri sayesinde ivme sensörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [47].

5.5.2.10.3.3. Bükülme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler

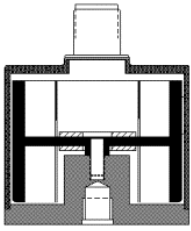
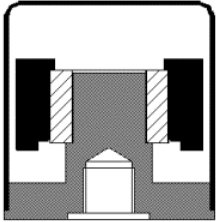
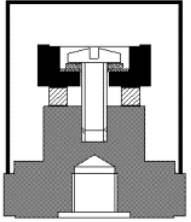
Bükülme tarzı tasarımlarda, ivmelenme durumunda, kristal üzerinde baskı yaratmayı destekleyen, dirsek biçimli algılayıcı seramik kristaller kullanılır. Bu kristal, ivmelenmede baskı miktarını arttıran taşıyıcı dirsek ile bağlı olabilir. Bu dizaynlar düşük profil, hafif ağırlık, mükemmel termal istikrar ve ekonomik fiyat sunar. Bükülme tarzı piezoelektrik ivmeölçerler, çalışma frekans aralıklarının düşük olması ve düşük darbe dayanımları sebebi ile dar bir kullanım alanına sahiptir [47].



Şekil 5.19. Bükülme tarzı piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı [47]

Yukarıda bahsedilen 3 tip piezoelektrik ivmeölçerin birbirine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu özellikler Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Piezoelektrik İvmeölçerlerin karşılaştırılması [44]

	Bükülme	Kesme	Sıkıştırma
Kütle Piezo Taban			
Avantaj	• En iyi hassasiyet	• Düşük sıcaklık duyarlılığı • Düşük taban deformasyon duyarlılığı	• Yüksek hassasiyet • Dayanıklılığı yüksek • Teknolojik avantajlar
Dezavantaj	• kırılgan • sıcaklık duyarlılığı görece yüksek	• Düşük hassasiyet	• Yüksek sıcaklık duyarlılığı • Yüksek taban deformasyon duyarlılığı

5.5.2.10.4. Piezoelektrik ivme sensörlerinin sinyal koşullama sistemleri

İvmeölçer, elektriksel bir çıkış ürettikten sonra, bu sinyalin osiloskop, analizör, kayıt edici, gibi bir cihaz tarafından okunabilmesi için sinyalin koşullanması gerekir. Sinyal koşullandırma devresi temel olarak, sinyalin taşınabilir ve ölçülebilir şekilde düşük empedanslı voltaj sinyaline çevrilmesi, sinyalin zayıflatılması veya güçlendirilmesi ve filtreleme gibi işlemlere sahiptir.

Piezoelektrik esaslı ivme sensörlerinde sinyal koşullama iki farklı şekilde yapılabilmektedir.

1. IEPE tarzı ivme sensörlerinde, sensörün içindeki mikro elektronik devre yardımıyla
2. Yük tarzı ivme sensörlerinde, sensörün dışına takılan bir dönüştürücü yardımıyla

Tablo 5.2’de IEPE ve yük tarzı sinyal koşullama sistemlerinin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 5.2. IEPE ve yük tipi ivme sensörlerinin karşılaştırılması [47]

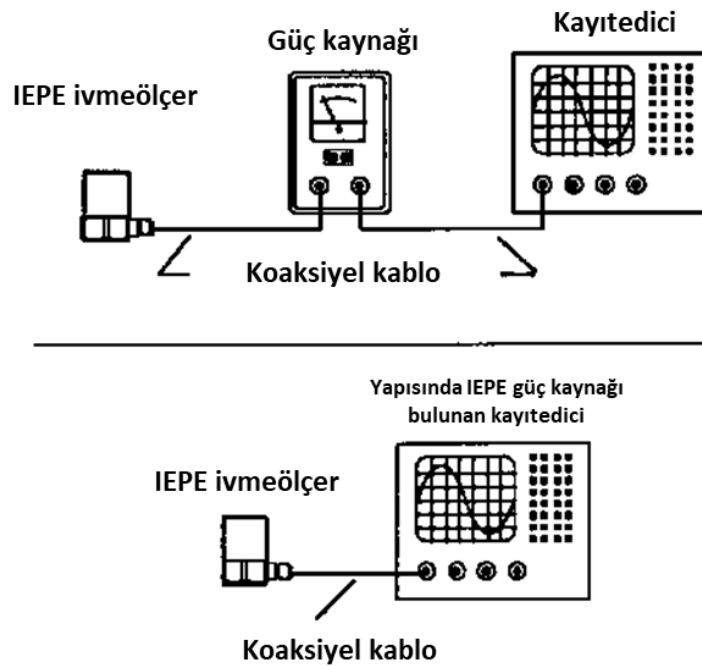
IEPE ivme sensörlerin temel özellikleri	Yük tipi ivme sensörlerin temel özellikleri
Transdüser monte edilmiş mikro elektronik devreler, birçok sinyal okuma cihazı ile uyumlu, düşük empedanslı voltaj sinyali üretmektedir.	Transdüserin çıkışı mutlaka koşullanması gereken yüksek empedanslı bir çıkıştır.
Kanal başına maliyeti düşüren, kullanımı kolay, sabit akım sinyal koşullayıcısı gerektirirler.	Harici bir sinyal koşullama gerekmektedir.
Sinyal uzun kablolu ile zorlu ortamlardan, sinyal kalitesinde bir düşme yaşanmadan aktarılabilir.	Transdüserin çıkışındaki sinyal, kabloların hareket etmesinden, elektromanyetik sinyallerden, radyo frekans dalga girişimlerinden kaynaklanan gürültüler açıktır.
Kolay bulunabilen koaksiyel kablolar ile çalışabilir.	Düşük gürültülü özel kablolarla ihtiyaç duyulur.
Hassasiyet ve frekans aralığı gibi özellikleri, besleme geriliminden bağımsız olarak her transdüser için sabittir.	Transdüserin hassasiyet, frekans aralığı gibi özellikleri değişkendir. Bu özellikler kablo uzunluğu ya da sinyal koşullayıcısının ayarları ile değişebilir.
Ekonomiktir.	540 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler.

5.5.2.10.4.1. IEPE tarzı ivme sensörleri

IEPE (İng. Integrated Electronics Piezo-Electric) tipi ivme sensörleri sensörleri voltaj çıkışlı veya düşük empedanslı ivme sensörü olarak da adlandırılırlar. Sensör içerisine yerleştirilen elektronikler, piezoelektrik algılama elemanı tarafından meydana getirilen yüksek empedans yük sinyalini, kullanılabilir düşük empedans voltaj sinyaline

dönüştürürler. Bu düşük empedans voltaj sinyali 2 tel veya koaksiyel kablo yardımıyla kolaylıkla herhangi bir voltaj okuyucu ya da kayıt cihazına taşınabilir. Düşük empedans sinyali uzak kablo mesafeleri üzerinden taşınabilir ve küçük alçaltma ile sinyal bakımından kirli alanlarda veya fabrika ortamlarında kullanılabilirler. IEPE devresi etkili şekilde empedans çevrimi sağlayabilmek için başka sinyal şartlandırıcı özellikleri de (gain, filtering ve self test features) içerir. Yüksek doğruluk oranı, kolay ve sadeleştirilmiş kullanımı, geniş çalışma frekans aralığı ve düşük maliyeti IEPE tarz ivme sensörlerinin titreşim ve şok uygulamaları için uygun tip olarak tavsiye edilmesini sağlar. Tüm bunların yanında sıcaklık IEPE tarzı devreler için önemli bir parametredir. Bu tarz ivme sensörleri için çalışma sıcaklığı limiti 121°C 'dir ancak özellikle 176°C 'ye ulaşan sıcaklıklarda çalışabilen çeşitleri de mevcuttur [47].

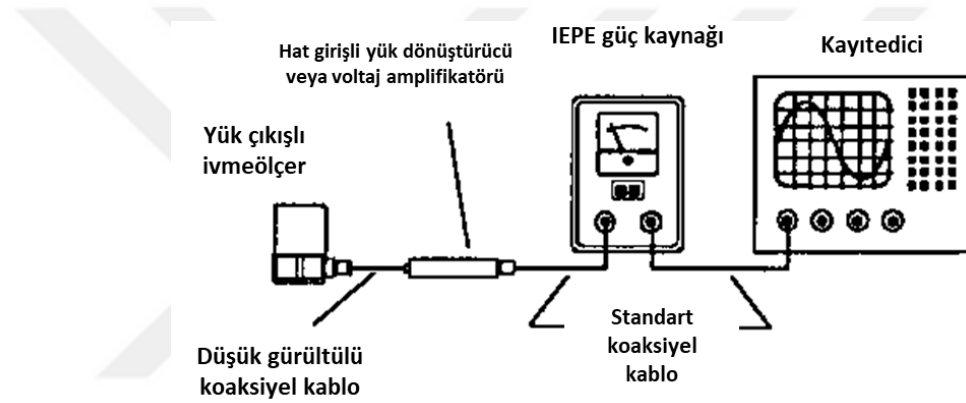
IEPE tarz ivme sensörlerinin içerisindeki elektronik elemanlar sabit akımı düzenleyen uyarıcı güç yani DC voltaj kaynağı gerektirirler. Bu güç kaynağı titreşim ölçücü, FFT analizci veya veri toplayıcıya yerleştirilebilir. Bunların hiç biri kayıtediciye (readout) yerleşmediği zaman, ayrı bir sinyal koşullayıcı gereklidir. İlave olarak, uyarıcı gereksinimini sağlayabilmesi için güç kaynağı, sinyal kazanç, filtreleme, tamponlama ve aşırı yük bildirime gibi ek sinyal koşullama ile bir araya getirilebilir. IEPE tarz ivme ölçüm sistemlerinde tipik iki sistem kurulumu Şekil 5.20'deki gibidir [47].



Şekil 5.20. Tipik iki IEPE sistemin kurulum şematiği [47]

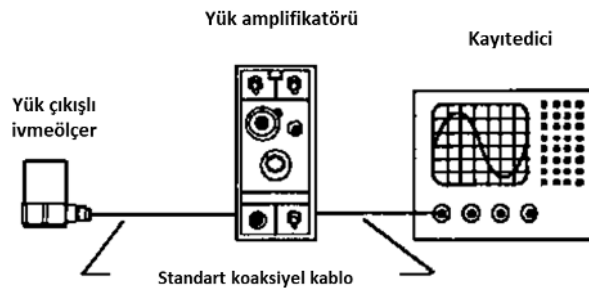
5.5.2.10.4.2. Yük tipi ivme sensörler

Yük ıkış tarzı ivme sensörlerinde piezoelektrik algılama eleman tarafından üretilen elektriksel yük sinyali yüksek empedans çıkışlıdır ve çevresel etkenlerle bozulmaya karşı oldukça duyarlıdır. Doğru bir ölçüm yapılabilmesi için sinyal kayıt cihazına girmeden düşük empedanslı voltaj sinyali şartını oluşturmak gerekir. Bunun için genellikle yk amplifikatörü ya da hat girişli yk dönüştürücü kullanılmaktadır. Yük tipi ivme sensörleri genelde yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren ölçümlerde kullanılır. lm sinyalinin uzun mesafelere taşınması söz konusu ise, sisteme bir hat girişli yk dönüştürücü entegre edilmesi gerekir. Sistem maliyetini azaltmak için hat girişli yk dönüştürücüler, IEPE ivme sensörlerindeki uyarıcı g kaynaklarıyla aynı sabit akımla çalıştırılabilir [47].



Şekil 5.21. Tipik hat girişli yk dönüştürücü sistem şematiği [47]

Yük tipi ivme sensörlerinde çıkış sinyalinin yüksek empedansından dolayı, birkaç önemli ölçüm önlemi alınmalıdır. Yük amplifikatörü ve ivme sensörü arasında düşük gürültüye sahip özel koaksiyel kablo kullanılmalıdır. Bu kablo özellikle tribo elektrik gürültü etkilerini azaltır ve konnektörlerin, kablolamanın ve ivme sensörün yüksek izolasyon direncini daima muhafaza eder [47].



Şekil 5.22. Yük amplifikatör devresi şematiği [47]

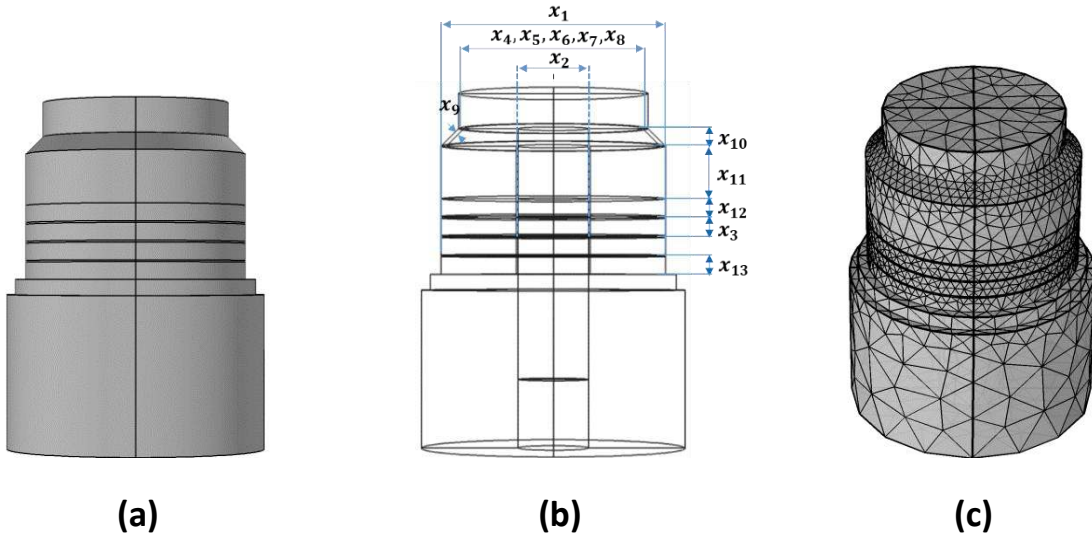
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, güç aktarma organları gibi titreşim değerlerinin kritik olduğu ürünler üzerinde kullanılabilecek yeterlilikte ve bilgisayar destekli tasarım araçları kullanılarak prototip üretim maliyetleri azaltılmış ivme sensörü tasarlanması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında öncül olarak tasarlanan ivmeölçer prototip olarak oluşturulmuş ve kalibrasyonlu bir ivme sensörü ile eş zamanlı olarak gerçel titreşime maruz bırakılmıştır. Kaydedilen ölçüm sonuçları hem COMSOL sonlu elemanlar analiz programı verileriyle hem kalibrasyonlu sensör verileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. En iyileme çalışmaları kapsamında belirlenen değişkenlere göre 0-10 kHz frekans aralığında titreşim verisi alınmıştır. Verilerin, aynı değişkenler yansıtılarak elde edilen COMSOL analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Tüm değişken ve veriler değerlendirilerek sıkıştırma (compression) tarz ivmeölçer için hedeflenen sensör özelliklerine en yakın tasarıma karar verilmiştir.

6.1. Modelleme Çalışmaları

Sıkıştırma tarz olarak tasarlanan ivmeölçerin modelleme çalışmaları COMSOL sonlu elemanlar analiz yazılımı ile yapılmıştır.

6.1.1. Model



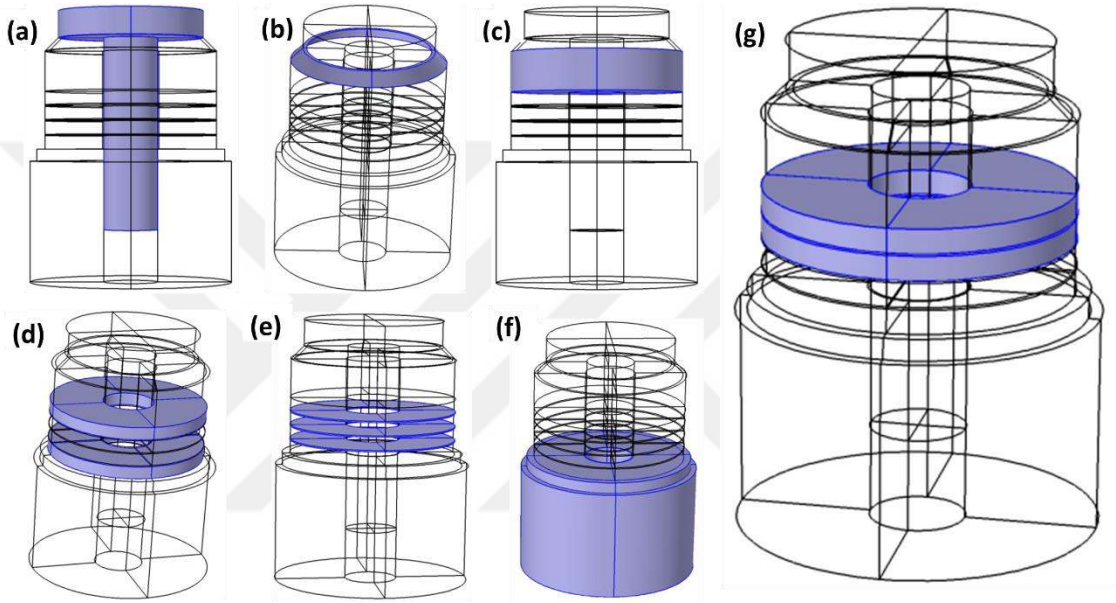
Şekil 6.1. (a) Öncül olarak tasarlanan ivmeölçerin 3 boyutlu görseli (b) Nümerik analiz için belirlenen 13 geometrik parametre (c) Sonlu elemanlar analizi için ivmeölçerin hücrelendirilmiş görseli

Öncül olarak tasarlanan model için alt parçalar ve geometrileri belirlenmiş, yapısal ve modal analiz için hücrelendirme yapılmış ve eniyileme çalışmaları için değişkenler

belirlenmiştir. Tasarımı yapılan modelde alt parçalar genelde silindirik geometride, kolay sökülüp takılabilecek şekilde ve montajlanmış ivmeölçer kompakt yapıdadır.

6.1.2. Öncül tasarım ve alt parçalar

Öncül olarak tasarlanan modelde civata, yay elemanı, sismik kütle, yalıtkan diskler, iletken levhalar, alt tabla ve piezoelektrik diskler bulunmaktadır.

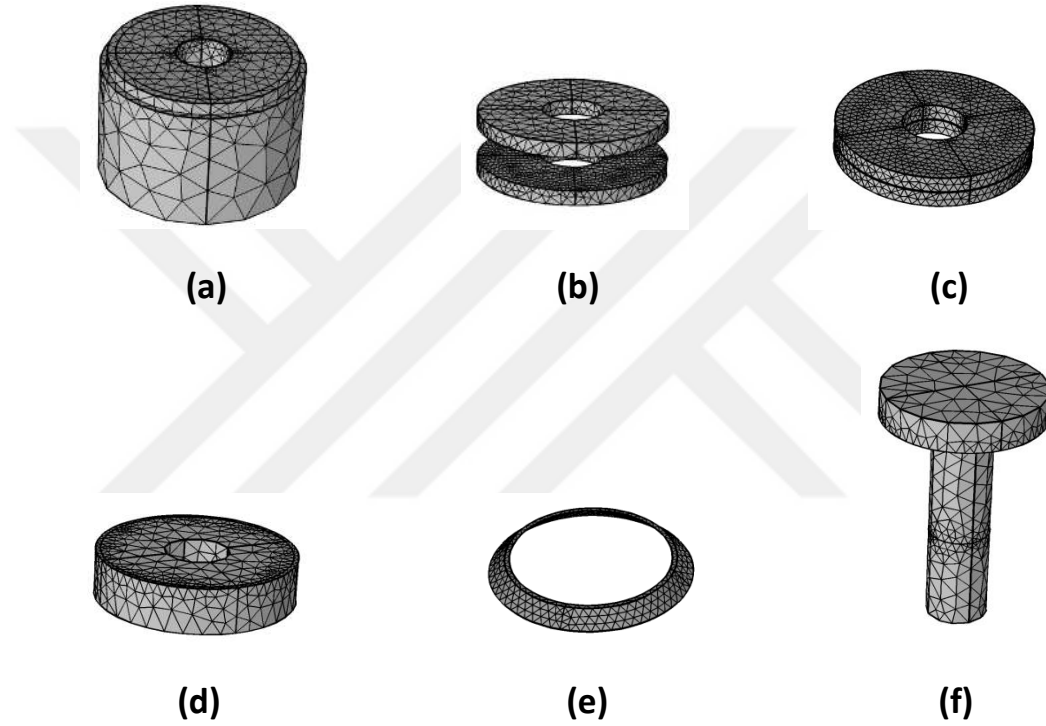


Şekil 6.2. Öncül tasarım ivmeölçerin alt parçaları. (a) Civata, (b) Yay elemanı, (c) Sismik kütle, (d) Alt ve üst yalıtkan diskler, (e) İletken levhalar, (f) Alt tabla, (g) Piezodiskler

Civata, sisteme bir ön gerilme sağlaması ve ivmeölçer alt parçalarını bir arada tutması için tasarlanmıştır. **Yay elemanı**, tasarıma sistemi fazla rijit olmaktan kurtarması ve hassasiyeti arttırması için eklenmiştir. **Sismik kütle**, ivmenin de etkisiyle piezoelektrik malzeme üzerine etkiyecek ivmelenme kuvvetini oluşturan elemandır. **Yalıtkan diskler**, piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulacak elektriksel yükün korunması için piezodisklerin altında ve üstünde yer alacaktır. Piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulacak potansiyelin iletilmesi **iletken levhalar** ile sağlanacaktır. **Alt tabla**, civata ile birlikte alt parçaların bir arada tutulması ve sisteme rijitlik katması için gereklidir. **Piezoseramik diskler**, sistemin en önemli alt parçaları olup ivmelenme halinde üzerine etkiyecek yük karşısında voltaj çıktısı sağlayan parçalardır. 2 adet olması tasarlanmıştır.

6.1.3. Alt parçaların hücrelendirilmesi (Meshleme)

Sonlu elemanlar analizi için alt parçalar kritikliğine göre farklı hücre büyüklüklerinde hücrelendirilmiştir. Yük çıkışında işlevi olmayan ve etkiyen yük karşısında en az deforme olması beklenen alt tablada mesh büyüklüğü en fazla iken stres dağılımının önemli olduğu yay, piezodiskler ve yalıtkan disklerde mesh büyüklüğü düşük tutulmuştur.



Şekil 6.3. Sonlu elemanlar analizi için öncül tasarımın alt parçalarının hücrelendirilmiş görseli. (a) Alt tabla, (b) Alt ve üst yalıtkan diskler, (c) Piezodiskler, (d) Sismik kütle, (e) Yay elemanı, (f) Civata

6.1.4. Alt parçaların montajlanması

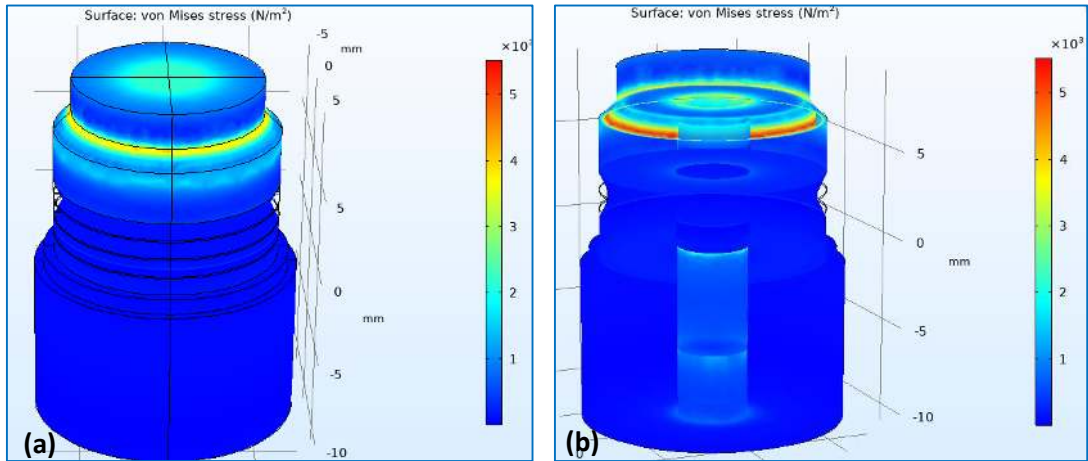
Belirlenen temel tasarıma göre ivmeölçer montajında en altta sistemin temeli görevi gören alt tabla bulunmaktadır. Sistemin alt parçaları civata ve alt tabla arasında sandviç edilmiştir. 2 adet piezoelektrik disk alt ve üst yalıtkan disklerin arasındadır. Piezoelektrik diskler negatif kutupları birbiriyle öpüşecek, pozitif kutupları dışta kalacak şekilde yerleştirilmiştir. 3 adet iletken levha, piezodisklerin üstünde, arasında ve altında olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Prototipleme yapılırken bu levhalardan altta ve üstte bulunanlar aynı kutupla temas ettikleri için aynı kabloya bağlanacaktır. Sismik kütle üst

iletken diskin üzerine yerleştirilmiştir. Yay elemanı ise civata başı ile sismik kütle arasındadır. Tüm alt parçalar civatanın alt tablaya ulaşabilmesine olanak verecek şekilde ortaları delik olarak tasarlanmıştır. Civata tüm parçaları bir arada tutacak şekilde alt tablaya sıkılmıştır.

6.1.5. Sonlu elemanlar yazılımı ile analiz

6.1.5.1. Yapısal analiz

COMSOL sonlu elemanlar analiz programı yardımıyla öncül olarak tasarlanan sıkıştırma tarz ivmeölçer 1g-100g ivme aralığında yapısal olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları bahsedilen ivmelenme aralığında alt parçalar içerisinde en fazla şekil değiştirmenin yay elemanı üzerinde gerçekleşeceğini öngörmektedir. Yay elemanı stres dağılımı incelendiğinde 100g değerinde bile en kritik bölgelerde gerilme değerlerinin $5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ olduğu görülmüştür. Bu değer tasarımda yay elemanı malzemesi olarak düşünülen St37 çeliğinin 240MPa olan akma gerilmesinin [48] çok altında olup malzeme dayanımı açısından tasarım için herhangi bir risk teşkil etmeyeceği anlaşılmıştır. Yine de yay elemanı et kalınlığı bir iyileştirme parametresi olarak eniyileştirme çalışmalarında değerlendirilecektir.

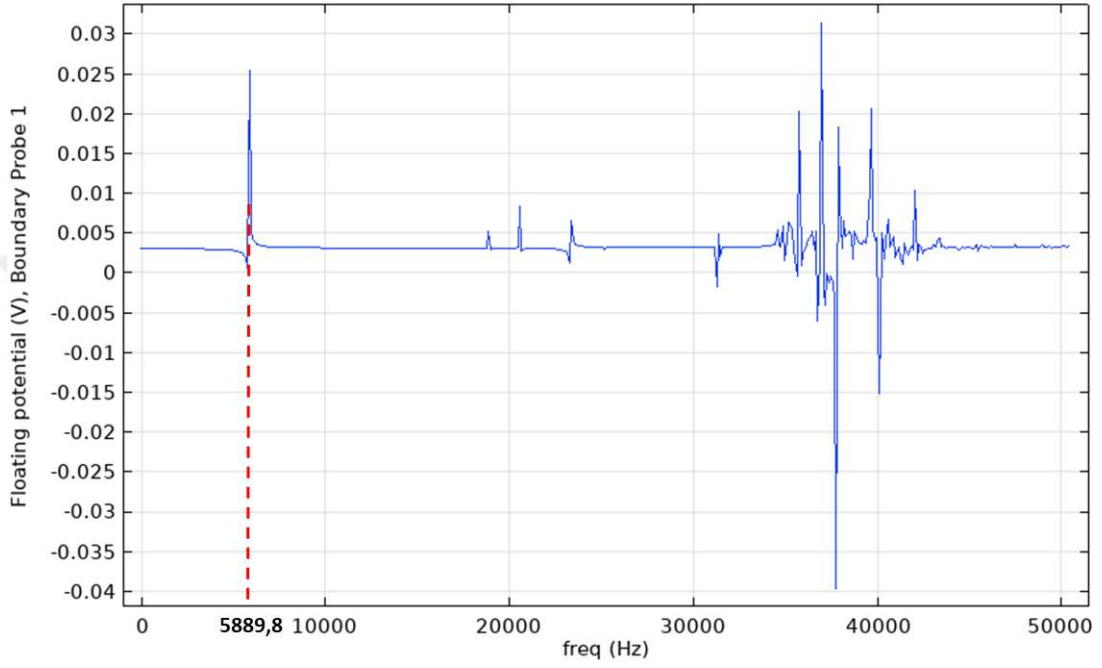


Şekil 6.4. Öncül tasarım stres analizi. (a) 1g ivmelenmede stres dağılımı, (b) 100g ivmelenmede stres dağılımı

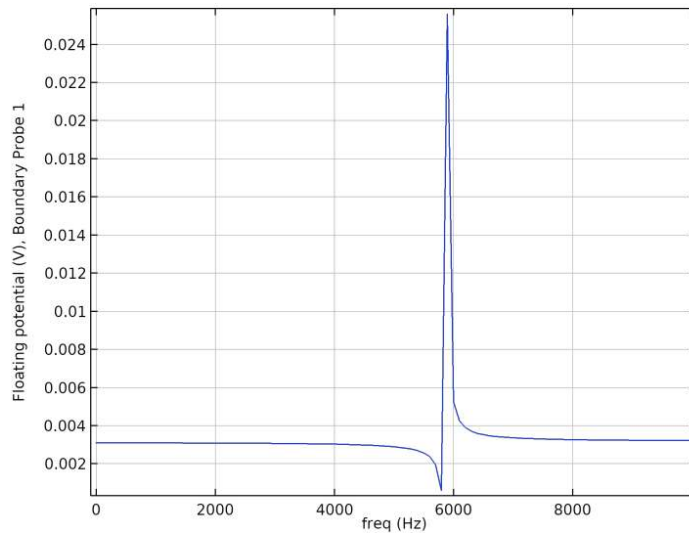
6.1.5.2. Modal analiz ve rezonans frekans spektrumu

Öncül tasarımın 0-50 kHz aralığında modal analizi yapıldığında ilk doğal frekansının 5889,8 Hz’de olduğu görülmüştür. Bu frekans değerinde ivmeölçerden alınan voltaj çıktısı normalin 10 katına kadar çıkmaktadır. Şekil 6.5’te sistemin 0-50 kHz’de

frekansa bağılı voltaj çıktıları grafiksel olarak verilmiştir. Karşılaşılan ilk doğal frekans ivmeölçer için hedeflenen (0-10 kHz) çalışma frekans aralığı içerisinde yer almakta olup tasarımın eniyileştirme araştırmalarında bu değerin yukarıya çekilmesi ile ilgili çalışmalar yapılacaktır. 5889,8 Hz’de ivmeölçerin voltaj çıktısındaki ani yükselme Şekil 6.6’da, modal görünümü Şekil 6.7’de verilmiştir

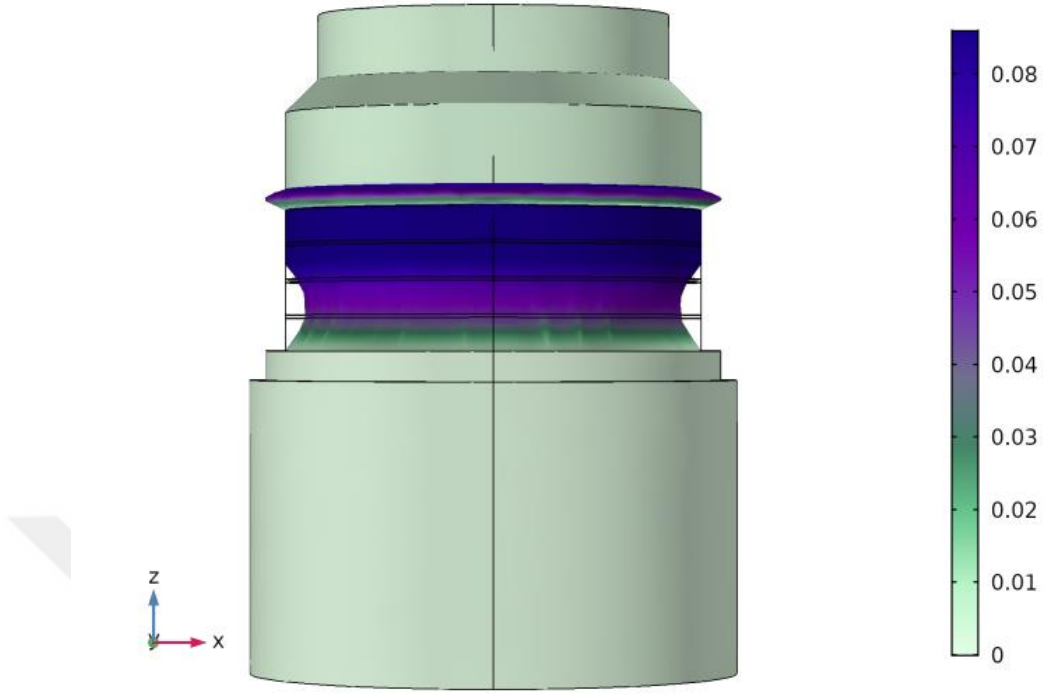


Şekil 6.5. Öncül tasarımın 0-50 kHz aralığında frekansa bağılı voltaj çıktısı



Şekil 6.6. Öncül tasarımın 0-10 kHz’deki doğal frekansı

Eigenfrequency=5889.8 Hz Surface: Total displacement (mm)



Şekil 6.7. Öncül tasarımın 5889,8 Hz'deki modal görünümü

6.2. Prototipleme-Alt Parçalar ve Montaj

6.2.1. Alt Parçaların İmalatı

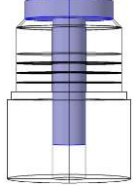
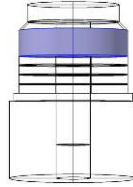
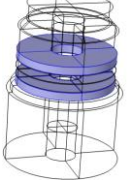
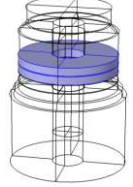
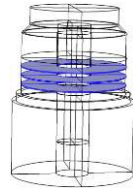
Alt parçalardan; civata, yay elemanı, sismik kütle ve alt tabla St37 çeliğinden torna ve freze tezgahlarında imal edilmiştir. 200µm kalınlığındaki iletken levhalar lazer kesme makinasında kesilmiştir.

Seramik yalıtkan diskler seramik imalat prosesleri takip edilerek imal edilmiştir.

Tasarımın en önemli parçası olan piezoelektrik seramik diskler, imalat aşamasında yalıtkan disklerden farklı olarak kutuplama ve elektrotlama gibi piezoelektrik özellik kazandırma işlemlerinden geçirilmiştir. Hem yalıtkan diskler hem de piezoelektrik diskler hedeflenen geometrilere lazer kesme ve delik delme tezgahlarında getirilmişlerdir.

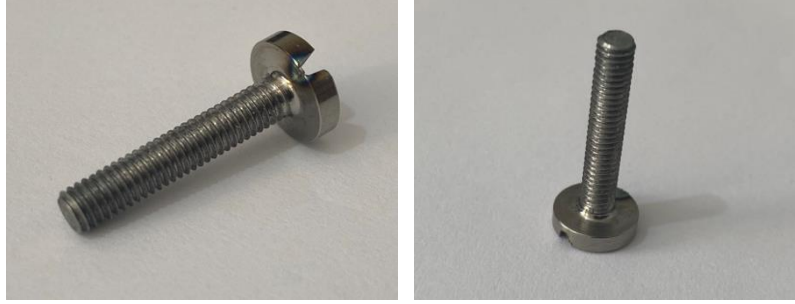
İmal edilen tüm alt parçaların özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. *Prototip ivmeölçer alt parçalarının özellikleri*

No	Parça Adı	Parça Görseli	İlk prototipte kullanılan adet	Çap	Yükseklik	Malzeme	Görevi
1	Cıvata		1	Cıvata Başı 11mm Dış Anma Çapı 4mm	Cıvata Başı 3mm Dış işlenmiş çap 12mm	St37	Sensörün alt parçalarına ön gerilme uygulayarak ve aynı zamanda alt tabla ile birlikte parçaların bir arada tutulmasını sağlar
2	Yay Elemanı		1	Küçük Çap 10,8mm Küçük Çap 12,8mm	1 mm (Et kalınlığı:0,3mm)	St37	Sisteme esneklik katar ve aynı zamanda ivmeölçer hassasiyetini artırır
3	Sismik Kütle		1	Çap: 12,8mm Delik Çapı:4,2mm	3mm	St37	İvmelenme etkisi ile piezo elemanlar tarafından yük çıkışına sebep olacak kuvveti oluşturur
4	Yalıtkan Disk		2	Çap: 12,8mm Delik Çapı:4,2mm	1mm	Seramik	Piezoelemanlar tarafından oluşturulan elektriksel potansiyelin izole edilmesini sağlar
5	Piezodisk		2	Çap: 12,8mm Delik Çapı:4,5mm	1mm	PZT-5A	İvmelenme etkisi altında elektriksel yük çıkışı verir
6	İletken Levha		3	Çap: 12,8mm Delik Çapı:5 mm	0,2mm	Fosfor Bronz	Piezoelemanlar tarafından oluşturulan potansiyelin iletilmesini sağlar
7	Alt Tabla		1	Çap : 15mm Yalıtkan diskin oturduğu yüzeyde çap: 12,8mm Delik çapı (Cıvata deliği) 4mm	Toplam yükseklik 10mm Yalıtkan diskin oturduğu çapın yüksekliği 1mm	St37	Sisteme rijitlik katarak yük altında deformasyonu önler. Cıvata ile birlikte ivmeölçerin alt parçalarının bir arada tutulmasını sağlar

6.2.1.1. Civata

Standart bir civata kullanılmayıp ilk prototip için St37 çeliğinden 15 mm uzunluğunda ve 1mm diş adımına sahip M4 civata imal edilmiştir.



Şekil 6.8. İvmeölçer civatası

6.2.1.2. Yay elemanı

Sistem rijitliğini azaltması ve ivmeölçer hassasiyetini artırması için tasarıma dahil edilen yay elemanı 0,3mm et kalınlığında St37 malzemeden imal edilmiştir. Konik yapıdaki yay elemanının taban çapı 12,8mm, tepe çapı 10,8mm, yüksekliği 1mm'dir.



Şekil 6.9. İvmeölçer yay elemanı

6.2.1.3. Sismik kütle

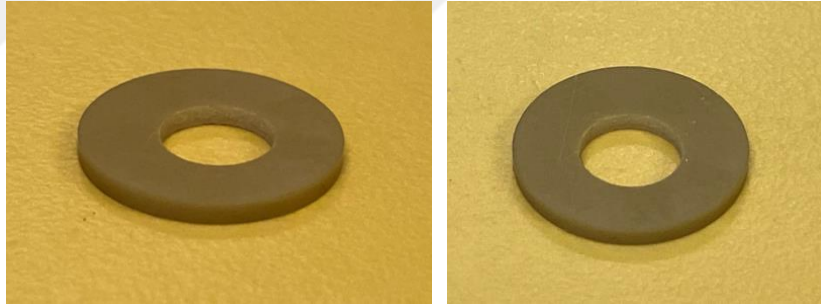
St37 çeliğinden imal edilmiştir. Dış çapı 12,8mm ve delik çapı civatanın geçmesine izin verecek şekilde 4,2 mm'dir. Yüksekliği ilk prototip için 3mm olarak öngörülmüş ve imal edilmiştir.



Şekil 6.10. *İvmeölçer sismik kütlesi*

6.2.1.4. Yalıtkan diskler

Piezodisklerin altına ve üstüne yerleştirilerek elektriksek yalıtımı sağlaması amacıyla tasarıma eklenen yalıtkan diskler seramik malzemeden imal edilmiştir. Dış çapları 12,8mm, delik çapları 4,2mm'dir. Yükseklikleri ilk prototip için 1mm olacak şekilde imal edilmiştir.



Şekil 6.11. *İvmeölçer yalıtkan diskleri*

6.2.1.5. İletken levhalar

Piezodiskler tarafından sağlanan elektriksel yükün iletilmesi amacıyla piezodisklerin üstüne, arasına ve altına birer adet yerleştirilmişlerdir. Olası cıvata dişi temasını önlemek amacıyla iç çapları diğer alt elemanların iç çaplarından daha geniş tutulmuştur (5mm). 200µm kalınlığında iletken diskler fosfor bronzdan imal edilmiş olup çap ve delik işlemleri lazer kesim makinasında yapılmıştır.



Şekil 6.12. İvmeölçer iletken levhaları

6.2.1.6. Alt tabla

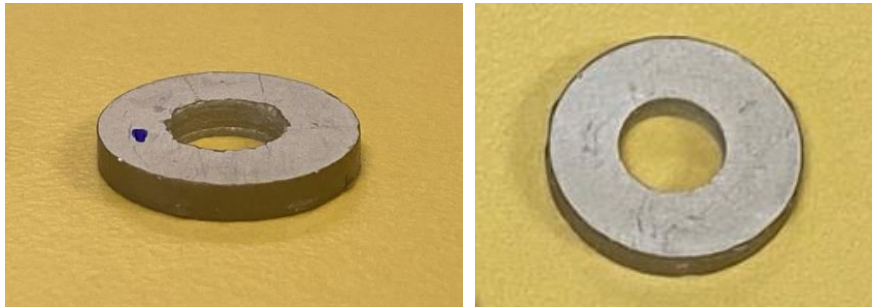
Sistem alt parçalarının montajı için gövde görevi gören alt tabla St37 çeliğinden imal edilmiştir. Çapı 15mm, yüksekliği 10mm'dir. Alt yalıtkan diskin oturduğu yüzeyde çap 12,8mm'dir. Cıvata bağlantısı için içerisine M4x1 vida deliği işlenmiştir.



Şekil 6.13. İvmeölçer alt tablası

6.2.1.7. Piezoseramik diskler

İvme ölçümü için voltaj çıkışı sağlayan piezodiskler PZT-5A seramiğinden imal edilmiştir. Yükseklikleri 1mm, dış çapı 12,8mm ve delik çapı 4,5 mm olan piezodisklerin piezoelektrik sabiti, d_{33} 370 pc/N 'dur

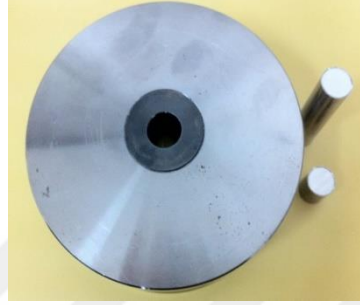


Şekil 6.14. İvmeölçer piezodiskleri

6.2.1.7.1. Piezoelektrik seramik üretimi

İvmeölçer tasarımında en önemli alt parçanın piezoseramik disk olması sebebi tez çalışmasında kullanılan piezodisklerin imalat aşamaları detaylı olarak verilmiştir.

Öncelikle ticari tozlar, Şekil 6.15'te verilen kalıplarda Şekil 6.16'da gösterilen hidrolik pres yardımıyla şekillendirilmiştir.



Şekil 6.15. *Presleme için kullanılan metal kalıplar*

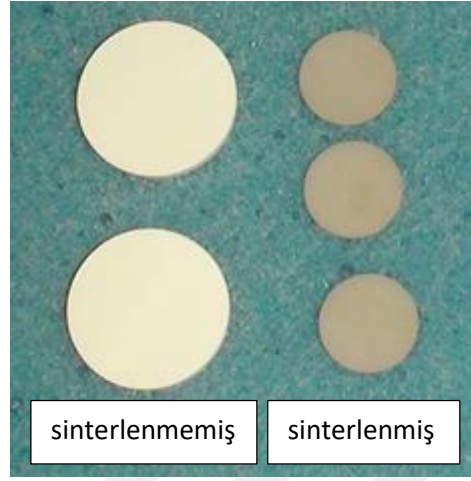


Şekil 6.16. *Hidrolik pres*

Preste elde edilen yaş seramikler 1150-1275°C sıcaklıklar arasında sinterlenmiştir. Sinterleme işlemiyle malzemelerin yoğunluğunun değişmesine bağlı olarak mekanik, fiziksel ve elektriksel özellikleri de değişmektedir. Prosesin bu özelliğinden yararlanılarak malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi de mümkündür. Şekil 6.17'de sinterleme öncesi ve sonrası seramik örnekleri verilmiştir.

Tez kapsamında sentezlenen toz kompozisyonlarının her biri ile farklı sıcaklıklarda sinterleme çalışması yapılmış ve her sıcaklık için yoğunluk ve elektriksel özellikler

incelenmiştir. Yüzey işlemleri sonrasında kompozisyonların yoğunluk hesaplaması Arşimed prensibine göre yapılmıştır.

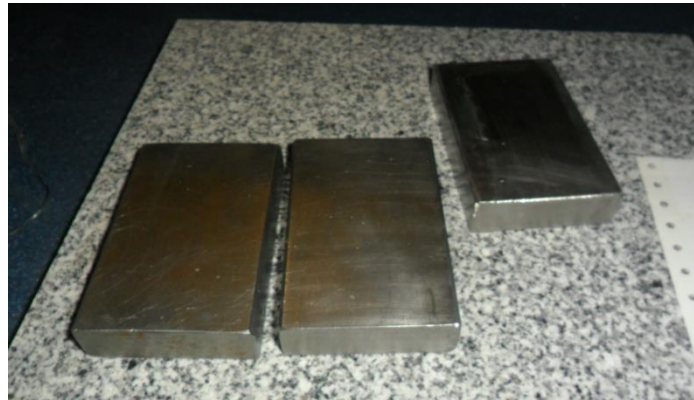


Şekil 6.17. Sinterlenmiş ve sinterlenmemiş seramik peletlerin görüntüsü

Arşimed prensibine göre yoğunluk, (5-1) denklemine göre hesaplanmaktadır

$$\rho = \frac{\text{Kuru Ağırlık}}{\text{Yaş Ağırlık} - \text{Asılı Ağırlık}} \quad (5-1)$$

Yoğunlukları ölçülen numuneler polimer bazlı yapıştırıcılarla Şekil 6.18'deki gibi düz metal plakalara sıcaklık yardımıyla yapıştırılmıştır.



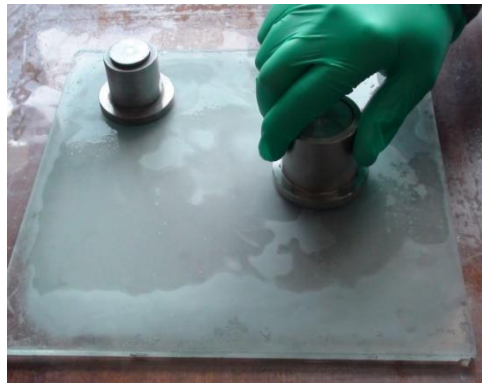
Şekil 6.18. Piezoseramiklerin yapıştırıldığı metal plakalar

Metal plaka üzerindeki piezoseramikler yüzey paralelliği sağlanması amacıyla Şekil 6.19'daki taşlama cihazında taşlanmıştır.



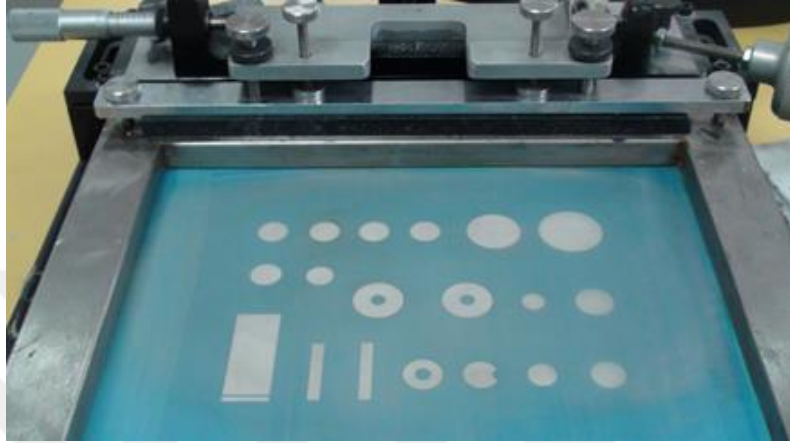
Şekil 6.19. Taşlama cihazı

Piezoseramik malzeme üretiminde yüzey paralelliğinin yanında yüzey pürüzlülük değerleri de önemli olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün elektrolama prosesinde elektrotun yüzeye yapışmasına izin verecek değerlerde olması gerekir. Bunun sağlanabilmesi için taşlanmış numuneler son olarak Şekil 6.20’deki gibi yüzey finişleme işleminden geçirilmiştir.



Şekil 6.20. Yüzey finişleme işlemi

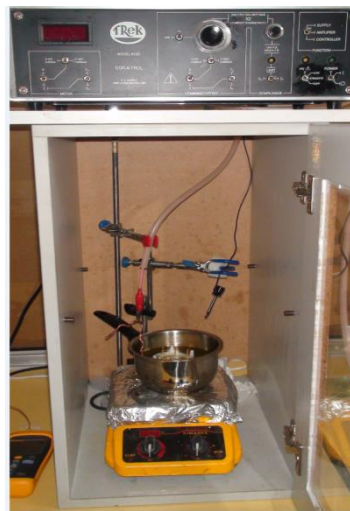
Sinterlenen seramiklerden en yüksek verimin alınabilmesi için doğru sinterleme sıcaklığına ve doğru yoğunluk değerine sahip olmaları gerekmektedir. Bu koşul göz önünde bulundurularak farklı sinterleme sıcaklığı denemeleri yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerin yoğunlukları ölçülmüş ve elek baskı yöntemi ile elektrot pasta kullanılarak elektrotlama işlemleri yapılmıştır (Şekil 6.21).



Şekil 6.21. *Elektrotlama düzeneği*

Elektrotlanan numunelere ısıtım işlemi uygulanarak seramik yüzeylerle metalik elektrotların bağlanmaları sağlanmıştır. Piezoelektrik malzemeler bu proseslerin ardından iletken yüzeylere sahip olmuştur.

Yüzey iletkenliği sağlanan seramikler Şekil 6.22’deki kutuplama düzeneğinde 2,4 kV/mm elektrik alanına maruz bırakılarak kutuplama işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.22. *Seramik kutuplama düzeneği*

Kutuplama işlemini takiben numunelerin elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Tablo 6.2’de farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen numunelerin yoğunluk ve elektriksel karakterizasyon sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 6.2. Farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen numunelerin karakterizasyon sonuçları

Sinterleme Sıcaklığı(°C)	D	d ₃₃	Q _E	Dis.Fak	F _a	F _r	k _p	R (ohm)	C (nanoF)	Q _m	K ^T
1250 PZT-5A	7,78	434	73	0,0136	202650	174210	0,59	19,9	2,15	82	1989
1225 PZT-5A	7,68	407	70	0,0142	200500	174700	0,56	20,5	2,14	86	1967
1175 PZT-5A	7,62	391	65	0,0153	199020	173915	0,55	21,8	2,11	84	1952

Birçok işlemten geçirilen numunelerde yüzey paralelliğinin bozulmuş olması ihtimaline karşı yüzey paralellikleri Şekil 6.23’te verilen yüzey paralelliği ölçüm ünitesi ile kontrol edilmiştir.



Şekil 6.23. Yüzey paralelliği ölçüm ünitesi

İvmeölçer üretimindeki hassasiyet nedeniyle iletken levhalar Şekil 6.24’te gösterilen lazer kesim cihazı ile kesilmiştir.



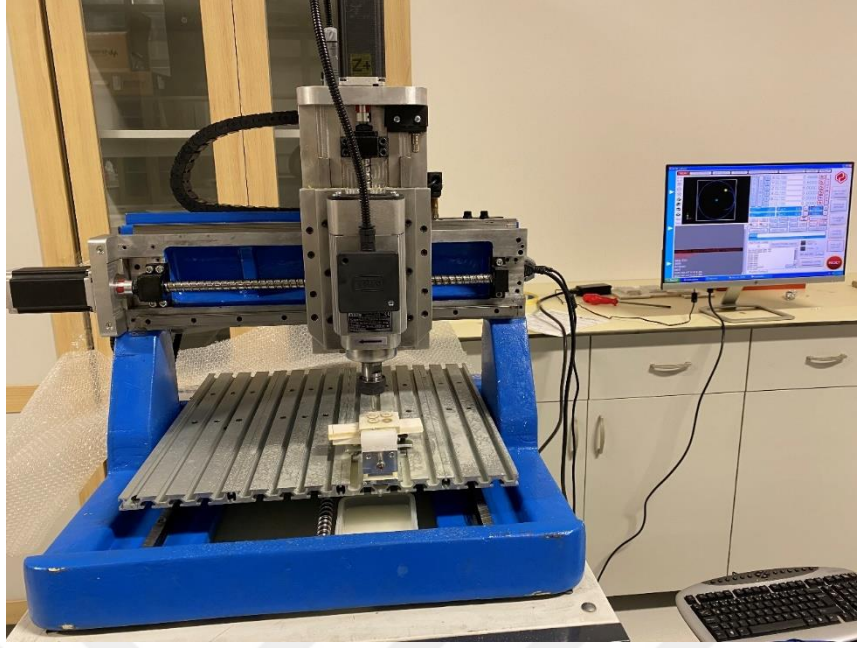
Şekil 6.24. İletken levhaların kesilmesinde kullanılan lazer kesim cihazı

Piezoseramik malzeme istenen özelliklerde elde edildikten sonra tasarıma uygun geometride şekillendirilebilmesi için lazer kesim ve Şekil 6.25 'te verilen delik delme tezgahlarında son işlemleri yapılarak Şekil 6.26 (b)'deki gibi montaja uygun hale getirilmiştir.

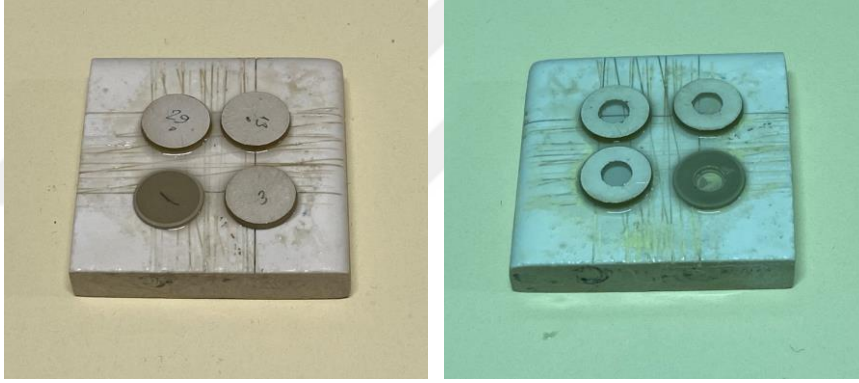
Elde edilen PZT-5A seramik malzemenin piezoelektrik özellikleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Elde edilen PZT-5A'nın piezoelektrik özellikleri

Özellikler	PZT-5A	
Eşleşme Katsayısı (%)	K_p	71
Piezoelektrik Yük Sabitleri (PC/N)	d_{33}	450
	d_{31}	-200
Piezoelektrik Voltaj Sabitleri ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	g_{33}	22,1
	g_{31}	-11,1
Dielektrik Sabiti	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2300
Kayıp Faktörü (%)	$\tan \delta$	0,0
Frekans İçeriği (Hz .M)	N_t	2040
	N_p	2080
	NL	1545
Elastiklik Sabiti ($\times 10^{10}$ N/m ²)	S_{11}^E	13,8
	S_{11}^0	11,8
Mekanik Kalite Faktörü	Q_m	80
Yoğunluk (g/cm ³)	ρ	7,6



Şekil 6.25. Piezoseramik disklere delik delme işlemi için kullanılan tezgah

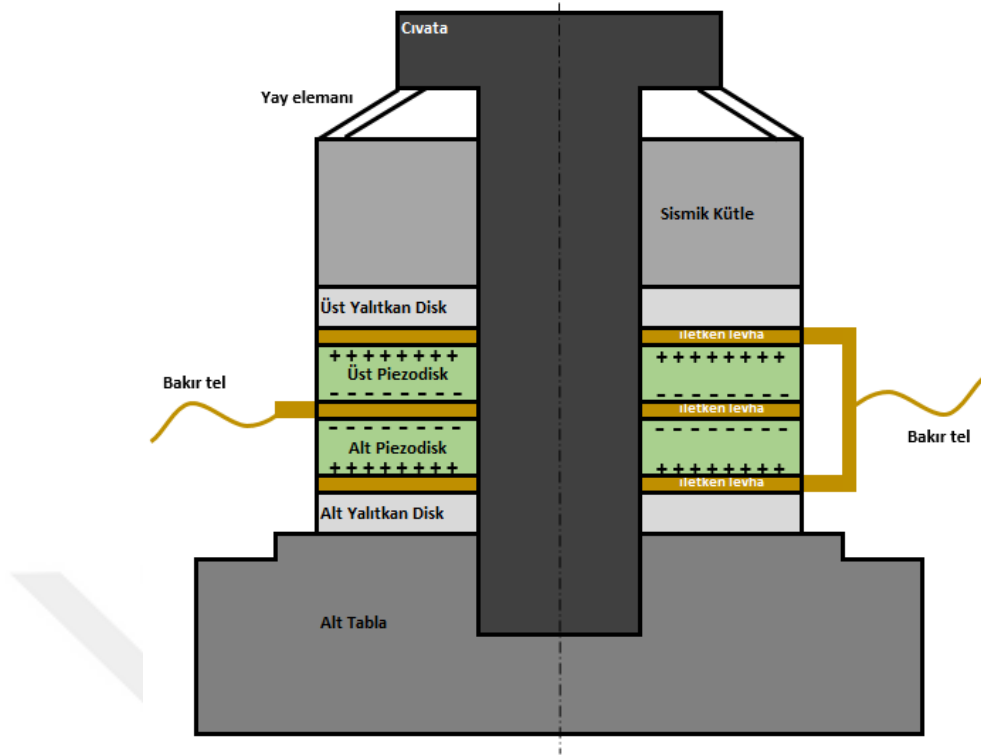


Şekil 6.26. Piezoseramik diskler (a) Delik delme işlemi öncesi, (b) Delik delme işlemi sonrası

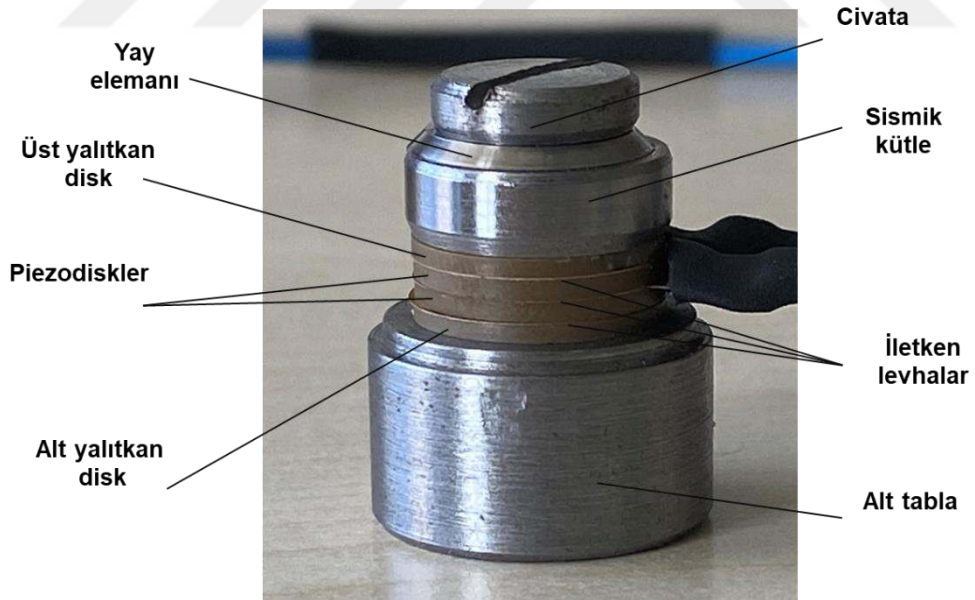
6.2.2. Montajlama

Alt parçaların, tasarımda öngörüldüğü şekilde montajlanması ve iletken levhalara kablo bağlantısının yapılması ile öncül prototip ivmeölçer imal edilmiştir.

Piezoseramik ivmeölçer montajı Şekil 6.27'deki şematik gösterime uygun olarak piezoseramik katlar arasına iletken levhalar konularak yapılmıştır. Bu tasarımda piezoseramiklerin seri olarak bağlanabilmesi amacıyla piezoelektrik disklerin montajı Şekil 6.27'deki şematikte olduğu gibi polarizasyon yönleri birbirine zıt olacak şekildedir. Aynı kutuba temas eden iletken levhaların kolları birleştirilerek elektriksel iletim sağlanmıştır.



Şekil 6.27. Piezoelektrik ivmeölçer montaj şematiği



Şekil 6.28. Montajı tamamlanmış prototip ivmeölçer



Şekil 6.29. Kablo bağlantısı yapılmış BNC konnektörlü prototip ivmeölçer

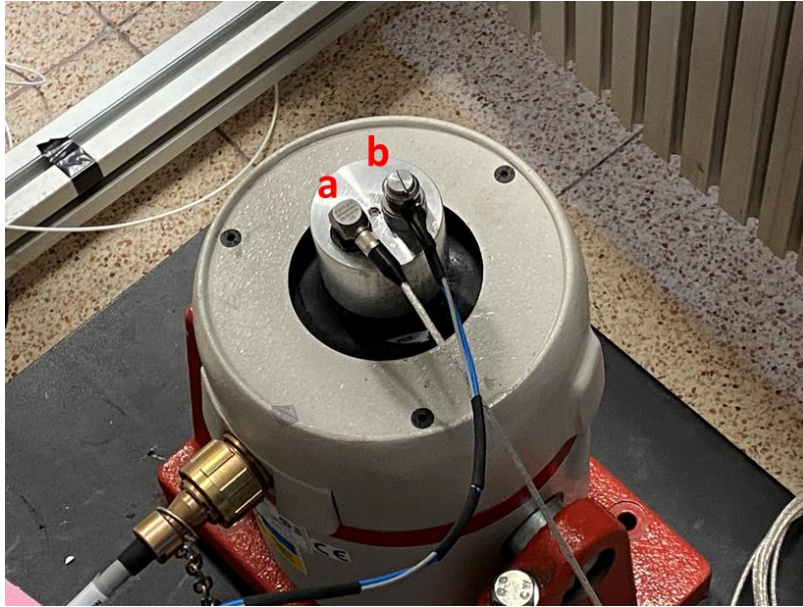
6.3. Deney Düzeneği

Bu tez çalışmasında deneysel çalışmalar prototip olarak üretilen ivmeölçer varyasyonlarının titreştirici (shaker) üzerine bağlanarak belirli ivme değerlerinde ve hedeflenen frekans aralığında sağladığı voltaj çıktılarının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Titreştirici düzenek tarafından üretilen titreşim hareketlerinin ivme büyüklükleri ve frekans değerleri lazer titreşim ölçüm cihazı ile hassas olarak ölçülmüş ve değişen parametrelerde elde edilen voltaj çıktıları kaydedilmiştir. Prototip ivme sensörünün doğrusallığı ise kalibrasyonlu bir ivme sensöründen eş zamanlı olarak alınan karşılaştırma verileri ile kontrol edilmiştir.

Deney düzeneği; prototip ivme sensörü, eş zamanlı ölçüm yapan ivme sensörü, sinyal jeneratörü, sinyal güçlendirici, titreştirici, lazer titreşim tarayıcı ve osiloskoptan oluşmaktadır.



Şekil 6.30. Deney düzeneği a) Sinyal jeneratörü, b) Sinyal güçlendirici, c) Titreştirci d) İvme sensörleri, e) Titreşim tarayıcı, f) Osiloskop



Şekil 6.31. Titreştirci üzerine yerleştirilen ivme sensörleri a) Prototip ivme sensörü b) Eş zamanlı ölçüm yapan kalibrasyonlu Brüel Kjaer ivme sensörü

Deney düzeneği içerisinde yer alan cihaz ve ekipmanların teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.32 Brüel Kjaer 4513-001 model ivme sensörü

Tablo 6.4. Brüel Kjaer 4513-001 model ivme sensörünün teknik özellikleri [51]

	Birim	Brüel Kjaer 4513-001 Tip İvme Sensörü
Dinamik Karakteristikler		
Voltaj Hassasiyeti (160 Hz'de)	mV/g	100 ± 10 %
Ölçüm Aralığı (±pk)	ms ⁻² (g)	490 (50)
Frekans Cevabı	-	Tipik genlik cevabına bakınız
Montajlı Rezonans Frekansı	kHz	32
Genlik Cevabı ± 10% (Tipik)	Hz	1'den - 10.000'e kadar
Artık Gürültü	mg	0.2
Tersinir Hassasiyet	%	<5
Elektriksel Karakteristikler		
Çıkış Empedansı	Ω	100
DC Çıkış (Oda sıcaklığında)	V	12± 1
Bias Voltajı (Belirlenmiş sıcaklık aralığında)	V	8 - 16
Besleme Gücü	mA	2 - 20
Başlama Süresi	s	1
Topraklama	-	İzole edilmiş taban
Doğal Karakteristikler		
Sıcaklık Aralığı	°C	-51 - 100
Nem	-	Hermatik olarak korunaklı
Azami Operasyonel Şok (Pik)	g pk	5000
Termal Geçiş Hassasiyeti	% °C	0.24
Termal Şok Hassasiyeti	g/ °C	0.04
Fiziksel Karakteristikler		
Boyutlar	-	Boyut şematğine bakınız
Ağırlık	gr	8.6
Dış Kap Malzemesi	-	Titanyum
Konnektör	-	10-32 UNF
Montaj	-	10-32 UNF'ye uygun delik
Montaj Torku	Nm	1.7

Tablo 6.5. Polytec titreşim tarayıcı teknik özellikleri

Cihaz Görseli	Özellik	Açıklama
	Ölçüm mesafesi	125 mm
	Tarama açısı	50° x 40°
	Lazer sınıfı	Sınıf 2
	Tarayıcı özellikleri	Açısal çözünürlük < 0.001°
	Kamera özellikleri	HD, 30x optik büyütme, görüş sahası 64° x 38°
	Arayüzler	Elektriksel ve mekanik arayüzleri bulunmaktadır
	Ağırlık	9 kg
	Boyutlar	189x370x177 mm

Tablo 6.6. WF 1966 sinyal jeneratörü teknik özellikleri

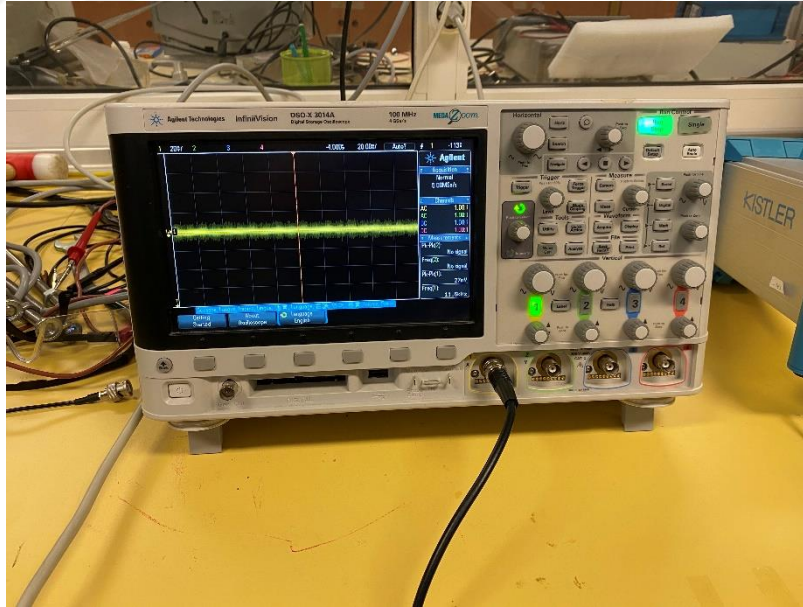
Cihaz Görseli	Özellik	Açıklama
	Frekans Aralığı	0.01 µHz – 15 MHz
	Frekans Ayarlama Çözünürlülüğü	0.01 µHz
	Maks. Çıkış Gücü	Kanal1/2: 20Vp-p/Açık
	Maks. Çıkış Gücü Çözünürlülüğü	Kanal1/2: 0.1 mVp-p/Açık
	Dalga Biçimi Dikey Çözünürlük	14 bit
	Sürekli Osilasyon Hareketi	Mevcut
	Modülasyon	FM, PM
	Kanal Sayısı	2
	Ekran Taraması	Frekans, faz
	Kayıt Edilebilir Hafıza Sayısı	10
	Güç	AC 100V/115V/230V

Tablo 6.7. Titreştirici teknik özellikleri (Bruel Kjaer LDS V400)

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Maks. Kuvvet	98 N	
Frekans Aralığı	DC – 9 kHz	
Maks. Genlik	14 mm	
Maks. İvmelenme	490 m/s ²	

Tablo 6.8. Sinyal güçlendirici teknik özellikleri (Frank Bacon LDS 500PA)

Özellik	Açıklama	Cihaz Görseli
Nominal Güçte Frekans Aralığı	10 khz – 14 kHz	
Sinüs Güç Çıkışı	500 W	
Maksimum Çıkış Voltajı	40 V rms	
Voltaj Regülasyonu	% 2	
Rastgele Çıkış	54 A pk	



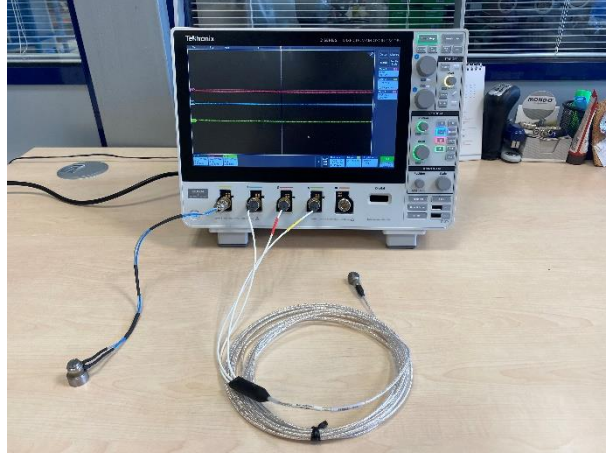
Şekil 6.33. Sinyal okumada kullanılan osiloskop (Infiniivision 3014-A)

Tablo 6.9. İnfiniivision 3014-A osiloskop teknik özellikleri [52]

InfiniiVision	4000 X-Series	3000T X-Series	3000A X-Series	2000 X-Series	1000 X-Series
Analog channels	2 or 4	2 or 4	2 or 4	2 or 4	2 or 4
Digital channels	16 (MSO models or upgrade)	16 (MSO models or upgrade)	16 (MSO models or upgrade)	8 (MSO models or upgrade)	External trigger can be used as a 3rd digital channel on 2-channel models
Bandwidth (upgradable)	200, 350, 500 MHz, 1, 1.5 GHz	100, 200, 350, 500 MHz, 1 GHz	100, 200, 350, 500 MHz, 1 GHz	70, 100, 200 MHz	50, 70, 100, 200 MHz
Max sampling rate	5 GSa/s	5 GSa/s	4 GSa/s ($\leq$ 500 MHz) 5 GSa/s (1 GHz)	2 GSa/s	2 GSa/s
Max memory depth	4 Mpts	4 Mpts	2 Mpts (standard) 4 Mpts (option)	1 Mpts (standard)	2 Mpts
Max waveform update rate	> 1,000,000 wfms/sec	> 1,000,000 wfms/sec	> 1,000,000 wfms/sec	> 200,000 wfms/sec	up to 200,000 wfms/sec
Display	12.1 inches, capacitive touch	8.5-inch, capacitive touch	8.5 inches	8.5 inches	7 inches
Zone touch trigger	Standard	Standard	No	No	No
WaveGen 20-MHz function/arbitrary waveform generator	Dual-channel AWG (option)	Single-channel AWG (option)	Single-channel AWG (option)	Single-channel function (option)	Single-channel function (standard on G models)
Integrated digital voltmeter (standard)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Integrated hardware counter (standard)	5-digit frequency or period counter (8 digits with external 10 MHz clock reference)	8-digit frequency, period, or totalizer counter	5 digits	5 digits	5-digits
Search and navigate	Standard	Standard, lister supported	Standard	Standard	No
Segment memory	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard on DSO models
Mask/limit test	Option	Option	Option	Option	Standard on DSO models
Serial protocol analysis options	I ² S/SPI, UART, CAN/CAN-dbc/CAN-FD/LIN/LIN symbolic, SENT, FlexRay, I ² S, MIL-STD1553, ARINC429, USB2.0, CXPI, Manchester/NRZ	I ² C/SPI, UART/RS232, CAN/CAN-dbc/CAN-FD/LIN/LIN symbolic, SENT, FlexRay, I ² S, MIL-STD1553, CXPI, ARINC429, Manchester/NRZ	I ² S/SPI, UART, CAN/LIN, FlexRay, I ² S, MIL-STD1553, ARINC429	I ² S/SPI, UART, CAN/LIN	I ² C, UART (standard on all models) SPI, CAN/LIN (standard on DSO models)

6.4. Gürültü Ölçümü

Prototip ivmeölçerin kablolamasının yapılmasının ardından titreşimsiz ortamda Şekil 6.34'deki gibi osiloskopa bağlanmış ve ortamın elektriksel şartlarına göre değişmekle birlikte, sistemin sağladığı verilerin ortalama 15-17mV gürültü içerdiği tespit edilmiştir. İvmeölçer ölçümlerinde hesaplamalar elde edilen voltaj değerlerinden gürültü ölçümü arındırılarak yapılacaktır.

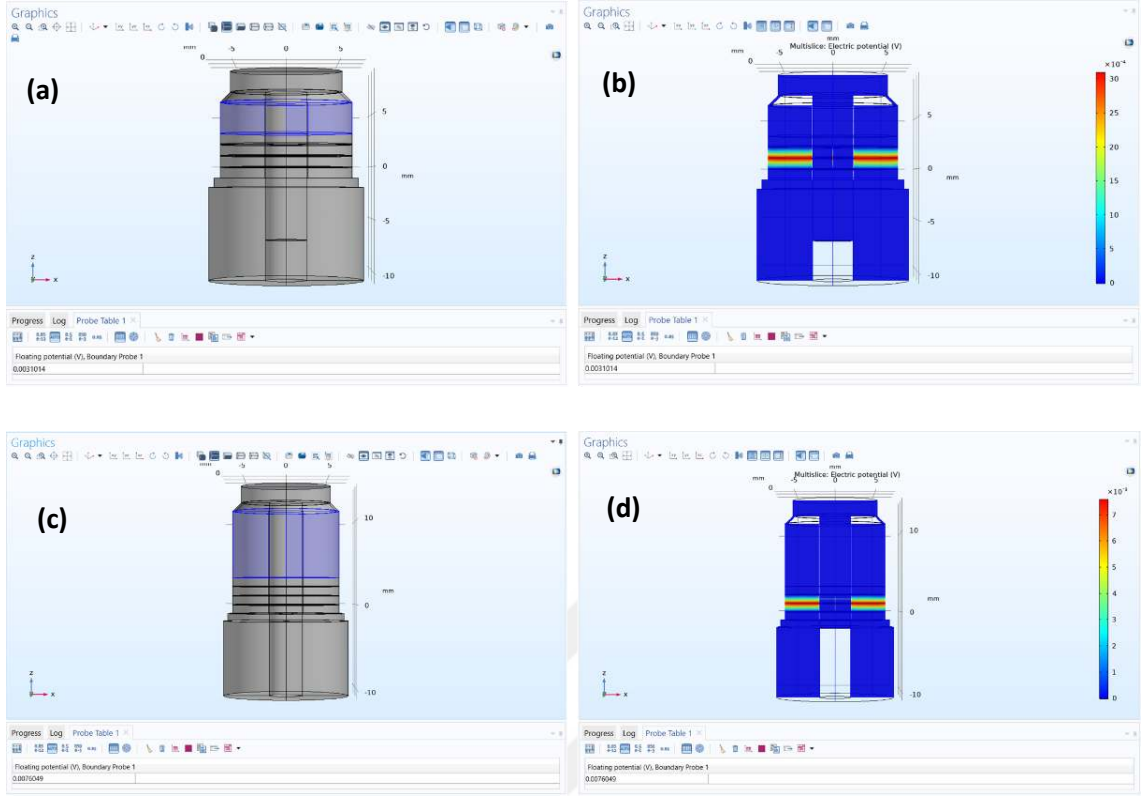


Şekil 6.34. Osiloskopla sistemdeki gürültünün ölçülmesi

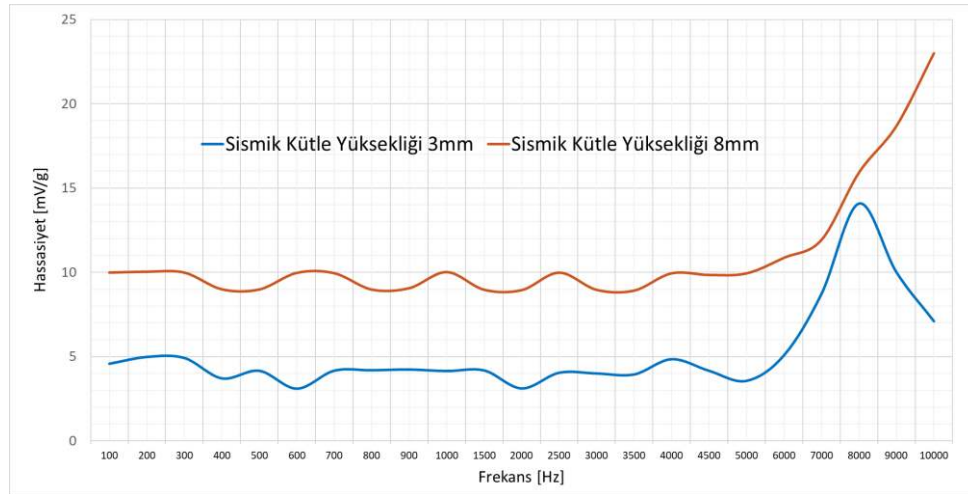
6.5. İlk Prototipin Değerlendirilmesi

Ölçüm sonuçları, gürültü ölçümünün arındırılması durumunda ilk prototipin yaklaşık 6000Hz'e kadar "g" başına yaklaşık 4mV çıktı sağladığını göstermektedir. Bu değer COMSOL'un öngördüğü değere (3,1mV/g) yakın olsa da bu çalışmalar kapsamında hedeflenen hassasiyet değerinin yarısı mertebelerindedir. Diğer yandan alt parçalarda yapılan geometrik değişikliklerin elde edilen voltaj çıkışına doğrudan etki ettiği görülmüştür. Bu değişikliklerin voltaj çıkışına etkileri COMSOL yazılımı tarafından da doğrulanmaktadır.

Örnek olarak prototip sensörle 0-10 kHz'de 1g ivmelenme değerinde elde edilen 4mV voltaj çıkışı sismik kütlenin yüksekliğinin 3mm'den 8mm'ye çıkarılması ile 6mV/g mertebelerinde ölçülmektedir. COMSOL, bu değişiklik sonucu voltaj değerinin 3,1mV'tan 7,6mV'a çıkacağını hesaplamaktadır. Bu değişiklikle ilgili COMSOL analizleri Şekil 6.35'te verilmiştir. Şekil 6.36'da 0-10 kHz aralığında sismik kütlenin 3mm ve 8mm olduğu versiyonlarda titreştirici üzerinde deneysel olarak elde edilen voltaj çıktıları grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.35. Sismik kütle değişiminin voltaj çıkışına etkisinin COMSOL ile araştırılması (a) Sismik kütle yüksekliğinin 3mm olarak belirlenmesi, (b) Sismik kütle yüksekliği 3mm iken elde edilen voltaj çıkışı, (c) Sismik kütle yüksekliğinin 8mm olarak değiştirilmesi, (d) Sismik kütle yüksekliği 8mm iken elde edilen voltaj çıkışı



Şekil 6.36. Sismik kütlenin değiştirilmesi ile prototip ivmeölçer hassasiyetinin 0-10 kHz bandında değişimi

En iyileştirme çalışmaları kapsamında COMSOL analizleri ile hassasiyet değerlerinin iyileştirilebileceği anlaşılmaktadır.

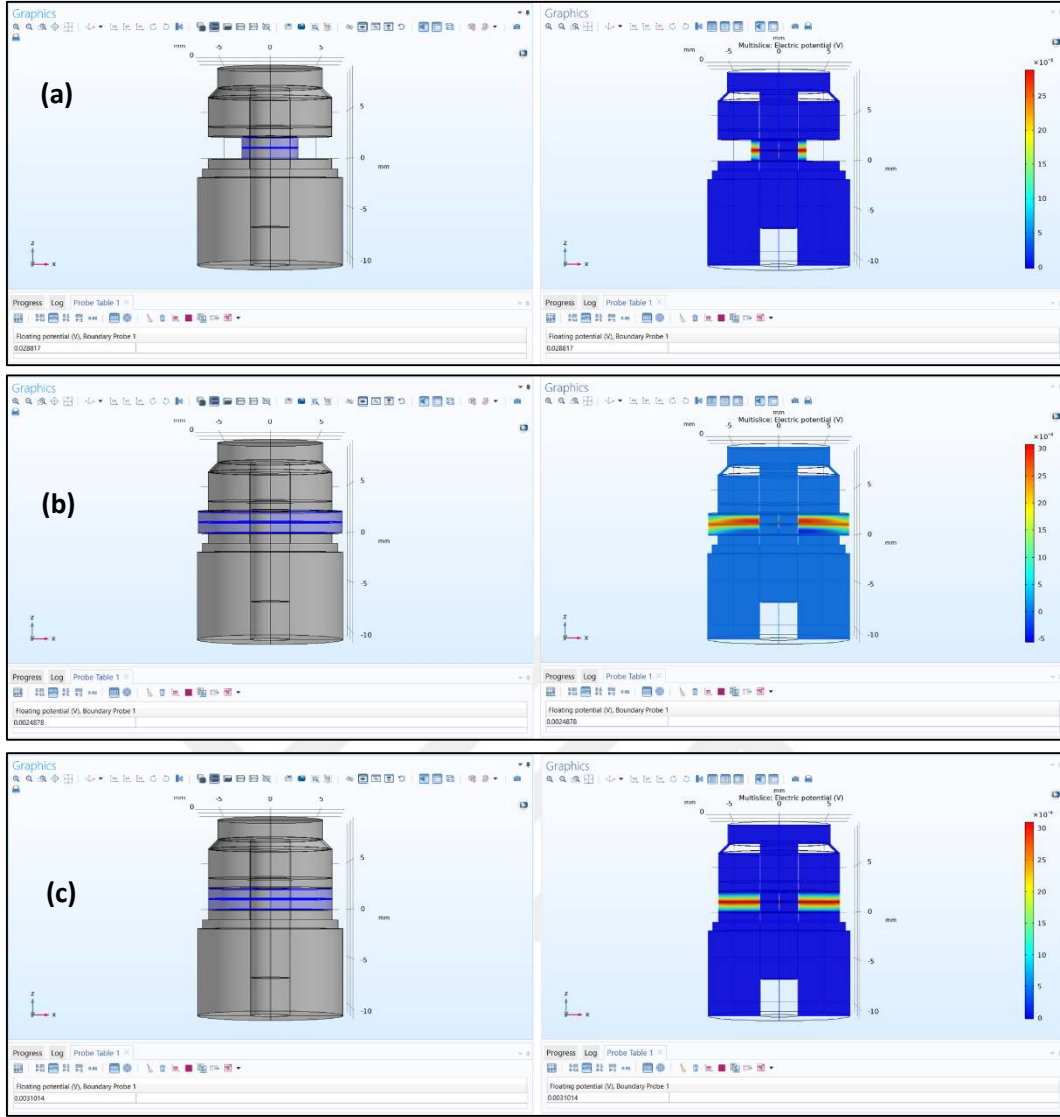
Tablo 6.10. En iyileştirme çalışmaları için belirlenen değişkenler ve ivmeölçer varyansları

Tasarım Değişkenleri	Tanım	Varyans	Değişken Aralığı	Değiştirme Adedi
x_1	Piezodisk çapı	-	5,8mm-14,8mm	10
x_2	Piezodisk delik çapı	-	4,2mm-11,2mm	8
x_3	Piezodisk kalınlığı	-	1,0mm-2,5mm	5
x_4	Yay elemanı çapı	Sismik kütlelin üstünde	4,8mm-10,8mm	7
x_5		Yay elemanı ters ve sismik kütlelin altında		7
x_6		Yay elemanı ters ve sismik kütlelin üstünde		5
x_7		Çift yay elemanı (konik uçlar dışarı doğru)		7
x_8		Çift yay elemanı (konik uçlar birbirine doğru)		7
x_9	Yay elemanının yüksekliği	-	0,1mm-1,0mm	6
x_{10}	Yay elemanının et kalınlığı	-	0,5mm-2,5mm	6
x_{11}	Sismik kütlelin yüksekliği	-	3,0mm-10,0mm	5
x_{12}	Üst yakıtkan diskin kalınlığı	-	0,5mm-2,5mm	5
x_{13}	Alt yakıtkan diskin kalınlığı	-	0,5mm-2,5mm	5
x_{14}	Yay elemanının adet, konum ve pozisyonu	V1 Yay elemanı yok		1
		V2 Sismik kütlelin üstünde		1
		V3 Sismik kütlelin altında		1
		V4 Atl tabla üstünde		1
		V5 Sismik kütlelin üstünde çap daraltılmış ve 180 derece döndürülmüş		1
		V6 Sismik kütlelin altında çap daraltılmış ve 180 derece döndürülmüş		1
		V7 Sismik kütlelin altında ve üstünde		1
		V8 Sismik kütlelin altında ve üstünde, sismik kütlelin altındaki 180 derece döndürülmüş		1
		V9 Sismik kütlelin altında ve üstünde çap daraltılmış, sismik kütlelin altındaki 180 derece döndürülmüş		1
		V10 Sismik kütlelin altında ve üstünde çap daraltılmış, sismik kütlelin üstündeki 180 derece döndürülmüş		1
		V11 Sismik kütlelin altında ve üstünde - sismik kütlelin üstündeki 180 derece döndürülmüş		1

6.6.2. COMSOL analizleri

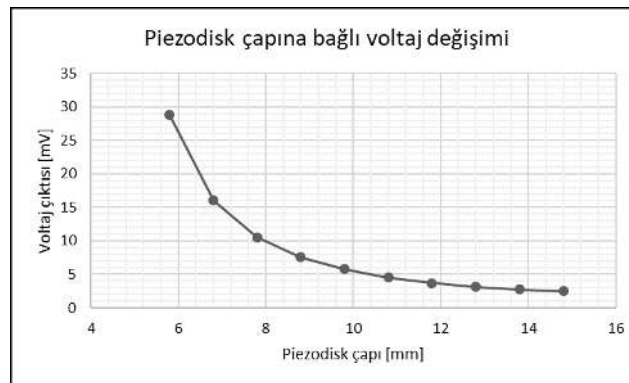
6.6.2.1. Piezodisk çapına bağlı voltaj çıkışı değişimi

Piezo eleman geometrisi elde edilen elektriksel yükün büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Piezodiskin yüzey alanı genişledikçe aynı ivme büyüklüğünde birim alana düşen kuvvet yani basınç azaldığı için elde edilen voltaj da düşmektedir. Piezodisk çapı COMSOL programında 5,8mm'den 14,8mm kadar 10 defa değiştirilerek voltaj çıkışı analiz edilmiştir. Piezodisk çap değişimi ile voltaj çıkışının COMSOL'da analizi Şekil 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.38. Piezodisk çap değişiminin voltaj çıkışına etkisinin araştırılması. (a) Piezodisk çapı en küçük değerde, (b) Piezodisk çapı en büyük değerde, (c) Piezodisk çapı optimum değerde

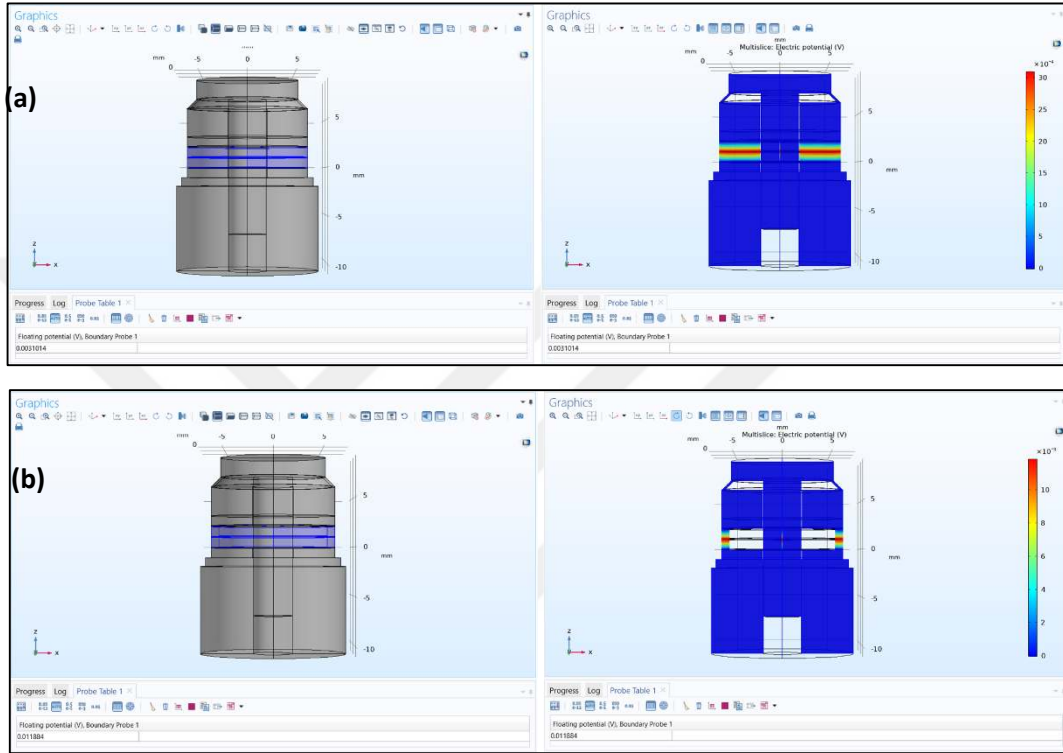
Çap değişiminin piezoelektrik voltaj çıkışına etkisi Şekil 6.39’da grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.39. Voltaj çıkışının piezodisk çapı ile değişimi

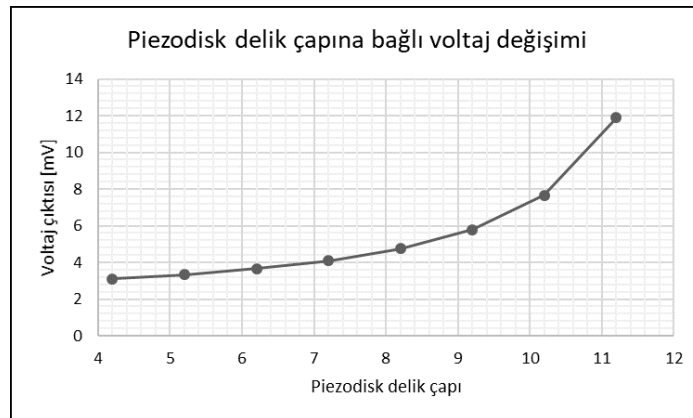
6.6.2.2. Piezodisk delik ϕ apına bağlı voltaj ϕ ıktısı değişimi

COMSOL yazılımı ile piezodisk delik ϕ apının 4,2mm'den 11,2 mm'ye 8 defa değiştirilmesiyle yapılan analizlerde artan delik ϕ apı ile elde edilen voltajın dūřtūėu gōr÷lmektedir. Piezodisk ϕ ap değişimi ile voltaj ϕ ıktısının COMSOL'da analizi şekil 6.40'ta verilmiştir.



şekil 6.40. Piezodisk delik ϕ apı değişiminin voltaj ϕ ıktısına etkisi. (a) Piezodisk delik ϕ apı en k÷çük değerde, (b) Piezodisk delik ϕ apı en b÷y÷k değerde

Delik ϕ apı değişiminin piezoelektrik voltaj ϕ ıktısına etkisi şekil 6.41'de grafiksel olarak verilmiştir.

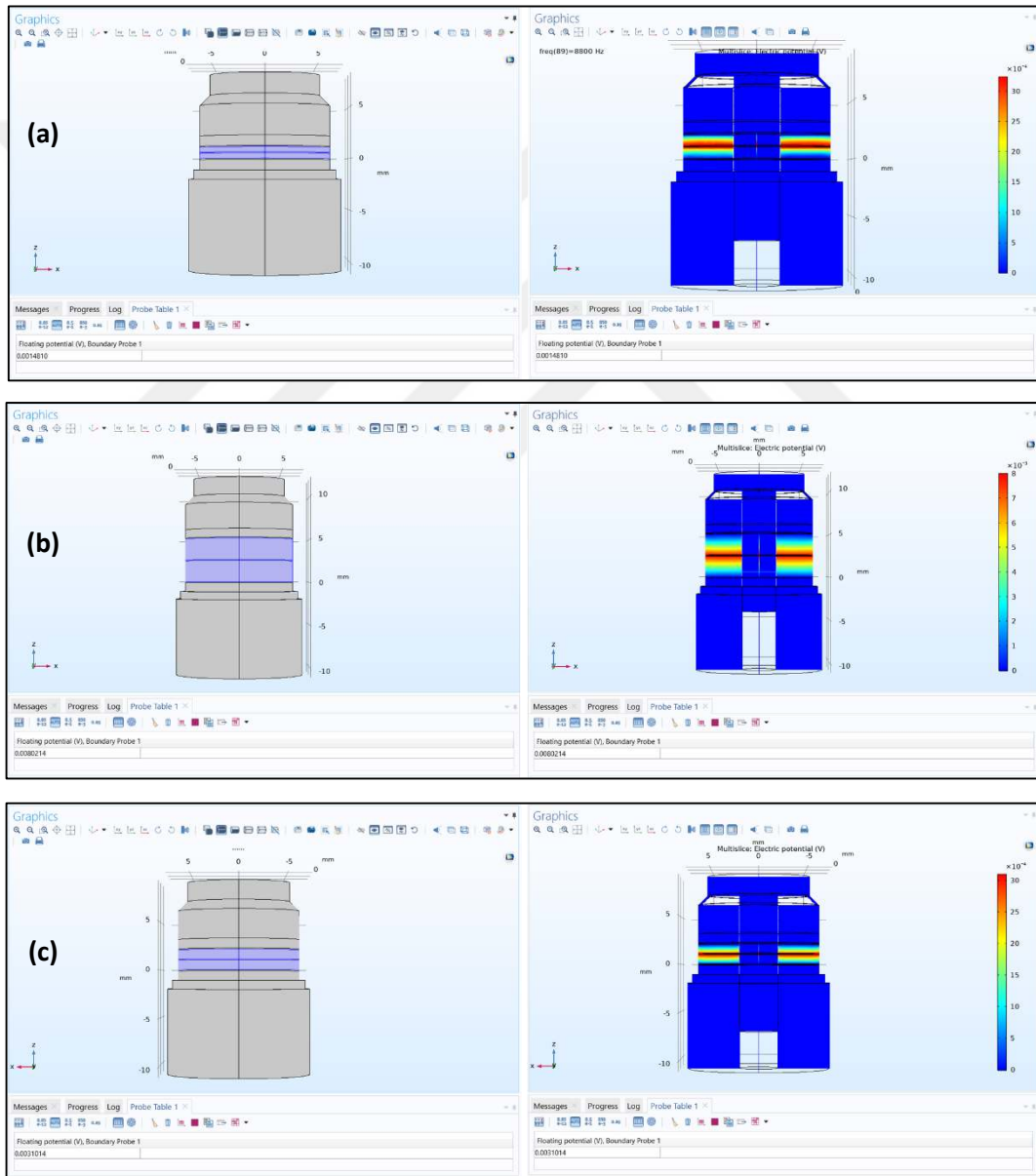


şekil 6.41. Voltaj ϕ ıktısının piezodisk delik ϕ apı ile değişimi

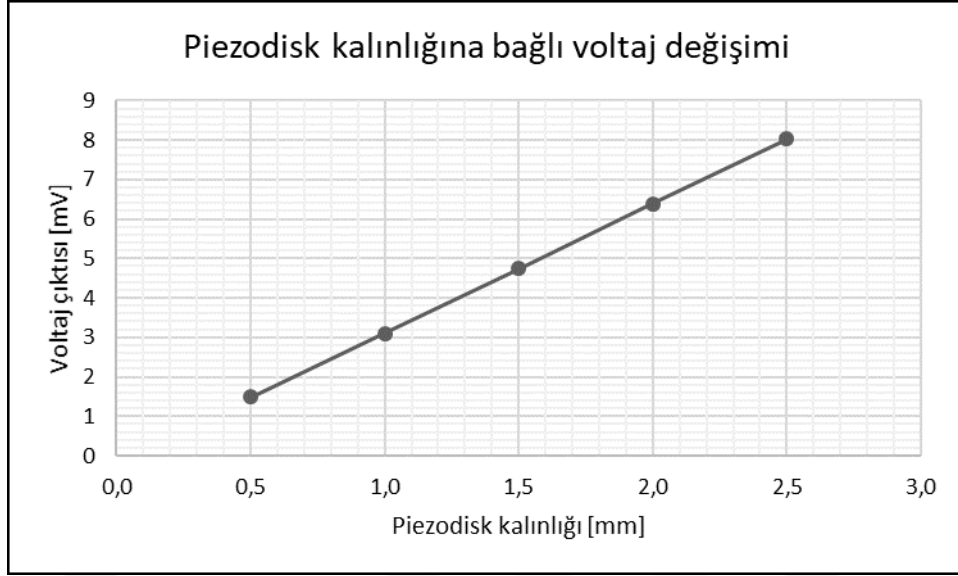
Delik çapı arttıkça piezodisk yüzey alanının azalmasına bağlı olarak elde edilen voltajın arttığı görülüyor.

6.6.2.3. Piezodisk kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi

Piezodisk kalınlığı da voltaj çıktısına doğrudan etki edebilecek bir parametredir. Pieodisk kalınlığının 0,5mm'den 2,5mm'ye 5 defa değiştirilmesi ile yapılan analizlerde (Şekil 6.42) disk kalınlığı arttıkça voltaj çıktısının doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bu değişim Şekil 6.43'te grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.42. Piezodisk kalınlık değişiminin voltaj çıktısına etkisi. (a) Piezodisk kalınlığı en küçük değerde, (b) Piezodisk kalınlığı en büyük değerde, (c) Piezodisk kalınlığı optimum değerde



Şekil 6.43. Voltaj çıkışının piezodisk kalınlığı ile değışimi

6.6.2.4. Yay elemanı çapına bağılı voltaj çıkışı değışimi

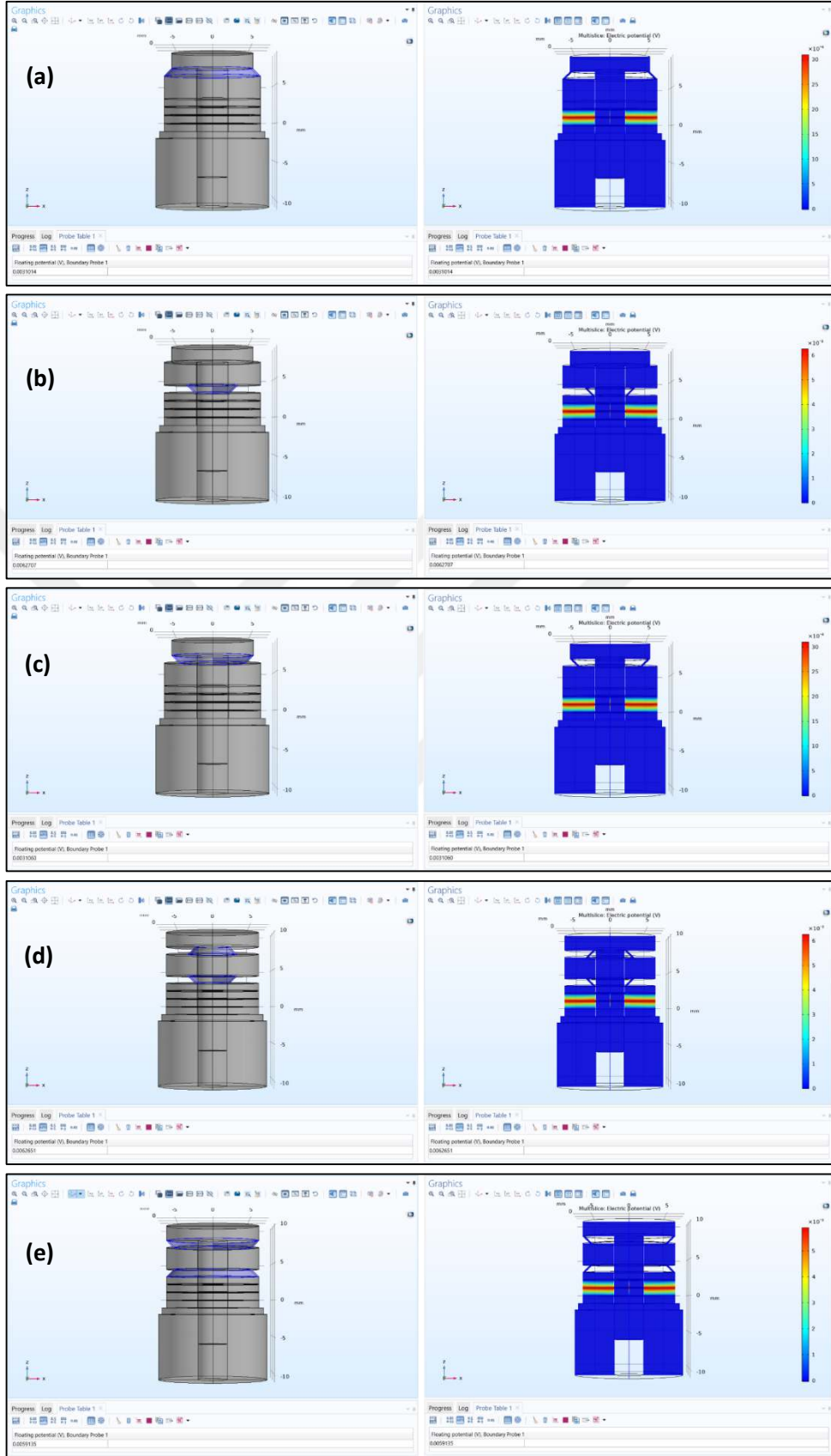
COMSOL yazılımı ile yapılan analizlerde kullanılan yay elemanı sayısının, bu yay elemanlarının sensör içerisindeki yerinin, pozisyonunun ve geometrisinin voltaj çıkışına etki ettiğı görülmektedir.

Yay elemanının;

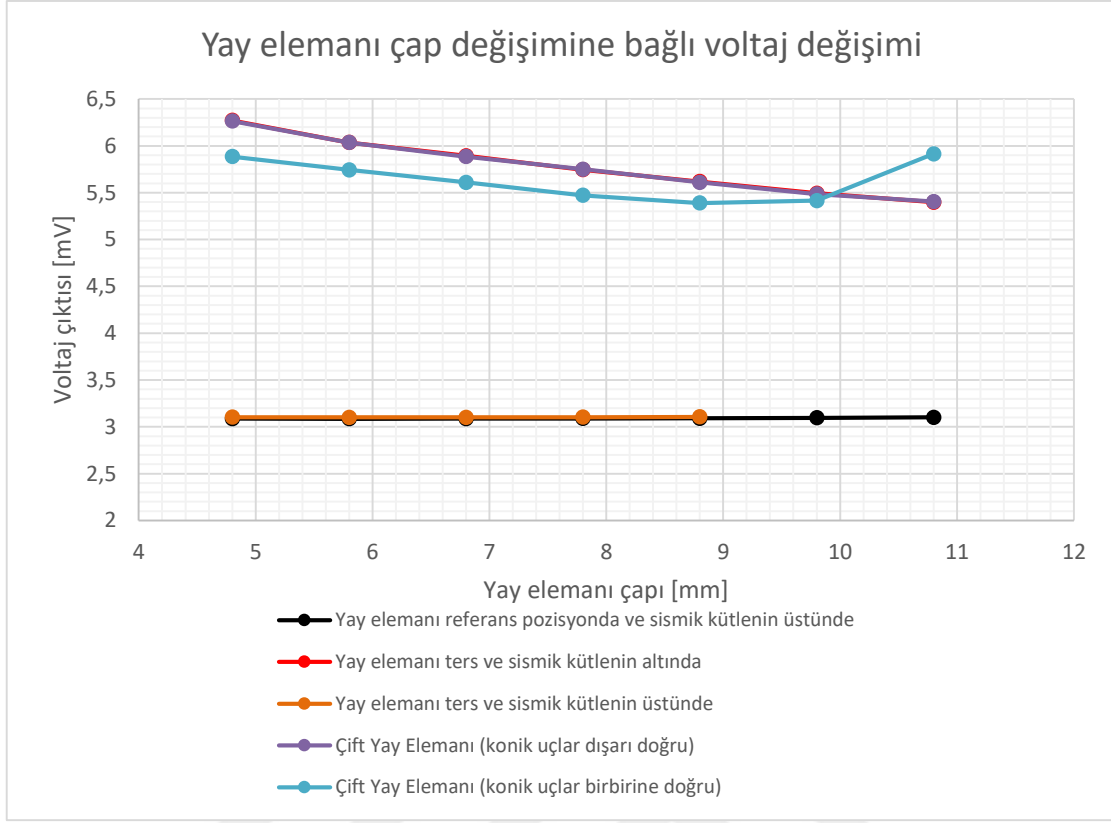
- (a) Sismik kütle üstünde referans pozisyonunda,
- (b) Sismik kütle altında ve ters pozisyonunda,
- (c) Sismik kütle üstünde ve ters pozisyonunda,
- (d) İki adet yay elemanından birisi sismik kütlenin üstünde diğeri sismik kütlenin altında, yay elemanlarının konik uçları dışa dönük,
- (e) İki adet yay elemanından birisi sismik kütlenin üstünde diğeri sismik kütlenin altında, yay elemanlarının konik uçları biribine dönük,

olduğı durumlarda çap değışimlerine bağılı voltaj çıktıları ayrı ayrı araştırılmıştır.

Şekil 6.44'te bu varyanslarda elde edilen en büyük voltaj değışimlerine ait COMSOL analizleri verilmiştir.



Şekil 6.44. Çeşitli konumlardaki yay elemanlarının çap değişimlerine bağlı en büyük voltaj çıktılarının elde edildiği çap, konum ve pozisyonlar

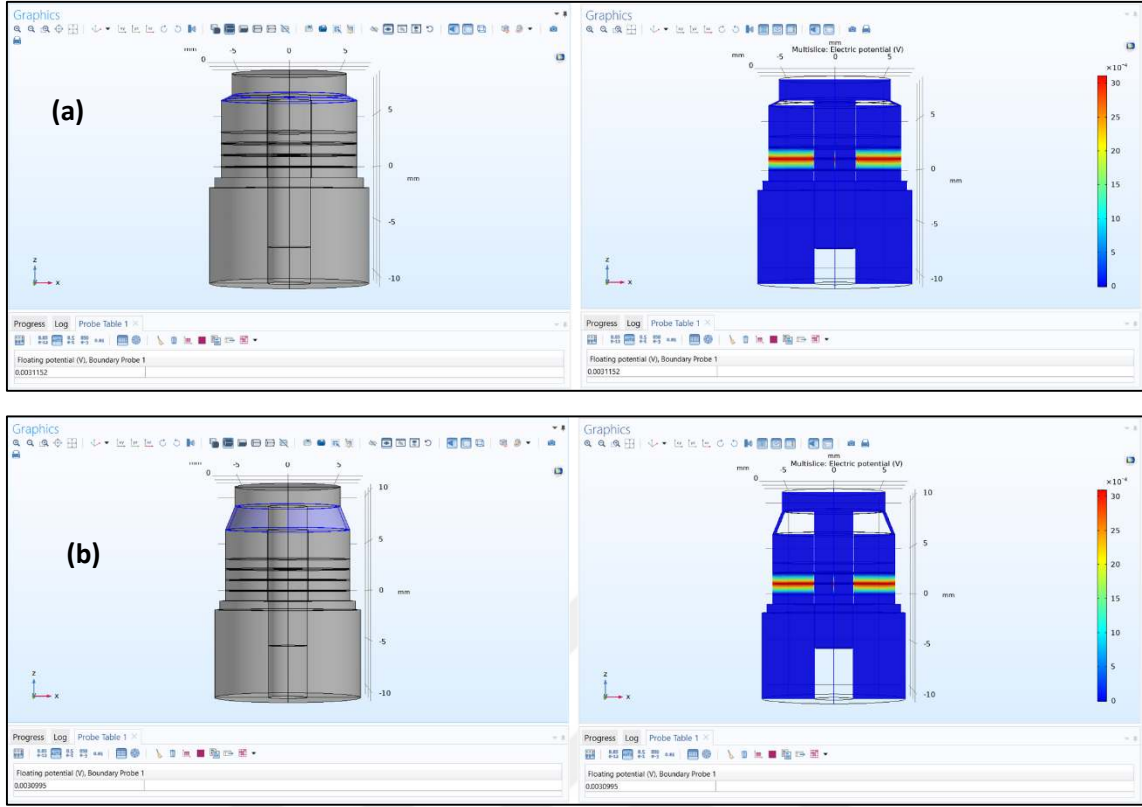


Şekil 6.45. Yay elemanı çeşitli konumlarda iken çap değişimine bağlı voltaj değişimleri

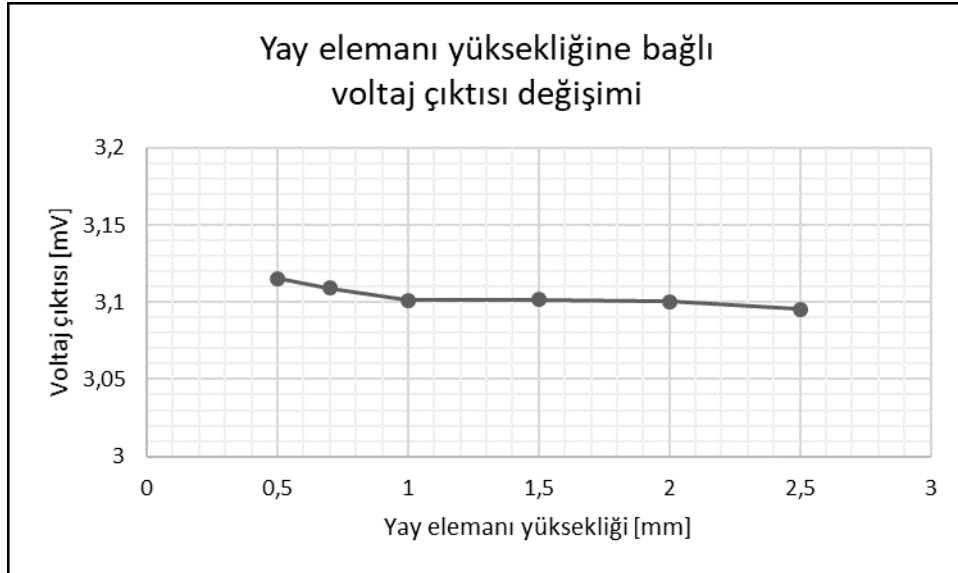
Bu varyanslarda en büyük voltaj çıktısının yay elemanının sismik kütleinin altında, ters ve en küçük çapta iken alındığı görülüyor.

6.6.2.5. Yay elemanı yükseliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi

En iyileştirme çalışmaları kapsamında yay elemanının geometirisi üzerinde belirlenen bir başka değişken de yay elemanı yüksekliğidir. COMSOL analizlerinden yay elemanı yüksekliğinin elde edilen voltaj çıktısı üzerinde pek etkili olmadığı anlaşılmaktadır. 0,5mm'den 2,5mm'ye 6 defa değiştirilen yükselikte voltaj değişimi en fazla %0,6 mertebesinde olduğu görülmüştür.



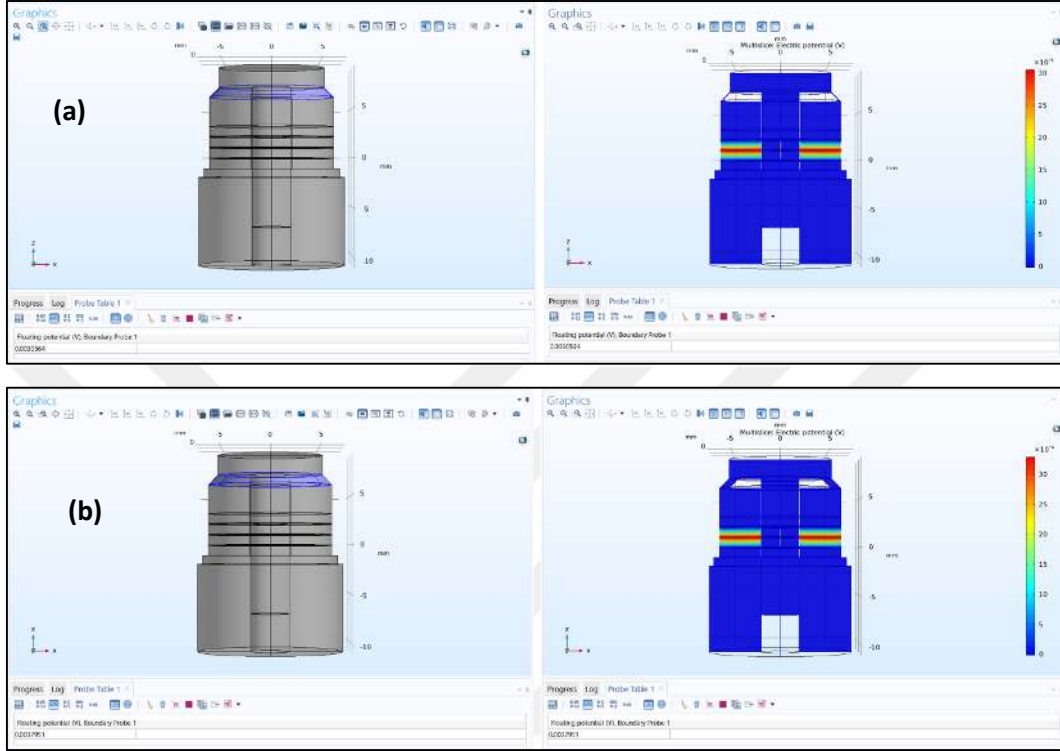
Şekil 6.46. Yay elemanı yüksekliğinin voltaj çıktısı üzerindeki etkisi



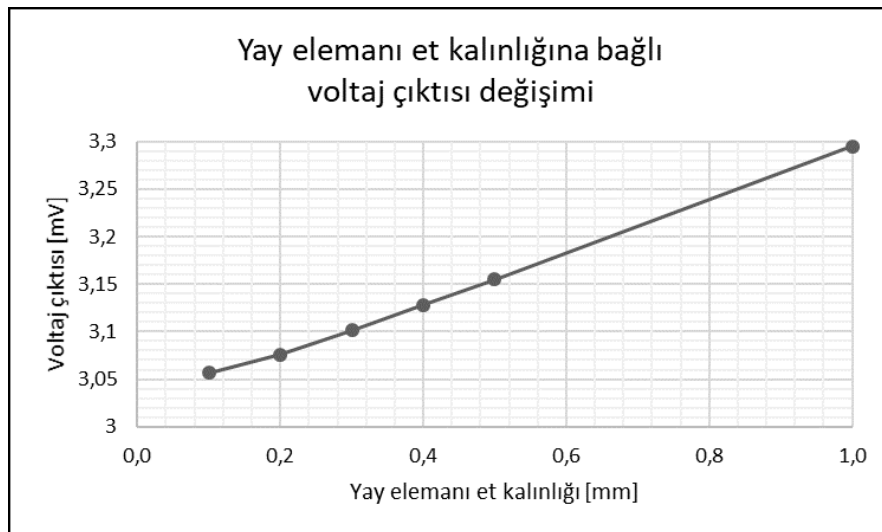
Şekil 6.47. Yay elemanı yükseklik değişimine bağlı voltaj çıktısı değişimi

6.6.2.6. Yay elemanı kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi

Yay elemanı kalınlığının 0,3mm'den 1mm'ye kadar arttırıldığı analizlerde voltaj çıktısının yay elemanı kalınlığı ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 6.48. Yay elemanı kalınlığının voltaj çıktısına etkisi (a) Yay elemanı kalınlığı en küçük değerde, (b) Yay elemanı kalınlığı en büyük değerde

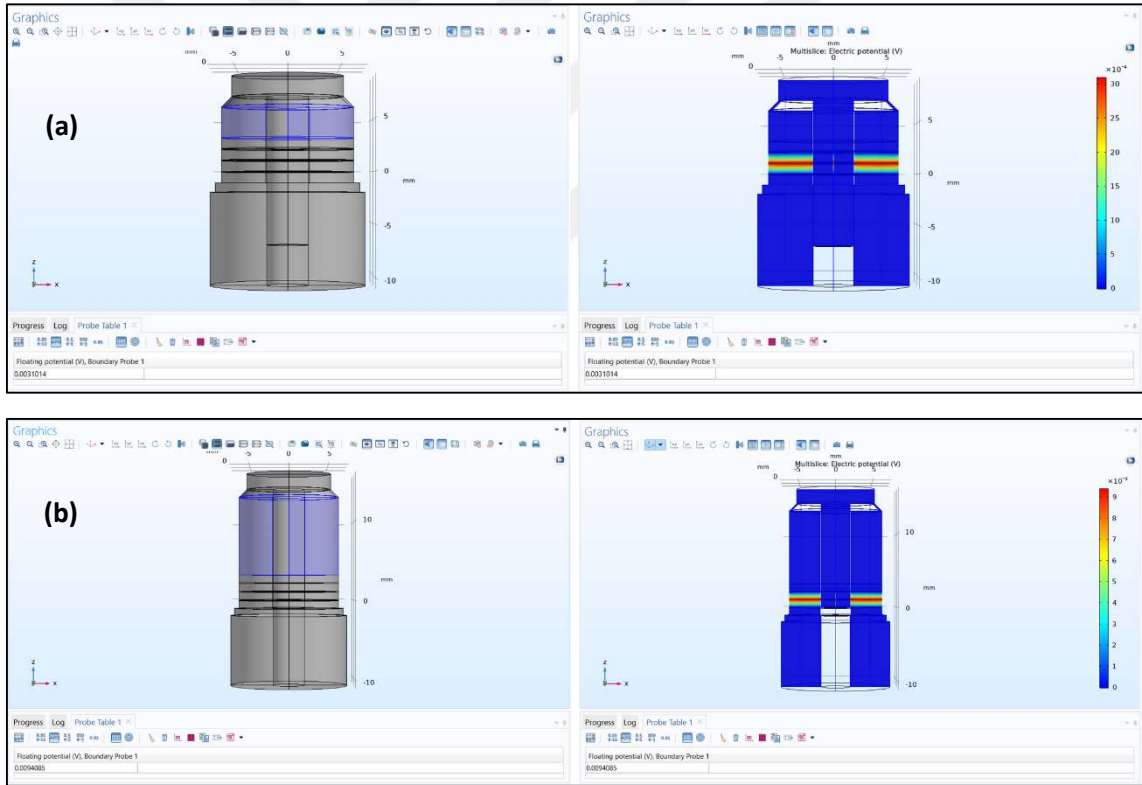


Şekil 6.49. Yay elemanı kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi

Yapısal analizde stres dağılımı bakımından en kritik parçanın yay elemanı olduğu tespit edilmişti. Yay elemanı kalınlığının artırılmasının hem stres dağılımında hem de elde edilen voltaj çıktısında iyileştirme sağlayacağı anlaşılmaktadır.

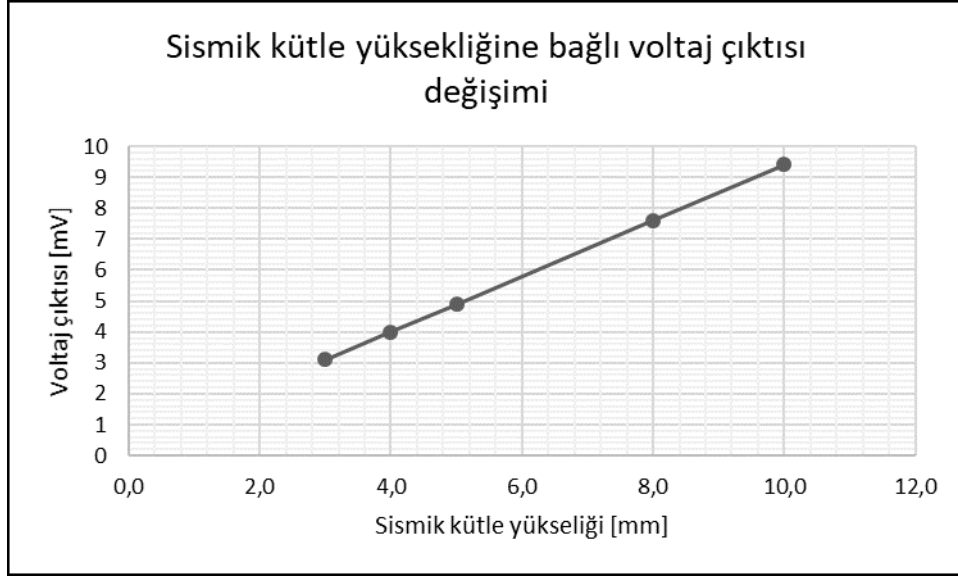
6.6.2.7. Sismik kütle yüksekliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi

Newtonun ikinci hareket kanununa göre bir cisme etki eden ivmelenme kuvveti cismin kütlesi ile doğru orantılıdır. ($F=ma$). Sismik kütlenin yüksekliğinin değiştirilmesi kütle büyüklüğünü doğrusal olarak değiştirdiği için bu etkinin voltaj çıktısını da doğrusal olarak değiştirmesi beklenir. COMSOL’da, sismik kütlenin yükseliği 3mm’den 10mm’ye kadar arttırılarak yapılan analizlerde voltaj çıktılarının tamamen doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Sismik kütle yüksekliğinin en düşük ve en yüksek olduğu değerlere ait COMSOL analiz görüntüleri Şekil 6.50’de verilmiştir.



Şekil 6.50. Sismik kütle yüksekliğinin voltaj çıktısına etkisi (a) Sismik kütle yüksekliği en küçük değerde, (b) Sismik kütle yüksekliği en büyük değerde

Şekil 6.51’de sismik kütle yüksekliğinin voltaj çıktısına etkisi grafiksel olarak verilmiştir.

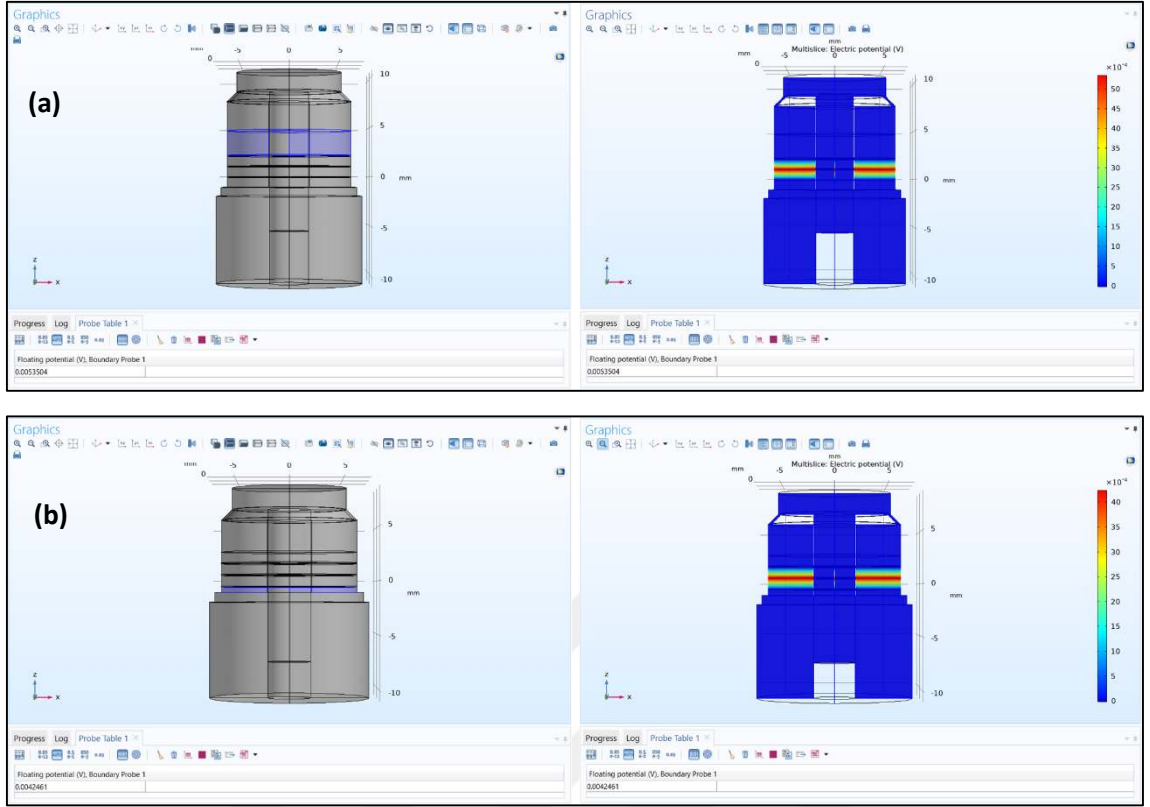


Şekil 6.51. Sismik kütle yüksekliğine bağlı voltaj çıktısı değişimi

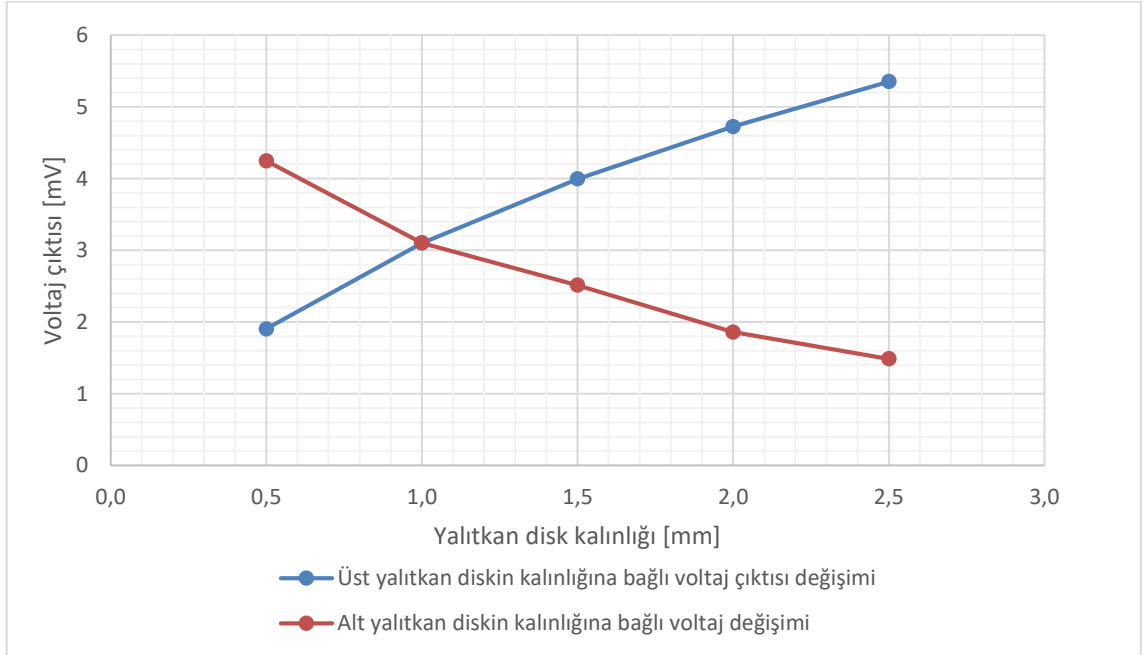
6.6.2.8. Yalıtkan disk kalınlığına bağlı voltaj çıktısı değişimi

Yalıtkan disklerin kalınlığının elde edilen voltaj değerleri üzerinde etkili olabileceği değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz yazılımı yardımı ile disk kalınlıklarının 0,5mm'den 2,5mm'ye artırıldığı çalışmalarda üst yalıtkan disk kalınlığının artırılmasının voltaj çıktısını arttırdığı, alt yalıtkan disk kalınlığının artırılmasının ise elde edilen voltajı düşürdüğü görülmüştür. Üst yalıtkan disk kalınlığının voltajı arttırmasında, kalınlık artışının tıpkı sismik kütle yüksekliğinin artışında olduğu gibi piezodiskler üzerine etki eden ivmelenme kuvvetinin arttırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Alt yalıtkan disk kütlelerinin piezo elemanlar üzerine etkisi bulunmadığından, kalınlık artışı voltaj çıktısına olumlu yönde etki etmemiştir. Şekil 6.52'de en yüksek voltaj çıktılarının elde edildiği yalıtkan disk kalınlıklarında COMSOL analizleri verilmiştir.

En iyileştirilmiş tasarıma karar verme aşamasında yapısal dayanım da göz önünde bulundurularak üst yalıtkan diskin kalın, alt yalıtkan diskin ise ince seçilmesi ivmeölçer hassasiyeti bakımından faydalı olacaktır. Alt ve üst yalıtkan disk kalınlıklarının voltaj değişimine etkisi Şekil 6.53'te grafiksel olarak verilmiştir.



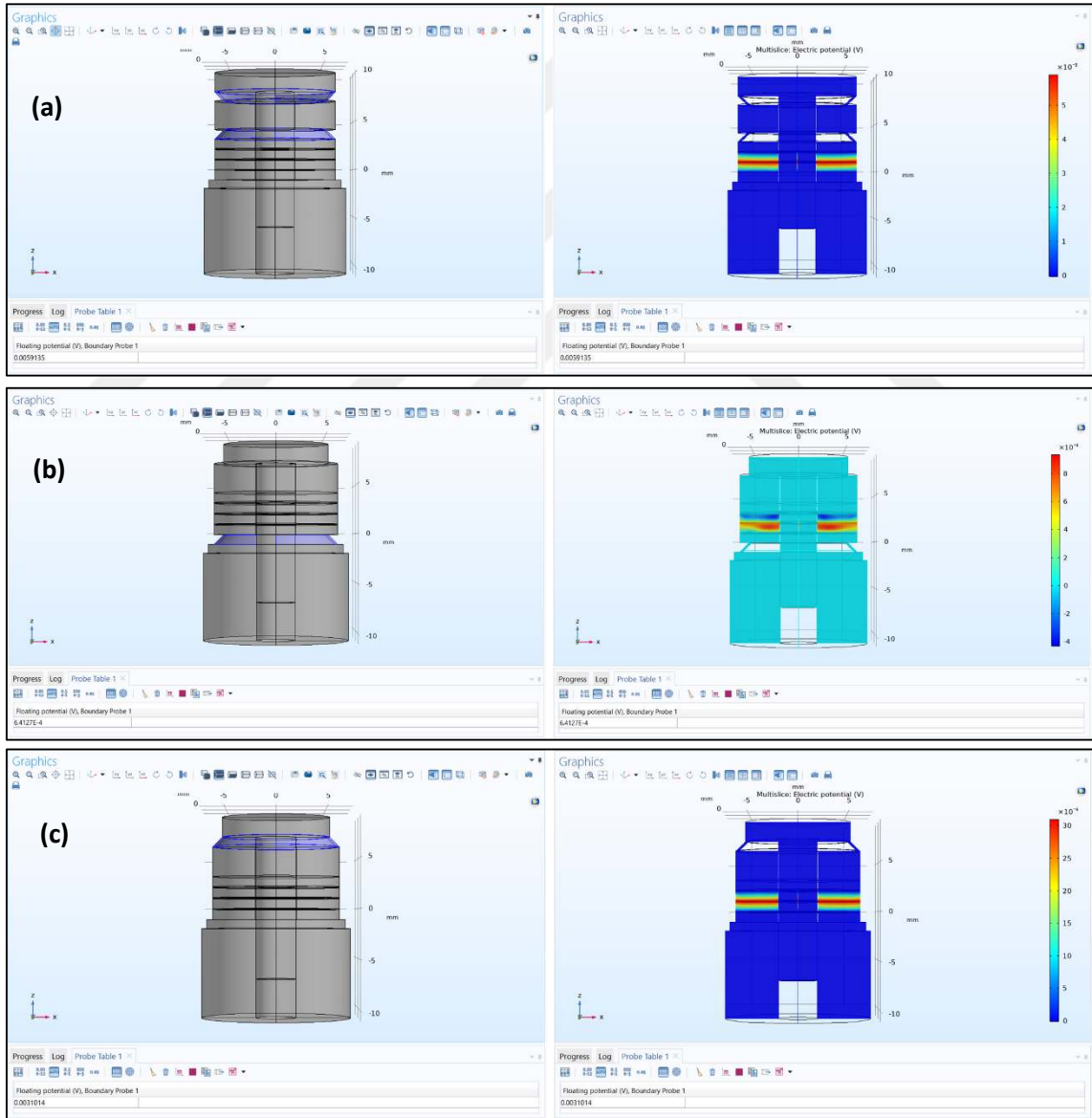
Şekil 6.52. Yalıtkan disk kalınlıklarının voltaj çıkışına etkisi (a) Üst yalıtkan disk kalınlığı en yüksek değerde, (b) Alt yalıtkan disk kalınlığı en düşük değerde



Şekil 6.53. Yalıtkan disk kalınlıklarına bağlı voltaj çıkışı değişimi

6.6.2.9. Yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı voltaj çıktısı değişimi

COMSOL yazılımı ile yapılan analizlerde kullanılan yay elemanı sayısının, sensör içerisindeki yerinin ve pozisyonunun voltaj çıktısına etki ettiği görülmektedir. Yükseklik ve et kalınlığı sabit kalmak şartıyla yay elemanı konum ve pozisyonlarında yapılan değişikliklerle toplamda 11 varyansın voltaj çıktıları analiz edilmiştir. Şekil 6.54'te bu varyanslar içerisinde (a) en yüksek voltaj değerinin elde edildiği durum, (b) en düşük voltaj değerinin elde edildiği durum, (c) prototip ivmeölçer tasarımındaki durum verilmiştir. 11 varyansta elde edilen voltaj çıktıları Şekil 6.55'te grafiksel olarak verilmiştir.

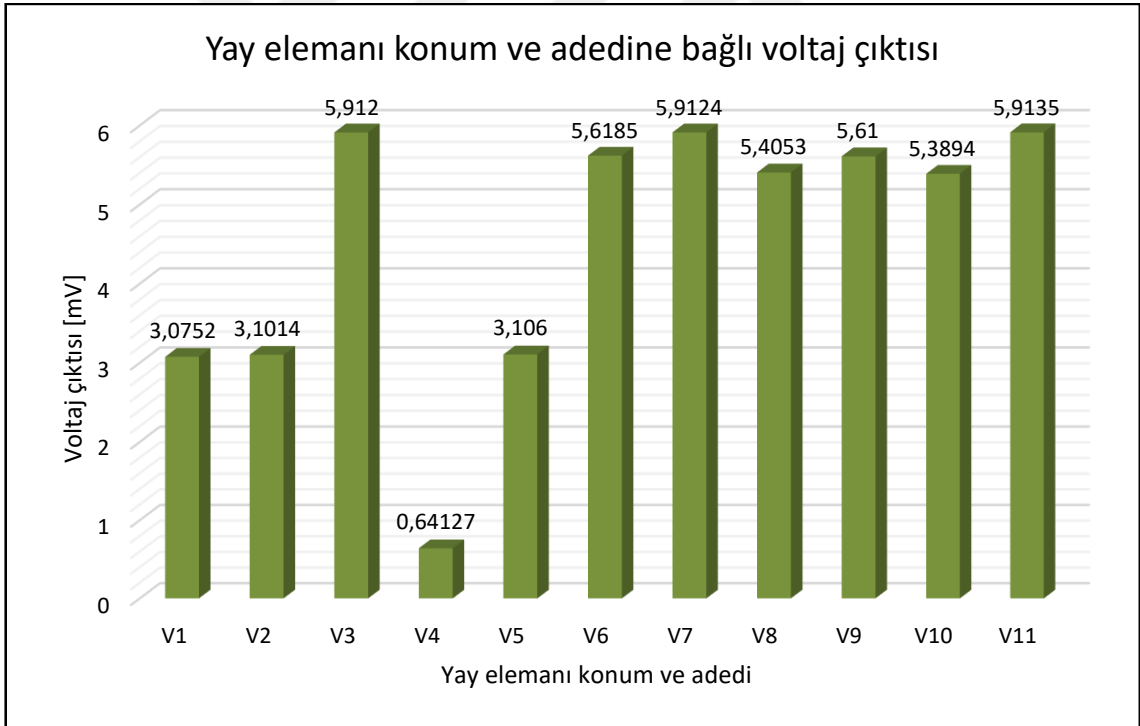


Şekil 6.54. Yay elemanı adet, konum ve pozisyonlarına göre voltaj çıktısı. (a) en yüksek voltaj çıktısının elde edildiği durum, (b) en düşük voltaj çıktısının elde edildiği durum, (c) ilk prototipteki durum

Yay elemanı konum, adet ve pozisyonlarına göre oluşturulan varyanslar Tablo 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.11. *Yay elemanı konum, adet ve pozisyonlarına göre varyanslar*

Varyans	Kullanılan Yay Elemanı Adedi	Yay Elemanı Konum ve Pozisyonu
V1	0	Yay elemanı yok
V2	1	Yay elemanı sismik kütlenin üstünde
V3	1	Yay elemanı sismik kütlenin altında
V4	1	Yay elemanı alt tabla üstünde
V5	1	Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, çap daraltılmış ve yay elemanı 180 derece döndürülmüş
V6	1	Yay elemanı sismik kütlenin altında, çap daraltılmış ve yay elemanı 180 derece döndürülmüş
V7	2	Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde
V8	2	Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, sismik kütlenin altındaki 180 derece döndürülmüş
V9	2	Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, çap daraltılmış, sismik kütlenin altındaki 180 derece döndürülmüş
V10	2	Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, çap daraltılmış, sismik kütlenin üstündeki 180 derece döndürülmüş
V11	2	Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, sismik kütlenin üstündeki 180 derece döndürülmüş



Şekil 6.55. *Yay elemanı konum, adet ve pozisyonlarına göre belirlenen varyansların voltaj çıktıları*

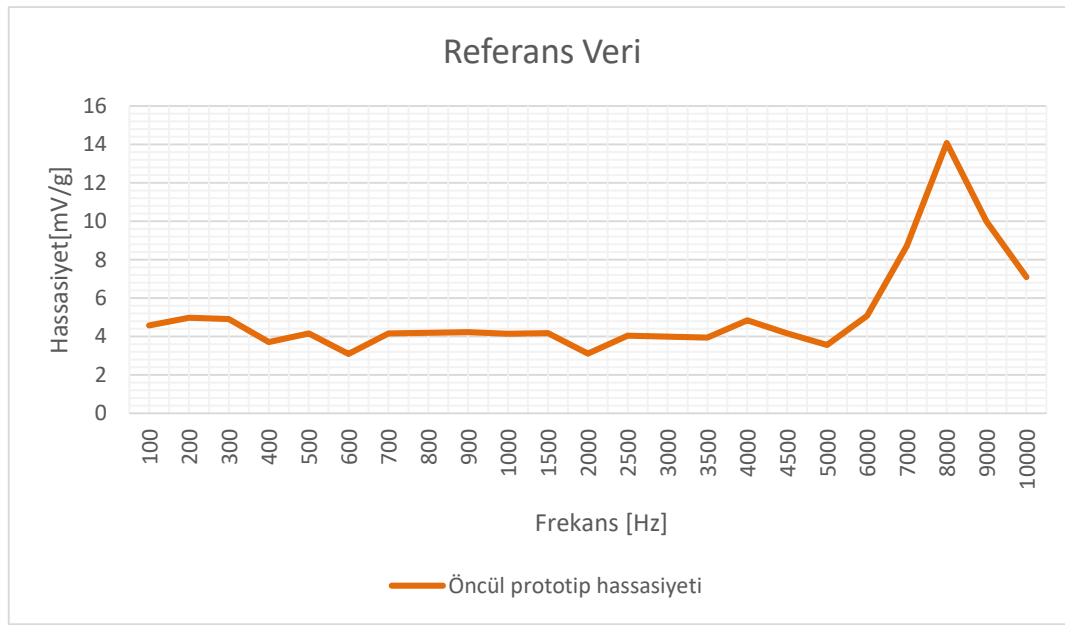
COMSOL yazılımı ile analizi yapılan tüm varyanslar ve bu varyanslarda elde edilen voltaj çıktıları Tablo 6.12’de özetlenmiştir. Tablodaki beyaz hücrelerde varyansa ait değişken değeri, yeşil hücrelerde o varyansta elde edilen voltaj çıktısı verilmiştir. Varyans açıklamaları Tablo 6.10’da verilmişti.

Tablo 6.12. Belirlenen varyanslarda COMSOL analizleri ile elde edilen voltaj çıktıları

X1 R[mm]	X2 R[mm]	X3 t[mm]	X4 R[mm]	X5 R[mm]	X6 R[mm]	X7 R[mm]	X8 R[mm]	X9 h[mm]	X10 t[mm]	X11 h[mm]	X12 h[mm]	X13 h[mm]	X14 V
5,8	4,2	0,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	0,5	0,1	3	0,5	0,5	V1
28,817	3,1014	1,481	3,0873	6,2707	3,1035	6,2651	5,8854	3,1152	3,0564	3,1014	1,9036	4,2461	3,0752
6,8	5,2	1	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0,7	0,2	4	1	1	V2
16,011	3,3411	3,1014	3,0863	6,0357	3,1005	6,0357	5,7439	3,109	3,0758	3,9989	3,1014	3,1014	3,1014
7,8	6,2	1,5	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	1	0,3	5	1,5	1,5	V3
10,542	3,6529	4,7402	3,0867	5,8929	3,1004	5,885	5,6101	3,1014	3,1014	4,8961	3,9948	2,5134	5,912
8,8	7,2	2	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	1,5	0,4	8	2	2	V4
7,5781	4,0949	6,3777	3,0883	5,7444	3,1024	5,7493	5,4724	3,1015	3,1282	7,6049	4,7245	1,8599	0,64127
9,8	8,2	2,5	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	2	0,5	10	2,5	2,5	V5
5,7625	4,7412	8,0214	3,0911	5,6185	3,106	5,61	5,3891	3,1005	3,1549	9,4085	5,3504	1,4862	3,106
10,8	9,2		9,8	9,8		9,8	9,8	2,5	1				V6
4,55	5,7947		3,0951	5,494		5,4852	5,4158	3,0955	3,2951				5,6185
11,8	10,2		10,8	10,8		10,8	10,8						V7
3,6901	7,6568		3,1014	5,3987		5,4052	5,9135						5,9124
12,8	11,2												V8
3,1014	11,884												5,4053
13,8													V9
2,7542													5,61
14,8													V10
2,4878													5,3894
													V11
													5,9135

6.6.3. Referans veri kaydı

Belirlenen değişkenlerin prototipe yansıtılmasından önce referans veri olması açısından baz tasarımla veri kaydı yapılmıştır. Baz tasarıma göre üretilen prototip ivmeölçer titreştirici üzerinde 1g ivme değerinde ve 0-10 kHz aralığında titreşime maruz bırakılmıştır. Bu frekans aralığında voltaj çıktıları ölçülmüş ve karşılaştırma verisi olarak saklanmıştır. Baz tasarıma göre üretilen prototip ivmeölçerde kullanılan alt parçaların geometrik özellikleri Tablo 6.13'te verilmiştir. İlk prototiple elde edilen voltaj değerleri Şekil 6.56'da grafiksel olarak verilmiştir.

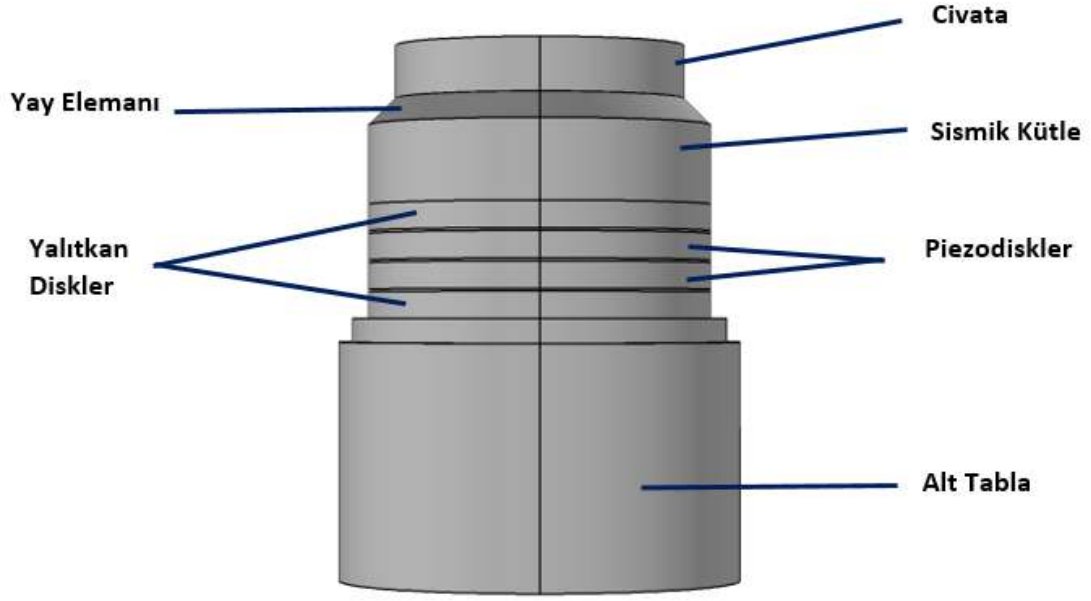


Şekil 6.56. Baz tasarıma göre üretilen prototip ivmeölçerle elde edilen referans veri

Tablo 6.13. Baz tasarıma göre üretilen prototip ivmeölçer alt parçalarının geometrik özellikleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Değeri
Piezodisk çapı	12,8mm
Piezodisk delik çapı	4,2mm
Piezodisk kalınlığı	1mm
Yay elemanı çapı	10,8mm
Yay elemanının yüksekliği	1mm
Yay elemanının et kalınlığı	0,3mm
Sismik kütle büyüklüğü	3gr
Üst yakıtkan diskin kalınlığı	1mm
Alt yakıtkan diskin kalınlığı	1mm
Yay elemanının adet, konum ve pozisyonu	1 adet yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve referans pozisyonunda

Referans verinin kaydedildiği baz tasarım görseli Şekil 6.57'de verilmiştir



Şekil 6.57. Referans veri kaydının yapıldığı baz tasarım

6.6.3.1. Kararlı frekans aralığı

DeneySEL ölçümler her ne kadar 0-10 kHz aralığında yapılmış olsa da sistem kararlılığının birçok varyansta 0-5 kHz aralığında sağlanabildiği görülmüştür. Bir çok varyansta 5 -10 kHz frekans aralığında (çoğunlukla 7 kHz civarında) doğal frekansa sahip olduğu görülmüştür. Veri karşılaştırmalarında sağlıklı değerlendirme yapılabilmesi için sistem kararlılıklarının sağlanabildiği 0-5 kHz aralığında alınan veriler kullanılacaktır.

6.6.4. Değişkenlerin prototipe yansıtılması

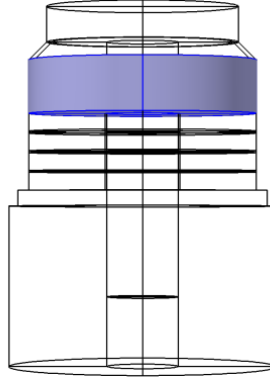
Belirlenen değişkenlerde tüm değişken değerlerinin pototipe yansıtılması ve her varyans için deneySEL çalışma yapılması zor ve zahmetli bir iş olacağı için nihai tasarımın belirlenmesinde COMSOL verilerinden faydalanılması amaçlanmıştır. Buna göre prototip ivmeölçerde sismik kütle büyüklüğü, yay elemanı adet konum ve pozisyonu, piezodisk çapı gibi değişkenler değiştirilerek 0-10 kHz frekans aralığında 1g titreşime maruz bırakılarak ölçümler yapılmış ve değişikliklerin elde edilen voltaj çıktıları ne yönde etkilediği kayıt altına alınmıştır. Diğer yandan yansıtılan bu değişiklikler sonucunda voltaj çıktılarının COMSOL öngörülerıyla paralellik gösterip göstermediği araştırılmıştır.

6.6.4.1. Sismik kütlenin değiştirilmesi

Değişken değerlerindeki değişikliğin elde edilen voltaj çıktısına etkisinin araştırıldığı ilk çalışma sismik kütle büyüklüğünde yapılan değişiklik olmuştur. Kütle değişiminin voltaj çıktısına etkisi 3 farklı varyansta incelenmiştir;

- 1) Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,1mm
- 2) Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm
- 3) Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm

3, 5, 8 ve 10 gram sismik kütleler kullanılarak yapılan ölçümlerde sismik kütle büyüklüğündeki artışın elde edilen voltaj değerleri ile büyük oranda paralellik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.58. İvmeölçer sistemi içerisinde sismik kütle

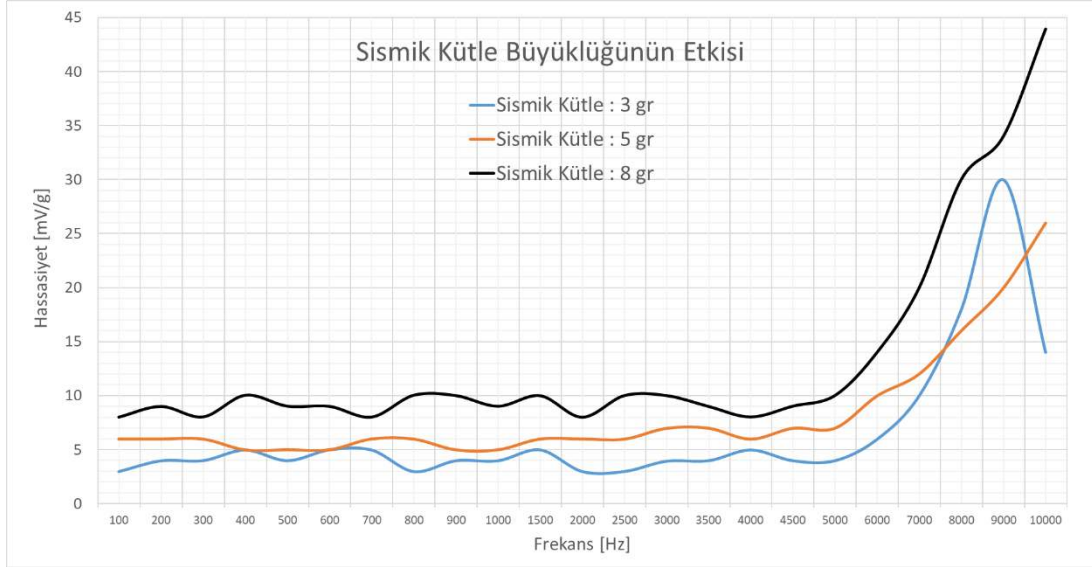
6.6.4.1.1. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,1mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi

Bu varyansa ait temel geometrik özellikler Tablo 6.14’te verilmiştir.

Tablo 6.14. Yay elemanı et kalınlığı 0,1mm iken sismik kütle değişikliği yapılan tasarımın geometrik özellikleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Değeri
Piezodisk kalınlığı	1mm
Yay elemanının yüksekliği	1mm
Yay elemanının et kalınlığı	0,1mm
Sismik kütle büyüklüğü	3gr, 5gr, 8gr
Yay elemanının adet, konum ve pozisyonu	1 adet yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve referans pozisyonunda

Yay elemanı et kalınlığı 0,1mm ve yay elemanı sismik kütle üzerinde konumlandırılmış iken 3, 5 ve 8 gram sismik kütle büyüklüğüne sahip sistemlerden elde edilen hassasiyet değerleri Şekil 6.59’da verilmiştir.



Şekil 6.59. 0,1mm et kalınlığındaki yay elemanı sismik kütlenin üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklüklerde sismik kütlelere sahip sistemlerin 0-10 kHz aralığındaki hassasiyet değişimi

Deneysel ölçümlerde voltaj değerlerinin yatay seyrettiği 5000 Hz’e kadar ortalama hassasiyet değerlerinin COMSOL hesaplama verileriyle karşılaştırılması Tablo 6.15’te verilmiştir.

Tablo 6.15. Deneysel veri-COMSOL verisi karşılaştırma tablosu; Yay elemanı sismik kütle üzerinde ve et kalınlığı 0,1mm

Sismik Kütle Büyüklüğü [gr]	Ortalama Hassasiyet [mV/g]	
	Deneysel Veri	COMSOL
3	4,05	3,06
5	6,40	4,83
8	9,06	7,50

COMSOL hesaplamaları ve deneysel ölçümler büyüklük olarak farklılık gösterse de kütle değişimlerinde elde edilen hassasiyet değişimleri paralellik göstermektedir.

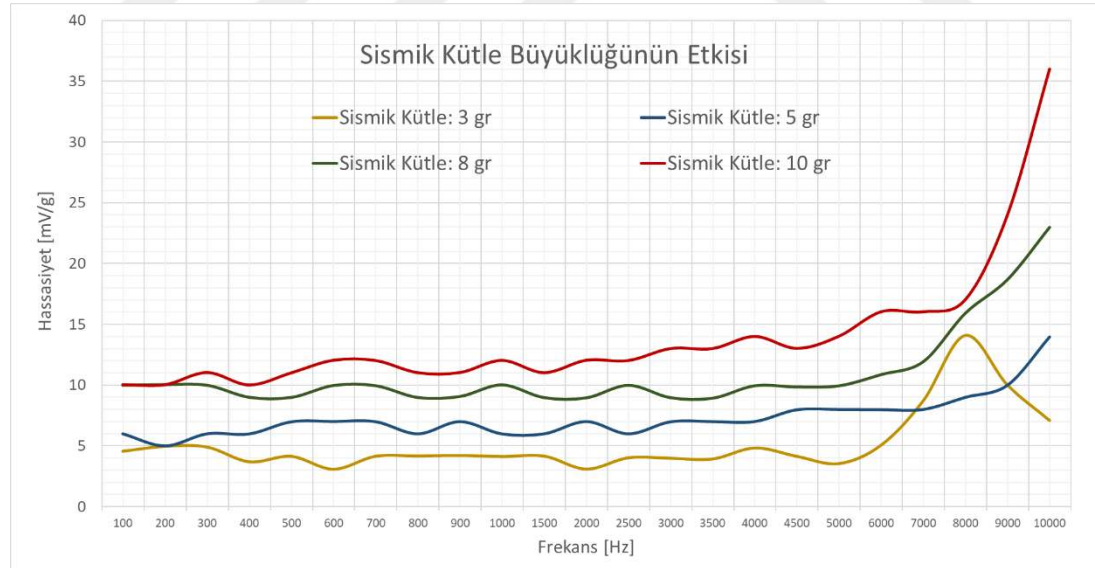
6.6.4.1.2. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi

Bu varyansa ait temel geometrik özellikler Tablo 6.16’da verilmiştir.

Tablo 6.16. Yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişikliği yapılan tasarımın geometrik özellikleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Değeri
Piezodisk kalınlığı	1mm
Yay elemanının yüksekliği	1mm
Yay elemanının et kalınlığı	0,3mm
Sismik kütle büyüklüğü	3gr, 5gr, 8gr, 10gr
Yay elemanının adet, konum ve pozisyonu	1 adet yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve referans pozisyonunda

Yay elemanı et kalınlığı 0,3mm ve yay elemanı sismik kütle üzerinde konumlandırılmış iken 3, 5, 8 ve 10 gram sismik kütleyle sahip sistemlerden elde edilen hassasiyet değerleri değerleri Şekil 6.60’ta verilmiştir.



Şekil 6.60. 0,3mm et kalınlığındaki yay elemanı sismik kütlenin üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklüklerde sismik kütlelere sahip sistelerin 0-10 kHz aralığındaki hassasiyet değişimi

Deneyisel ölçümlerde voltaj değerlerinin yatay seyrettiği 5000 Hz'e kadar ortalama hassasiyet değerlerinin COMSOL hesaplama verileriyle karşılaştırılması Tablo 6.17'de verilmiştir.

Tablo 6.17. Deneyisel veri-COMSOL verisi karşılaştırma tablosu; Yay elemanı sismik kütle üzerinde ve et kalınlığı 0,3mm

Sismik Kütle Büyüklüğü [gr]	Ortalama Hassasiyet [mV/g]	
	Deneyisel Veri	COMSOL
3	4,11	3,10
5	6,61	4,90
8	9,54	7,60
10	12,47	9,41

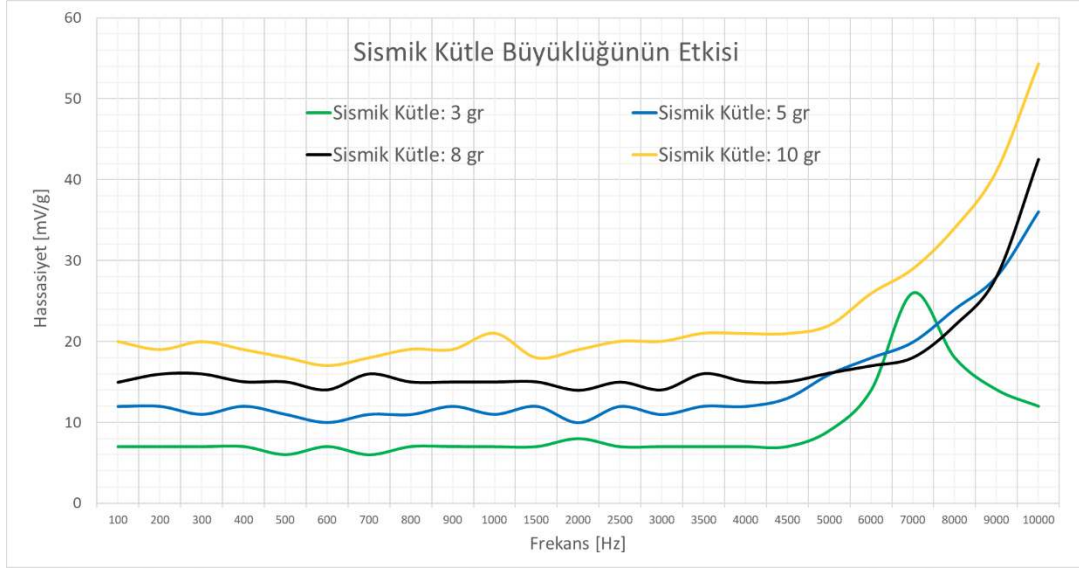
6.6.4.1.3. Yay elemanı sismik kütlenin altında ve üstünde, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm iken sismik kütle değişiminin hassasiyete etkisi

Bu varyansa ait temel geometrik özellikler Tablo 6.18'de verilmiştir.

Tablo 6.18. 0,3mm et kalınlığına sahip yay elemanları sismik kütlenin altında ve üstünde iken sismik kütle değişikliği yapılan tasarımın geometrik özellikleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Değeri
Piezodisk kalınlığı	1mm
Yay elemanının yüksekliği	1mm
Yay elemanının et kalınlığı	0,3mm
Sismik kütle büyüklüğü	3gr, 5gr, 8gr, 10gr
Yay elemanının adet, konum ve pozisyonu	1 adet yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve referans pozisyonunda, 1 adet yay elemanı sismik kütlenin altında ve referans pozisyona ters konumda

Bu varyansa sahip sistemlerden sismik kütle değişimi ile elde edilen hassasiyet değerleri değerleri Şekil 6.61'de verilmiştir.



Şekil 6.61. 0,3mm et kalınlığındaki yay elemanları sismik kütlenin hem altında hem üstünde konumlandırılmış iken farklı büyüklükteki sismik kütlelerle 0-10 kHz aralığındaki hassasiyet değişimi

Bu varyansta 5 kHz'e kadar elde edilen ortalama hassasiyet değerlerinin COMSOL hesaplama verileriyle karşılaştırılması Tablo 6.19'da verilmiştir.

Tablo 6.19. Deneyisel veri-COMSOL verisi karşılaştırması; Yay elemanı sismik kütle üstünde ve altında, yay elemanı et kalınlığı 0,3mm

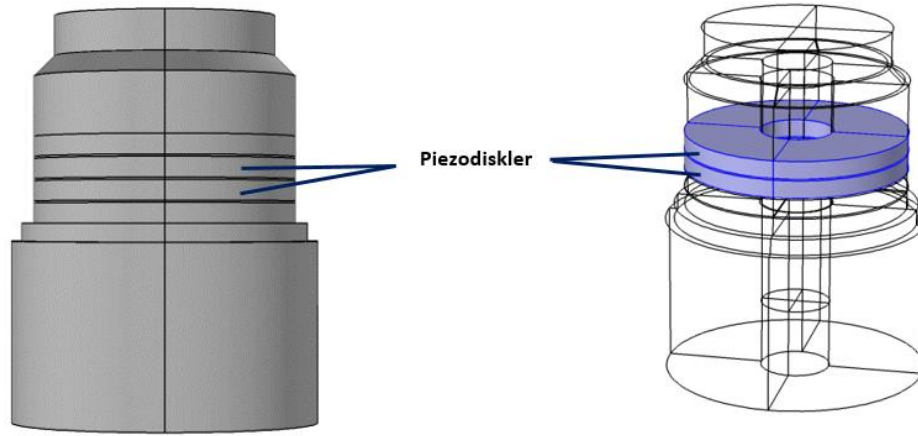
Sismik Kütle Büyüklüğü [gr]	Ortalama Hassasiyet [mV/g]	
	Deneyisel Veri	COMSOL
3	7,17	5,41
5	11,72	8,53
8	16,11	13,26
10	19,56	16,40

Sismik kütle büyüklüğünün değiştirilmesi ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen veriler, kütle değişimi ile voltaj çıktısı arasında bir paralellik olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalarda hassasiyetin kütle artış oranında arttığı görülmüştür. Bu durum yay elemanı konum, adet ve kalınlığının değiştirildiği farklı varyanslarla da doğrulanabilmektedir.

6.6.4.2. Piezodisk kalınlığının değiştirilmesi

Deneyisel çalışmalarda 1mm ve 2mm kalınlığında piezodiskler kullanılarak 0-10 kHz frekans aralığında 1g ivmelenme ile titreşim değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçların doğrulanabilmesi farklı büyüklükteki sismik kütlelerin kullanıldığı ve yay

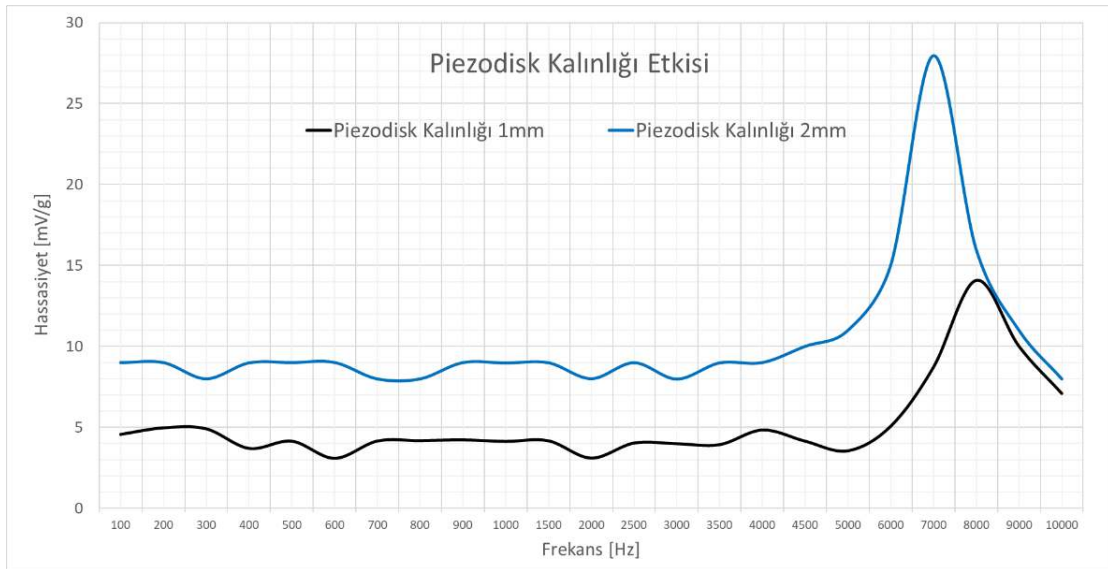
elemanın adet ve konumlarının değiştirildiği varyanslarda da deneysel çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 6.62. İvmeölçer sistemi içerisinde piezodiskler

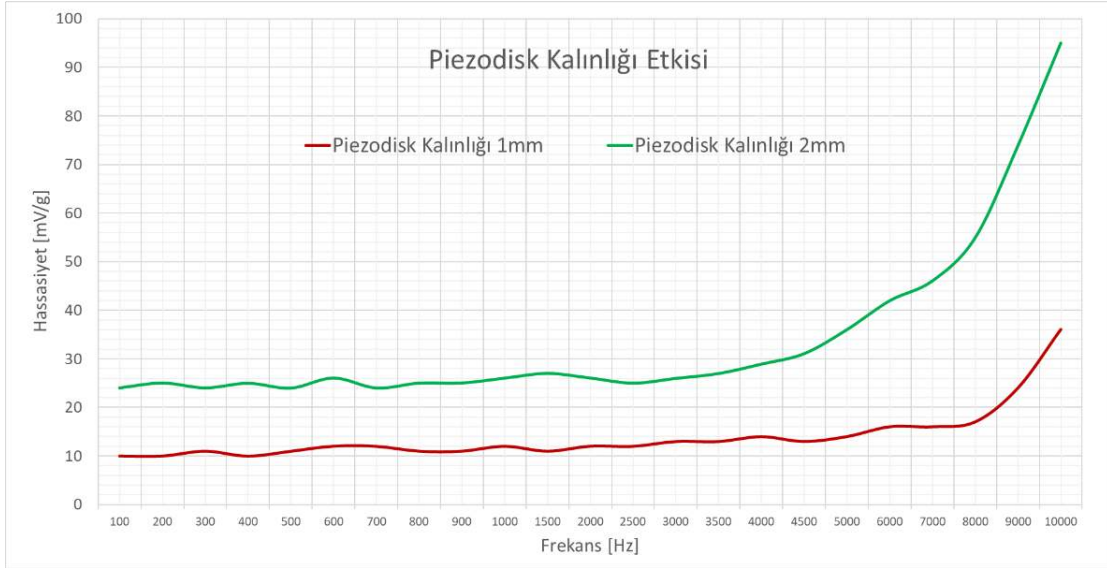
6.6.4.2.1. Yay elemanı sismik kütle üzerinde iken piezodisk kalınlığının hassasiyete etkisi

Sismik kütle büyüklüğü **3 gr** iken ve yay elemanı sismik kütle üzerinde iken piezodisk kalınlığının elde edilen voltaj çıktısına etkisi Şekil 6.63'te grafikleştirilmiştir. 0-5 kHz aralığı kararlı hassasiyet frekans aralığı kabul edilerek elde edilen ortalama hassasiyet değeri **1mm** piezodisk kullanıldığında 4,11 mV/g , **2mm** piezodisk kullanıldığında 8,89mV/g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.63. Sismik kütlenin 3 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi

Sismik kütle büyüklüğü **10 gr** iken ve yay elemanı sismik kütle üzerinde iken piezodisk kalınlığının elde edilen voltaj çıktısına etkisi Şekil 6.64'te grafikleştirilmiştir.



Şekil 6.64. Sismik kütlenin 10 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi

Sismik kütle büyüklüğü 3 gramdan 10 grama çıkarılarak çalışma tekrarlanmış ve 0-5 kHz frekans aralığında 1mm piezodisk kullanılarak yapılan çalışmalarda ortalama hassasiyet 12,47 mV/g , 2mm piezodisk kullanılarak yapılan çalışmalarda ortalama hassasiyet 26,39 mV/g olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.20. 3gr ve 10gr sismik kütlelere sahip ivmeölçer sistemlerinde farklı kalınlıklarda piezodiskler kullanılarak 0-5 kHz aralığında elde edilen ortalama hassasiyet değerleri

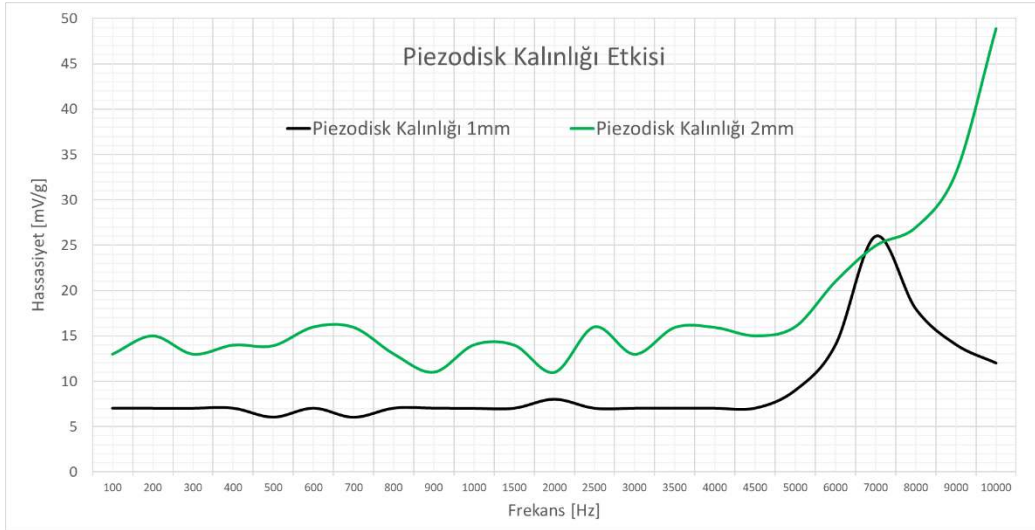
Piezodisk Kalınlığı [mm]	Ortalama Hassasiyet [mV/g]	
	Sismik Kütle : 3 gr	Sismik Kütle : 10 gr
1	4,11	12,47
2	8,89	26,39

6.6.4.2.2. Yay elemanı sismik kütlenin üstünde ve altında iken piezodisk kalınlığının hassasiyete etkisi

Elde edilen verilerin güvenilirliğinin artırılması için yay elemanının hem sismik kütle altında hem de sismik kütle üstünde bulunduğu varyanslarda 0-10 kHz aralığında ölçümler tekrar edilmiştir.

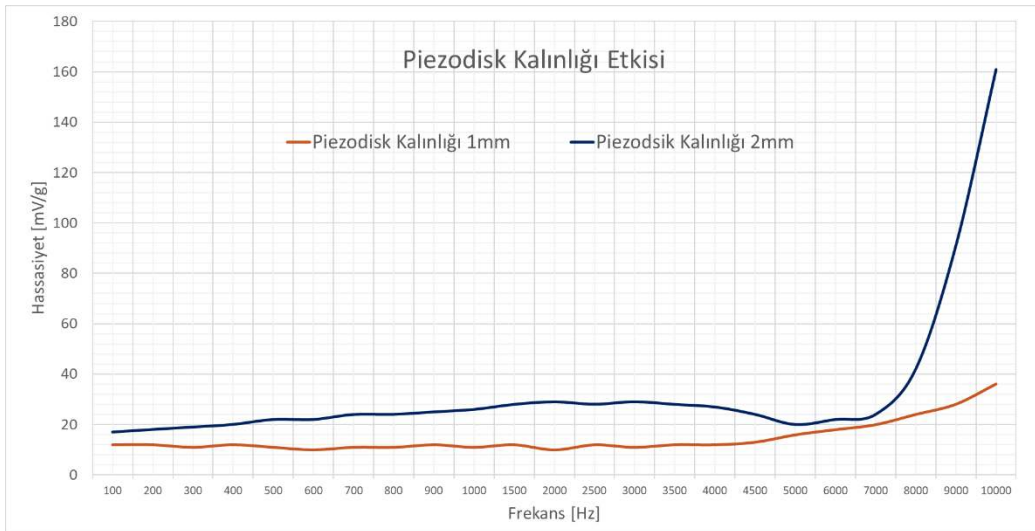
Sismik kütle büyüklüğü 3 gr iken piezodisk kalınlığının elde edilen voltaj çıktısına etkisi Şekil 6.65'te grafikleştirilmiştir.

0-5 kHz aralığı kararlı hassasiyet frekans aralığı kabul edilerek elde edilen ortalama hassasiyet değeri **1mm** piezodisk kullanıldığında 7,17 mV/g , **2mm** piezodisk kullanıldığında 14,10 mV/g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.65. Sismik kütle 3 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi

Sismik kütle büyüklüğü **5 gr** iken ve yay elemanı sismik kütle üzerinde iken piezodisk kalınlığının elde edilen voltaj çıktısına etkisi Şekil 6.66'da grafikleştirilmiştir.



Şekil 6.66. Sismik kütle 5 gr olduğu sistemde iki farklı kalınlıktaki piezodisk ile elde edilen hassasiyet değişimi

Sismik kütle büyüklüğü 3 gramdan 10 grama çıkarılarak çalışma tekrarlanmış ve 0-5 kHz frekans aralığında 1mm piezodisk kullanılarak yapılan çalışmalarda ortalama hassasiyet 11,72 mV/g , 2mm piezodisk kullanılarak yapılan çalışmalarda ortalama hassasiyet 23,89 mV/g olarak hesaplanmıştır.

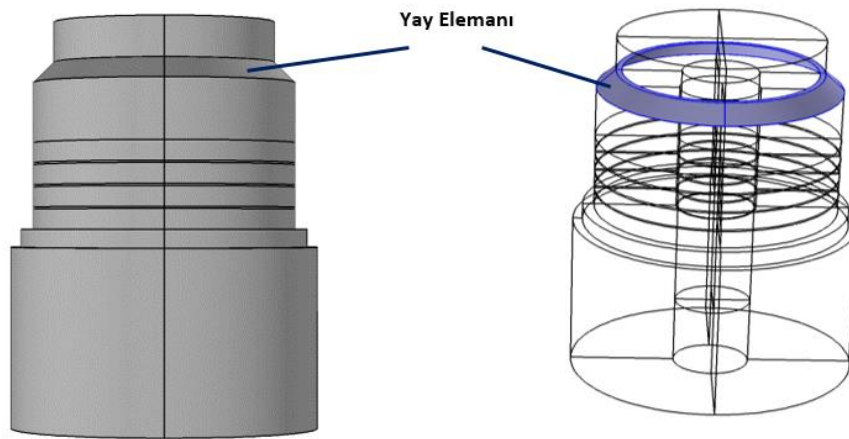
Piezodisk kalınlığının 1mm ve 2mm olduğu durumlarda elde edilen ortalama hassasiyet değerleri Tabo 6.21’de verilmiştir.

Tablo 6.21. 3gr ve 5gr sismik kütlelere sahip ivme ölçer sistemlerinde farklı kalınlıklarda piezodiskler kullanılarak 0-5 kHz aralığında elde edilen ortalama hassasiyet değerleri

Piezodisk Kalınlığı [mm]	Ortalama Hassasiyet [mV/g]	
	Sismik Kütle : 3gr	Sismik Kütle : 5gr
1	7,17	11,72
2	14,10	23,89

Elde edilen veriler, piezodisk kalınlığı ile elde edilen voltaj çıktısının orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. COMSOL hesaplamalarıyla da tutarlı olan bu durum farklı büyüklükte sismik kütlelerin kullanıldığı veya yay elemanının farklı konumlandırıldığı sistemlerle doğrulanmıştır.

6.6.4.3. Yay elemanının kalınlığının değiştirilmesi



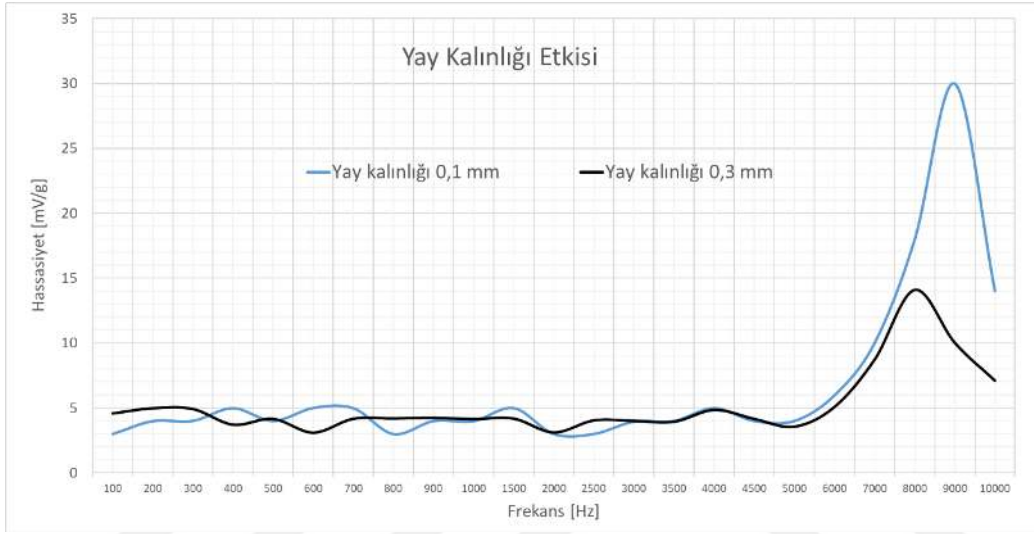
Şekil 6.67. İvme ölçer sistemi içerisinde yay elemanı

COMSOL analizleri, kullanılan yay elemanının kalınlığının elde edilen hassasiyete az da olsa etki ettiğini göstermektedir. Yay kalınlığının hassasiyete gerçekte etkisinin

anlaşılabilmesi için **0,1 mm** ve **0,3 mm** et kalınlığına sahip yay elemanları ile çeşitli varyanslarda ölçümler yapılmıştır.

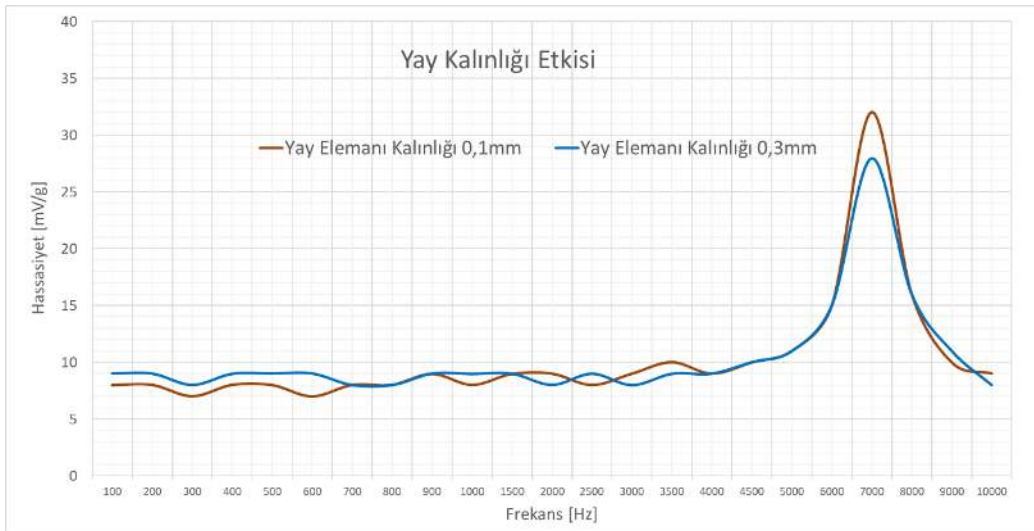
6.6.4.3.1. Yay elemanının sismik kütle üzerinde bulunduğu durumda yay kalınlığının hassasiyete etkisi

3gr sismik kütle ve 1mm kalınlıkta piezodisk kullanılarak yapılan ölçümlerde yay elemanı kalınlığının hassasiyete etkisinin % 1,48 mertebesinde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.68. Sismik kütle 3gr, piezodisk kalınlığı 1mm iken yay elemanı kalınlığının hassasiyete etkisi

Ölçümler piezodisk kalınlığı değiştirilerek tekrar edildiğinde yay kalınlığının hassasiyete etkisinin önemli ölçüde olmadığı doğrulanmıştır. Hassasiyet eğrilerinin her iki ölçümde de rezonans bölgesi hariç birbiri içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.69. Sismik kütle 3gr, piezodisk kalınlığı 2mm iken yay elemanı kalınlığının hassasiyete etkisi

6.6.4.3.2. Yay elemanın sismik kütlenin altında ve üstünde bulunduğu durumda yay kalınlığının hassasiyete etkisi

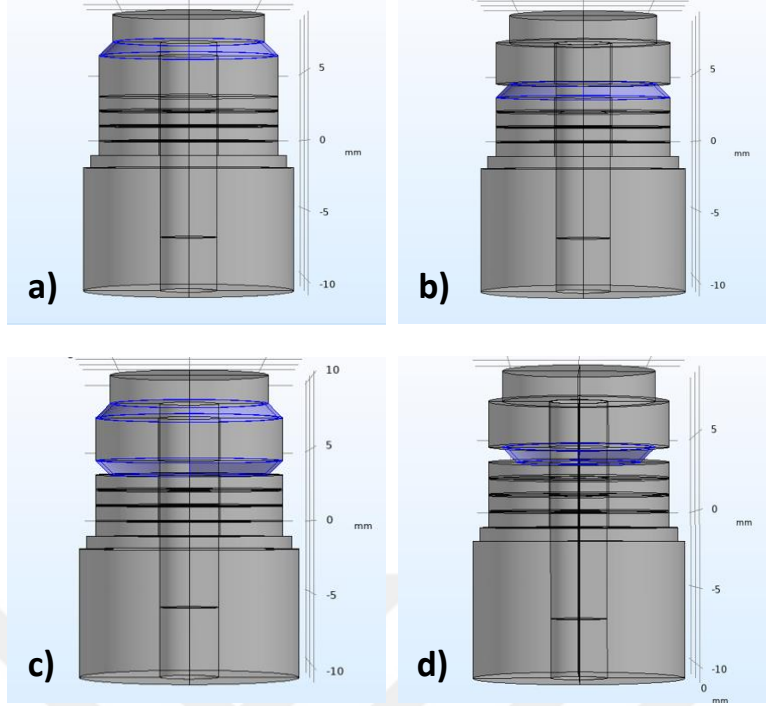
5gr sismik kütle ve 2mm kalınlıkta piezodisk kullanılan ivmeölçer sisteminde 0,1mm ve 0,3mm et kalınlığına sahip yay elemanları sismik kütlenin altında ve üstünde konumlandırılarak voltaj çıktıları ölçülmüş ve yine yay elemanının et kalınlığının hassasiyete belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Şekil 6.70’te görüleceği üzere hassasiyet eğrileri, yay et kalınlığının etkisinin araştırıldığı önceki ölçümlerde olduğu gibi birbirini içersindedir.



Şekil 6.70. Yay elemanın sismik kütle altında ve üstünde konumlandırıldığı durumda yay elemanı et kalınlığının hassasiyete etkisi

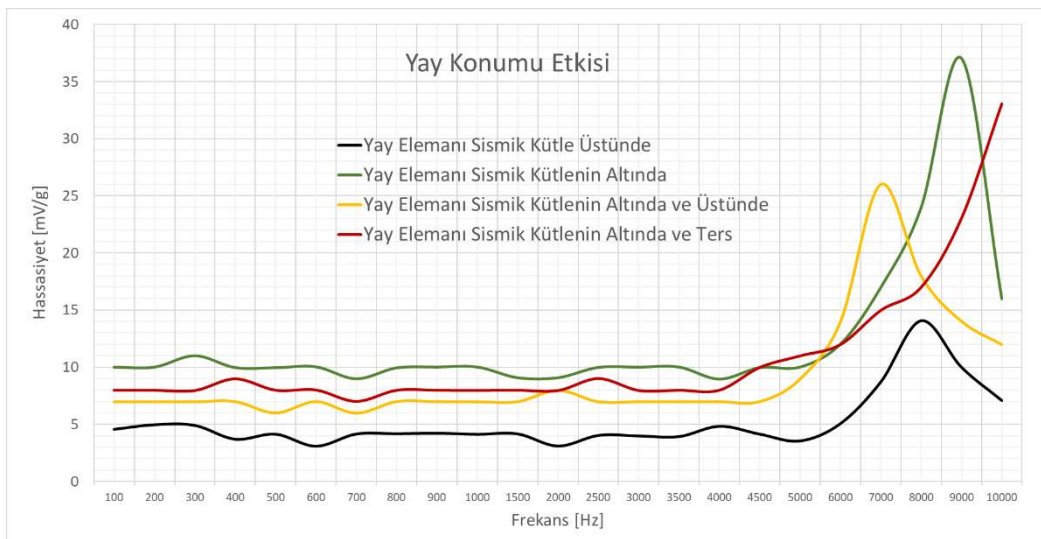
6.6.4.4. Yay elemanın konumunun değiştirilmesi

Yay elemanı konumlandırmasının elde edilen voltaj çıktısına etkisinin araştırılması için 2 farklı büyüklükteki sismik kütle ile yay elemanı 4 farklı konum ve pozisyonda iken 1g ivmelenme değerinde 0-10 kHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar COMSOL analizleri ile paralellik göstermektedir. Deneysel çalışma yapılan 4 farklı yay elemanı konumlandırması Şekil 6.71’de gösterilmiştir.



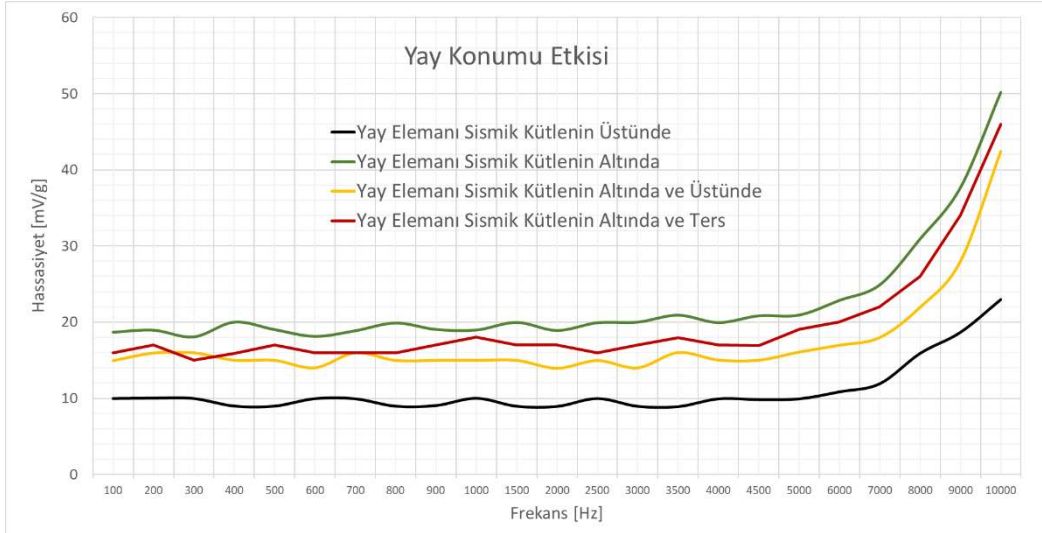
Şekil 6.71. Yay elemanı konumlandırmaları; a) Baz tasarım(yay elemanı sismik kütle üzerinde), b) Yay elemanın sismik kütle altındaki, c) Yay elemanı sismik kütle altındaki ve üstünde, d) Yay elemanı sismik kütle altındaki ve referans pozisyona ters pozisyonda

Yay elemanı konumlandırmasının elde edilen voltaj çıktısına etkisinin araştırılması için 2 farklı büyüklükteki sismik kütle ile yay elemanı 4 farklı konum ve pozisyonda iken 1g ivmelenme değerinde 0-10 kHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar COMSOL analizleri ile paralellik göstermektedir. Deneysel çalışma yapılan 4 farklı yay elemanı konumlandırması Şekil 6.71’de gösterilmiştir.



Şekil 6.72. 3 gr sismik kütle kullanılan sistemde yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı olarak elde edilen hassasiyet değerleri

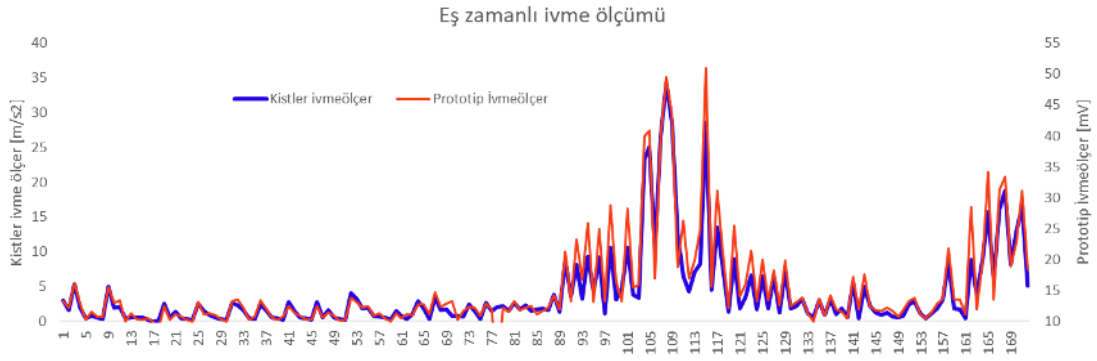
Sismik kütle ağırlığı 3gr iken yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen verilere göre yay elemanının sismik kütlenin altında konumlandırıldığı varyansta hassasiyet en yüksek değerlerde ölçülmektedir. 8gr sismik kütle kullanılarak yapılan ölçümlerde Şekil 6.72'deki sıralama Şekil 6.73'teki gibi doğrulanmıştır.



Şekil 6.73. 8 gr sismik kütle kullanılan sistemde yay elemanının adet, konum ve pozisyonuna bağlı olarak elde edilen hassasiyet değerleri

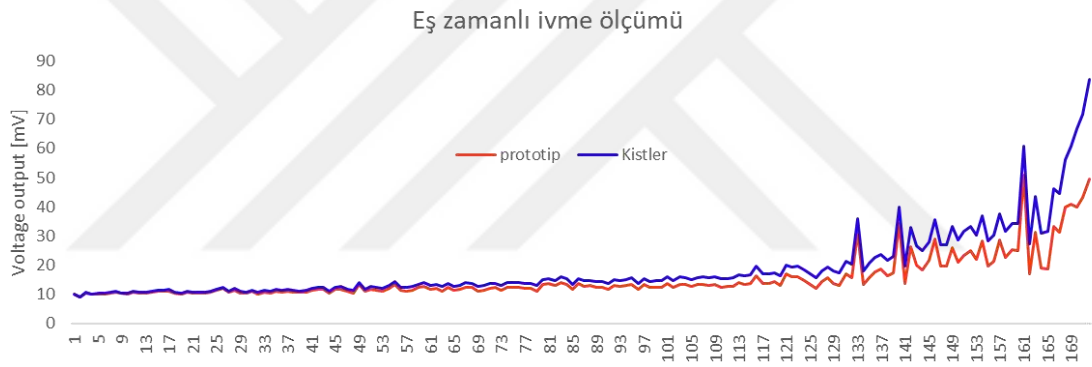
6.7. Gerçel Test Ortamlarında Ölçümler

İvmeölçer çalışmalarında çeşitli varyanslarda elde edilen prototip ivmeölçerlerin anlamlı ve doğrulanabilir çıktılar üretip üretmediklerinin anlaşılması için baz tasarım prototip ivmeölçer ve *Kistler 8766A500BH* kalibrasyonlu ivme sensörü ile eş zamanlı veri kaydı yapılmıştır. Rastgele oluşturulan 172 adet yapay titreşim hareketinde ivmelenme büyüklüğü iki sensör tarafından eş zamanlı olarak ölçülmüş ve veriler gürültü ölçümünden arındırıldığında iki sensörden elde edilen veri eğrilerinin Şekil 6.74'teki gibi %97 oranında birbirini takip ettiği görülmüştür. Bu ölçümlerde Kistler ivme sensöründen alınan veri m/s^2 cinsinden, prototip ivme sensöründen alınan veri voltaj cinsinden kaydedilmiştir.



Şekil 6.74. Kistler ve prototip ivme sensörleri ile ölçülen yapay titreşim verisi eğrileri

Bu verilerin küçükten büyüğe doğru sıralanmasıyla oluşan eğriler Şekil 6.75’te verilmiştir. Grafikte iki sensörün ivme ölçüm eğrilerinin bir A katsayısı ile ($A \sim 1,3$) birbirini takip ettiği görülmektedir.



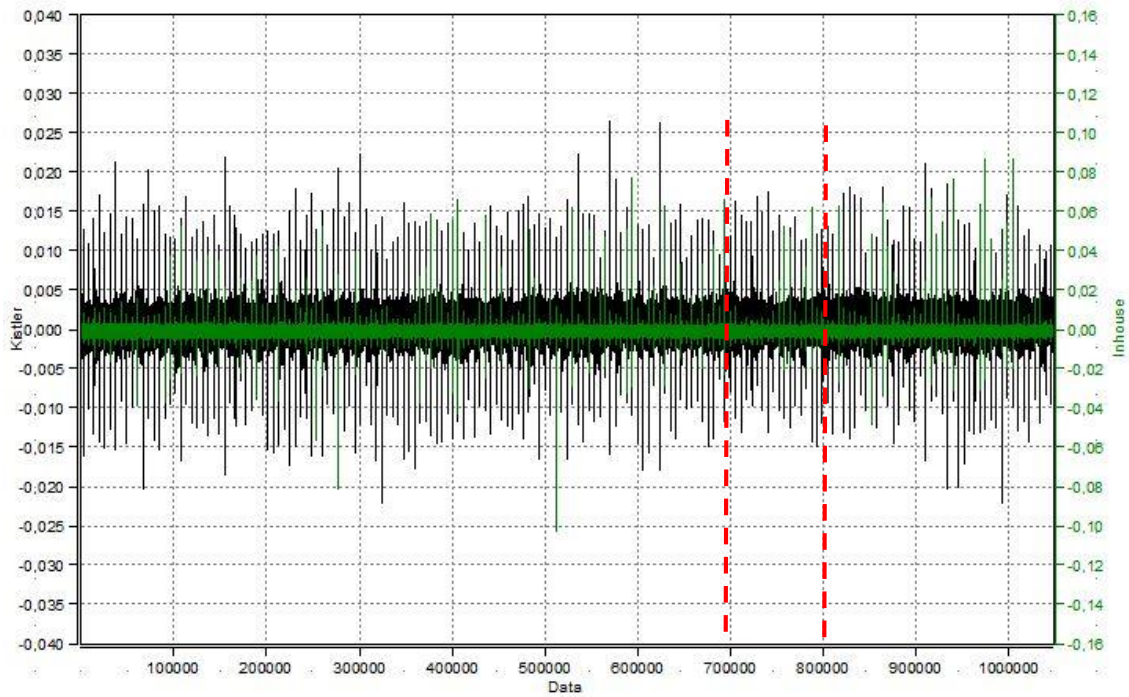
Şekil 6.75. Kistler ve prototip ivme sensörleri tarafından kaydedilen eş zamanlı ivme verilerinin küçükten büyüğe doğru sıralanması ile elde edilen eğriler

Eş zamanlı ölçümlerde kullanılan $\pm 500g$ ölçüm kapasiteli Kistler 8766A500BH ivme sensörü Şekil 6.76’da verilmiştir.

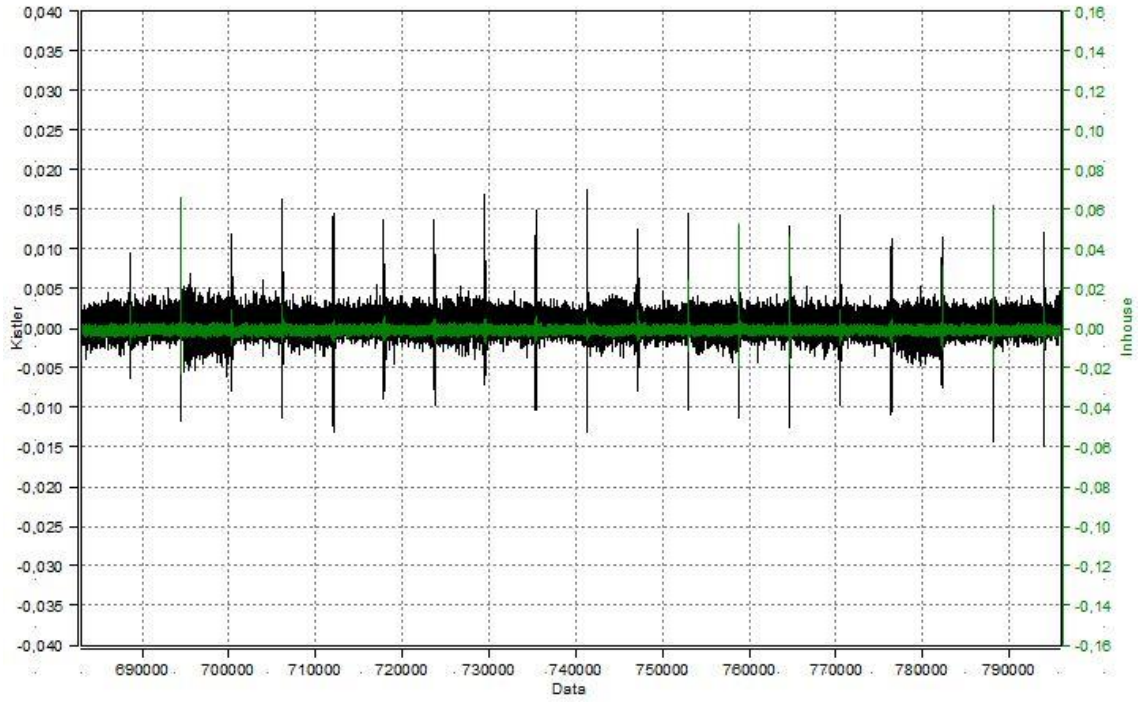


Şekil 6.76. Kistler 8766A500BH model 3 eksenli ivme sensörü[49]

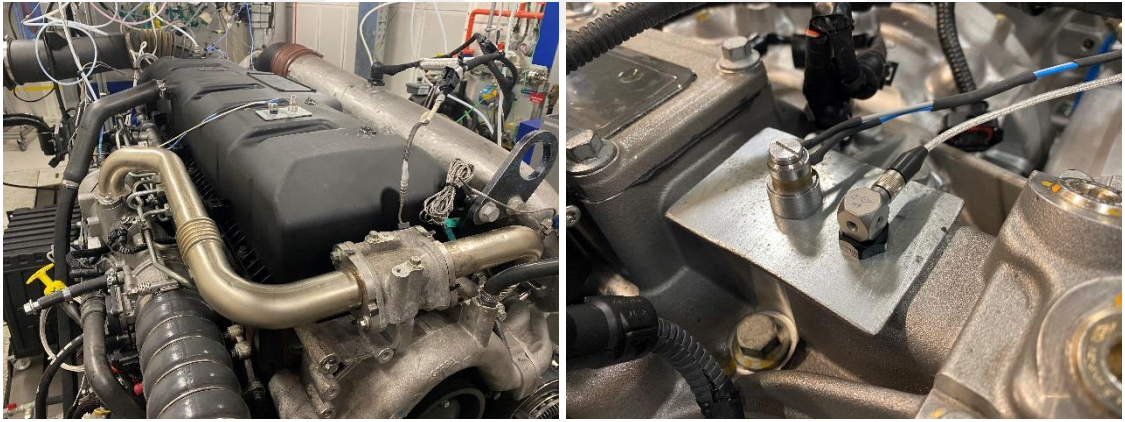
Performans araştırması amacıyla yapılan ivme ölçümlerinde baz tasarıma sahip prototip ivmeölçer rastgele titreşimler haricinde gerçek titreşim çevrimlerine de maruz bırakılmıştır. İçten yanmalı motor ve aktarma organları geliştime testlerinin yapıldığı bir test odasında prototip ivmeölçer ve kalibrasyonlu ivme sensörü Şekil 6.79’da görüldüğü gibi aynı koşullarda motor ve şanzımanlar üzerine bağlanarak sensörlerden eş zamanlı titreşim verisi alınmıştır. Şekil 6.77’de 1 kHz veri kayıt frekansında iki sensörle eş zamanlı olarak alınan titreşim verisi görülmektedir. 30 dakika süresince toplanan veri analiz edilmiş ve test çevrimi gereği vites değişimine bağlı olarak 6 saniyede bir kaydedilmesi gereken toplam 214 titreşim pikinin iki sensör tarafından da tespit edilebildiği ve veri piklerinin 214 noktada çakışık olduğu tespit edilmiştir. Bu piklerin çakışık olduğu Şekil 6.78’de olduğu gibi rassal olarak seçilen bir veri kesitinde daha büyük ölçekli bir grafik üzerinde daha kolay anlaşılabilir.



Şekil 6.77. Kistler ivme sensörü ve prototip ivmeölçerle eş zamanlı alınan titreşim verisi



Şekil 6.78. Kistler ve prototip ivmeölçerle alınan verinin daha büyük ölçekli grafiği



Şekil 6.79. Kistler ve prototip ivmeölçerlerin içten yanmalı motor ve şanzıman üzerine bağlanarak eş zamanlı titreşim datası alındığı veri toplama düzenekleri

Gerçek ortamlarda kalibrasyonlu ivme sensörü ile eş zamanlı olarak yapılan bu ölçümler prototip ivme sensöründen elde edilen verilerin tutarlı ve doğrulanabilir olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇ

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında havacılıktan otomotive oldukça geniş kullanım alanı olan ve günümüzde ithal olarak tedarik edilen ivme sensörlerine alternatif olabilecek yeterlilikte piezoelektrik esaslı ivme sensörü tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tek eksen (Z eksen) ölçüm yapabilecek sıkıştırma (compression) tarz ivmeölçer tasarımı benimsenmiş ve model ortaya çıkarılmıştır. Öncül tasarıma uygun alt parçalar imal edilerek tasarıma uygun şekilde montajlanmış ve voltaj çıkışlı ilk prototip sensör elde edilmiştir. Öncül prototip sensörün maruz kaldığı yapay titreşimlerde anlamlı voltaj çıktıları ürettiği osiloskop yardımıyla doğrulanmıştır. Diğer yandan COMSOL sonlu elemanlar analiz yazılımı yardımıyla ilk prototipin modeli oluşturulmuş, rezonans frekansları araştırılmış ve rezonans frekanslarındaki modları görüntülenmiştir. Baz olarak tasarlanan prototip sensörün COMSOL analizlerinde elde edilen voltaj çıktıları bu tasarıma uygun şekilde oluşturulan ivmeölçerle gerçel ortamda titreşim cihazı (shaker) üzerinde 0-10 kHz frekans aralığında yapılan ölçümlerde elde edilen voltaj çıktıları ile paralellik gösterdiği anlaşılmıştır. Optimum tasarım için yapılacak çalışmalar kapsamında alt parçaların geometri ve ivmeölçer sistemi içerisindeki konumlarının değiştirilmesi ile 14 parametreden türetilen 93 varyasyon COMSOL programında analiz edilmiş ve hassasiyet değerlerinin bu parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımının öngördüğü sonuçların gerçel ortamda belli parametrelerle yapılan deneylerle yüksek oranda doğrulandığı görülmüş ve optimum ivmeölçer tasarımı COMSOL yazılımı yardımıyla belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- COMSOL sonlu elemanlar analiz yazılımı ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar büyük oranda tutarlılık göstermektedir. Piezosensör tasarımı ve benzeri çalışmalarda COMSOL yazılımından faydalanılarak deney sayıları azaltılabilir.
- Tasarlanan sistem, 0-5kHz frekans aralığında daha tutarlı çıktılar sağlamaktadır.
- Sistemin 5-10kHz aralığında - çoğunlukla 7 kHz civarında- doğal frekansları olduğu görülmüştür (COMSOL analizleri ile tutarlıdır).
- Klasik sıkıştırma tip tasarımı sismik kütle arttıkça elde edilen hassasiyet doğrusala yakın oranda artmaktadır.

- Yay elemanın konum adet ve pozisyonu hassasiyeti etkilemektedir. Klasik sıkıştırma tip sensörde en fazla voltaj, yay elemanın sismik kütlenin altında konumlandırıldığı sistemde elde edilmiştir.
- Hassasiyet, piezodisk kalınlığı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.
- Belirlenen model için yay kalınlığının hassasiyete önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- Gerçel ortamda ağır ticari araçların aktarma organlarında endüstriyel ivme sensörü ile eş zamanlı yapılan ölçümlerde ölçülen ivme değişimleri ile baz tasarımdan elde edilen voltaj değişimlerinin %97 oranında örtüştüğü görülmüştür. Bütün titreşim pikleri her iki sensörle de tespit edilebilmiştir.



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, 1995.8
- [3] Çiçek, K. (2011). Çinko oksit ince filmin pyroelektriklik özelliği üzerinde alt taş materyalin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- [4] Donato, M.D. 2014. Development of composite piezoelectric materials for tactile sensing, PhD Thesis in Physics, Politecnico di Torino Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, Torino, İtalya
- [5] Vijaya, M.S.2013. Piezoelectric Materials and Devices Applications in Engineering and Medical Sciences M. Newyork, USA (1,161)
- [6] Gül, M., (2019). *Piezoelektrik Seramiklerin Tasarımı, Üretimi ve Elektriksel Yorulma Davranışlarının Karakterizasyonu*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, Afyon, Türkiye.
- [7] APC International Ltd., 2002. "Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications", Pennsylvania, USA.
- [8] Pınar, D., (2017). *İvmeölçer Sinyallerinin İleri Yöntemlerle Analizi*, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye
- [9] Tichy, J. Erhart, J. Kittinger E. Prívratská, J. 2010. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics Mechanical, Dielectric and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials, Springer Heidelberg Dordrecht London New York (1,176)
- [10] Gökçeyrek A.B., (2019) *Kurşunsuz Piezoelektrik Çok Katmanlı Seramiklerin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, Türkiye.
- [11] Dhingra, P., Biswas, J., Prasad, A., Meher, S.S., *Energy Harvesting using Piezoelectric Materials*, Special Issue of International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), International Conference on Electronic Design and Signal Processing (ICEDSP) 2012

- [12] Li J., Liu Y., Zhang Y., Cai H.L., Xiong R.G. (2013). Molecular ferroelectrics: where electronics meet biology. *Physical Chemistry of Chemical Physics* **15**: 20786-20796.
- [13] Tressler J F, Alkoy S, Newnham R E, “Piezoelectric sensors and sensor materials”, *Journal of Electroceramics* 2: 4, 257-272 (1998).
- [14] Türker, Ö., (2009) *PZT/Polimer Esaslı Aktif Titreşim Kontrolüne Uygun Akıllı Kiriş Tasarımı ve İmalatı*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye
- [15] Shekhani H.N., Uchino K. (2015). Evaluation of the machanical quality factor under high power conditions in piezoelectric ceramics from electrical power. *Journal of the European Ceramic Society*, **35**: 541-544.
- [16] Jordan T.L., Ounaies Z. (2001) Piezoelectric ceramics characterization. NASA-ICASE Raporu.NASA/CR-2001-211225. Virginia, ABD.
- [17] Jin B.M., Kim J., Kim S.C. (1997). Effects of grain size on the electrical properties of $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ ceramics. *Applied Physics A* **65**: 53–56
- [18] Lupascu D.C., (2004) *Fatigue in Ferroelectric Ceramics and Related Issues*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ABD.
- [19] 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.
- [20] Çalışkan, F. (2016). *Seramiklerin Şekillendirilmesi*. Sakarya Üniversitesi.
- [21] Cho, Y.S., Yeo, J.G., Jung, Y.G., Choi, S.C., Kim, J. ve Paik, U. (2003). Effect of molecular mass of poly(vinyl butyral) and lamination pressure on the pore evolution and microstructure of BaTiO_3 laminates. *Materials Science and Engineering A* 362: 174–180.
- [22] Lupascu, D.C. (2004). *Fatigue in Ferroelectric Ceramics and Related Issues*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ABD, 18-20.
- [23] Song, J.K., Um, W.S., Lee, H.S., Kang, M.S., Chung, K.W. ve Park, J.H. (2000). Effect of polymer molecular weight variations on PZT slip for tape casting. *Journal of the European Ceramic Society* 20: 685-688.
- [24] Yoon, D.H., Lee, B.I. (2004). Processing of barium titanate tapes with different binders for MLCC applications-Part II: Comparison of the properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 24: 753-761.
- [25] Lines M.E., Glass A.M. (1977). *Principles and applications of ferroelectric and related materials*. Clarendon Press, Oxford, İngiltere.
- [26] Haertling, Gene H., *Ferroelectric Ceramics: History and Technology*. *Journal of the American Ceramic Society*, 82: 797-818

- [27] Ergün C, Yılmaz Ş, Özdemir E, Gül Ö, Kalenderli Ö, “Piezoelektrik malzemeler ve uygulamaları”, *11. 'inci Uluslararası Malzeme Sempozyumu Bildirisi* (19–21 Nisan 2006).
- [28] Schwartz, M., 2002. Encyclopedia of Smart Materials, Wiley, New York.
- [29] Shrout T.R., Zhang S.J. (2007). Lead-free piezoelectric ceramics: alternatives for PZT?. *Journal of Electroceramics*, **19**: 111–124.
- [30] Bayramol, D.V. 2014, Piezoelektrik Akıllı Malzemeler ve Tekstilde Kullanımları, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:8, No: 3, 2014 (61-67), Namık Kemal Üniversitesi Müh. Fak. Tekstil Müh. Böl., 59850 Tekirdağ/Türkiye
- [31] Harrison J.S., Ounaies Z. (2001) Piezoelectric polymers. NASA-ICASE Raporu.NASA/CR-2001-211422. Virginia, ABD.
- [32] Dargaville, T. R. Celina, M. C. Elliott , J. M. Chaplya, P. M. Gary, Jones D. Mowery, D. M. Assink R. A. Clough, R. L. Martin, J. W. 2004. Characterization, Performance and Optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror, Concepts Sandia National Laboratories Albuquerque, Sandia is a multiprogram laboratory operated by Sandia Corporation, Newmexico, California
- [33] Gusarow, B. 2015. PVDF piezoelectric polymers: characterization and application to thermal energy harvesting, Master Thesis, Universite Grenoble Alpes, Saint MartindHeres France
- [34] 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.
- [35] Baur, C. 1, Apo, D. J. , Maurya, D. , Priya, S., Voit, W. , 2014. Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Vibrational Energy Harvesting, Materials and Devices Laboratory (BMDL), Center for Energy Harvesting Materials and Systems (CEHMS), Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia U.S.A.
- [36] Dogan A., Tressler J.F., Newnham R.E. (2001). Solid-State Ceramic Actuator Designs. *AIAA JOURNAL*, **39**: 1354-1362.
- [37] Gürbüz M.(2013). Production and characterization of 94NBT-6BT piezoelectric single crystal materials. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- [38] Vijaya, M.S.2013. Piezoelectric Materials and Devices Applications in Engineering and Medical Sciences M. Newyork, USA (1,161)
- [39] Physik Instrumente (2009) Piezoelectrics in Positioning: Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications, Karlsruhe, Germany.
- [40] Kadioğlu T., Dinçer H., İvme Sensörü Uygulaması, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İzmit, Türkiye

- [41] Hu W., (2014) *High-Performance Accelerometer Based On Asymmetric Gapped Cantilevers For Physiological Acoustic Sensing*, Wayne Eyalet Üniversitesi, Doktora Tezi, Detroit, Michigan, ABD
- [42] Da Silveira Nantes Button V.L., (2015) Principles of Measurement and Transduction of Biomedical Variables, Department of Biomedical Engineering, School of Electrical and Computing Engineering, University of Campinas, São Paulo, Brazil
- [43] Seshia A. A., Palaniapan M., Roessing T. A., Howe R. T., Gooch R. W., Schimert T. R., Montague S., (2002) A Vacuum Packaged Surface Micromachined Resonant Accelerometer
- [44] Piezoelectric Accelerometers Theory and Application, Metra Mess- und Frequenztechnik © 2001
- [45] Ghemari Z., Salah S., Bourenane R., (2018) Resonance Effect Decrease and Accuracy Increase of Piezoelectric Accelerometer Measurement by Appropriate Choice of Frequency Range, Hindawi Research Article, Algeria
- [46] Piezoelectric Accelerometer And Vibration Preamplifier Handbook by Mark Serridge, BSc and Torben R. Licht, MSc Revision November 1987
- [47] *Vibration and Shock Sensor selection Guide*, PCB Piezotronics, Inc., ABD, 1993
- [48] Türk Standardı - TS 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 1980, Ankara, Türkiye
- [49] Kistler Miniature PiezoStar Accelerometer, IEPE Triaxial Accelerometers Data Sheet
- [50] Üneşi E., (2018). *Piezoelektrik Seramik Eyleyiciler Kullanarak Aktif Akustik Sönümleme*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, Türkiye.
- [51] Brüel Kjaer Product Data Sheet, DeltaTron Accelerometers, Types 4513, 4513-001, 4513-002, 4513-B, 4513-B-001 and 4513-B-002
- [52] Keysight InfiniiVision 3000A X-Series Oscilloscopes Data Sheet

İnternet Kaynakları

- 1) <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction>
- 2) <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>
- 3) <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1474>
- 4) <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>
- 5) <https://www.phyley.com/instantaneous-acceleration>
- 6) <https://sites.google.com/site/delseaphysics1/Home>
- 7) <https://web.itu.edu.tr/ozturkyi/bolum3a.pdf>
- 8) <https://www.pasco.com/resources/blog/53>
- 9) <https://www.directindustry.com/prod/metra-mess-und-frequenztechnik-radebeul-ek/product-69226-592001.html>
- 10) <https://wtamu.edu/~cbaird/sq/2014/01/07/do-i-weigh-less-on-the-equator-than-at-the-north-pole/>
- 11) <https://wilcoxon.com/blog/choosing-an-accelerometer/>
- 12) https://www.engineersgarage.com/article_page/accelerometers/

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat KARAER

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu:

Lise : İskenderun Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı) (1997-2000)

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2003-2007)

Çalıştığı Kurumlar:

- Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Teknik Satınalma (2008-2010)
- Ford Otomotiv Sanayi A.Ş., Ar-Ge, Tasarım Doğrulama ve Test Müdürlüğü (2011-2021, Devam ediyor)

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Karagoz, S., Karaer, M., and Dasdemir, N., "Exhaust Gas Heat Recovery at an Engine Test Facility," SAE Technical Paper 2016-01-0235, 2016, ISSN: 0148-7191