

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PZT/POLİMER ESASLI AKTİF TİTREŞİM
KONTROLÜNE UYGUN AKILLI KİRİŞ
TASARIMI VE İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Önder TÜRKER**

Anabilim Dalı : Makina Mühendisliği

Programı : Katı Cisimlerin Mekanik

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PZT/POLİMER ESASLI AKTİF TİTREŞİM
KONTROLÜNE UYGUN AKILLI KİRİŞ
TASARIMI VE İMALATI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Önder TÜRKER
(503061504)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Celaletdin ERGÜN (İTÜ)
Eş Danışman : Doç. Dr. Şafak YILMAZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. M. Salih DOKUZ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KIZIL (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bana zaman ayıran, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek deneysel bir çalışma için ortam hazırlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Celalettin ERGÜN'e ve Doç. Dr. Şafak YILMAZ' a teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için maddi katkı sağlayan İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü'ne saygılarımı arz ederim.

Tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi katlılarını esirgemeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim çok sevgili aileme teşekkür ederim.

MAYIS 2009

Önder TÜRKER

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
KISALTMALAR.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı.....	1
2. PİEZOELEKTRİKLİK.....	5
2.1. Piezoelektrik Özellik.....	5
2.2. Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler.....	9
2.2.1. Yaşlanma.....	9
2.2.2. Mekanik Sınırlamalar.....	9
2.2.3. Elektriksel Sınırlamalar.....	9
2.2.4. Isısal Sınırlamalar	10
2.3. Piezoelektrik Malzemeler	10
2.3.1. Doğal Piezoelektrik Malzemeler (Kristaller)	11
2.3.2. Piezoelektrik Seramik Malzemeler	12
2.3.2.1. Yumuşak ve Sert Piezoelektrik Seramikler	13
2.3.2.2. Piezoelektrik PZT	15
2.3.2.3. Yaygın Kullanılan Piezoelektrik Seramikler ve Özellikleri	20
2.3.3. Polimer Piezoelektrikler	21
2.3.4. Kompozit piezoelektrikler.....	22
2.4. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları	22
2.4.1. Sensörler	23
2.4.2. Üreteçler.....	23
2.4.3. Aktuatörler	24
2.4.4. Transdüserler.....	25
2.5. Piezoelektrik Sabitler.....	25
2.5.1. Piezoelektrik Yük Sabiti	26
2.5.2. Piezoelektrik Voltaj Sabiti.....	27
2.5.3. Dielektrik Sabiti.....	28
2.5.4. Elektromekanik Çift Faktörü (Katsayısı)	29
2.5.5. Elastik Uygunluk	32
2.5.6. Elastiklik Modülü (Young Modülü)	32
3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER.....	33
3.1. Giriş	33
3.2. Sensör Çeşitleri	34

3.2.1. Eksenel Sensör Elemanları	34
3.3. Piezoelektrik Kompozit Sensörler	37
3.3.1. 0-3 Piezoelektrik Seramik-Polimer Kompozit Sensörler	38
4. TİTREŞİM VE AKTİF KONTROL	41
4.1 Titreşim	41
4.1.1 Titreşim analizi	42
4.1.1.1 Sönümsüz serbest titreşim.....	42
4.1.1.2 Sönümlü serbest titreşim	43
4.1.1.3 Sönümlü zorlamalı titreşim	45
4.1.1.4 Rezonans	47
4.1.2 Kirişlerde eğilme titreşimleri	48
4.1.2.1 Matematik modelin oluşturulması.....	50
4.1.2.2 Serbest titreşimler	50
4.1.2.3 Bir tarafından ankastre mesnetli sabit kesitli kirişin doğal frekanslarının teorik olarak hesaplanması	51
5. AKILLI ÇUBUĞUN SONLU ELEMANLAR MODELİ	54
5.1 ANSYS Modelleme Elemanları	54
5.1.1 Solid 5	54
5.1.2 Solid 45	55
5.2 Piezoelektrik Malzeme Değerleri Dönüşümü.....	56
5.2.1 Temel Bilgiler	56
5.2.2 Rijitlik/uyum matrisi	58
5.2.3 İletkenlik matrisi.....	60
5.2.4 Yoğunluk girişi	61
5.2.5 Piezoelektrik sabit matrisi	61
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
6.1. Ön Çalışmalar	63
6.2. PZT Tozunun Hazırlanması	63
6.3. Numunelerin Hazırlanması	66
6.3.1. Alüminyum Çubukların Hazırlanması	66
6.3.2. Maskeleme	66
6.3.3. Piezoelektrik Kompozitlerin (Boyaların) Hazırlanması ve Uygulanması	67
6.3.4. Yüzey Elektrotunun Hazırlanması	69
6.4. Polarizasyon	71
6.5. Sinyal Performans Testleri	71
6.6. Deney Sonuçları	74
7. SAYISAL MODELLEME	77
7.1 Akıllı Çubuğun Modellenmesi	77
7.2 Serbest Titreşim İçin Aktif Kontrol	79
7.3 Malzemenin (PZT Kompozit) Sonlu Elemanlar Analizi	81
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	88
EKLER.....	89

KISALTMALAR

PZT	: Kurşun-Zirkonat-Titanat
PT	: Kurşun Titanat
PZN	: Kurşun Çinko Niobatlar
BT	: Baryum Titanat
APC	: American Piezo Ceramics Inc.

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1 : Bazı Piezoelektrik Kristallerin Oda Sıcaklığındaki Özellikleri.....	12
Çizelge 2.2 : Yumuşak ve Sert Seramiklerin Karşılaştırılması.....	15
Çizelge 2.3 : PZT Seramiklerinin Özellikleri.....	19
Çizelge 2.4 : PZT Türleri ve Özellikleri.....	19
Çizelge 2.5 : Bazı Piezoelektrik Seramiklerin Özellikleri.....	20
Çizelge 2.6 : Piezoelektrik Yük Sabiti İndislerinin İfadeleri.....	27
Çizelge 2.7 : Piezoelektrik Voltaj Sabiti İndislerinin İfadeleri.....	28
Çizelge 2.8 : Dielektrik Sabiti İndislerinin İfadeleri.....	29
Çizelge 2.9 : Elektromekanik Çift Katsayısı İndislerinin İfadeleri.....	30
Çizelge 2.10 : Elastik Uygunluk İndislerinin İfadeleri.....	32
Çizelge 6.1 : APC 856 PZT Piezoelektrik Seramiğinin Özellikleri.....	64
Çizelge 7.1 : Sonlu Elemanlarda Çıkan Sonuçlar.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Bölge Hareketlerinin Çizgisel Gösterimi, (a) Polarizasyon Öncesi, (b) Polarizasyon, (c) Polarizasyon Sonrası.....	6
Şekil 2.2	: Piezoelektrik Elemanda Meydana Gelen Histersiz (a) ve Boyut Değişimi.....	7
Şekil 2.3	: Piezoelektrik Elemanın Davranışı (a) Elemandaki Polarizasyon Doğrultusu (b-c) Üreteç Davranışı (d-e) Motor Davranışı.....	8
Şekil 2.4	: Provskit Kristalinin Şematik Görüntüsü.....	13
Şekil 2.5	: PZT Yapısı, (a) Sıcaklık>T _c , (b) Sıcaklık<T _c	16
Şekil 2.6	: Kuri Sıcaklığına Göre PZT’de ki Yapısal Dönüşümler.....	16
Şekil 2.7	: Mekanik Gerilme Sonucu Yapıda Meydana Gelen Çarpılmalar, (a) Gerilmesiz Durum, (b-d) Gerilme Sonucunda Meydana Gelen Çarpılma.....	18
Şekil 2.8	: PVDF β Fazının Moleküler Dizilimi.....	22
Şekil 2.9	: Temel Piezoelektrik Sensör Çeşitleri, (a) Eksenel Sensör, (b) Fleksör Sensör.....	23
Şekil 2.10	: Piezoelektrik Eleman Kullanılarak Oluşturulan Elektrik Enerjisi, (a) Ark Üretimi, (b) Şarj Üretimi.....	24
Şekil 2.11	: Temel Aktuatör Çeşitleri (a-c).....	25
Şekil 2.12	: Piezoelektrik Malzemeler İçin Koordinat Sistemi.....	26
Şekil 3.1	: Eksenel Piezoelektrik Seramik Sensör Elemanı.....	35
Şekil 3.2	: Çok Elemanlı Eksenel Sensör.....	35
Şekil 3.3	: Sismik Kütleli Eksenel Sensör.....	37
Şekil 3.4	: Kompozit Piezoelektrik Malzemelerde Fazların Birbirlerine Göre Konumu.....	38
Şekil 3.5	: Piezoelektrik Boyanın Uygulanma Şekli.....	40
Şekil 4.1	: Basit Kütle–Yay Sistemi.....	42
Şekil 4.2	: Basit Kütle–Yay–Sönüm Sistemi	43
Şekil 4.3	: Sönümlü Serbest Titreşim (a) $\zeta = 0.1$, (b) $\zeta = 0.3$	45
Şekil 4.4	: Zorlamalı Titreşim İçin Frekans Cevabı (a) Genlik, (b) Faz.....	46
Şekil 4.5	: Kirişlerde Eğilme.....	48
Şekil 4.6	: Bir Tarafından Ankastre Mesnetli Kiriş.....	51
Şekil 5.1	: ANSYS Programındaki SOLID5 Elemanı.....	55
Şekil 5.2	: ANSYS Programındaki SOLID45 Elemanı.....	55
Şekil 6.1	: PZT Tozunun Hazırlanması (a-c) Sinterlenen Tozlar (d-e) Öğütme İşlemi (f-ı) Eleme ve Saklama.....	65
Şekil 6.2	: Maskeleme resimleri sensör için.....	66
Şekil 6.3	: Maskeleme resimleri aktuatör için.....	67
Şekil 6.4	: Piezoelektrik Boya Karışımının Hazırlanıp Uygulanması (a) Maskeleme İşleminin Hazırlanması (c) Piezoelektrik Boyanın Uygulanışı (d) Piezo Boyanın Kuruması.....	68

Şekil 6.5 :	Yüzey (üst) Elektodunu Hazırlanması (a-b) Gümüş Bandın Uygulanma şekli ve akrilik sürülmesi (c-d) Gümüş Boyanın Aktuatöre ve Sensöre Sürülmesi.....	70
Şekil 6.6 :	Yüzey (e) İletkenliğin Kontrol Edilmesi.....	70
Şekil 6.7 :	Polarizasyon Aşaması (a) Polarizasyon Düzenegi (b-c) Polarizasyon İçin Numuneye Yapılan Bağlantılar.....	71
Şekil 6.8 :	(a) Sinyal Performans Testleri İçin Kurulan Düzenek (b) Numunelerin Düzeneğe Bağlanması (c) Numune Üzerine Kuvvet.....	72
Şekil 6.9 :	Aktif Kontrol Testleri İçin Kurulan Şematik Düzenek.....	72
Şekil 6.10 :	Cihazı ve Terminalleri (a-b).....	73
Şekil 6.11 :	DAQ Cihazı Bağlantı Şeması.....	73
Şekil 6.12 :	Bir numaralı deney numunesinden alınan sinyaller.....	74
Şekil 6.13 :	İki numaralı deney numunesinden alınan sinyaller.....	75
Şekil 6.14 :	Üç numaralı deney numunesinden alınan sinyaller.....	75
Şekil 6.15 :	<i>Signal Express</i> programından bir görünüş. Kırmızı renkte olan aktuatör mavi renkte olan ise sensördür.....	76
Şekil 7.1 :	Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli (aktuatör).....	78
Şekil 7.2 :	Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli (sensör).....	79
Şekil 7.3 :	ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun (%100 PZT) Serbest Titreşim Grafikleri (a)Kontrolsüz, (b) $K_p=50$, (c) Karşılaştırması	82
Şekil 7.4 :	Hacim Merkezli Boşluklu Kübik Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak elde edilen elektrik gerilimi değeri.....	82
Şekil 7.5 :	Hacim Merkezli Boşluksuz Kübik Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak elde edilen elektrik gerilimi değeri.....	82
Şekil 7.6 :	Yüzey Merkezli Kübik Boşluksuz Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	83
Şekil 7.7 :	Yüzey Merkezli Kübik Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	83
Şekil 7.8 :	Yüzey Merkezli Boşluklu Kübik Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	83
Şekil 7.9 :	Hacim Merkezli Tetragonal Boşluklu Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	84
Şekil 7.10 :	Hacim Merkezli Tetragonal Boşluksuz Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	84
Şekil 7.11 :	Hacim Merkezli Tetragonal Boşluklu Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	85
Şekil 7.12 :	Hacim Merkezli Tetragonal Boşluksuz Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri.....	85

SEMBOL LİSTESİ

A	: Seramik elemanın yüzey alanı (m^2)
d	: Piezoelektrik yük sabiti (C/N)
D₀	: Seramik sik yada telin çapı (m)
ϵ^0	: Boşluğun dielektrik sabiti($8,85 \times 10^{-12}$ farad/m)
ϵ^T	: Seramik malzemenin dielektrik sabiti (farad/m- sabit gerilme)
F	: Kuvvet
f_m	: Minimum impedans frekansı(rezonans frekansı) (Hz)
f_n	: Maksimum impedans frekansı(anti-rezonans frekansı) (Hz)
g	: Piezoelektrik voltaj sabiti (Vm / N)
h	: Seramik elemanın yüksekliği ya da kalınlığı (m)
k	: Elektromekanik çift faktörü
k_{eff}	: Efektif çift faktörü
K^T	: Relatif dielektrik sabiti(sabit gerilme altında)
l	: Seramik elemanın ilk boyu (uzunluğu) (m)
N	: Frekans sabiti (Hz*m)
Q_m	: Mekanik kalite faktörü
ρ	: Seramiğin yoğunluğu (kg / m ³)
s	: Elastik Uygunluk (m ² / N)
S	: Gerinim (birim şekil değişimi)
tan δ	: Dielektrik kayıp faktörü
T	: Gerilme
T⁰	: Sıcaklık
T_C	: Küri sıcaklığı
v	: Seramik malzemede içindeki sesin hızı (m / s)
w	: Seramik elemanın genişliği (m)
E	: Elastiklik modülü (N / m ²)
P_s	: Maksimum Polarizasyon
P_r	: Artık (Remanent) polarizasyon

PZT/POLİMER ESASLI AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜNE UYGUN AKILLI KİRİŞ TASARIMI VE İMALATI

ÖZET

Akıllı çubuklar, üzerlerindeki piezoelektrik malzeme ve kontrol sistemi sayesinde titreşimleri sönümlenen sistemlerdir. Bu çalışmada, bir tarafından ankastre mesnetli akıllı çubuk ANSYS programında yapılan model ve kurulan deney düzeneği ile çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında, öncelikle akıllı yapılar hakkında kısa bilgi verilmiş ve tarihçesine değinilmiş, ilerleyen bölümlerde, piezoelektriklik ve piezoelektrik malzeme özellikleri açıklanmış, titreşim teorisi ve akıllı yapılar konuları ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, bir tarafından ankastre mesnetli bir akıllı çubuk modelinin ANSYS 10 programı kullanılarak hazırlanması ve bu modele serbest ve zorlamalı titreşim için aktif titreşim kontrolü uygulanması açıklanmıştır. Son bölümde ise ANSYS modeli yapılan çubuğun deneysel olarak analizi yapılmıştır.

DESIGNING AND MANUFACTURING OF PZT/ POLYMER BASED SMART BEAMS WHICH COMPETIBLE ACTIVE VIBRATION CONTROL

SUMMARY

Smart beams are vibration damped systems that include piezoelectric materials and control systems. In this thesis, a cantilever smart beam modeled using ANSYS computer program and experimentally.

First two chapter mention about smart structures and their history, the piezoelectricity and the piezoelectric materials. Chapter three explains vibration theory and the smart structure concept. Chapter four shows how a cantilever smart beam can be modeled in ANSYS 10 computer program, and how active vibration control for free or forced vibration can be applied to that model. In the last chapter, experimental analysis of the model was made in ANSYS program.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde mekanik ve malzeme bilimindeki gelişmeler ve eş zamanlı olarak ortaya çıkan tasarım ve imalat teknolojilerindeki ilerlemeler çok sayıda yeni ve ileri derecede mühendislik malzemesi üretmiştir. Bunlar arasında fonksiyonel malzemeler olarak adlandırılanları, mekanik, elektrik, manyetik alan veya ısınma gibi bir dış fiziksel olayın etkisi altında kaldığı zaman şeklini ve davranış özelliklerini değiştirebilmektedirler. Bir malzeme kendi içerisindeki ve çevresindeki değişikliklere tepki gösterebiliyor ve kendisinden beklenen davranışı tüm kullanım süresi boyunca en uygun bir şekilde yerine getirebiliyorsa akıllı olarak adlandırılır. Piezoelektrik gibi yarı iletken malzemeler, akıllı malzemeler sınıfına girmektedir. Gelişen ve yenilenen teknolojiye akıllı malzemelere olan talep her geçen gün daha da artmaktadır. Akıllı malzemeler içinde piezoelektrik malzemelerin kullanım alanlarının çokluğu bu malzemelerin gelecekte de en çok ihtiyaç duyulan malzemelerden olacağının bir göstergesidir (Yüklü, 2008).

Akıllı malzemeler (aktif titreşim kontrollü) makina mühendisliği, uçak mühendisliği ve inşaat mühendisliği gibi değişik mühendislik sahalarında farklı yapılara uygulanabilmektedir. Uçak mühendisliğinde bir uçağın kanat veya kuyruğunun, inşaat mühendisliğinde bir binanın veya köprünün, makina mühendisliğinde ise robot kollarının veya esnek kirişlerin ve plakaların aktif titreşim kontrolü, mühendislerin ilgisini çeken araştırma konularıdır (Malgaca, 2007).

Akıllı yapılar, görevleri titreşimi sönmölemek olan sensör ve aktüatör elemanlarının gövde üzerine yapıştırılması ile oluşan yapılar olarak görölebilir. Örneğin, araştırmacılar ince elastik çubuktaki titreşimleri gidermek için üzerine yapıştırılmış piezoelektrik seramik ya da filmin, sensör ve aktüatör özelliklerinden yararlanarak daha düşük titreşim genlikleri elde etmenin olabirliğini ispatlamışlardır. Çubuk dış kuvvet etkisiyle deforme olduğunda, eşzamanlı olarak deforme olan piezoelektrik sensör kuvvetin şiddetiyle orantılı olarak bir yüzey şarjı üretir. Sensörden alınan bu

sinyali işleyen kontrol sistemi, aktüatöre uygun gerilimi uygulayarak tersi yönde bir deformasyon yapmasını sağlar ve bu sayede yapının titreşimi sönümlenmiş olur.

Akıllı yapılarda kullanılan piezoelektrik sözcüğünün fiziksel ifadesi sanıldığı kadar anlaşılmaz ve karmaşık değildir. Latince “bastırmak-press” anlamına gelen “piezo” ön ekinden türetilen “piezoelektrik” kavramı basitçe, üzerine mekanik bir basınç uygulanan bazı kristal ve seramik malzemelerde bir elektriksel gerilimin oluşması olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik etki denen bu olgunun terside söz konusudur (Tressler ve diğ., 1995).

Piezoelektrik özellik, kristal iç yapılarında merkezi simetriye sahip olmayan malzemelerde görülen bir özelliktir. Piezoelektrik özelliğe sahip kristaller, boyutsal olarak şekil değişimine veya titreşime maruz kaldıklarında elektrik sinyali üretirler. Bu durum *doğrudan etki* olarak adlandırılır. Bu durumun tersine ise *dolaylı etki* denir. Dolaylı etkide piezoelektrik malzeme kendisine uygulanan bir elektrik alan karşısında boyutsal olarak uzama veya kısalma gösterir (Ergun ve diğ., 2006).

Piezoelektrik etkinin bulunuşu, Pierre ve Jacques Curie 1880 yılında teorik olarak bazı kristallerin mekanik kuvvetler altında elektriksel olarak kutuplanabildiklerinin keşfetmelerine dayanmaktadır. Pierre ve Jacques Curie, kuvars, turmalin ve rochelle tuzu üzerinde yaptıkları deneylerde bu etkiyi gözlemlemişlerdir (APC International, 2006).

19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarından itibaren piezoelektrik malzemelerin gösterdiği piezo özelliklerden yararlanmak için çalışmalar başlamıştır. Bu dönemde piezoelektrik malzemeler üzerinde yürütülen çalışmaların çoğu kuvars, turmalin, rochelle tuzu gibi doğal piezoelektrik kristaller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler üzerinde yürütülen çalışmalar daha çok haberleşme ve sonar teknolojileri geliştirmeye odaklanmıştır. Geliştirilen teknolojilerden; radyo, mikrofon, fonograf, radar, telefon gibi birçok cihazda yararlanılmıştır. İlerleyen süreç içerisinde bu malzemelerin, çok yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu ve dielektrik özelliği gösterdikleri keşfedilmiştir ve bu davranış *ferroelektrik davranış* olarak adlandırılmıştır (APC International, 2006).

20. ve 21. yüzyılda ise doğal piezoelektrik kristallerin yanında metal oksit bazlı piezoelektrik seramikler, polimer piezoelektrik malzemeler ve diğer yapay piezoelektrik malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. İlk çok kristalli ferroelektrik

seramik, 1943 yılında ABD, Japonya ve Sovyetler Birliği'ndeki araştırmacıların birbirlerinden habersiz şekilde buldukları baryum titanattır (BaTiO_3). Perovskit yapıda olan baryum titanat, 1954 yılında PZT (kurşun zirkonat titanat)'nin bulunmasına kadar geçen 11 senelik süre zarfında kullanılan başlıca piezoelektrik seramik malzeme olmuştur. O günden bu yana tasarımcılara doğrudan ve dolaylı piezoelektrik etkiden, birçok yeni uygulamada yararlanma imkanı doğmuştur. Piezoelektrik malzemeler genellikle fiziksel olarak dayanıklı, kimyasal olarak kararlı ve nispeten ucuz imal edilebilirler; bileşimi, şekli ve boyutu amacı karşılayacak şekilde çeşitlendirilebilir (APC International, 2006).

Günümüzde piezoelektrik malzemelerin ikili özelliğinden endüstride bir çok uygulamada yararlanılmaktadır. Doğrudan etki özelliği, dinamik basınç ve kuvvetlerdeki değişimlerin, şok ve titreşimlerin algılanmasında kullanılırken; dolaylı etki özelliğinden ise tahrik mekanizmalarının tasarımında yararlanılmaktadır. Mekanik kuvvetlerin elektrik sinyaline dönüştürülmesine örnek olarak, geniş bir frekans aralığında hızlanmaları ölçen ivmeölçerler, piezoelektrik algılayıcılar (sensörler), plaklardaki izler dolayısı ile titreşen iğnenin yarattığı elektriksel tepkileri toplayan pikap kartuşlarını verebiliriz. Elektrik sinyallerinin mekanik tepkiye dönüşümüne örnek olarak da dalgalı akım girişiyle (AC) titreşen ve bir kap içindeki sıvının şiddetle karışmasını sağlayan ultrasonik temizleme cihazının transdüseri gösterilebilir. Ayrıca piezoelektrik malzemelerden, piezoelektrik motorlar, nanometre hassasiyetinde hareketler ve ayarlamalar, ultrasonik enerji üretimi, sonar sinyal üretimi, akışmetreler, seviye ölçerler, hidrofonlar, hızlandırıcılar, kimya ve gıda endüstrisinde kimyasal reaksiyonların kontrolünde kullanılan sonokimyasal uygulamalar, gaz alma ve cüruf kırma uygulamaları, ink-jet printing, MEMS (Micro Electro Mechanical Sytems), NEMS (Nano Electro Mechanical Sytems) veya MENS (Micro Electro Nano Systems) cihazları ve diğer sensör uygulamalarını kapsayan geniş bir yelpazede yararlanılmaktadır (Tressler ve diğ., 1995).

Akıllı malzemeler çeşitli gruplara ayrılırlar. Bunlar şekil hafızalı alaşımlar (Shape Memory Alloys), fiber optikler, magnetrostriktif malzemeler, ve magneto-rheological malzemeler, piezoelektrik malzemeler, elektrostriktif malzemeler, elektrorheological malzemeler gibi gruplara ayrılırlar. Piezoelektrik malzemeler bunlar arasında en yaygın olarak kullanılandır. PZT (Lead-Zirkonate- Titanate) seramikler halen birçok noktasal algılayıcı ve uyarıcıda kullanılır. Bu malzemeler, işlenmemiş seramik tozu

şeklinde veya disk, silindir, tüp gibi standart geometrilerde olabilmektedir. Gerekli seramik işleme yöntemleri ile istenilen şeklin verilmesi, yüksek maliyetler ve zorlukları beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin, ürüne dönüştürülmesinde maliyeti düşürecek, uygulamayı ve ulaşılabilirliği kolaylaştıracak her türlü keşif, günlük uygulamalarda ki kullanılabilirliği yaygınlaştıracaktır. Bu unsurlar göz önüne alındığında, polimer matrisli karma (kompozit) piezomalzemelerin üretimi, seramik imalat proseslerine göre daha ucuzdur ve bir çok avantajı beraberinde getirmektedir (APC International, 2006).

Akıllı çubuklarla ilgili yapılan son çalışmalar arasında, H_{∞} metodu ile bir akıllı çubuğun aktif kontrolü (Kırcalı, 2006), sensörlerde kullanılabilecek polimer/PZT kompozitlerin geliştirilmesi (Günaydın, 2007), ve akıllı yapıların aktif kontrolünün sonlu elemanlar modeliyle çözülmesi (Malgaca, 2007) bulunmaktadır.

Sunulan çalışmada akıllı yapılara (ankastre kiriş) dışarıdan uygulanan bir tahriği algılayabilen (sensör) ve buna aktif denetim mekanizmaları yardımıyla müdahale edebilen yapılar (aktuatör) incelenecektir. Bu sayede mekanizmada meydana gelen titreşimlerin sönümlenmesi sağlanacak ve mekanizmaların ömürleri uzayacaktır. Çalışmada kullanılacak sensör ve aktuatör laboratuvar ortamında hazırlanacaktır. İki çeşit PZT kullanılacaktır. Birisinde sadece PZT içeren sensör ve aktuatör diğesinde ise kompozit piezo sensör ve aktuatör kullanılacaktır.

2. PİEZOELEKTRİKLİK

2.1 Piezoelektrik Özellik

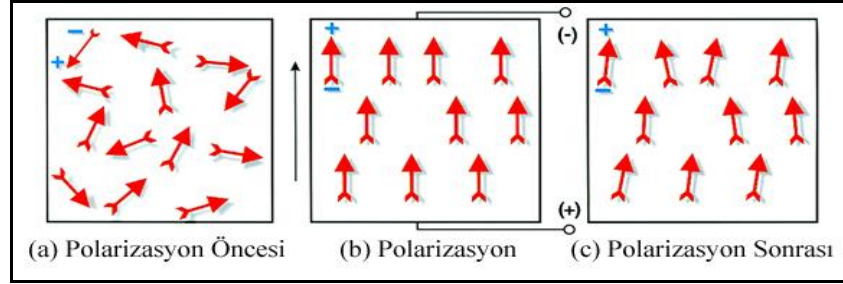
Kristal simetriye sahip olmayan malzemelerde gözlenen ve gerilme veya deformasyonun elektrik alanla olan ilişkisini anlatan piezoelektrik özellik; toplam 32 adet kristal yapının sadece 21 tanesinde gözlenir. Bu malzemeler; sülfatları, fosfatları, tartaratları, oksitleri ve çeşitli şeker yapıları içerebilir. Bunların 10 tanesi birim kafes yapılarında dipole sahiptirler ve ısı uzamalar veya büzölmeler dahi yüzeylerinde elektrik yükü oluşması için yeterlidir. Bu malzemeler *piezoelektrik malzemeler* olarak adlandırılırlar (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

Elektrik alan içerisinde bulunmayan katı maddelerin yapısında, pozitif ve negatif yüklerin sayıları birbirlerine eşittir. Başka bir deyişle elektriksel olarak nötr durum yani denge hali söz konusudur. Teorik olarak bu dengenin, yapıda boyutsal bir şekil değişimi ile bozulması ve malzeme yüzeylerinde elektriksel yüklerin oluşması beklenir. Kristal simetri, bu elektriksel yüklerin oluşumunu olanaklı kılan en önemli faktördür. Piezoelektrik malzemelerin mekanik etkiye yanıtı, kristal yapılarındaki atomların dizilişi ile belirlenen *kristal yönelme* ve uygulanan mekanik gerilme ile oluşan uzamanın yönü arasındaki açısal değerlere bağlıdır. Yani, mekanik uzamalar tensörel olarak ifade edilir ve aksi yönlerde değer olarak farklılık göstermezler ($\epsilon_{12} = \epsilon_{21}$ gibi). Piezoelektrik malzemelerde oluşan elektriksel kutuplama ve elektriksel alan ise vektörel büyüklüklerdir ve değerleri yöne bağlıdır ve malzemenin kristal yapısı tarafından belirlenir, ayrıca malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Dolayısıyla mekanik bir gerilmenin malzemede oluşturacağı elektriksel kutuplama, malzemeye bağlıdır ve her piezoelektrik malzeme için kristal yapısına göre karakteristik bir değer alır (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

İzotropik malzemelerde, elektrik alanının sebep olduğu gerilme veya deformasyon ters yönlerde birbirine eşit olurken, izotropik olmayan malzemelerde, farklı bir ilişki gözlenir. Bu özellik sadece yüksek dielektrik sabitli malzemelerde yani *ferroelektrik malzemelerde* gözlenir (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

Ferroelektrik malzemeler, kristal yapısı yüksek elektrik alan ($\approx 10^6 \text{V/m}$) altında ani olarak kutuplanabilme yeteneğine sahip olan malzemeler olarak tanımlanabilirler. Ferroelektrik malzemeler, piezoelektrik malzemelerin bir türüdür ve piezoelektrik malzemelerde gözlenen kristal yapının yüksek elektrik alan altında kutuplanabilmesi *ferroelektrik özellik* olarak adlandırılır.

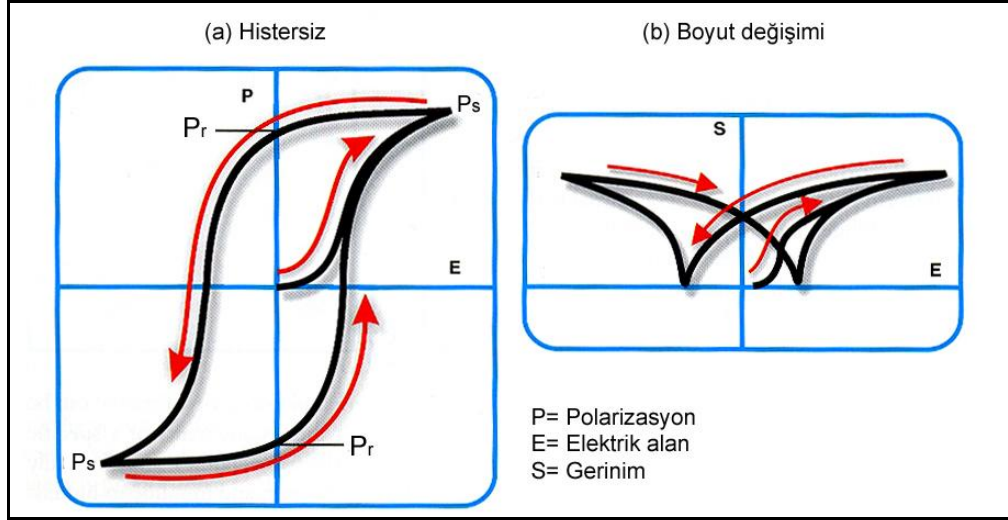
Çok kristalli ferroelektrik seramikler, başlangıçta toplam elastik enerjileri en az olacak şekilde her bir tane içerisinde dipolleri rasgele doğrultularda polarizasyona sahip *bölgeler* (domainler) içerirler (Şekil 2.1a). Bu rasgele dizilişten dolayı ferroelektrik malzemeler piezoelektrik özellik göstermezler. Ancak, Küri sıcaklıklarının altında, bir eşik değerden daha büyük bir statik elektrik alanına maruz kaldıklarında başka bir deyişle kutuplandıklarında piezoelektrik özellik kazanabilirler.



Şekil 2.1: Bölge Hareketlerinin Çizgisel Gösterimi, (a) Polarizasyon Öncesi, (b) Polarizasyon, (c) Polarizasyon Sonrası (APC International, 2006)

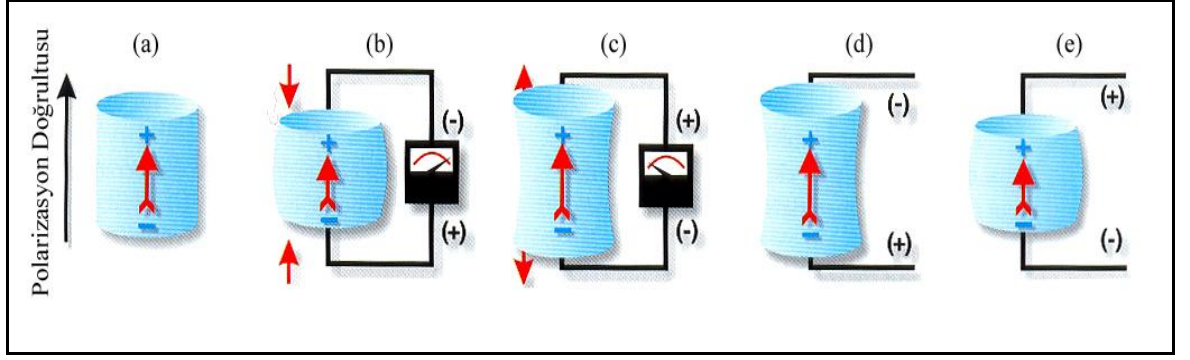
Polarizasyon da diyebileceğimiz kutuplama işlemi sırasında malzemenin yüzeylerine yerleştirilen elektrotlar yardımıyla malzeme üzerine DC gerilim uygulanarak yüksek bir elektrik alan ($\sim 5 \text{kV/cm}$) oluşturulur ve dipollerin bu elektrik alana paralel olarak yönelmesi sağlanır (Şekil 2.1b). Polarizasyon esnasında bölgeler uygulanan elektrik alan doğrultusunda gerek ters çevrilme ile gerekse belirli bir açı kazanma yoluyla yeniden dizilerek anizotropik duruma gelirler. Polarizasyon sonrasında çok fazla gerilen bölgelerin bir kısmı yeniden eski durumlarına dönebilirler, fakat büyük bir çoğunluğunda kutuplama kalıcıdır (Şekil 2.1c). Dolayısıyla polarizasyon öncesi malzeme, izotropiktir ve bu durumda piezoelektrik davranış göstermez. Polarizasyon sonunda ise uygulanan elektrik alanı ile dipoller bir eksene doğru yönelirler ve polikristallerden oluşan tüm yapıda net bir elektriksel dipol momenti oluşur. Bu yapıda aynı yöne yönelmiş izole dipollerin oluşturduğu bölgeler vardır. (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007).

Ferromanyetik malzemeler gibi, kutuplanmış bir ferroelektrik malzeme de histersiz gösterir. Şekil 2.2a'da piezoelektrik seramik bir elemana uygulanan bir elektrik alan sonucunda oluşan tipik histersiz ve Şekil 2.2b' elemanın boyut değişimi verilmiştir (APC International, 2006).



Şekil 2.2: Piezoelektrik Elemanda Meydana Gelen Histersiz (a) ve Boyut Değişimi (b) (APC International, 2006)

Histersiz elde edilirken öncelikle piezoelektrik seramik eleman, *maksimum polarizasyon*, P_s , elde edilinceye kadar elektrik alana maruz kalır. *Artık (Remanent) polarizasyonun*, P_r , belirlenmesi için ise elektrik alanı sıfıra düşürülmelidir. Daha sonra elektrik alan tersine çevrilerek ters yönde maksimum bir polarizasyon elde edilir ve negatif artık polarizasyonun belirlenmesi için elektrik alan sıfırlanır. Histersis eğrileri altında kalan alan, seramik elemanın elektrik alanındaki değişimlere uyan polarizasyon doğrultusundaki boyut değişimlerine bağlı olarak değişir (Şekil 2.2b). Elektrik alanına paralel doğrultuda olan boyuttaki göreceli artış/azalış elektrik alanına dik doğrultuda olan boyuttaki göreceli azalış/artış ile karşılanır (APC International, 2006; Alexander, 2006)



Şekil 2.3: Piezoelektrik Elemanın Davranışı (a) Elemandaki Polarizasyon Doğrultusu (b-c) Üreteç Davranışı (d-e) Motor Davranışı (APC International, 2006)

Herhangi bir piezoelektrik seramik eleman üzerine uygulanan mekanik basma veya çekme gerilmesi, voltaj üreterek elemanın dipol momentini bozar, polarizasyon doğrultusunda basma veya polarizasyona dik yönde çekme, polarizasyon voltajıyla aynı polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 2.3b). Polarizasyon yönünde çekme veya polarizasyon doğrultusuna dik yönde basma uygulandığında ise piezoelektrik seramik eleman, polarizasyon voltajına zıt polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 2.3c). Seramik elemanın bu şekildeki basma ve çekme mekanik enerjilerini elektrik enerjisine çevirmesine *üreteç davranışı* denir. Bu davranış; ateşleme sistemlerinde, kuru pillerde, sensör cihazlarda vb. ürünlerde kullanılır (APC International, 2006).

Eğer seramik elemana polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığı takdirde, seramik eleman uzayacak ve çapı küçülecektir (Şekil 2.3d). Polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusuna dik uygulandığında ise, seramik elemanın boyu kısalacak ve çaptan genişleyecektir (Şekil 2.3e) (APC International, 2006).

Seramik eleman üzerine AC voltajı uygulanırsa, eleman uygulanan voltajın frekansında sinüzoidal bir şekilde sırayla uzayıp kısalacaktır. Seramik elemanın bu şekilde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirmesine *motor davranışı* denir ve piezoelektrik motorlarda, ses ve ultrasonik titreşim üreten cihazlarda vb. birçok üründe kullanılır. Uygulanan gerilmeler ve oluşan voltaj malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu durum uygulanan voltaj ve elde edilen genleme değerleri için de geçerlidir (APC International, 2006).

2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler

Her piezoelektrik malzeme, diğer malzemeler gibi, özelliklerinin belirlediği sınırlar dahilinde belirli çalışma koşulları altında en iyi performansı sergiler. Bir piezoelektrik malzemeyi bu sınırların üzerinde çalışmaya zorlamak veya fark etmeden bu sınırları aşmak, piezoelektrik malzemenin beklenen performansı vermemesi veya fonksiyonlarını tamamen yitirmesi ile sonuçlanabilir. Bu durum kısmen veya tamamen piezoelektrik malzemenin polarizasyonun ortadan kalkmasına ve buna bağlı olarak zaman içerisinde piezoelektrik malzeme özelliklerinin belirleyen piezoelektrik sabitlerde kayıp oluşmasına sebep olabilmektedir. Piezoelektrik seramik bir elemanın birçok özelliği polarizasyondan sonra zamanla logaritmik bir şekilde azalır (Ergun ve diğ., 2006).

2.2.1 Yaşlanma

Yaşlanma, zaman içerisinde piezoelektrik malzeme özelliklerinde yaşanan kayıp veya azalma olarak tanımlanabilir. Yaşlanma, normal şartlar altında kullanılan bir piezoelektrik malzemede dahi beklenen bir durumdur. Yaşlanmanın gerçek hızı, seramik elemanın bileşimine ve elemanı hazırlamak için seçilen imalat yöntemine sıkı sıkıya bağlıdır. Elemanı, mekanik, elektrik ve termal limitlerin üstünde kullanmak seramik elemanın yaşlanmasına katkıda bulunacaktır (Ergun ve diğ., 2006).

2.2.2 Mekanik Sınırlamalar

Bir piezoelektrik malzemede, mekanik gerilme seviyeleri bölgelerin yönlenmelerini bozmaya yetecek büyüklükte ise, mekanik gerilme sıralanışını yok edebilir. Bu, polarizasyon ile kazandırılan piezoelektrik özelliğin kısmen veya tamamen ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Piezoelektrik malzemenin mekanik gerilmeye dayanma sınırı malzemeden malzemeye değişir (APC International, 2006)

2.2.3 Elektriksel Sınırlamalar

Polarize edilmiş piezoelektrik bir malzeme, polarizasyondan sonra polarizasyon doğrultusuna ters yönde güçlü bir elektrik alanına maruz kalırsa piezoelektrik malzeme *depolarize* olacaktır. Depolarizasyonun derecesi; malzemenin maruz kaldığı, ters elektrik alanının uygulama süresine, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır. Fakat 200-500 V/mm veya daha büyük elektrik alanlar, önemli bir depolarizasyona

neden olur. AC akımın depolarizasyon etkisi ise döngünün, polarizasyon alanına zıt olduğu her bir yarım  evrinde gerçekleşir (APC International, 2006)

2.2.4 Isısal Sınırlamalar

Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik özellikler artan sıcaklığa bağlı olarak azalma gösterir. Eğer bir piezoelektrik malzeme, piezoelektrik malzemeler için kritik sıcaklık değeri olan *K ri sıcaklığına* ısıtılacak olursa, malzeme içindeki bölgeler yok olacak ve malzeme depolarize olacaktır. Artık bu noktadan sonra piezoelektrik malzeme oda sıcaklığına veya uygun çalışma sıcaklığına getirilse bile piezoelektrik özellik göstermeyecektir. Dolayısıyla piezoelektrik malzemelerin çalışma sıcaklıkları K ri sıcaklıklarının altında olmak zorundadır. Piezoelektrik seramik bir eleman için tavsiye edilen en üst kullanma sıcaklığı, K ri sıcaklığının yarısıdır. Tavsiye edilen sıcaklık aralığındaki kullanımlarda, domainlerin dizilimindeki değişimler geri d n   ml d r. Ayrıca ani sıcaklık dalgalanmaları, piezoelektrik seramik bir elemanı depolarize edebilecek nispeten yüksek voltajlar üretebilirler (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

Sonuc olarak, piezoelektrik bir malzemenin piezo özelliklerini ifade eden değerler belli süreler için geçerlidirler. Bundan dolayı piezoelektrik malzeme seçimi, çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Malzemenin  alı ma koşulları altında bozulma veya değişime uğrama süresi ne kadar uzunsa malzeme o kadar kararlıdır denilebilir.

2.3 Piezoelektrik Malzemeler

Bu başlık altında sensörlerde kullanılan piezoelektrik malzeme çeşitlerine değinilmiştir. Genel olarak bu malzemeleri; doğal piezoelektrik malzemeler (kuvars, rochelle tuzu vb.), piezoelektrik seramik malzemeler (kurşun-zirkonat-titanat, baryum titanat, kurşun titanat, vb.), polimer piezoelektrik malzemeler (nylon, vinilidin florür, trifloretilen, tetrafluoretilen vb.) ve kompozit piezoelektrik malzemeler olmak üzere dört genel başlık altında toplayabiliriz. Kompozit piezoelektrik malzemelere, Bölüm 3.4 Piezoelektrik Kompozit Sensörler’de değinilmiştir.

2.3.1 Doğal Piezoelektrik Malzemeler (Kristaller)

Doğal piezoelektrik malzemelerden, en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için mevcut kristalleri belirli kristalografik doğrultuları göz önüne alarak kesmek ve şekillendirmek gerekmektedir (Tressler ve diğ., 1995).

Birçok doğal piezoseramik arasından en çok kullanılanı, kuvarstır. Kuvars kristali günümüzde az da olsa hızlandırıcılarda kullanılmaktadır. Fakat kuvarsın elektromekanik çift katsayısının düşük olması, kuvarsın elektromekanik enerji dönüşümünün esas olduğu uygulamalarda tercih edilmemesine neden olmaktadır (Tressler ve diğ., 1995).

Yüksek voltaj sabitlerinden (g_h) dolayı lityum sülfat ve turmalin ticari hidrofonlarda hala kullanılan iki kristal piezoelektrik malzemedir. Bu kristaller şok ve hava akımı ölçümleri için de kullanılmışlardır (Tressler ve diğ., 1995).

Lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3), 400°C 'ye kadar yüksek hassasiyetlerine korumalarından dolayı yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde tercih edilmektedir. Lityum niyobat ve lityum tantalat dışında yüksek sıcaklıklarda kararlı oldukları için tercih edilen diğer kristaller; $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ve $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ kristalleridir (Tressler ve diğ., 1995).

Doğal kristaller, çok kararlı olduklarından sensör uygulamaları için en uygun piezoelektrik malzemeler olarak kabul edilirler. Özelliklerinin çok kararlı olması, sistemde kullanılan sensörün daha uzun kullanım ömrü sağlar. Fakat daha önce de belirtildiği gibi en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için kristal doğrultular göz önüne alma zorunluluğu en büyük dezavantajlarıdır. Bazı piezoelektrik kristallerin oda sıcaklığındaki özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

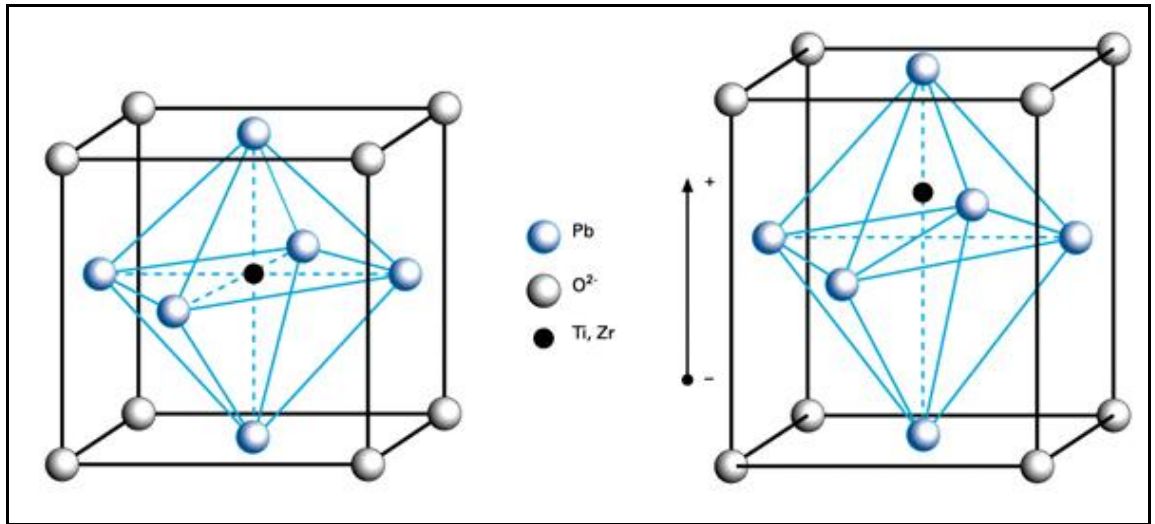
Çizelge 2.1: Bazı Piezoelektrik Kristallerin Oda Sıcaklığındaki Özellikleri (Tressler ve diğ., 1995).

Kristal	Kimyasal Formülü	d (pC/N)	K_{11}^T	K_{33}^T
Rochelle tuzu	$(\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$	2300 (d_{14})	1100	9,2
Turmalin	$(\text{CaAl}_3\text{Mn}_6(\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_3)_6(\text{OH})_4)$	3,6 (d_{15})	8,2	7,5
Kuvarz	(SiO_2)	2,3 (d_{11})	4,6	4,7
Lityum Niyobat	(LiNbO_3)	68 (d_{15})	84	30
Lityum Tantalat	(LiTaO_3)	26 (d_{15})	51	45

2.3.2 Piezoelektrik Seramik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, doğal piezoelektrik malzemelere göre fiziksel, kimyasal, mekanik ve piezoelektrik özellikleri açısından daha kullanışlı oldukları gibi, kimyasal olarak da daha kararlıdır. Ayrıca neme ve atmosferik koşullara karşı da daha dayanıklıdır. Özel uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilirler, karmaşık geometri veya büyük hacim gerektiren uygulamalar için kolay ve ucuz üretim olanağı sağlarlar. (Tressler ve diğ., 1995).

Geleneksel bir piezoelektrik seramik, genelde perovskit kristal yapısına sahiptir. Şekil 2.4’de olduğu gibi provskit kristalleri, genellikle geniş bir kafese dizilmiş kurşun veya baryum ve oksijen iyonları gibi divalent metal iyonları arasında, küçük titanyum veya zirkonyum gibi tetravalent metal iyonları içerirler. Kristallerde, tetragonel veya rombohedral simetriyi oluşturan şartlar altında her bir kristal dipol momente sahiptir (Şekil 2.4) (APC International, 2006).



Şekil 2.4: Perovskit Kristalinin Şematik Görüntüsü (Physik Instrumente, 2007).

Piezoelektrik seramik bir malzeme hazırlamak için, ince toz halindeki başlangıç metal oksit tozları belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra homojen bir toz karışımı elde etmek için ısıtılırlar. Elde edilen toza organik bir bağlayıcı eklenerek disk, tel, bar, levha, vb. şekillerde yapısal elemanlara dönüştürülebileceği gibi toz olarak saklanabilirler. Çeşitli formlar verilmiş seramik elemanlar belirli süreler dahilinde pişirme programları uygulanarak fırınlanırlar. Bu fırınlama işlemi Sinterleme olarak adlandırılır ve başlıca amacı toz parçacıklarını birbirine bağlayan yoğun kristal

yapıya dönüştürmektir. Bu işlemlerden sonra elemanlar soğumaya bırakılır ve gerekirse istenilen ölçülerde kesilir veya çapakları alınır (APC International, 2006).

2.3.2.1 Yumuşak ve Sert Piezoelektrik Seramikler

Piezoelektrik seramikleri yumuşak ve sert olmak üzere iki grup altında toplayabiliriz. Bu gruplama piezoelektrik seramiklerin bileşimleri ve özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Piezoelektrik seramik bileşimine, az miktarda donör dopant eklemek kristal yapıda metal (katyon) boşlukları oluşturur. Bu boşluklar seramiğin piezoelektrik özelliklerini arttırmaktadır. Bileşime donör dopant eklemek suretiyle elde edilen piezo seramiğe yumuşak piezo seramikler adı verilir. Yumuşak seramiklerin en önemli özellikleri; yüksek elektromekanik çift katsayıları, yüksek piezoelektrik sabitleri, yüksek permitiveleri, yüksek dielektrik sabitleri, yüksek dielektrik kayıplar, düşük mekanik kalite faktörleridir. Yumuşak piezo seramikler, sert piezo seramiklere göre daha fazla uzama gösterirler ve daha geniş sinyal bant genişliğine sahiptirler. Fakat histersizleri daha büyüktür ve gerek depolarizasyon olsun gerekse de olumsuzluk yaratacak diğer etmenlere karşı daha hassastırlar. Yumuşak seramiklerin K_{üri} sıcaklıkları çok yüksek olamadığından (genellikle 300°C'nin altında) yüksek frekans veya yüksek elektrik alan uygulamalarında kullanımları kısıtlıdır. Sonuç olarak şunu söyleyebiliriz ki; yumuşak piezo seramikler güç(gerilim) uygulamalarından çok sensör uygulamaları için tercih edilirler (APC International, 2006).

Seramik bileşimine donör dopant yerine *akseptör dopant* katılması halinde ise kristal yapıda *oksijen* (katyon) boşlukları oluşur. Bu tür bileşimlerle de *sert piezo seramikler* elde edilir. Sert piezo seramiklerin özellikleri genellikle yumuşak seramiklerin özelliklerine zıttır. Sert seramikler, 300°C'nin üstünde K_{üri} sıcaklıklarına, küçük piezoelektrik yük sabitlerine, yüksek elektromekanik çift katsayılarına ve yüksek mekanik kalite faktörlerine sahiptirler. Aynı zamanda sert piezo seramikleri, hem polarize hem de depolarize etmek oldukça zordur. Sert seramikler yumuşak seramiklere göre daha kararlı oldukları halde yumuşak seramiklerin gösterdiği uzamayı gerçekleştiremezler. Sert seramikler, yüksek mekanik yükler ve yüksek voltajlar altında kullanılmaya elverişlidir (APC International, 2006).

Yumuşak bir piezo seramik, sert bir piezo seramiğin bazı özelliklerini taşıyacak şekilde hazırlanabilir. Bu durumun tersi yani sert bir seramiğin yumuşak bir seramiğin özelliklerini taşıyacak şekilde hazırlanması da söz konusu olabilir. Bundan dolayı herhangi bir uygulama için seramik seçerken ayrıntılı bir yaklaşımla malzeme özelliklerini dikkatli bir şekilde kıyaslamak daha yararlı olacaktır. Yumuşak ve sert piezo seramiklerin genel hatlarıyla karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmiştir.

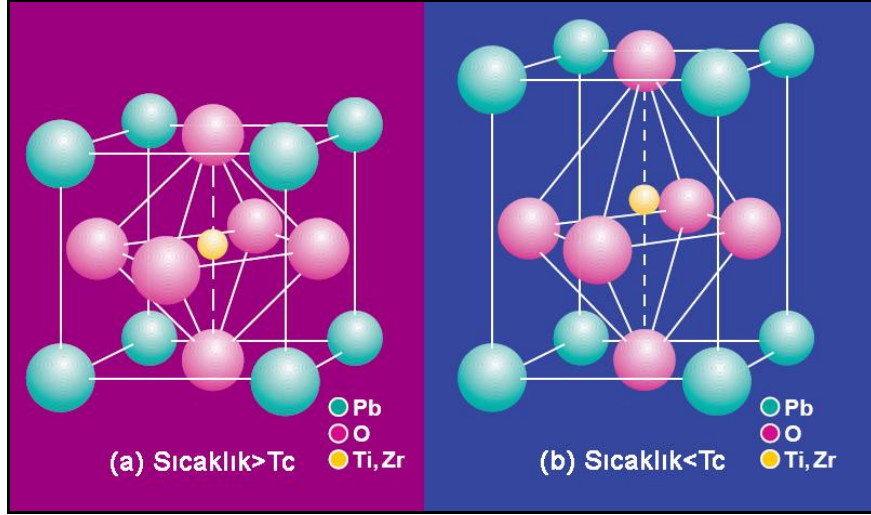
Çizelge 2.2: Yumuşak ve Sert Piezoelektrik Seramiklerin Karşılaştırılması (APC International, 2006).

Özellikler	Yumuşak Seramikler	Sert Seramikler
Piezoelektrik sabitler	Büyük	Küçük
Permitive	Yüksek	Düşük
Dielektrik Sabitler	Büyük	Küçük
Dielektrik Kayıplar	Yüksek	Düşük
Elektromekanik Çift Faktörü	Büyük	Küçük
Elektrik Direnç	Çok yüksek	Düşük
Mekanik Kalite Faktörü	Düşük	Yüksek
Polarizasyon/Depolarizasyon	Kolay	Daha zor

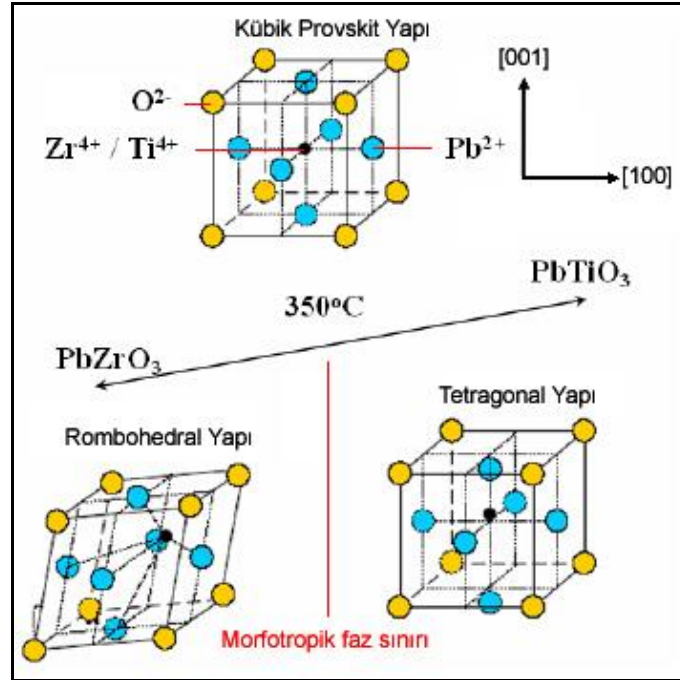
2.3.2.2 Piezoelektrik PZT

Piezoelektrik seramik sensörlerin çoğu PZT esastır. PZT, $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (kurşun-zirkonat- titanat) piezoelektrik seramik Clevite firmasının tescilli ürünüdür. Bu ürün %52-54 mol PbZrO_3 (kurşun zirkonat) ve %46-48 mol PbTiO_3 (kurşun titanat)’ün oluşturdıkları katı çözeltilerin genel adı haline gelmiştir. PZT, provskit yapıda olan ferroelektrik bir malzemedir (Şekil 2.5) (Tressler ve diğ., 1995).

PZT’nin birim kafes yapısında kurşun atomları kafes köşelerinde, oksijen atomları ise yüzey merkezine yerleşmiş durumdadırlar (Şekil 2.5). Kurşun ve oksijen atomlarının her ikisi de yaklaşık 1.4Å’luk bir çapa sahiplerdir. Bu iki iyon kafes parametresi 4Å olan yüzey merkezli kübik bir kristal sistem oluşturlar. Oktahedral olarak konumlanmış olan titanyum ve zirkonyum atomları ise birim kafesin merkezinde yer alırlar (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006; APC International, 2006).



Şekil 2.5: PZT Yapısı, (a) Sıcaklık > T_c , (b) Sıcaklık < T_c (Piezo Kinetics Inc., 2007)



Şekil 2.6: Kuri Sıcaklığına Göre PZT’de Meydana Gelen Yapısal Dönüşümler (Ergun ve diğ., 2006)

Yüksek sıcaklıktaki bir PZT soğutulduğunda, PZT’nin kristal yapısı bir faz dönüşümünün etkisi altına girer. Bu faz dönüşümü sırasında yaklaşık olarak 0.1 Å’luk atomik ötelenmeler meydana gelir. Titanyumca zengin PZT bileşimlerinde, küri sıcaklığında kübik $m3m$ yapıdan 4mm tetragonal yapıya dönüşüm gerçekleşir. Bu sayede tetragonal yapıda [001] doğrultusunda oluşan polarizasyon, küri sıcaklığı ile

0°K arasında kendini korur. Bahsi geçen bu yapısal dönüşümler Şekil 2.6’de gösterilmiştir (Ergun ve diğ., 2006).

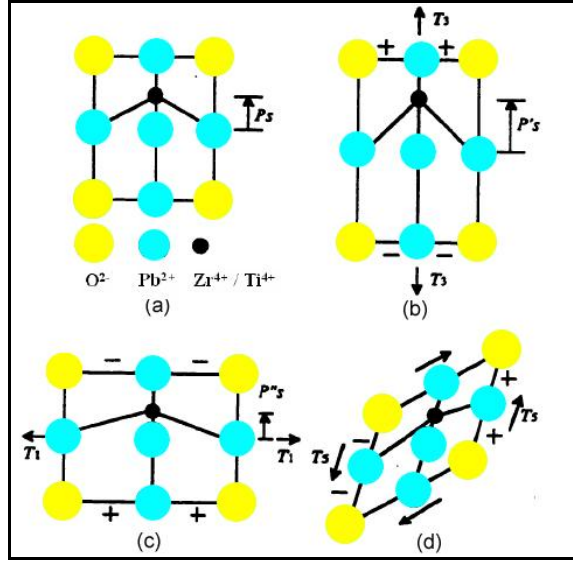
Daha yüksek oranda polarizasyonu mümkün kılacak piezoelektrik seramiklerle çalışmak için, ikinci faz dönüşümünü gerçekleştirebilecek bileşimler tercih edilmelidir. PZT, küri sıcaklığında kübik perovskit yapıda olan paraelektrik durumdan, tetragonal ve rombohedral yapılardan oluşan morfortropik yapıya dönüşür. Morfortropik yapı piezoelektrik özellik taşır, ayrıca bu yapının piezoelektrik çift katsayısı oldukça yüksektir (Ergun ve diğ., 2006).

PZT sisteminde titanyumca zengin bileşimler, [001] yönünde önemli miktarda uzamayla tetragonal modifikasyonu mümkün kılar ve gene bu yönde yüksek oranda ani polarizasyona uğrayabilirler. Tetragonal yapı içerisindeki bu olaylar toplam 6 tane olan [001] yönünde gerçekleşebilir. Zirkonyumca zengin bileşimlerde ise rombohedral ferroelektrik yapı istenir. Bu durumda, polarizasyon ve çarpılma 8 tane [111] yönlerinde gerçekleşebilir. En iyi polarizasyon ve dolayısıyla en iyi piezoelektrik katsayı, tetragonal ve rombohedral ferroelektrik fazların her ikisini de içeren morfortropik kompozisyonlarda elde edilir. Bu tür kompozisyonlar için – 50°C’den +200°C’ye kadar oldukça geniş bir sıcaklık aralığında toplam 14 adet kutuplama yönü mevcuttur. Bu durum morfortropik bölgede veya bu bölge yakınlarında piezoelektrik sabitlerin neden en büyük değerleri aldıklarına bir açıklama getirmektedir. Ayrıca polarizasyon sırasında, tetragonal ve rombohedral fazlar arasında faz dönüşümleri meydana gelebilir (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

Bu simetriye sahip kutuplanmış bir seramik için d_{31} , d_{33} , d_{15} gibi tensör (piezoelektrik yük sabitleri) katsayılar kullanılır. Bu katsayıları arttırıcı ve azaltıcı etkiye sahip olan faktörler mevcuttur. Azaltıcı etkilerin başında Şekil 2.7’de da gösterildiği gibi mekanik gerilme altında kristal yapıda oluşan çarpılmalar gelmektedir (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

Dipol momente paralel bir mekanik gerilme (Şekil 2.7b) altında x_3 doğrultusundaki ani polarizasyonda ($\vec{P}_s$) bir artış gerçekleşir. Bu artış d_{33} etkisi olarak adlandırılır. Dipol momente dik bir mekanik gerilme (Şekil 2.7c) uygulanması sonucunda ise enine doğrularda elektrik yükleri oluşur ve bu durum da d_{31} etkisi adlandırılır. Dipol, kayma gerilmesine (Şekil 2.7d) maruz kaldığında ise yükler kenar yüzeylerde toplanır ve etki d_{15} etkisi olarak adlandırılır. Tensör katsayılarını arttırıcı etkiler ise

genellikle bölge duvarlarının hareketlerini içeren büyük etkilerdir (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).



Şekil 2.7: Mekanik Gerilme Sonucu Yapıda Meydana Gelen Çarpılmalar,(a) Gerilmesiz Durum, (b-d) Gerilme Sonucunda Meydana Gelen Çarpılma (Chen Y., 1999)

PZT esaslı piezoelektrik malzemeler birleşim oranlarına göre farklı özellikler göstermektedir. Bazı PZT türlerinin piezoelektrik özellikleri Çizelge 2.3 'de verilmiştir. Her ne kadar bazı PZT üreticileri, geliştirdikleri formüller sonucu patentlerini aldıkları PZT'ler için değişik bir adlandırmaya gitseler de genellikle; PZT-4 Fe, PZT-5 Nb, PZT-6 Cr ve PZT-7 La katkılı PZT'leri ifade eder. Sıklıkla karşılaşılan bir başka PZT ifade etme şekli ise PZT'lerin Type1, Type 2, Type 3 gibi US Navy standartlarına göre olanıdır. US Navy ile gruplandırılan PZT'lerin özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir. Çizelge 2.3'ye ek olarak diğer önemli piezoelektrik sensör malzemeleri ve özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

Çizelge 2.3: PZT Seramiklerinin Özellikleri (Tressler ve diğ., 1995)

PZT Türü	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$d_{33}(\text{pc/N})$	$d_{31}(\text{pc/N})$	$d_{15}(\text{pc/N})$	K_{33}^T	k_{33}	k_{31}	k_{15}
PZT-2	370	152	-60	440	450	0.63	-0.28	0.70
PZT-4	325	285	-122	495	1300	0.70	-0.33	0.71
PZT-4D	320	315	-135	-	1450	0.71	-0.34	-
PZT-5A	365	374	-171	585	1700	0.71	-0.34	0.69
PZT-5B	330	405	-185	564	2000	0.66	-0.34	0.63
PZT-5H	195	593	-274	741	3400	0.75	-0.39	0.68
PZT-5J	250	500	-220	670	2600	0.69	-0.36	0.63
PZT-5R	350	450	-195	-	1950	-	0.35	-
PZT-6A	335	189	-80	-	1050	0.54	-0.23	-
PZT-6B	350	71	-27	130	460	0.37	-0.15	0.38
PZT-7A	350	153	-60	360	425	0.67	-0.30	0.68
PZT-7D	325	225	-100	-	1200	-	-0.28	-

PZT bileşimine katılacak katkıların piezoelektrik özellikler üzerinde önemli bir etkisi vardır. PZT'ye katılan Ba, Sr, Ca, La vs. gibi elementler ile Küri sıcaklığı, duyarlılıkları ve dayanımları gibi piezoelektrik özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlamakta, böylece arzu edilen tasarım gereksinimlerine uygun olan geniş bir yelpazede özelliklere sahip ürünlerin üretimi mümkün olmaktadır (Tressler, J. F., Alkoy, S., Newham, R. E., 1995)

Çizelge 2.4: PZT Türleri ve Özellikleri (Piezo Kinetics Inc., 2007)

PZT Türü	Özellikleri
Navy Type I	Kayıp oluşumunun az olmasının istendiği, transdüser, sonar ve medikal uygulamalarda kullanılırlar.
Navy Type II	Yüksek elektromekanik aktivite ve yüksek dielektrik sabitine ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilirler. Akışmetreler, akış ve ses dedektörleri, hızlandırıcılar, hidrofonlar başlıca kullanıldıkları yerlerdir.
Navy Type III	Mekanik kalite faktörünün yüksek olması istenilen uygulamalarda kullanılırlar.
Navy Type V	Düşük impedanslı, yüksek dielektrikliğin ve yüksek hassaslığın istendiği sensör uygulamalarında kullanılırlar.
Navy Type VI	Oldukça yüksek dielektrikliğin ve şekil değişiminin mevcut olduğu sensör uygulamaları için kullanılırlar.

Çizelge 2.5: Bazı Piezoelektrik Seramiklerin Özellikleri (Tressler ve diğ, 1995)

Kimyasal Formül	$T_c(^{\circ}\text{C})$	K_{33}^T	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/N)	d_{15} (pC/N)	k_{33}	k_{31}	k_{15}
BaTiO ₃	115	1700	190	-78	260	0.50	0.21	0.48
PbTiO ₃	470	190	56	-	68	0.45	-	-
PbNb ₂ O ₆	570	225	85	9	-	0.38	>0.045	-
KNaNb ₂ O ₆	420	495	127	-51	306	0.60	-0.27	-0.46
Ba _{0.4} Pb _{0.6} Nb ₂ O ₆	260	1500	~220	-90	-	~0.55	~0.22	-
LiNbO ₃	1150	25	6	-	-69	0.23	-	0.60
Na _{0.5} Bi _{0.5} Ti ₂ O ₅	320	300	~70	~15	-	~0.40	~0.10	-

2.3.2.3 Yaygın Kullanılan Piezoelektrik Seramikler ve Özellikleri

Şu an piyasada farklı malzemelerden üretilmiş çok çeşitli piezoelektrik seramiklere ulaşmak mümkündür. Bunlar üretildiği malzemelerin cinsine, üretim yöntemlerine ve birleşim oranlarına bağlı çok değişik piezoelektrik özellik taşıyabilmektedirler.

Kurşun zirkonat ve kurşun titanatın dışında kurşun içeren diğer bir bileşik de kurşun magnezyum niyobattır ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$). Bu piezoelektrik seramik PZT'nin sağladığı avantajlar ve ayrıca piezoelektrik özellikler bakımından PZT'den az da olsa üstündür (Tressler ve diğ, 1995).

Baryum titanatın (BaTiO_3) Küri sıcaklığı yaklaşık 120°C dir. Küri sıcaklığının altında tetragonal yapı kararlıdır ve bu yapı dielektrik ve piezo özellikler gösterir. Küri sıcaklığının üzerinde ise kübik yapı kararlıdır ve bu yapı çok düşük dielektrik sabitine sahiptir. Baryum titanat, yüksek toksit etkiye sahip olan kurşunu içermediği için tıbbi uygulamalar dahil olmak üzere çevreye daha uyumlu kabul edilmektedir. (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

PT, kurşun titanat, (PbTiO_3) piezo seramikler yüksek bir Küri sıcaklığına (490°C), düşük dielektrik sabitine (~ 200) ve büyük bir anizotropiye sahiptir. Bu nedenle kalınlık yönünde titreşim modunda çalışan yüksek frekans ve yüksek sıcaklık piezoelektrik dönüştürücü kullanımlarına uygundur. Fakat geniş yapısal anizotropisi sebebiyle sinterlenmesi zordur. Bu nedenle kafes içi Pb^{2+} pozisyonlarına Ca^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Sm^{3+} , Gd^{3+} , Y^{3+} gibi katışkılar yapılarak kafes anizotropisi ayarlanabilir. Bu şekilde sinterlenebilirlik, elektromekanik çift gibi piezo özellikleri geliştirilebilir. Saf PT (kurşun titanat), kalsiyum ve/veya stronsiyum ile karıştırıldığında üstün

piezoelektrik anizotropisinden dolayı hidrofon malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. PZT ile karşılaştırıldığında tepki süresi daha kısadır (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

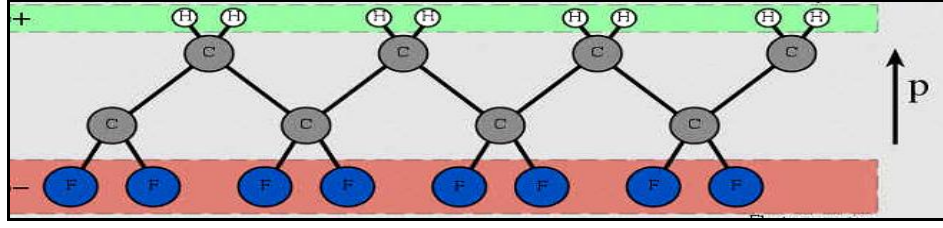
Kurşun nikel niobatlar, $(\text{Pb}(\text{NiNb})\text{O}^{3-})$, PZT'lerden daha büyük deplasman değerlerine, yani daha yüksek d_{33} 'e, ve dielektrik sabitlerine sahip olabilmektedirler. Böylece daha küçük ölçekte cihaz üretimi için optimum değerler sağlayabilmektedirler. Özelliklerinin dopantlar yardımıyla modifikasyonu mümkündür (Tressler ve diğ., 1995; Ergun ve diğ., 2006).

PZN, kurşun çinko niobatlar, $(\text{Pb}(\text{Zn}_{1-3}\text{Nb}_2=3)\text{O}^{3-})$ kurşun esaslı kompleks perovskit yapıya sahip ferroelektrik seramik malzemedir. Çok tabakalı seramik kapasitör, tahrikçi ve elektromekanik dönüştürücü uygulamaları için çok uygun malzemelerdir. Diğer normal ferroelektrik malzemelere göre polarizasyona çok yavaş cevap verirler ve bu durum polarizasyonlarının ani olarak kaybetmemelerini sağlar (Tressler ve diğ., 1995).

2.3.3 Polimer Piezoelektrikler

Piezoelektrik polimerlerin büyük çoğunluğu florakarbon esaslı polimerlerden oluşur. Bu polimerler arasında PVDF, üzerinde en çok çalışma yürütülen piezoelektrik polimerdir.

PVDF, $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2-)_n$ tekrar grubuna sahip, en basit florakarbon grubudur. PVDF, yüksek oranda kristal bir yapıya sahiptir, yapıdaki kristallik %50 ile %70 arasında değişmektedir. Bu değişimin sebebi α , β , γ olarak adlandırılan üç farklı faz durumundan ileri gelmektedir. Bu üç yapı arasında çeşitli kimyasal ve fiziksel teknikler kullanılarak dönüşüm gerçekleştirilebilir. β ve γ formlarında molekül eksenine dik doğrultuda dipoller mevcut olduğundan malzemede kutup söz konusudur ve piezoelektrik özellik gösterirler. PVDF'nin β fazı en güçlü piezoelektrik özelliği gösterir. β fazının kristal yapısı Şekil 2.8'te verilmiştir (Chen, 1999).



Şekil 2.8: PVDF β Fazının Moleküler Dizilimi

Piezoseramiklerle karşılaştırdığımız zaman PVDF'lerin bazı avantajları söz konusudur. Bunların başında iyi mekanik dayanım, düşük akustik impedans, imalat kolaylığı ve mükemmel esneklik gelmektedir. En büyük dezavantajları ise polarizasyonlarının zor olmasıdır. PVDF'yi polarize etmek için 1.2MV/cm gibi çok yüksek elektrik alanları oluşturmak gerekmektedir (Chen, 1999).

2.3.4 Kompozit piezoelektrikler

Piezoelektrik kompozitlerin sensörler imalinde kullanılmasının temel sebebi; kutuplanmış PZT'nin düşük hidrostatik duyarlılığıdır. Kompozit sensörlerle bu performansın artırılması hedeflenir. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilirler. Kompozitler her bileşenin en zayıf noktasını iyileştirerek, her bileşenden en iyi şekilde faydalanmamızı sağlar. Bu duruma en iyi örnek ise kompozit hidrofonlardır. Kompozit hidrofonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer iki fazdan oluşur.

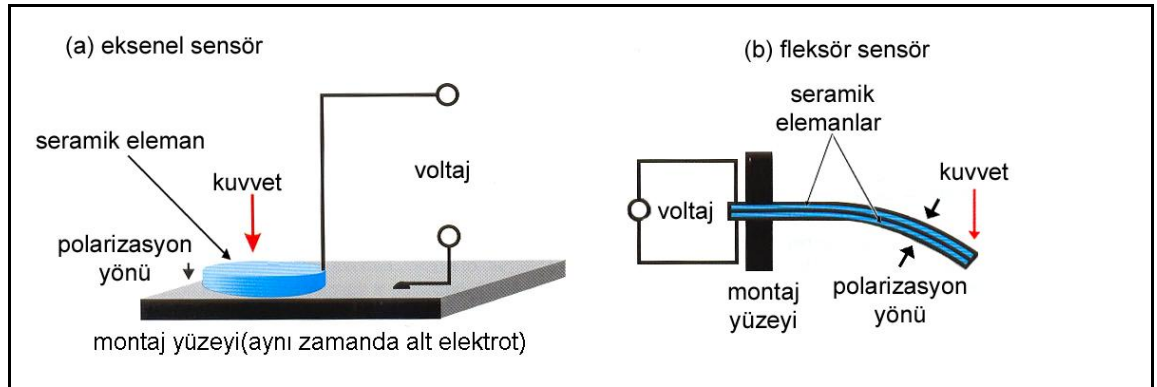
Piezoelektrik kompozitlerde başarılı bir polarizasyon ve buna bağlı olarak iyi piezoelektrik özellikler sağlamak için parçacıklar ile matrisin arabağı kuvvetli olmalıdır. Ayrıca kuvvetli bir bağ oluştururken, piezoelektrik seramik tozları homojen bir şekilde matriste dağıtmak, kompozitin çok daha verimli bir piezo-performans sergilemesine yardımcı olmaktadır. Yüksek ısı direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir (Tressler ve diğ., 1995).

2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları

Piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı cihazlar dört genel başlık altında toplanır; Sensörler, üreteçler, aktuatörler (öteleyiciler) ve transdüserlerdir (dönüştürücüler).

2.4.1 Sensörler

Sensör, ivmelenme veya basınç gibi mekanik etkiyi elektrik sinyaline çevirir. Bazı sensörlerde fiziksel parametre direk piezoelektrik elemanın üzerine etkir ve elektrik sinyalini oluşturur. Bazen de sensörde mevcut olan piezoelektrik elemana akustik sinyallerin etkimesi sonucu oluşan titreşimlerle elektrik sinyali oluşturulur. Genellikle kurulan sistemler, sensörden gelen sinyalleri işleyerek duyulabilir, görülebilir veya hissedilebilir cevaplara dönüştürürler (APC International, 2006).

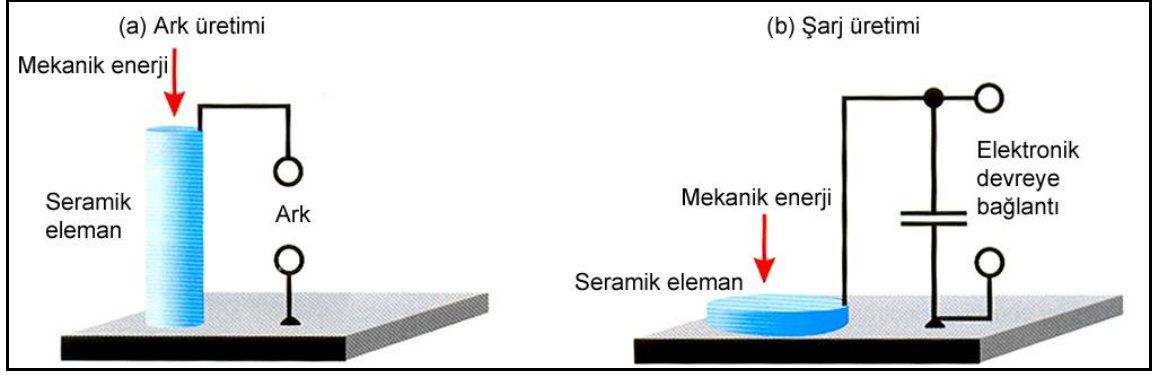


Şekil 2.9: Piezoelektrik Sensör Çeşitleri, (a) Eksenel Sensör, (b) Fleksör Sensör (APC International, 2006).

Piezoelektrik eleman kullanılarak yapılan sensörlerin eksenel ve fleksör olmak üzere iki temel çeşiti mevcuttur. Bu sensörlerin basitçe yapıları Şekil 2.9 verilmiştir (APC International, 2006).

2.4.2 Üreteçler

Üreteç olarak dizayn edilen piezoelektrik malzemeler, gerilim (voltaj) üretirler. Bu özelliklerinden ötürü herhangi bir elektrot aralığında ark oluşturabildiklerinden (Şekil 2.10a) yakıt ateşleyicilerinde, gaz sobaları, kombi gibi cihazlarda, kaynak ekipmanlarında ve daha birçok cihazda piezo çakmak (ateşleme aparatı) olarak kullanılırlar.

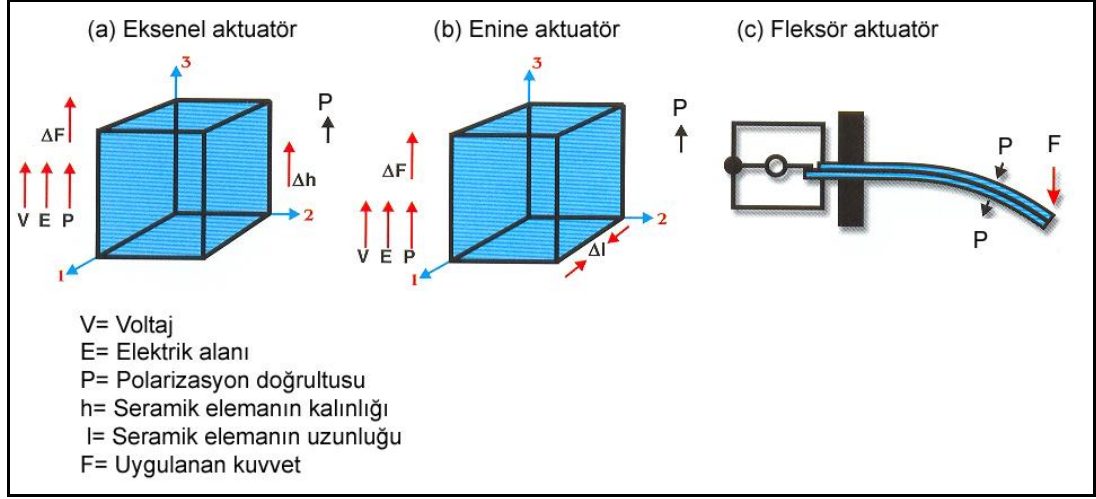


Şekil 2.10: Piezoelektrik Eleman Kullanılarak Oluşturulan Elektrik Enerjisi, (a) Ark Üretimi, (b) Şarj Üretimi (APC International, 2006).

Piezoelektrik ateşleme sistemleri, küçük ve basittirler. Bu özellikleri bazı durumlarda, kalıcı mıknatıslar veya yüksek voltaj dönüştürücüleri ve kapasitörler gibi, alternatif sistemlere göre avantaj sağlar. Ayrıca piezoelektrik bir elmandan elde edilen elektrik enerjisini depolama imkanı da mevcuttur. Çok katlı kapasitörleri oluşturmada kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteçlerinin yapımında da kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen üreteçler (Şekil 2.10b) elektronik devreleri beslemede kullanılan kuru pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok elverişlidirler (APC International, 2006).

2.4.3 Aktuatörler (Öteleyiciler)

Tetikleyici veya tahrikçi olarak adlandırılabilen aktuatörler, elektrik sinyalini yüksek çözünürlükte (hassas) ötelenmeye (yer değişimine) çevirirler. Öteleyiciler, temel olarak eksenel, enine ve fleksör öteleyiciler olarak gruplandırılırlar (Şekil 2.11). Aktuatörlerin gösterdiği yüksek hassasiyetteki hareketten makinalarda kullanılan takımların hassas şekilde kalibrasyonundan, çeşitli sistemlerde kullanılan optik lens veya aynaların kalibrasyonuna kadar birçok yüksek duyarlılık gerektiren uygulamada yararlanılır. Ayrıca piezoelektrik aktuatörler, uygulamasına göre hidrolik valfleri, küçük hacimdeki motorları veya özel amaçlı motorları kontrol etmede de kullanılabilirler. Aktuatörler, bir çeşit piezoelektrik motorlardır ve en büyük avantajları elektromanyetik gürültü oluşturmamalarıdır. Ayrıca eğer aktuatörün gerçekleştirdiği ötelenme engellenirse, aktuatör kullanılabilir bir kuvvet üretmiş olur (APC International, 2006).



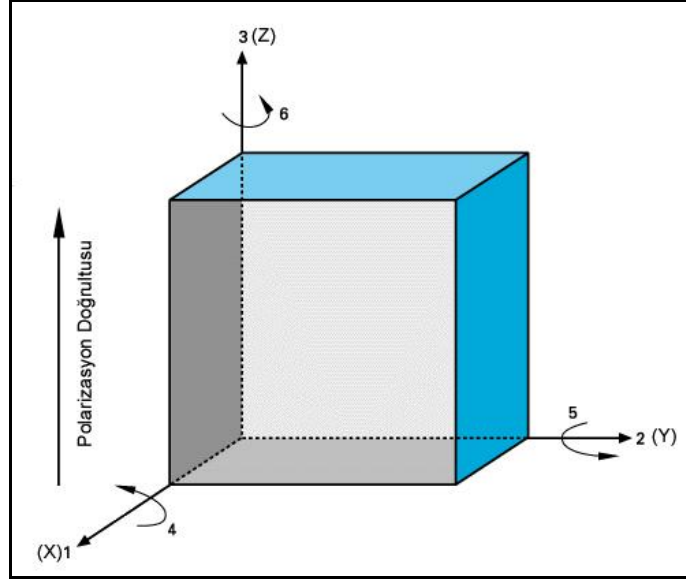
Şekil 2.11: Temel Aktuatör Çeşitleri (a-c) (APC International, 2006).

2.4.4 Transdüserler (Dönüştürücüler)

Piezoelektrik transdüserler, elektrik enerjisini ses veya sesüstü titreşen mekanik enerjiye çevirebilirler. İşitilebilen ses meydana getiren transdüserlerin, aynı şekilde ses üreten elektromanyetik cihazlara göre; kompaktlık, basitlik, güvenilirlik ve yüksek ses için gerekenden daha az enerji ihtiyacı gibi artıları vardır. Bu özelliklerinden dolayı pil ile çalışan ve ses üreten cihaz uygulamalarında idealdirler. Piezoelektrik etki iki yönlü olduğundan transdüserler, elektrik enerjisinden ultrasonik sinyaller üretebildiği gibi ses dalgasını da elektrik sinyaline dönüştürebilirler. Bu özelliğinden dolayı transdüserler kullanılarak mesafe, akış, sıvı seviyesi ölçen cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlarda sinyal gönderme ve alma işlemleri tek bir piezoelektrik transdüserle yapılabildiği gibi her iki işlem için ayrı ayrı piezoelektrik transdüser kullanan cihazlar da mevcuttur. Ayrıca piezoelektrik transdüserlerden temizlemede, sıvıların atomizasyonunda, seramik veya diğer gevrek malzemelerin işlenmesinde, plastik malzemelerin kaynak işlemlerinde, medikal uygulamalarda vb. ultrasonik titreşimler oluşturduğu için yararlanılır (APC International, 2006).

2.5 Piezoelektrik Sabitler

Piezoelektrik bir seramik, anizotropik olduğundan, fiziksel sabitler uygulanan mekanik veya elektrik kuvvetin doğrultularına bağlıdır. Bundan dolayı her sabit ilgili iki niceliğin doğrultularını belirtmek için genellikle iki alt indise sahiptir. Pozitif polarizasyon doğrultusu, X-Y-Z koordinat sisteminin çoğunlukla Z doğrultusu ile belirtilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Piezoelektrik Malzemeler İçin Koordinat Sistemi (Physik Instrumente, 2007)

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. Verilen bu indisleme sistemi her bir piezoelektrik sabiti için geçerlidir. En sık kullanılan piezoelektrik sabitlerinin detaylı açıklaması aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

2.5.1 Piezoelektrik Yük Sabiti

Piezoelektrik yük sabiti, d , uygulanan birim mekanik gerilme (T) sonucu oluşan polarizasyon veya uygulanan birim elektrik alan sonucu piezoelektrik malzemedeki mekanik genleme (S) olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik yük sabitinin ilk alt indisi elektrik alan, E , sıfır olduğunda malzemedeki mevcut olan polarizasyonu ya da uygulanan elektrik alanının yönünü işaret eder. Piezoelektrik yük sabitinin ikinci alt indisi ise uygulanan gerilmenin doğrultusunu veya meydana gelen birim şekil değişimini belirtir. Piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik alan sonucu oluşan genleme, elektrik alanıyla ve piezoelektrik yük sabitiyle ilişkili olduğundan, piezoelektrik yük sabiti aktüatör gibi genlemeye bağlı uygulamalar için malzemenin uygunluğunu sınavan önemli bir sabittir. d 'nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlardan bazıları Çizelge 2.6'de verilmiştir.

Çizelge 2.6: Piezoelektrik Yük Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006)

d	Açıklaması
d_{33}	3* yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 3 yönünde oluşan genleme
d_{31}	1** yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 1 yönünde oluşan genleme
d_{15}	2** yönünde uygulanan birim kayma gerilmesi sonucu 1 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 1 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 2 yönünde oluşan kayma genleme.
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Piezoelektrik yük sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.6’de verilmiştir (APC International, 2006)

$$d = k\sqrt{(s^E \epsilon^T)} \quad (2.7a)$$

$$d_{31} = k_{31}\sqrt{(s^E_{11} \epsilon^T_{33})} \quad (2.7b)$$

$$d_{33} = k_{33}\sqrt{(s^E_{33} \epsilon^T_{33})} \quad (2.7c)$$

$$d_{15} = k_{15}\sqrt{(s^E_{55} \epsilon^T_{11})} \quad (2.7d)$$

2.5.2 Piezoelektrik Voltaj Sabiti

Piezoelektrik voltaj sabiti, g, uygulanan birim mekanik gerilme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan elektrik alan veya uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan mekanik genlemedir. Piezoelektrik voltaj sabitinin ilk alt indisi, malzeme içinde oluşturulan elektrik alanının doğrultusunu veya elektrik ötelenme doğrultusunu belirtir. İkinci alt indis ise, uygulanan gerilmenin veya oluşan genlemenin doğrultusunu belirtir. Piezoelektrik bir malzemenin uygulanan bir fiziksel gerilmeye tepki olarak oluşturduğu elektrik alanının gücü uygulanan gerilme ve piezoelektrik voltaj sabitinden etkilendiğinden, sensör uygulamaları için kullanılan malzemenin doğru olup olmadığının belirlenmesinde piezoelektrik voltaj sabitinin rolü büyüktür, g ’nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlardan bazıları Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7: Piezoelektrik Voltaj Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006)

g	Açıklaması
g_{33}	3* yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 3 yönünde oluşan genleme
g_{31}	1** yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 1 yönünde oluşan genleme
g_{15}	2** yönünde uygulanan birim kayma gerilmesi sonucu 1 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 1 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 2 yönünde oluşan kayma genleme.
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı	
**seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Piezoelektrik voltaj sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.7’de verilmiştir. (APC International, 2006)

$$g = d/\epsilon^T \quad (2.8a)$$

$$g_{31} = d_{31}/\epsilon_{33}^T \quad (2.8b)$$

$$g_{31} = d_{31}/\epsilon_{33}^T \quad (2.8c)$$

$$g_{15} = d_{15}/\epsilon_{11}^T \quad (2.8d)$$

2.5.3 Dielektrik Sabiti

Bir piezoelektrik malzeme için *dielektrik sabiti* veya *manyetik geçirgenlik*, ϵ , birim elektrik alan başına dielektrik ötelenmedir. ϵ^T , sabit gerilme altındaki dielektrik sabiti ve ϵ^S , sabit genleme altındaki dielektrik sabitidir. ϵ ’nin ilk alt indisi dielektrik ötelenme doğrultusunu, ikinci alt indisi ise elektrik alanının doğrultusunu temsil eder. ϵ ’nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Relatif dielektrik sabiti K , ise ϵ ’nin (seramik malzemeden yapılmış bir elemanın depolayabileceği yük miktarının) ϵ_0 ’a (vakumda depolanana, $8,85 \times 10^{-12}$ farad/metre) oranlanmasıyla bulunur (Eşitlik 2.9) (APC International, 2006)

$$K^T = \varepsilon^T/\varepsilon_0 \quad (2.9)$$

Piezoelektrik sabitleri d , ε^T ve g arasındaki ilişki ise Eşitlik 2.10'daki gibidir.

$$g = d/\varepsilon^T \quad (2.10)$$

Çizelge 2.8: Dielektrik Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006)

E	Açıklaması
ε_{11}^T	Sabit gerilme altında 1** doğrultusundaki dielektrik ötelenme ve elektrik alanının permitivesi.
ε_{33}^S	Sabit genleme altında 3* doğrultusundaki dielektrik ötelenme ve elektrik alanının permitivesi.
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

2.5.4 Elektromekanik Çift Faktörü (Katsayısı)

Elektromekanik çift faktörü, k , bir piezoelektrik malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ne kadar verimli çevirdiğinin bir ölçüsüdür. Elektromekanik çift faktörünün ilk alt indisi elektrotların uzandığı doğrultuyu, ikinci alt indis ise uygulanan veya oluşturulan mekanik enerjinin doğrultusunu işaret eder. k 'nın aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9'dan da anlaşılacağı gibi seramik elemanın boyut ve şekillerine göre elektromekanik çift faktörü özel ifadeler alabilir. Örneğin ince disk şeklindeki piezoelektrik eleman için *düzlemsel elektromekanik çift faktörü*, k_p , radyal çift faktörünü belirtir. Aynı şekilde yüzey boyutları kalınlığına göre büyük olan disk veya levha şeklindeki malzemelerin *kalınlık elektromekanik çift faktörü*, k_t 'de (k_{33} 'ün özel bir ifadesi) bu özel ifadelere örnek olarak verilebilir. k_t , k_{33} gibi 3 doğrultusundaki elektrik alanı ve gene aynı doğrultudaki mekanik titreşimler arasındaki çift faktörünü belirtir.

Piezoelektrik seramik üreticilerinin kataloglarında yer alan elektromekanik çift faktörü değerleri teorik olarak elde edilen maksimum k değerleridir. Tipik bir piezoelektrik seramik, bileşimine ve uygulanan kuvvetlerin doğrultulana bağlı olarak

düşük girdi frekansında herhangi bir formda gönderilen enerjinin ancak %30-75'ini diğer enerji formuna dönüştürebilmektedir.

Arzu edilen bir enerji dönüşümü için genellikle elektromekanik çift faktörü değerlerinin yüksek olması istenir. Fakat elektromekanik çift faktörü, ne dielektrik kayıplardan ne mekanik kayıplardan ne de dönüştürülmemiş enerjinin geri kazanımından sorumlu tutulmamalıdır. Enerjinin ne kadar etkin dönüştürüldüğü piezoelektrik eleman tarafından dönüştürülmüş, kullanılabilen enerjinin (depolanan), eleman tarafından alınan toplam enerjiye (giren enerjiye) oranıyla belirlenir. Uygun tasarlanmış bir sistemde kullanılan piezoelektrik seramiklerin verimliliği bu yöntemle ölçüldüğünde, verimlilik %90'ı aşmaktadır.

Çizelge 2.9: Elektromekanik Çift Katsayısı İndislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

K	Açıklaması
k_{33}	3* doğrultusundaki elektrik alanı ve gene 3 doğrultusundaki boyuna titreşimler için elektromekanik çift faktörü (seramik tel, uzunluk>10x çap)
k_t	3 doğrultusundaki elektrik alanı ve gene 3 doğrultusundaki boyuna titreşimler için elektromekanik çift faktörü (ince disk, yüzey boyutları kalınlığa nispeten daha büyük; $k_t < k_{33}$)
k_{31}	3 doğrultusundaki elektrik alanı ve 1** doğrultusundaki boyuna titreşimler için elektromekanik çift faktörü (seramik tel)
k_p	3 doğrultusundaki elektrik alanı ve 1 ve 2** doğrultusundaki radyal titreşimler için elektromekanik çift faktörü (ince disk)
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Seramik bir elemanın elektromekanik çift faktörüne ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.11'de verilmiştir. Eşitlik 2.11 statik veya düşük frekanslar için geçerlidir (APC International, 2006).

$$k^2 = d^2 / (s^E \epsilon^T) \quad (2.11a)$$

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = d_{31}^2 (s_{11}^E \epsilon_{33}^T) \quad (2.11b)$$

Seramik disk için:

$$k_p^2 = 2d_{31}^2 ((s_{11}^E + s_{12}^E) \epsilon_{33}^T) \quad (2.11c)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 (s_{55}^E \epsilon_{11}^T) \quad (2.11d)$$

Eşitlik 2.11’de piezoelektrik seramik elemanlar için verilen elektromekanik çift katsayıları yüksek frekanslar için Eşitlik 2.12’de verilen şekle dönüşür (APC International, 2006)

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = \frac{(\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n-f_m)/f_m)]}{1 + (\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n-f_m)/f_m)]} \quad (2.12a)$$

Seramik disk için:

$$k_p \approx \sqrt{[(2.51 (f_n-f_m)/f_n) - ((f_n-f_m)/f_n)^2]} \quad (2.12b)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = (\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n-f_m)/f_n)] \quad (2.12c)$$

Herhangi bir şekildeki piezoelektrik eleman için ise elektromekanik çift katsayısı Eşitlik 2.13’de verilmiştir.

$$k_{eff}^2 = (f_n^2 - f_m^2)/f_n^2 \quad (2.13)$$

2.5.5 Elastik Uygunluk

Elastik Uygunluk (compliance), s , bir piezoelektrik malzemeye 11 ve 33 doğrultularında uygulanan birim gerilme sonucunda oluşan genlemedir. Aynı zamanda elastiklik modülünün tersidir (genleme/gerilim). S^D , sabit elektrik ötelenme altındaki elastik uygunluk, S^E ise sabit elektrik alan altındaki elastik uygunluktur. S^D ve S^E ’nin ilk alt indisleri genleme’nin doğrultusunu, ikinci alt indisleri gerilmenin

doğrultusunu belirtir. S 'nin aldığı alt indislerle göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.10'de verilmiştir.

Çizelge 2.10: Elastik Uygunluk İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006)

S	Açıklaması
S_{11}^E	Sabit elektrik alan altında 1** doğrultusunda uygulanan gerilme sonucu gene 1 doğrultusunda oluşan genleme için elastik uygunluk
S_{33}^D	Sabit elektrik ötelenme altında3* doğrultusunda uygulanan gerilme sonucu gene 3 doğrultusunda oluşan genleme için elastik uygunluk
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Piezoelektrik seramik bir elemanda elastik uygunluğa ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.14'de verilmiştir.

$$s = 1/\nu^2 \quad (2.14a)$$

$$s_{33}^D = 1/Y \quad (2.14b)$$

$$s_{33}^E = 1/Y^E_3 \quad (2.14c)$$

$$s^{D11} = 1/Y^{D11} \quad (2.14d)$$

$$s_{11}^E = 1/Y^E_{11} \quad (2.14e)$$

2.5.6 Elastiklik Modülü

Elastiklik modülü, E , bir seramik malzemenin elastikliği hakkında fikir yürütebilmemizi sağlayan en önemli parametredir. Elastiklik modülü, malzemeye uygulanan gerilmenin yine aynı yönde oluşturduğu genlemeye bölünerek elde edilir (APC International, 2006).

3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER VE AKTUATÖRLER

3.1 Giriş

Akıllı yapılar, görevleri sistemi sönümlemek olan sensör ve aktüatör elemanlarının gövde üzerine yapıştırılması ile oluşan yapılar olarak görülebilir. Araştırmacılar ince elastik çubuktaki titreşimleri gidermek için üzerine yapıştırılmış piezoelektrik seramik ya da filmin, sensör ve aktüatör özelliklerinden yararlanarak daha düşük titreşim genlikleri elde etmenin olabirliğini ispatlamışlardır. Çubuk dış kuvvet etkisiyle deforme olduğunda, eşzamanlı olarak deforme olan piezoelektrik sensör kuvvetin şiddetiyle orantılı olarak bir yüzey şarjı üretir. Sensörden alınan bu sinyali işleyen kontrol sistemi, aktüatöre uygun gerilimi uygulayarak tersi yönde bir deformasyon yapmasını sağlar ve bu sayede yapı sönümlenmiş olur.

Sensörler; fiziksel ortamlarla, elektronik olarak çalışan ve data kayıt eden sistemlerin birbirleriyle uyum içersinde çalışabilmesi için veri akışını sağlayan elemanlardır. Bir sensör belirli bir fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkiyi algılayarak, bu etkiyi bir elektrik sinyaline dönüştürür ve sinyali bir bilgi işlem sistemine gönderir. Genellikle sensörler yardımıyla kontrol edilen sistemlerde sensörün algıladığı girdiye bir çıktı ile cevap verilir. Bu duruma; sıcaklık, mesafe, kuvvet, ivme ölçümleri vb. örnek olarak verilebilir.

Nesnelerin yerinin belirlenmesi, mesafe, akış, hız ölçümü vb. uygulamalar için işitilebilir ses sinyalleri (dalgaları) veya ultrasonik (sesüstü) sinyaller üreten ve algılayan dönüştürücü (transdüserler) sistemlerde de sensör elemanlardan yararlanılır. Bu uygulamaların birçoğunda ise sensör malzemesi olarak piezoelektrik seramik eleman veya elemanlardan yararlanılır. Alıcı verici uygulamalarında ise, hem gönderilecek sinyalin iletilmesinde, hem de yansıyan sinyalin toplanmasında tek bir piezoelektrik seramik eleman kullanılacağı gibi bu işlemler için iki piezoelektrik seramik eleman da kullanılabilir (APC International, 2006).

Tipik bir piezoelektrik sensör, yapısından dolayı, üzerine kuvvet veya basınç uygulanması veya uygulanan bu kuvvet veya basıncın değişmesi durumunda elektrik sinyali üretecektir. Statik yük altında seramik elemandaki serbest yük taşıyıcıları,

dipollerin yüklerini nötür duruma getirecek şekilde dipollere göç ederler ve elemanın elektrik yükünü (şarjını) etkin bir şekilde boşaltırlar. Sensör olarak kullanılan seramik elemanın üzerine uygulanacak bir gerilme statik durumu bozarak elektriksel yükü yeniden oluşturacaktır. Seramik eleman üzerindeki gerilmenin ortadan kalkması halinde ise malzeme doğası gereği üzerinde oluşan elektrik yükünü boşaltma eğilimine yeniden girecektir (Hale, 2004).

Uzun süreli kontrol uygulamaları için tasarlanan sensörlerde de kullanılan tek kristalli, yönlendirilmiş ve belirli doğrultularda kesilmiş piezoelektrik seramikler, çok kristalli piezoelektrik seramiklere göre üstündürler. Çünkü tek kristalli seramiklerin piezoelektrik özellikleri, çok kristalli seramiklere göre daha çok karardır. Diğer taraftan çok kristalli seramiklerin, kuvvet ve uzama sensörlerinde kullanılması daha avantajlıdır, çünkü çok kristalli seramikler daha yüksek mekanik dayanım ve sıcaklık, basınç, rutubet gibi zor çevre şartlarına karşı daha fazla direnç sağlamaktadır. Sensör olarak kullanılacak çok kristalli piezoelektrik seramiklerin özellikleri, oldukça kolay bir şekilde geliştirilebilir ve bu malzemeler neredeyse sınırsız şekil ve boyutta imal edilebilir (APC International, 2006; Tressler ve diğ., 1995).

Bu bölümde sensör olarak kullanılabilecek piezoelektrik malzemelere, bu piezoelektrik malzemeler kullanılarak oluşturulan sensör elemanlarının özelliklerine ve çeşitlerine değinilecektir.

3.2 Sensör Çeşitleri

3.2.1 Eksenel Sensör Elemanları

Şekil 3.1’de eksenel piezoelektrik seramik bir sensörün temel yapısı verilmiştir. Bir eksenel sensör, seramik piezoelektrik elemanın polarize edildiği doğrultuya paralel doğrultuda uygulanan kuvveti algılar ve gene aynı yönde bir elektrik sinyali üretir (Şekil 3.1). Eksenel sensörlerde, hem birim şekil değişimi hem de elektrik sinyali aynı doğrultuda olduğundan d_{33} sensörleri veya 33-Mod sensörleri olarak da adlandırılırlar (APC International, 2006).



Şekil 3.1: Eksenel Piezoelektrik Seramik Sensör Elemanı (APC International, 2006)

Seramik bir piezoelektrik sensöre uygulanan kuvvet ile oluşturulan yük (şarj) Q , Eşitlik 3.7’de verilmiştir. Yük, elemanın seramik elemanın boyutlarına bağlı değildir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

$$Q = C_0 V \quad (3.7)$$

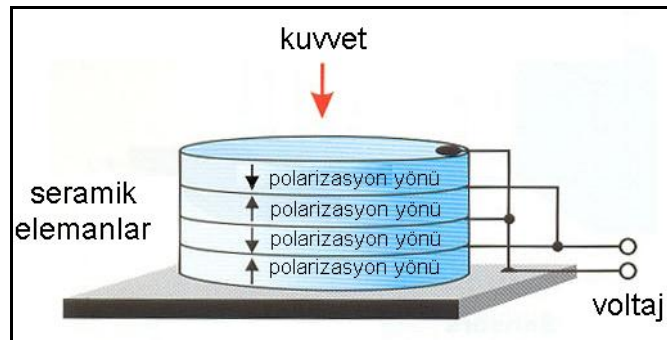
Eksenel bir sensör için Eşitlik 3.7, Eşitlik 3.8’deki ifadeye dönüşür.

$$Q = -d_{33} F \quad (3.8)$$

Eğer birden fazla seramik eleman üst üste dizilir ve paralel bağlanırsa, kuvvet her bir elemana eş zamanlı olarak etki eder (Şekil 3.2). Bu durumda Q , Eşitlik 3.9’de verildiği gibi ifade edilecektir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

$$Q = -(d_{33} F) n^* \quad (3.9)$$

n^* = seramik eleman sayısı



Şekil 3.2: Çok Elemanlı Eksenel Sensör (APC International, 2006)

Yükün tersine, piezoelektrik sensöre uygulanan kuvvet sonucu oluşan voltaj V , seramik elemanın boyutlarından etkilenir. Voltaj, seramik elemanın yüksekliği ile doğru, kesit alanı ile ters orantılıdır. Bir veya birden fazla paralel bağlanmış seramik

eleman içeren bir sensörün ürettiği voltaj, Eşitlik 3.10 yardımıyla ile hesaplanabilir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

$$V = -(g_{33}hT) \quad (3.10)$$

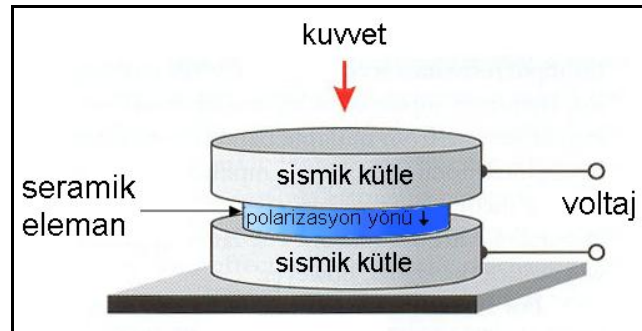
Bir sensör, ister tek bir seramik elemandan ister birden fazla paralel bağlı seramik elemandan oluşmuş olsun, her iki durumda da elde edilen voltaj aynı olacaktır ve voltaj uygulanan gerilmenin artışıyla doğrusala yakın bir şekilde artış gösterecektir (APC International, 2006).

Eksenel sensörlerin başlıca uygulama alanları; ivmelenmelerin ve motorların devirlerinin izlenmesidir. En basit bir akselerasyon sensörü, disk şeklindeki piezoelektrik seramiği aktif olmayan sismik kütleler arasına sıkıca yerleştirmek suretiyle yapılabilir (Şekil 3.3). Seramiğin polarize edildiği yönle aynı doğrultuda olan ivmelenme sırasında sismik kütle seramik eleman üzerine bir kuvvet uygular ve eleman ivme ile orantılı olan bir elektrik sinyali oluşturur. Bu tür sensör uygulamalarında sismik kütle olarak, osmiyum veya tungsten gibi yüksek yoğunluğa sahip metaller tercih edilir. Bazı ivme sensör uygulamalarında ise seramik elemanın kendisi sismik kütle olarak kullanılır (APC International, 2006).

Sismik kütle tarafından piezoelektrik elemana uygulanan kuvvet Eşitlik 3.11 ile verilmiştir. Seramik eleman üzerindeki gerilme, elemanın yüzey alanı, ivme ve sismik kütle tarafından belirlenir (Eşitlik 3.12) (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

$$F = Ma \quad (3.11)$$

$$T = -(M/A)a \quad (3.12)$$

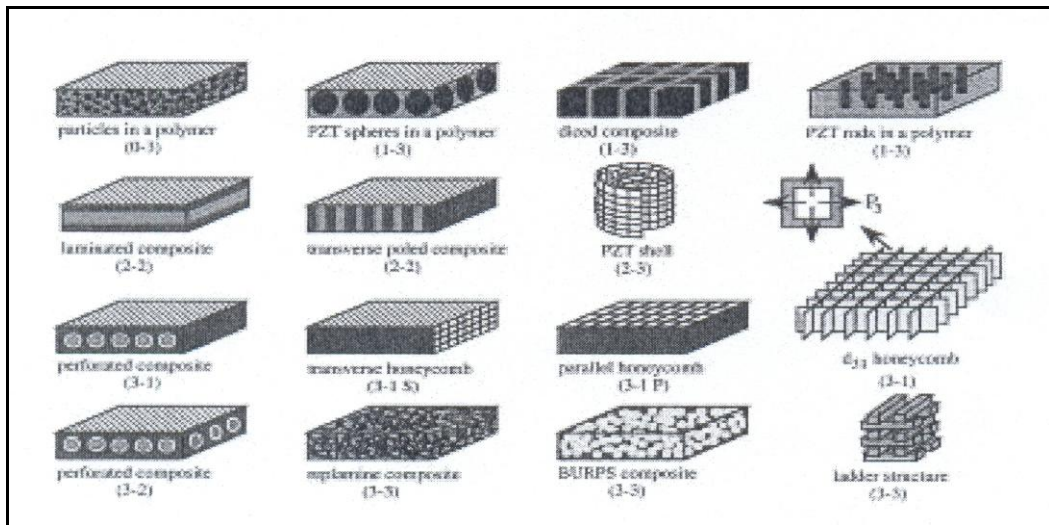


Şekil 3.3: Sismik Kütleli Eksenel Akselerasyon Sensörü (APC International, 2006)

3.3 Piezoelektrik Kompozit Sensörler

Piezoelektrik kompozitlerin sensörler imalinde kullanılmasının temel sebebi; kutuplanmış PZT'nin düşük hidrostatik duyarlılığıdır. Kompozit sensörlerle bu performansın artırılması hedeflenir. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilirler. Kompozitler her bileşenin en zayıf noktasını iyileştirerek, her bileşenden en iyi şekilde faydalanmamızı sağlar. Bu duruma en iyi örnek ise kompozit hidrofonlardır. Kompozit hidrofonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer, iki fazdan oluşur (Tressler ve diğ., 1995).

Kompozit malzemeler için bir fazın onunla fiziksel temasta olan diğ. faz ile olan doğru ilişkiyi belirlemede kullanılan bir işaretler sistemi mevcuttur. Bu sisteme göre; kompozit bir malzeme, birbirinden farklı iki fazın ancak 10 değişik şekilde konumlandırılmasıyla elde edilebilmektedir. Bu durumda, Şekil 3.4'de ifade edildiği gibi, fazların birbirlerine göre konumları; 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 3-2, 3-3 olabilmektedir. Günümüzde iki farklı faz kullanılarak oluşturulmak istenen piezoelektrik kompozitler için bu notasyondan 0-3, 1-3, 2-2, 2-3, 3-0, 3-1, 3-2, 3-3 üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Kompozit piezoseramikleri göz önüne aldığımızda, bu işaret sistemine göre ilk rakam aktif fazın fiziksel bağlanma durumunu, ikinci rakam ise pasif fazın bağlanma durumunu temsil etmektedir (Tressler ve diğ., 1995).



Şekil 3.4: Kompozit Piezoelektrik Malzemelerde Fazların Birbirlerine Göre Konumu (Tressler ve diğ., 1995)

Kompozit olarak hazırlanan piezoelektrik elemanlarda temel hedef kullanılan ikinci fazla, enine ve boyuna doğrultulardaki hidrostatik gerilmenin bir bölümünü soğurarak, piezoelektrik elemanın, piezoelektrik voltaj sabitinin değerini yükseltmektir. Daha önce de belirtildiği gibi hidrostatik durumda piezoelektrik elemanın tensör sabitleri g_h ve d_h sıfır olmakta ve sensörlerin duyarlılığı ortadan kaldırmaktadır. Polimer kullanılarak hazırlanan seramik/polimer piezoelektrik kompozitlerde, polimer faz enine ve boyuna doğrultulardaki hidrostatik durumda, gerilmelerin bir bölümünü soğurarak piezo elemanın g_h 'sinin sıfır olmasını engellemektedir (Tressler ve diğ., 1995).

3.3.1 0-3 Piezoelektrik Seramik-Polimer Kompozit Sensörler

0-3 konfigürasyonundaki piezoelektrik kompozitler, seramik piezoelektrik parçacıkların, polimer matrise rasgele konumlanmalarıyla oluşturulurlar. Piezoelektrik bir kompoziti bu şekilde oluşturmanın en büyük avantajı, kompozite istenilen şekli verirken piezo etkisinin aktif kalmasıdır. Polimer faz süneklik ve esneklik sağlayarak piezoelektrik malzemenin imalatını kolaylaştırmaktadır. Piezoelektrik seramik faz ise üstün piezoelektrik özellikleri ve kolay polarize edilebilmesi ile kompozitin piezo özellik kazanmasını sağlamaktadır (APC International, 2006; Hale, 2004).

0-3 piezoelektrik seramik-polimer kompozit sensörleri *kalın film, kaplama* gibi alternatif şekillerde uygulayabilmeye yönelik çalışmalar son 20 yılda gittikçe artmakta ve buna bağlı olarak da büyük bir ilgiyi bereberinde getirmektedir. Bu şekilde uygulanan 0-3 piezoelektrik kompozit sensörler, *piezoelektrik boya* veya *piezo boya* olarak da isimlendirilmektedir (Raptis ve diğ., 2004).

Polimer matrisli piezoelektrik kompozit malzemeler üzerinde yürütülen çalışmaların başlıca merkezleri Amerika ve Japonya'dır. Piezoelektrik boya konusundaki araştırmalar 1986 yılında Klein, Safari, Newnham ve Runt tarafından Penn State Üniversitesinde yapılmıştır. Çalışmada PZT tozları, polimer bir bağlayıcı ve çeşitli katkılarla (çökelmeyi ve köpük oluşumunu engelleyecek kimyasallar gibi) karıştırılarak piezoelektrik kompozit boya hazırlanmıştır (Hale, 2004).

Takip eden yıllarda Japan Atom Enerjisi Kurumu da piezoelektrik boya üzerinde çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalarda Japon bilim adamları Egusa ve Iwasawa yapısal malzemeler üzerindeki titreşimleri algılamada kullanılabilecek kalın film

Üretim teknolojisine dayanan piezoelektrik boyalar geliştirmeyi başarmışlardır (Raptis ve diğ., 2004).

Bu çalışmalarda geliştiren ve piezoelektrik boya olarak adlandırılan piezoelektrik / polimer kompozitleri boyadan çok macunumsu bir yapıdadırlar ve spatula yardımıyla şekillendirilmektedirler (Hale, 2004).

1999 yılında Hale ve Truk tarafından yapılan çalışmalar boya tabancası ile pkrtlebilir piezoelektrik boyaların geliştirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu teknolojiye polimer olarak akrilik ve piezoelektrik seramik toz olarak PZT kullanmışlardır. Bu karışımı boya tabancasıyla püskürtmek suretiyle bir sensör geliştirmişlerdir. Daha sonra Hale, White ve Poumeyrol geliştirdikleri bu piezoelektrik boyayı bir köprü ayağına uygulayarak çalışabileceğini kanıtlamışlardır. 2004 yılında ise ürünün ticari olarak kullanılabilecek duruma gelmesiyle birlikte patent çalışmalarına başlamışlardır (Raptis ve diğ., 2004).

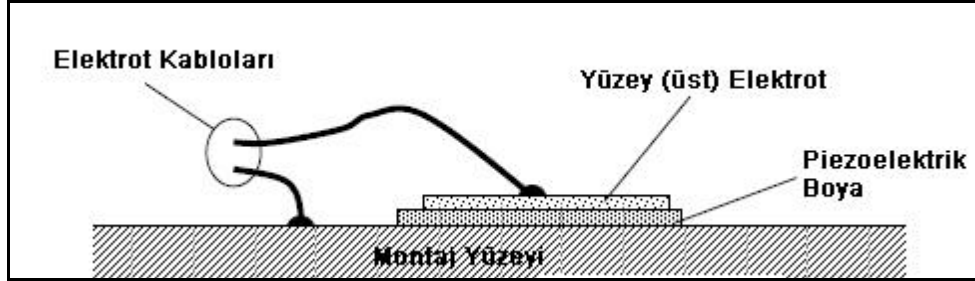
Piezoelektrik boyaların mekanik ve elektriksel özellikleri faz olarak kullanılan malzemelerin özelliklerine ve hacim oranlarına sıkı sıkıya bağlıdır. Piezoelektrik boyalarda, yüksek değerlere sahip piezoelektrik yük sabitleri ancak matriste hacimce fazla oranda, ince ve homojen dağıtılmış piezoelektrik tozların mevcudiyeti ile elde edilebilmektedir. Kompozit boyalarda piezoelektrik fazın azalmasıyla hem piezo özelliklerde hem de dielektrik özelliklerde kayıp yaşanmaktadır (Chen, 1999; Hale ve diğ., 1999).

Yüksek elastiklik modülüne sahip matris kullanmak hassasiyeti arttırmaya yardımcı olmaktadır, fakat sudaki veya biyolojik dokulardaki mekanik empedansı yakalayabilmek için, tasarlanacak sensörlerde düşük elastiklik modülüne sahip matris malzemesi tercih edilmelidir. Ayrıca iyileştirilmiş seramik-polimer direnci, çalışma sıcaklıklarında malzemenin polarizasyonunun korunmasını sağlar (Tressler ve diğ., 1995; Hale, 2004).

Piezoelektrik boyaların sağladığı en büyük avantaj hemen hemen her türlü yzeeye kolaylıkla uygulanabilmeleridir. Özellikle ulaşılması zor ve kıvrımlı yzeelere büyük avantaj sağlamaktadır. Maliyetleri de oldukça düşüktür (Hale, 2004).

Piezoelektrik kompozitlerde başarılı bir polarizasyon ve buna bağlı olarak iyi piezoelektrik özellikler sağlamak için parçaçıklar ile matrisin bağı kuvvetli olmalıdır. Ayrıca kuvvetli bir bağ oluştururken, piezoelektrik seramik tozları homojen bir

şekilde matriste dağıtmak, kompozitin çok daha verimli bir piezo-performans sergilemesine yardımcı olmaktadır. Yüksek ısıl direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir (APC International, 2006; Hale, 2004).



Şekil 3.5: Piezoelektrik Boyanın Uygulanma Şekli (Hale, 2004)

Piezoelektrik boyanın uygulamadaki en genel hali Şekil 3.5'deki gibidir. Şekil 3.5'de verilen resimde piezoelektrik boyanın iletken bir montaj yüzeyine nasıl uygulanabileceğini göstermektedir. İletken olan veya olmayan yüzeylere uygulamadaki tek fark, iletken olmayan montaj yüzeyleri için alt elektrot hazırlanmasıdır.

4. TİTREŞİM VE AKTİF KONTROL

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bu salınımlar bir sarkaçın hareketi gibi periyodik olabileceği gibi çakıllı bir yolda tekerleğin hareketi gibi rastgele de olabilir.

Titreşim bazen arzu edilir. Örneğin; bir akort çatalının, üflemeli çalgılarda veya mızıkada dilin, veya bir hoparlörde koninin hareketi birçok aletin doğru kullanılması için gerekli olan arzu edilir titreşimdir.

Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler.

4.1 Titreşim

Serbest titreşim, bir başlangıç hareketi verilen ve daha sonra serbestçe salınmaya bırakılan sistemlerde meydana gelen titreşim türüdür. Bir çocuğu salıncakta sallanırken ardından itirmek ve daha sonra serbest bırakmak veya bir akort çatalına vurmak ve daha sonra salınmaya bırakmak bu titreşim türünün örnekleridir. Mekanik sistem daha sonra kendi frekansı veya frekanslarında titreşecek ve sifıra gidecektir.

Zorlamalı titreşim, değişen bir kuvvet veya hareket bir mekanik sisteme uygulandığında oluşan titreşim türüdür. Balanssızlık dolayısıyla çamaşır makinesinin titreşimi, araç titreşimleri (motordan, yaylardan veya yoldan kaynaklanan), veya deprem sırasında bir binanın titreşimleri bu titreşim türünün örneklerine dahildir. Zorlamalı titreşimde titreşimin frekansı uygulanan zorlamanın veya hareketin frekansına bağlıdır, fakat titreşimin genliği ise sistemin mekanik davranışına bağlıdır (Hartog, 1985; Rao, S.,1990; Thompson, 1996; Maia, 1997).

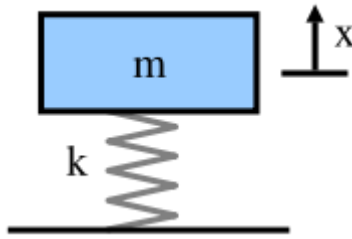
4.1.1 Titreşim analizi

Titreşim analizinin temelleri, basit kütle-yay-sönüm elemanı modeli incelenerek anlaşılabilir. Aslında bir otomobil gibi karmaşık bir yapı dahi bir basit kütle-yay-sönüm modellerinin toplamı olarak modellenebilir (Hartog, 1985).

4.1.1.1 Sönümsüz serbest titreşim

Kütle-yay-sönüm modelini incelemek için sönümün göz ardı edilebilir olduğunu ve kütleye hiçbir dış kuvvetin etkimediğini varsayıyoruz (örneğin: serbest titreşim).

Yay tarafından kütleye uygulanan kuvvet yayın uzaması “x” ile orantılıdır (Yayın kütlenin ağırlığı dolayısıyla sıkıştırıldığını varsayıyoruz). Orantı sabiti, k, yayın katsayısı ve birimi kuvvet/uzama cinsindendir (örneğin: lbf/in veya N/m) (Hartog, 1985).



Şekil 4.1 Basit Kütle–Yay Sistemi

$$F_s = -k.x \quad (4.1)$$

Kütle tarafından üretilen kuvvet ise Newton’un ikinci hareket kanununda verilen kütlenin ivmesiyle orantılıdır:

$$\sum F = ma = m\ddot{x} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4.2)$$

Kütle üzerindeki kuvvetleri toplayıp aşağıdaki adi diferansiyel denkleme ulaşırız:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (4.3)$$

Yayı “A” kadar çekerek titreşime başlattığımızı ve sonra serbest bıraktığımızı varsayarsak, kütlenin hareketini tanımlayan yukarıdaki denklemin çözümü şöyle olur:

$$x(t) = A\cos(2\pi f_n t) \quad (4.4)$$

Bu çözüm şu anlamdadır: kütle “A” genliğinde ve f_n frekansında salınmaktadır, burada f_n titreşim analizindeki en önemli değerlerden biridir ve sönümsüz “doğal frekans” olarak adlandırılır.

f_n , basit kütle-yay sistemi için aşağıdaki gibi tanımlanır:

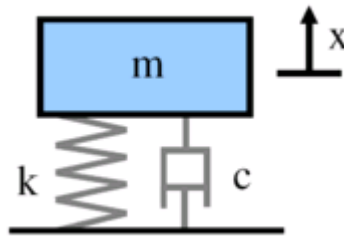
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.5)$$

Eğer sistemin kütlesini ve yay katsayısını biliyorsanız, sisteme bir ilk hareket verildiğinde hangi frekansta titreyeceğini yukarıdaki formülü kullanarak bulabilirsiniz. Titreşen her sistem, tahrik edildiğinde titreşeceği bir veya daha fazla doğal frekansa sahiptir. Genel olarak bu basit ilişki daha kompleks bir sisteme bir kütle veya direnç eklediğimizde ne olduğunu açıklar (Hartog, 1985).

Basit modelimize göre kütle sonsuza kadar aynı genlikte salınacaktır, gerçek sistemde daima sönüm denen enerjiyi harcayan ve en sonunda sistemin durmasına neden olan etkiler vardır.

4.1.1.2 Sönümlü serbest titreşim

Şimdi sisteme kütlenin hızıyla orantılı olarak kuvvet üreten viskoz bir sönümleyici ekliyoruz. Sönümleme viskoz olarak adlandırılmaktadır çünkü bir akışkanın içindeki bir objeyi modellemektedir. Orantı sabiti “c” sönüm katsayısı olarak adlandırılır ve kuvvet/hız birimindedir (örneğin: lbf s/ in veya N s/m).



Şekil 4.2 Basit Kütle–Yay–Sönüm Sistemi

$$F_d = -cv = -c\dot{x} = -c \frac{dx}{dt} \quad (4.6)$$

Kütle üzerindeki kuvvetleri toplayarak aşağıdaki adi diferansiyel denklemi elde ederiz:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (4.7)$$

Bu denklemin çözümü sönümün miktarına bağlıdır. Eğer sönüm yeterince küçükse, sistem titreşecek fakat zaman geçtikçe titreşimi sona erecektir. Bu durumda sistem az sönümlü olarak ifade edilir. Eğer sönümü sistemin artık salınmadığı noktaya kadar arttırsak kritik sönüme ulaşmış oluruz. Sönümü kritik sönümün üzerine çıkarttığımızda ise sistem aşırı sönümlü sistem olarak adlandırılır. Kütle–yay sönüm modelinde kritik sönüm için sönüm katsayısının ulaşması gereken değer şudur:

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (4.8)$$

Sistemdeki sönümü tanımlamak için sönüm oranı (sönüm faktörü veya % kritik sönüm de denir) denen bir oran kullanılır. Bu oran sistemdeki gerçek sönümün, kritik sönüme ulaşması için gereken sönüme oranıdır. Kütle yay sönüm modeli için sönüm oranı (ζ) formülü ise şöyledir:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (4.9)$$

Örneğin; metal yapılar (uçak gövdeleri, motor krank milleri gibi) 0.05 den daha küçük sönümleme faktörlerine sahipken, otomotiv süspansiyonları 0.2-0.3 aralığındadır (Hartog, 1985).

Az sönümlü kütle yay sönüm sistemi için çözüm aşağıdaki gibidir:

$$x(t) = X e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t - \phi), \omega_n = 2\pi f_n \quad (4.10)$$

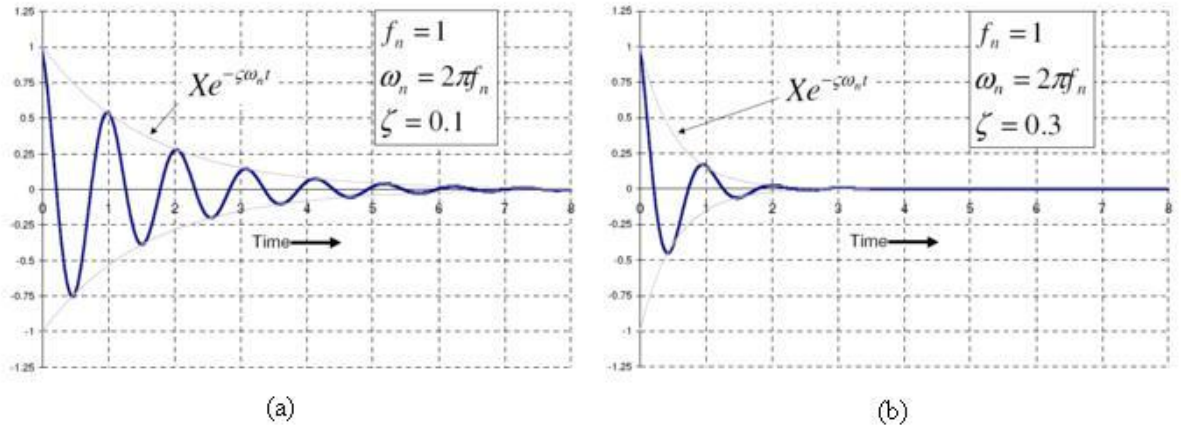
Başlangıç genliği (X) ve faz farkı (ϕ) yayın ne kadar sıkıştırıldığına göre değişir. Bu çözümde fark edilmesi gereken önemli nokta eksponansiyel terim ve kosinüs fonksiyonudur. Eksponansiyel terim sistemin ne kadar hızlı sönümleneceğini belirleyen terimdir (sönüm oranı büyüdükçe sistem daha hızlı sönümlenir). Kosinüs fonksiyonu ise çözümün salınım yapan kısmıdır ve salınımın frekansı sönümsüz durumdan farklıdır.

Bu durumdaki frekansa sönümlü doğal frekans, f_d , denir ve aşağıdaki formüle göre sönümsüz doğal frekansla ilişkilidir:

$$f_d = \sqrt{1-\zeta^2} f_n \quad (4.11)$$

Sönümlü doğal frekans sönümsüz doğal frekanstan daha düşüktür, fakat birçok pratik durumda sönüm oranı göreceli olarak küçüktür ve bu yüzden aradaki fark göz ardı edilebilir.

Şekil 4.3’de, 0,1 ve 0,3’lük sönüm oranlarının zaman geçtikçe sistemin sönümlenmesini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Pratikte sıklıkla yapılan ise bir darbeden sonra (örneğin; bir çekiçe vurduktan sonra) deneysel olarak serbest titreşimi ölçmektir ve bundan sonra salınım oranını ölçerek sistemin doğal frekansı hesaplanır ve düşüş oranı ölçülerek sönüm oranı bulunur. Doğal frekans ve sönüm oranı sadece serbest titreşimde önemli değildir. Aynı zamanda sistemin zorlama altındaki titreşiminde nasıl davranacağını da belirlerler (Hartog, 1985).



Şekil 4.3 Sönümlü Serbest Titreşim (a) $\zeta = 0.1$, (b) $\zeta = 0.3$

4.1.1.3 Sönümlü zorlamalı titreşim

Bu bölümde kütle yay sönüm modeline formülü aşağıdaki gibi olan, harmonik değişen bir kuvvet eklediğimizde modelimizin nasıl davranacağına bakacağız. Böyle bir kuvvet örneğin dönmede dengesizlikten kaynaklanabilir.

$$F = F_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (4.12)$$

Eğer yine kütle üzerindeki kuvvetleri toplarsak, aşağıdaki adi diferansiyel denklemleri elde ederiz:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(2\pi f \cdot t) \quad (4.13)$$

Bu problemin kararlı durum çözümü şu şekilde yazılabilir;

$$x(t) = X \cdot \cos(2\pi f \cdot t - \phi) \quad (4.14)$$

Sonuç, kütlelerin uygulanan kuvvetle aynı frekansta (f) salınacağını fakat arada bir faz farkı ϕ olacağını gösterir.

Titreşimin genliği "X" ise aşağıdaki formülde olduğu gibi tanımlanır:

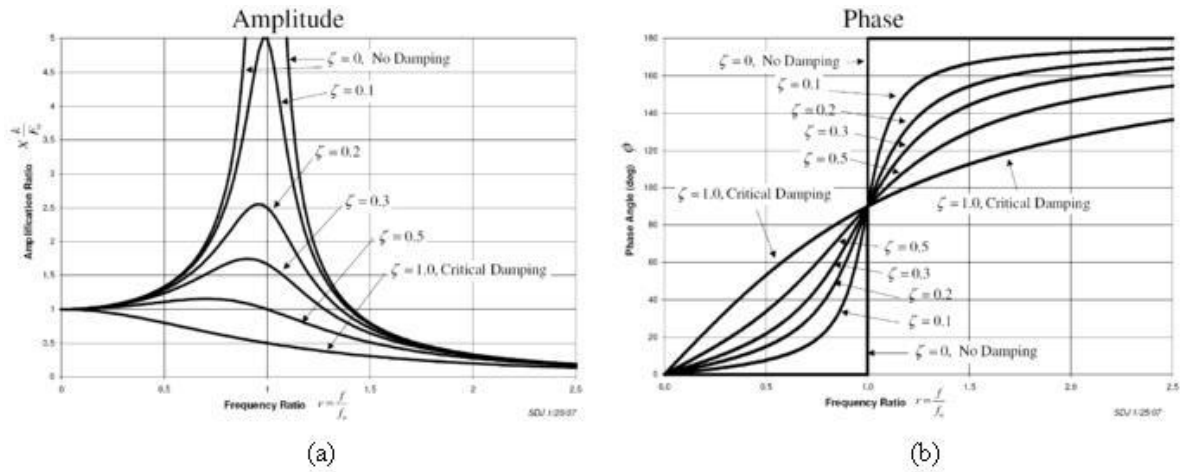
$$X = \frac{F_0}{k\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4.15)$$

Burada “r”, harmonik kuvvetin frekansının sönümsüz kütle-yay-sönüm modelinin doğal frekansına oranı olarak tanımlanır (Hartog, 1985).

$$r = f / f_n \quad (4.16)$$

Faz farkı (φ) ise aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (4.17)$$



Şekil 4.4 Zorlamalı Titreşim İçin Frekans Cevabı (a) Genlik, (b) Faz

Bu, sistem cevabı adı verilen fonksiyonların grafikleri, zorlamalı titreşimin en önemli özelliklerinden birini gösterir. Zorlama frekansının doğal frekansla hemen hemen aynı olduğu, çok az sönümlü sistemlerde titreşimin genliği çok yüksek olabilir. Bu olgu rezonans (mekanik rezonans) olarak adlandırılır (Böyle bir durumda sistemin doğal frekansı sıklıkla rezonans frekansı olarak adlandırılır).

Eğer, rezonans mekanik bir sistemde meydana gelirse çok zararlı olabilir. Sonuç olarak titreşim analizinin en önemli sebeplerinden biri rezonansın ne zaman meydana geleceğini tahmin etmek ve gerçekleşmesini önlemek için ne gibi önlemlerin alınacağına karar vermektir. Şekil 4.4(a), genlik çizimlerinde görüldüğü gibi, sönüm eklemek titreşimin genliğini önemli derecede azaltır. Aynı zamanda genlik, sistemin kütlesi veya direnci değiştirilerek doğal frekansın zorlama frekansından uzaklaştırılmasıyla da düşürülebilir. Eğer sistem değiştirilemiyorsa, belki zorlama frekansı değiştirilebilir (örneğin: kuvvete sebep olan makinenin dönme hızını değiştirerek).

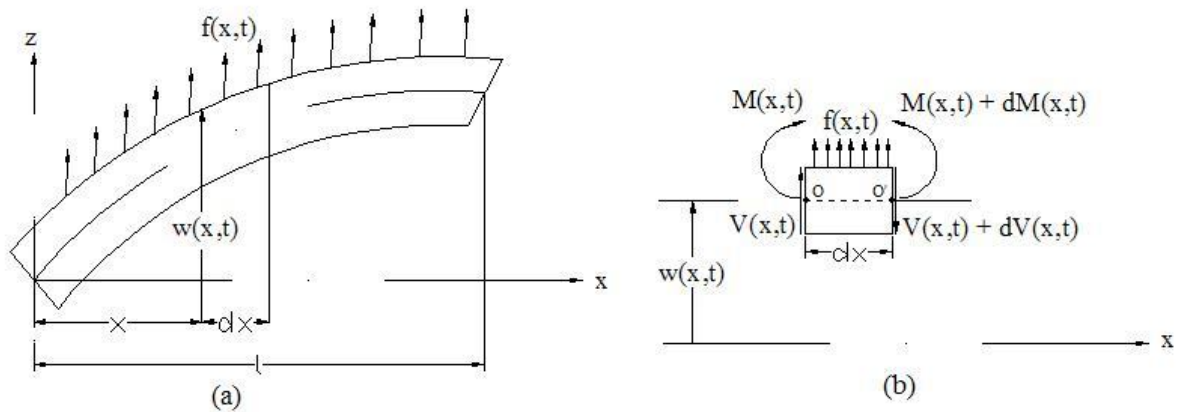
4.1.1.4 Rezonans

Eğer kütle ve yayı enerji depolama elemanları olarak görürseniz rezonansı anlamak çok kolaydır. Kütle kinetik enerji depolarken yay ise potansiyel enerji depolar. Daha önce de bahsedildiği gibi, kütle ve yay, üzerinde hiçbir kuvvet yokken, enerjilerini doğal frekansa eşit oranda bir ileri bir geri dönüştürürler. Diğer bir deyişle, eğer enerji verimli bir şekilde kütle ve yayın içerisine pompalansaydı, enerji kaynağının doğal frekansa eşit oranda beslenmesi gerekirdi. Bir kütle ve yayı bir kuvvet uygulamak bir çocuğu salıncakta sallamaya benzer, eğer daha yükseğe sallamak istiyorsanız doğru zamanda itirmek zorundasınızdır. Aynen salıncak örneğinde olduğu gibi, daha büyük bir hareket elde etmek için uygulanan kuvvetin illa ki çok yüksek olması gerekmemektedir. Bu kuvvetler sadece enerjinin sistemin içine eklenmesini sağlar (Rao,1990).

Sönüm ise enerji depolamak yerine enerjiyi harcar. Sönüm kuvveti hızla orantılı olduğundan, hareket büyüdükçe enerji daha fazla sönümlenir. Böylece, sönüm elemanı tarafından sönümlenen enerji ile kuvvet tarafından beslenen enerjinin eşit olduğu bir noktaya ulaşılır. Bu noktada sistem maksimum genliğe ulaşır ve uygulanan kuvvet aynı kaldığı sürece bu genlikte titremeye devam eder. Eğer hiç sönüm yoksa, enerji yutacak hiçbir şey yoktur ve böylece hareket teorik olarak sonsuza gider ki bu da rezonans durumudur (Rao,1990).

4.1.2 Kirişlerde eğilme titreşimleri

Kirişlerdeki yanal titreşimlerin diferansiyel hareket denklemini türetmek için kirişin bir diferansiyel elemanına etki eden $M(x,t)$ eğilme momenti, $V(x,t)$ kesme gerilmesi ve dış kuvvet $f(x,t)$ Şekil 4.5'te görülmektedir (Rao,1990).



Şekil 4.5 Kirişlerde Eğilme

Atalet kuvveti kirişin bir parçası üzerine etki ettiğinde,

$$\rho A(x)dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (4.18)$$

Hareketin z yönündeki kuvvet denkleminde;

$$-(V + dV) + f(x, t)dx + V = \rho A(x)dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (4.19)$$

Y ekseninde 0 noktasına göre moment denkleminde;

$$(M + dM) - (V + dV) dx + f(x, t)dx \frac{dx}{2} - M = 0 \quad (4.20)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx \quad (4.21)$$

$$dM = \frac{\partial M}{\partial x} dx \quad (4.22)$$

(4.19) ve (4.20) denklemlerinde her iki tarafı da dx 'e bölerek ve ikinci türev dx içeren terimleri de ihmal ederek;

$$-\frac{\partial V}{\partial x}(x, t) + f(x, t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (4.23)$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x}(x, t) - V(x, t) = 0 \quad (4.24)$$

(4.24) denklemini (4.19) denkleminde yerine koyarak;

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}(x, t) + f(x, t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (4.25)$$

Kirişlerde eğilme teorisinden (Euler-Bernoulli veya ince kiriş teorisi) eğilme momenti ile yer değiştirme arasında;

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \quad (4.26)$$

(4.26) denklemini (4.25)'de yerine koyarsak;

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \right) + \partial A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (4.27)$$

Uniform bir kiriş için (4.27) denklemi;

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (4.28)$$

Serbest titreşim için dış kuvvet $f(x,t)=0$ olduğundan, (4.28) denklemi;

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad (4.29)$$

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (4.30)$$

(4.30) denklemini (4.29) denkleminde yerine koyarsak;

$$c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad (4.31)$$

4.1.2.1 Matematik modelin oluşturulması

Hareket denkleminin zamana göre ikinci türevi alınması gerektiğinde ya da konuma (x) göre dördüncü türevi alınması gerektiğinde iki başlangıç koşulu ve dört sınır şartı gereklidir. $w(x,t)$ denklemi için genellikle eğilme titreşimleri $w_0(x)$ ve hız değeri de $\dot{w}_0(x)$ zamanın sıfır olması durumunda;

$$w(x, t = 0) = w_0(x) \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}(x, t = 0) = \dot{w}_0(x) \quad (4.33)$$

4.1.2.2 Serbest titreşimler

Değişkenlere ayırma metodu ile serbest titreşim denklemi çözülebilir.

$$w(x, t) = W(x)T(t) \quad (4.34)$$

(4.34) denklemi (4.31) denkleminde yerine koyularak;

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = 0 = a = \omega^2 \quad (4.35)$$

$a = \omega^2$ pozitif değişken

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (4.36)$$

(4.36) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) = 0 \quad (4.37)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} - \omega^2 T(t) = 0 \quad (4.38)$$

(4.36) denkleminin çözümü aşağıdaki gibidir.

$$T(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

A ve B sabitleri başlangıç koşullarını kullanarak hesaplanır.

$$W(x) = C e^{st} \quad (4.39)$$

C ve s değerleri sabit değerlerdir. Bu durumda (4.39) denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$s^4 - \beta^4 = 0 \quad (4.40)$$

Bu denklemin kökleri

$$s_{1,2} = \pm \beta \quad (4.41)$$

$$s_{3,4} = \pm i\beta \quad (4.42)$$

(4.41) ve (4.42) denklemleri kullanılarak (4.39) denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$W(x) = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + C_3 e^{i\beta x} + C_4 e^{-i\beta x} \quad (4.43)$$

C_1, C_2, C_3 ve C_4 denklemin sabitleridir.

(4.43) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

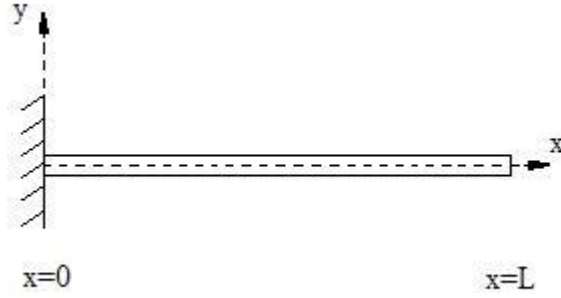
$$W(x) = C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x) + C_3 \cosh(\beta x) + C_4 \sinh(\beta x) \quad (4.44)$$

C_1, C_2, C_3 ve C_4 denklemin sabitleridir. Bu sabitler başlangıç koşullarını kullanarak hesaplanır.

(4.36) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir. Kirişin doğal frekansları bu denklem yardımıyla hesaplanır.

$$\omega_n = \beta_n \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, n = 1, 2, \dots \quad (4.45)$$

4.1.2.3 Bir tarafından ankastre mesnetli sabit kesitli kirişin doğal frekanslarının teorik olarak hesaplanması



Şekil 4.6 Bir Tarafından Ankastre Mesnetli Kiriş

Değişkenlere ayırma metodu ile doğal frekanslar hesaplanır.

$$w(x,t) = (C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x) + C_3 \cosh(\beta x) + C_4 \sinh(\beta x)) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t))$$

Sınır şartları:

$$w(0,t) = 0 \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0,t) = 0 \quad (4.47)$$

Kirişin ankastre mesnetli tarafında, (4.46) denklemi düşey yer değiştirmenin sıfır olduğunu ve (4.47) denklemi de dönmenin (açısal yer değiştirme) sıfır olduğunu göstermektedir.

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(L, t) = 0 \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \bigg|_{x=L} = 0 \quad (4.49)$$

Kirişin serbest tarafında, (4.48) denklemi eğilme momentinin sıfır olduğunu ve (4.49) denklemi de kesme kuvvetinin sıfır olduğunu göstermektedir.

$$w(0,t) = (C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0 + C_3 \cosh 0 + C_4 \sinh 0) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (4.50)$$

$$w(0,t) = (C_1 + C_3) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (4.51)$$

$$C_1 + C_3 = 0 \quad (4.52)$$

(4.52) denklemi 1. sınır şarttır.

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (4.53)$$

$$\beta(-C_1 \sin 0 + C_2 \cos 0 + C_3 \sinh 0 + C_4 \cosh 0) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = \beta(C_2 + C_4) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (4.54)$$

$$C_2 + C_4 = 0 \quad (4.55)$$

(4.55) denklemi ikinci sınır şartıdır.

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) = 0 \quad (4.56)$$

$$(-C_1 \beta^2 \cos(\beta l) - C_2 \beta^2 \sin(\beta l) + C_3 \beta^2 \cosh(\beta l) + C_4 \beta^2 \sinh(\beta l)) (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t))$$

$$(-C_1 \cos(\beta l) - C_2 \sin(\beta l) + C_3 \cosh(\beta l) + C_4 \sinh(\beta l)) = 0 \quad (4.57)$$

(4.57) denklemi üçüncü sınır şartıdır.

$$\left(EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(l, t) \right)_{(l, t)} = 0 \quad (4.58)$$

$$(C_1 \sin(\beta l) - C_2 \cos(\beta l) + C_3 \sinh(\beta l) + C_4 \cosh(\beta l)) \beta^3 EI (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0$$

$$(C_1 \sin(\beta l) - C_2 \cos(\beta l) + C_3 \sinh(\beta l) + C_4 \cosh(\beta l)) = 0 \quad (4.59)$$

(4.59) denklemi 4. sınır şartıdır.

Çözüm için bu dört denklemden C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 sabitlerinin katsayılarının determinantının sıfır olması gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\cos(\beta l) & -\sin(\beta l) & \cosh(\beta l) & \sinh(\beta l) \\ \sin(\beta l) & -\cos(\beta l) & \sinh(\beta l) & \cosh(\beta l) \end{bmatrix} = 0 \quad (4.60)$$

$$2(1 + \cos(\beta l) \cosh(\beta l)) = 0 \quad (4.61)$$

$$\cos(\beta l) \cosh(\beta l) = -1 \quad (4.62)$$

$$\cos(\beta_n l) \cosh(\beta_n l) = -1$$

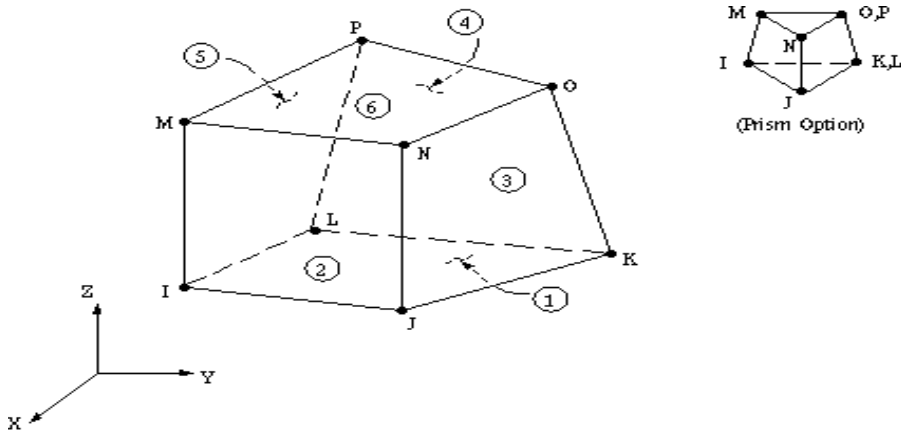
5. AKILLI ÇUBUĞUN SONLU ELEMENLAR MODELİ

Bu bölümde, üzerinde bir sensör ve iki aktüatör piezoelektrik seramik bulunan bir ankastre alüminyum çubuğun ANSYS sonlu elemanlar ile modellenmesi incelenecektir. Modelleme yapılırken, piezoelektrik seramik SOLID5, alüminyum çubuk SOLID45 elemanları ile programa tanıtılmıştır. Piezoelektrik malzemenin özelliklerini programa tanıtmak için üretici tarafından sağlanan veriler aynen programa girilemez. Bu değerler, uygun yöntemler kullanılarak programa uygun değerler ile değiştirilmiştir

5.1 ANSYS Modelleme Elemanları

5.1.1 Solid 5

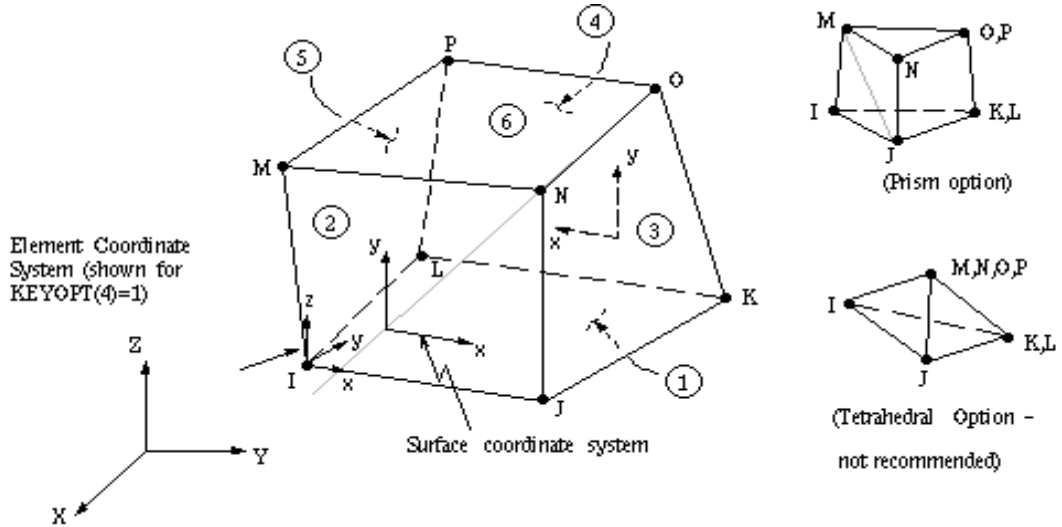
SOLID5, 3 boyutlu manyetik, termal, elektrik, piezoelektrik ve alanlar arasında sınırlı eşleşmeli yapısal alan kapasitesine sahiptir. Eleman, her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi olmak üzere toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Statik analizde magnetostatik alanların modellenmesi için sayısal potansiyel formüller (reduced RSP, difference DSP, veya general GSP) uygulanabilir. Benzer alan kapasitelerine sahip eşleşmeli alan elemanlar: PLANE13, SOLID62 ve SOLID98'dir. Şekil 5.1'de, bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimleri ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Eleman, 8 düğüm noktası ve malzeme özellikleriyle tanımlanır (ANSYS – Help)



Şekil 5.1 ANSYS Programındaki SOLID5 Elemanı

5.1.2 Solid 45

SOLID45, katı yapıların 3-boyutlu modellenmesinde kullanılır. Eleman, her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi (x, y, z yönlerinde yer değiştirme) olmak üzere toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Eleman, plastiklik, sünme, genişleme, gerilme katılaşması, büyük sehim ve büyük şekil değiştirme yeteneklerine sahiptir. Anizotropik özelliklere sahip benzer bir eleman ise SOLID64'tür. SOLID45'in yüksek düzenli bir çeşidi ise SOLID95'tir.



Şekil 5.2 ANSYS Programındaki SOLID45 Elemanı

Şekil 5.2'de, bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimleri ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Eleman, 8 düğüm noktası ve ortotropik malzeme özellikleriyle tanımlanır. Ortotropik malzeme yönleri elemanın koordinat yönleri ile ilişkilidir. Elemanın koordinat sistemi oryantasyonu, kartezyen koordinat sistemlerinde açıklandığı gibidir. (ANSYS – Help)

5.2 Piezoelektrik Malzeme Değerleri Dönüşümü

PZT gibi piezoelektrik seramiklerin malzeme özelliklerinin dönüşümü, üretici firmanın verdiği veriler ile ANSYS için gereken format arasında değişiklik olduğu için birçok kullanıcının kafasının karışmasına neden olur. Bu bölüm bunu açıklığa kavuşturmayı ve okuyuculara dönüşüm rutinleri hakkında bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

1. kısım genel esas denklemlerini özetler ve ilerideki irdellemeler için çerçeveselendirir. 2-5 arası kısımlar, üreticinin verisini, rijitlik matrisi, dielektrik sabitler ve piezoelektrik sabitler olarak ANSYS verisine çevirmeyi kapsar (Imaoka, 1999).

5.2.1 Temel Bilgiler

Dönüşüm rutinlerine geçmeden önce, piezoelektrik malzemelerin temel esas ilişkileri özetlenecektir (Imaoka, 1999).

T = mekanik gerilim

S = mekanik genleme

D = elektrik yer değiştirilmesi (ANSYS'te electric flux density olarak da anılabilir)

E = elektrik alan

Yukarıdaki notasyon (bütün büyük harfler), hem değişkenler (vektörler), hem de özelliklerin değerlerini belirten üst indis olarak kullanılacaktır.

Genellikle üretici tarafından verilen esas ilişki aşağıdaki şekildedir:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (5.1)$$

$$\{D\} = [d]^t \{T\} + [\epsilon^T]\{E\} \quad (5.2)$$

Burada;

$\{T\}$ = gerilme vektörü (altı öğeli x, y, z, yz, xz, xy)

$\{S\}$ = genleme vektörü (altı öğeli x, y, z, yz, xz, xy)

$\{D\}$ = elektrik yer değiştirme vektörü (üç öğeli x, y, z)

$\{E\}$ = elektrik alan vektörü (üç öğeli x, y, z)

$[s^E]$ = sabit elektrik alanda değerlendirilmiş uyum matrisi (örneğin: kısa devre)

$[d]$ = genleme/elektrik alanla ilgili piezoelektrik matrisi

$[d]^t$ = genleme/elektrik alanla ilgili piezoelektrik matrisi (transpoze)

$[\epsilon^T]$ = sabit gerilmede değerlendirilmiş dielektrik matrisi (örneğin: mekanik olarak serbest)

Diğer taraftan, ANSYS verilere aşağıdaki şekilde ihtiyaç duyar:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (5.3)$$

$$\{D\} = [e]^t \{S\} + [\epsilon^S]\{E\} \quad (5.4)$$

Burada;

$\{T\}$ = gerilme vektörü (altı öğeli x, y, z, xy, yz, xz)

$\{S\}$ = genleme vektörü (altı öğeli x, y, z, xy, yz, xz)

$\{D\}$ = elektrik yer değiştirme vektörü (üç öğeli x, y, z)

$\{E\}$ = elektrik alan vektörü (üç öğeli x, y, z)

$[c^E]$ = sabit elektrik alanda değerlendirilmiş rijitlik matrisi (örneğin: kısa devre)

$[e]$ = gerilme/elektrik alanla ilgili piezoelektrik matrisi

$[e]^t$ = gerilme/elektrik alanla ilgili piezoelektrik matrisi (transpoze)

$[\epsilon^S]$ = sabit genlemede değerlendirilmiş dielektrik matrisi (örneğin mekanik olarak kenetlenmiş)

Denklem 5.1 ve 5.2 şeklinde verilen üreticinin verisini, denklem 5.3 ve 5.4 şeklinde ANSYS notasyonuna çevirmek için, denklem 5.1'in genleme yerine gerilmeyi temel alması gerekir. Aşağıdaki ayarlamalar yapılabilir:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (5.5)$$

$$[s^E]\{T\} = \{S\} - [d]\{E\} \quad (5.6)$$

$$\{T\} = [s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\} \quad (5.7)$$

Denklem 5.2 elektrik yer değiştirmesini gerilme yerine genleme bağladığı için, denklem 5.7 denklem 5.2 içine koyulabilir:

$$\{D\} = [d]^t \{T\} + [\epsilon^T]\{E\} \quad (5.8)$$

$$\{D\} = [d]^t ([s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\}) + [\epsilon^T]\{E\} \quad (5.9)$$

$$\{D\} = [d]^t [s^E]^{-1}\{S\} + ([\epsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1}[d])\{E\} \quad (5.10)$$

Denklem 5.7 ve 5.10'un denklem 5.3 ve 5.4 ile karşılaştırılması ile, üretici verisi ile ANSYS için gerekli değerler arasındaki ilişki elde edilebilir.

$$[c^E] = [s^E]^{-1} \quad (5.11)$$

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1}[d] \quad (5.12)$$

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (5.13)$$

Bu denklemler temel dönüşüm rutinlerinin temelini oluşturacaktır. Dikkate alınmalıdır ki, üretici verileri $\{x, y, z, yz, xz, xy\}$ formunda mekanik vektöre sahipken, ANSYS'in mekanik vektörü $\{x, y, z, xy, yz, xz\}$ formundadır.

5.2.2 Rijitlik/uyum matrisi

Kullanıcının gerilme-genleme verisini girmesi için 3 yol vardır. Ortotropik malzeme özelliklerini (EX, NUXY, GXY) girmek için MP komutları kullanılabilir, veya kullanıcı TB,ANEL komutu kullanarak bir anizotropik elastik matrisi (rijitlik veya uyum matrisi olarak) girebilir.

Polarizasyonun 3-ekseninde (z-ekseni) olduğu varsayılırsa, kullanıcı, üretici verisini ANSYS için uyum matrisi oluşturmak üzere değiştirebilir:

$$[s^E] = [c^E]^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & s_{66}^E & 0 & 0 \\ & & & & s_{44}^E & 0 \\ & & & & & s_{44}^E \end{bmatrix}$$

Eğer s_{66}^E değerine ulaşılamıyorsa, $s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E)$ formülüyle bulunabilir. Dikkate alınması gereken, eğer kullanıcı rijitlik matrisi girmek istiyorsa $[c^E] = [s^E]^{-1}$ değerini hesaplamalıdır. Kullanıcının, bunu ileriki bölümlerde anlatılacak diğer sabitleri bulmak için hesaplaması gerekecektir. Matris Microsoft Excel programında MINVERSE komutu kullanılarak dönüştürülebilir. TB,ANEL komutu ile, herhangi bir matris (rijitlik matrisi veya uyum matrisi) girilebilir.

Veriyi uyum matrisi olarak girmek için kullanıcı aşağıdaki komutları kullanabilir:

TB,ANEL,1,1,,1 ! Malzeme numarası #1, 1 TEMP, TBOPT=1 (uyum matrisi girişi)

TBDATA, 1,se11,se12,se13 ! birinci satır girilir

TBDATA, 7,se11,se13 ! ikinci satır girilir

TBDATA,12,se33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,16,se66 ! dördüncü satır girilir

TBDATA,19,se44 ! beşinci satır girilir

TBDATA,21,se44 ! altıncı satır girilir

Yukarıdaki “se12” şeklindeki yazıları, uyum matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir.

Diğer taraftan, bu veriyi rijitlik olarak girmek için kullanıcı aşağıdaki komutları kullanabilir:

TB,ANEL,1,1,,0 ! Malzeme numarası#1, 1 TEMP, TBOPT=1 (rijitlik matrisi girişi)

TBDATA, 1,ce11,ce12,ce13 ! birinci satır girilir

TBDATA, 7,ce11,ce13 ! ikinci satır girilir

TBDATA,12,ce33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,16,ce66 ! dördüncü satır girilir

TBDATA,19,ce44 ! beşinci satır girilir

TBDATA,21,ce44 ! altıncı satır girilir

Yukarıdaki “ce12” şeklindeki yazıları, rijitlik matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir.

TB,ANEL kullanmaya alternatif bir metot ise MP komutlarını kullanmaktır. Polarizasyonun 3-ekseninde (z-ekseni) olduğu varsayılırsa, kullanıcı yine üretici verisini ANSYS verisine çevirebilir:

$$[D]^{-1} = [s^E] = [c^E]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & -\nu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ & & & & 1/G_{yz} & 0 \\ & & & & & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

Kullanıcı, yukarıdaki ilişkiyi kullanarak, rijitliği ortotropik MP komutları ile girebilir:

$$EX = \frac{1}{s_{11}^E} = EY \quad (5.14)$$

$$EZ = \frac{1}{s_{33}^E} \quad (5.15)$$

$$GXY = \frac{1}{s_{66}^E} = \frac{1}{2(s_{11}^E - s_{12}^E)} \quad (5.16)$$

$$GYZ = \frac{1}{s_{44}^E} = GXZ \quad (5.17)$$

$$NUXY = \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E} \quad (5.18)$$

$$NUYZ = \frac{s_{13}^E}{s_{33}^E} = NUXZ \quad (5.19)$$

Bu veriyi girmek için aşağıdaki komutlar kullanılabilir:

MP,EX ,1,1/se11 ! Malzeme numarası #1, Elastik modülü

MP,EY ,1,1/se11

MP,EZ ,1,1/se33

MP,NUXY,1,-se12/se11 ! küçük Poisson oranı

MP,NUYZ,1,-se13/se33

MP,NUXZ,1,-se13/se33

MP,GXY ,1,1/se66 ! kesme modülü

MP,GYZ ,1,1/se44

MP,GXZ ,1,1/se44s

Yukarıdaki “se12” şeklindeki yazıları, uyum matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir.

5.2.3 İletkenlik matrisi

Sabit genlemede değerlendirilen iletkenlik matrisi ANSYS’e girilir. Genellikle, üreticinin verisi sabit gerilmede değerlendirilmiştir. Bu nedenle bir dönüşüm gerekir. Denklem 5.12’de belirtildiği gibi, sabit genleme dayalı dielektrik sabitleri aşağıdaki ilişkiyle hesaplanabilir:

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \quad (5.20)$$

Kullanıcı, yukarıdaki denklem 5.12’yi değerlendirdikten sonra iletkenliği girebilir. İletkenlik matrisi sadece diyagonal maddelere sahiptir:

$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ & \epsilon_{11}^S & 0 \\ & & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} K_{11}^S & & \\ & K_{11}^S & \\ & & K_{33}^S \end{bmatrix}$$
$$K_{11}^S = \frac{\epsilon_{11}^S}{\epsilon_0} \quad (5.21)$$

ANSYS’te, kullanıcı iletkenlik değerini ϵ_{33}^T şeklinde kesin değer olarak veya K_{33}^T şeklinde bağıl değer olarak girebilirse de, bağıl değer önerilen seçimdir. Polarizasyonun 3-ekseninde (z-ekseni) olduğunu varsayarsak, bu, MP komutlarıyla aşağıdaki şekilde girilebilir:

EMUNIT,EPZRO,8.85e-12 ! boşluk (uzay) iletkenliğini belirtir

MP,PERX,1,eps11 ! Malzeme numarası #1

MP,PERY,1,eps11

MP,PERZ,1,eps33

Yukarıdaki “eps11” şeklindeki yazıları, bağıl iletkenlik matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir.

5.2.4 Yoğunluk girişi

Yoğunluğun herhangi bir değişikliğe ihtiyacı yoktur. MP komutuyla aşağıdaki gibi girilir:

MP,DENS,1,dens !Malzeme numarası #1

Yukarıdaki “dens” yazısını uygun yoğunluk değeriyle değiştirmek gereklidir.

5.2.5 Piezoelektrik sabit matrisi

Genellikle üreticinin verisi, mekanik genlemeyi elektrik alanla ilişkilendiren $[d]$ 'ye sahiptir. Bununla birlikte ANSYS, mekanik gerilmeyi elektrik alanla ilişkilendiren $[e]$ 'ye ihtiyaç duyar. Bu nedenle dönüşüm gereklidir.

Denklem 5.13, $[e]$ ile $[d]$ arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde kurmuştur:

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (5.22)$$

Burada, polarizasyon 3-ekseninde (z-doğrultusu) ve polarize edilmemiş doğrultularda simetri olduğu varsayılır ($d_{32} = d_{31}$ ve $d_{24} = d_{15}$):

$$[d]^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Daha önce de belirtildiği gibi, üreticinin verisi mekanik vektörü $\{x, y, z, yz, xz, xy\}$ olarak kabul eder. 4. Satırın 5. Satır ile yer değiştirmesi gerekir, ve aynı şekilde, satır 5 – satır 6, satır 6 – satır 4 ile yer değiştirir. Bu nedenle d_{15} ve d_{24} birer yana kaymıştır.

Kullanıcı, $[e]$ matrisini elde etmek için, $[d]$ matrisini, $[s^E]^{-1} = [c^E]$ ile kullanırsa aşağıdaki matrisi elde eder:

$$[d]^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Bu veriyi girmek için aşağıdaki komutlar kullanılabilir:

TB,PIEZ,1 ! Malzeme no #1, piezo matris

TBDATA, 3,e31 ! birinci satır girilir

TBDATA, 6,e31 ! ikinci satır girilir

TBDATA, 9,e33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,14,e15 ! beşinci satır girilir

TBDATA,16,e15 ! altıncı satır girilir

Yukarıdaki “e31” şeklindeki yazıları, piezoelektrik sabitlerinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir (Imaoka, 1999).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, piezoelektrik boya olarak da adlandırılan, 0-3 Seramik/Polimer piezoelektrik kompozitlerini geliştirme ve karakterize etme çalışmalarını içermektedir. Çalışmalarındaki başlıca amaç; teknolojik kolaylıkla birlikte maliyeti düşük ve pratik bir şekilde yapısal elemanlar üzerindeki titreşimleri algılayabilecek ve sensörlerde kullanılabilecek bir kompozit geliştirmektir. Bu bağlamda, piezoelektrik seramik olarak PZT, polimer olarak akrilik kullanılarak, sürülebilir bir piezoelektrik boya elde etmek hedeflenmiştir. Geliştirilen piezoelektrik boyanın polarizasyon karakteristiği belirlenmiş, sinyal performansı ölçülmüş, piezo ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir.

6.1 Ön Çalışmalar

Ön çalışmaları, geliştirilecek piezoelektrik boya için uygun ağırlık oranının, polarizasyon voltajının ve süresinin, uygulama tekniğinin, elektrot yapımının ve kurutma sürelerinin belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür. Literatürde yer alan çalışmalarda yukarıda sayılan noktalara ilişkin çok detaylı ve açık bilgiler mevcut değildir. Bu noktaların açığa kavuşturulması hem geliştirilecek piezo boyaların amacına ulaşabilmesi açısından hem de bundan sonra yapılabilecek çalışmalara zemin hazırlaması bakımından oldukça yararlıdır.

6.2 PZT Tozunun Hazırlanması

Piezoelektrik kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan PZT tozu (APC 856), APC firmasından temin edilmiştir. 856 Sensör uygulamaları için tercih edilebilecek yumuşak bir piezoelektrik seramiktir. Bu seramiğin özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. 856 başlıca; akışmetrelerde, kalınlık ölçüm cihazlarında, hidrofonlarda, mikrafonlarda, müzik pikaplarında, basınç sensörlerinde, hızlandırıcılarda, darbeli ateşleme sistemlerinde, hassas hareket kontrolünde, medikal amaçlı ultrasonik uygulamalarda ve aktuatörlerde kullanılmaktadır.

PZT tozları fırına yerleştirilmeden önce alümina fırın kapları içerisine hem hap şeklinde hem de toz olarak doldurulduktan sonra başka bir fırın kabı ile üzerleri kapatılmıştır. Tozları hap haline getirmek için mekanik el presi kullanılmıştır. Tozlar, takım çeliğinden imal edilmiş 1.2mm çapta boşluk içeren kalıpta 200psi kuvvet altında şekillendirilmiştir.

Çizelge 6.1: APC 856 PZT Piezoelektrik Seramiğinin Özellikleri
(APC International, 2006)

APC 856	
Relatif Dielektrik Sabiti (K^T)	4100
Dielektrik Kayıp Faktörü (%)*	2.7
Küri Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)**	150
Yoğunluğu (g/cm^3)	7.5
Mekanik Kalite Faktörü	72
Elektromekanik Çift Katsayısı (%)	
k_p	0.65
k_{33}	0.73
k_{31}	0.36
k_{15}	0.65
Piezoelektrik Yük Sabiti (10^{-12} C/N or 10^{-12} m/V)	
d_{33}	620
$-d_{31}$	260
d_{15}	710
Piezoelektrik Voltaj Sabiti (10^{-3} Vm/N or 10^{-3} m ² /C)	
g_{33}	18.5
$-g_{31}$	8.1
g_{15}	25
Young Modülü (10^{10} N/m ²)	
Y_{11}^E	5.8
Y_{33}^E	4.5
Frekans Sabitleri (Hz*m or m/s)	
N_L (longitudinal)	---
N_T (thickness)	1980
N_p (planar)	---
* 1 kHz’de	
**Maksimum çalışma sıcaklığı = Küri sıcaklığı/2	

Sinterleme işlemi *Proterm* yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. PZT tozları, 1320°C’de 150 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığına oda sıcaklığından 120 dakika süre içinde çıkmıştır. Sinterlemeden sonra oda sıcaklığına ise kontrollü bir şekilde 120 dakikada inilmiştir. Bu ısıtma ve soğutma prosedürü fırın özellikleri gözetilerek oluşturulmuştur. Fırından çıkan sinterlenmiş toz ve hapların bir kısmı ilk olarak seramik havan kullanılarak belirli bir boyutu kadar ufalanmıştır. Kalan hapların ise d_{33} ölçümleri için ayrılmıştır. Daha sonra sinterlenen PZT tozları, *Retsch PM 100* model mekanik öğütücüde 15 mm çelik toplar kullanılmak suretiyle 100 rpm devirde 30 dakika öğütülmüşlerdir. Öğütme sırasında cihazın sağlayabildiği en düşük devir ve buna istinaden yeteri kadar uzun bir süre tercih edilmiştir, çünkü yüksek

devirler öğütülen tozların öğütme kabının çeperine yapışmasına neden olmakta bu durum ise toz kaybına neden olmaktadır.



Şekil 6.1: PZT Tozunun Hazırlanması (a-c) Sinterlenen Tozlar (d-e) Öğütme İşlemi (f-i) Eleme ve Saklama

Öğütmeden çıkan sinterlemiş tozlar $75\mu\text{m}$ (200mesh) elek kullanılarak elenmişlerdir ve $75\mu\text{m}$ 'dan daha büyük, yeteri kadar öğütülmemiş tozlar tekrardan bir öğütme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu döngü, en az oranda fireye ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Elenen tozlar nemden uzak, temiz ve ağzı kapaklı cam kavanoz içine konularak oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. PZT tozunun hazırlanması ile ilgili adımlar Şekil 6.1'de verilmiştir.

6.3 Numunelerin Hazırlanması

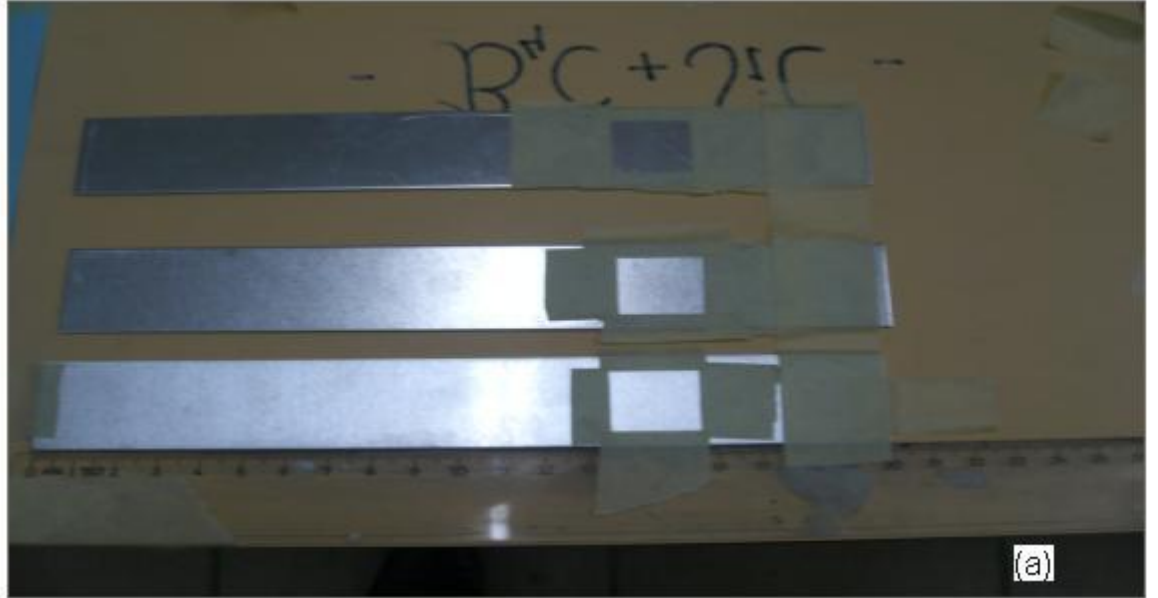
6.3.1 Alüminyum Sacların Hazırlanması

Piezoelektrik boya karışımları, 1mm kalınlığa 30mm genişliğe ve 200mm uzunluğa sahip alüminyum saclar üzerine uygulanmıştır. Bu saclar, piyasadan temin edilen kalınlık ve genişliğe sahip 400mm uzunluktaki alüminyum sacların ortadan ikiye

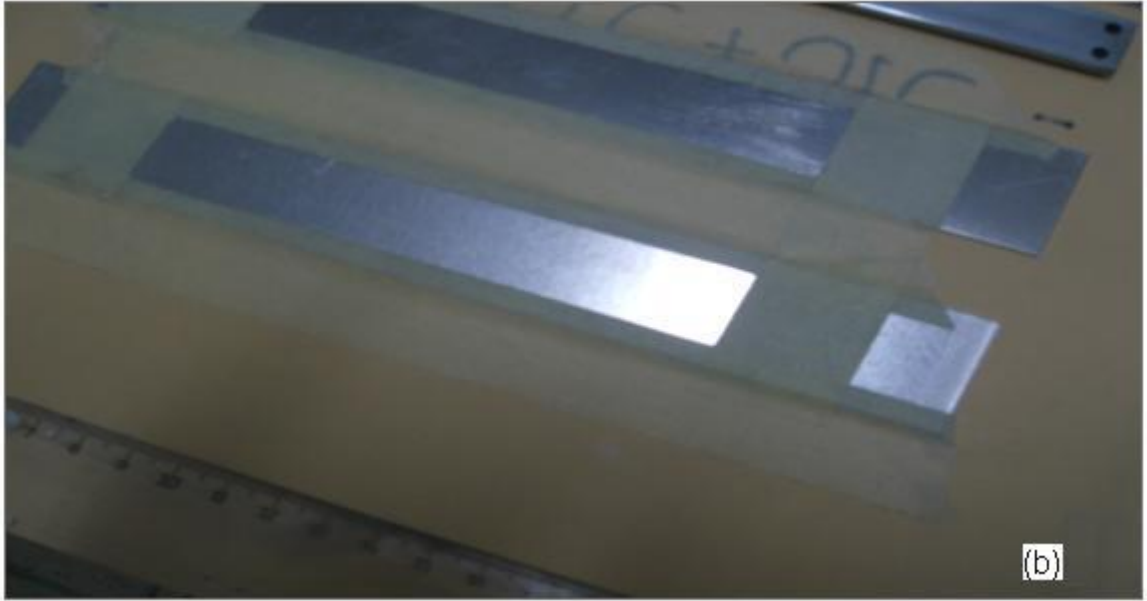
kesilmesiyle elde edilmiştir. Saf su ile saçların üzerinde bulunan talaşlar ve tozlar temizlenmiştir. Daha sonra yüzeyler alkolle silinerek yağlardan arındırılmıştır.

6.3.2 Maskeleme

Piezoelektrik boya, hazırlanan alüminyum saçların alt ve üst yüzeylerine yaklaşık olarak 20x20x0.3mm ve 160x20x0.3mm boyutlarında uygulanmıştır. Numunelerin boyutları maskeleme batları kullanılarak standartlaştırılmıştır. Yaklaşık 300 μ m kalınlık elde edebilmek için 50mm'lik standart bir maskeleme bandından 30cm uzunlukta, 3 tane üst üste yapıştırılarak sağlanmıştır. Daha sonra üst üste yapıştırılan batların üzerine numunelerin kalınlık ve genişliğini ayarlamak için hazırlanan kılavuz çizgilerinin bulunduğu bant yapıştırılmıştır. Maskeleme ile ilgili resimler Şekil 6.2'te verilmiştir.



Şekil 6.2: Maskeleme resimleri sensör için.

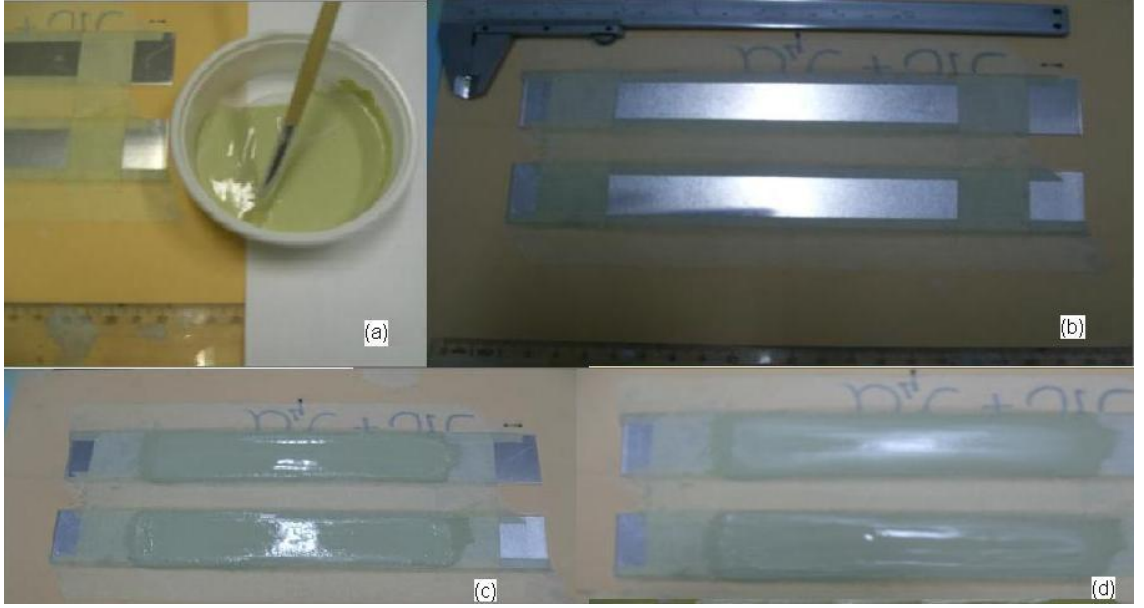


Şekil 6.3: Maskeleme resimleri aktuatör için.

6.3.3 Piezoelektrik (Boyarın) Kompozitlerin Hazırlanması ve Uygulanması

Piezoelektrik kompozitin (boyarın) hazırlanmasından önce alüminyum saclar üzerine maskeleme bandı hazırlanarak oluşturulmuş olan numune hazneleri konumlandırılmıştır. Konumlandırma işlemi sinyal performans testlerini gerçekleştirmek üzere tasarlanan düzenekte, en yüksek elektrik sinyalini üretmek amacıyla, sacın sabitlendiği nokta düşünülerek gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sacın 40mm'si sabitleme işlemi için ayrıldıktan sonra 10mm öteye numune gelecek şekilde bantlar yapıştırılmıştır (Şekil 6.3).

Ağırlıkça %80PZT-%20Akrilik içeren karışımlar hazırlamak için, 0.001g hassaslığa sahip, *Precisa XB 220 A* model hassas terazi kullanılmıştır. Darası alınan plastik bir hazneye gerekli oranda PZT konulduktan sonra, 2,5ml'lik tek kullanımlık şırınga yardımıyla oranı tamamlayacak kadar akrilik ilave edilmiştir. Akrilik, şırıngaya çekilmeden önce iyice çalkalanmıştır. Karışım ince plastik bir çubuk kullanılarak homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırılmıştır.



Şekil 6.4: Piezoelektrik Boya Karışımının Hazırlanıp Uygulanması (a) Maskeleme İşlemi (c) Piezoelektrik Boyanın Uygulanışı (d) Piezo Boyanın Kuruması

Karışım, saclar üzerinde maskeleme bantları ile sınırlandırılmış bölgeye küt uçlu bir fırça yardımıyla sürülmüştür. PZT tozlarının çökmesini engellemek için çeşitli sürme teknikleri denenmiştir. Bu teknikler arasından en sonucu veren şu şekildedir; birinci kat uygulandıktan sonra yaklaşık 8-10 dakika beklenir. Bu süre akriliğin katılaşmaya başladığı süredir. Daha sonra diğer katlar sırasıyla uygulanarak, hem katların birbirlerine yapışması sağlanmıştır hem de çökmenin kısmen önüne geçilmiştir. Bu işlem istenilen kalınlık sağlanıncaya kadar devam etmiştir. Katlar arasındaki bekleme süresi, PZT/akrilik oranına bağlı olduğundan, değişiklik arz etmektedir. Yapılan gözlemler sonucu en uygun zaman, *dokunma kuruması* diye adlandırabileceğimiz kuruma evresine girmeden önceki evredir. Süre olarak bu evreye giriş ortam şartlarından ve karışım oranlarından birinci derecede etkilendiğinden belirli bir süre vermek oldukça zordur, ama 8-10 dakika bu süre için yeterli olmaktadır. Bu evreye girildiğinin en büyük işareti sürülen boyanın yüzeyini parlak halden mat hale geçmesidir. Eğer yüzey parlakken, yani halen sıvı iken, bir sonraki kat atılmaya çalışılırsa, hem daha önceki kat hasara uğramakta hem de istenilen kalınlığa ulaşmak zorlaşmaktadır. Ayrıca önceki kattan kopan yarı kuru yarı ıslak parçalar boyanın sürülmesini zorlaştırmaktadır. Piezoelektrik boyanın hazırlanma aşamaları Şekil 6.4'te gösterilmektedir.

Numuneler, oda şartlarında 12 saatten az olmamak suretiyle kurutulmuşlardır. Kurutma işlemi yüzey elektrotunun yapılabilmesi ve polarizasyon için son derece

önemlidir. Yeteri kadar kurutulmayan numuneler, polarizasyon sırasında elektrik alanına dayanamayıp hasara uğramaktadırlar.

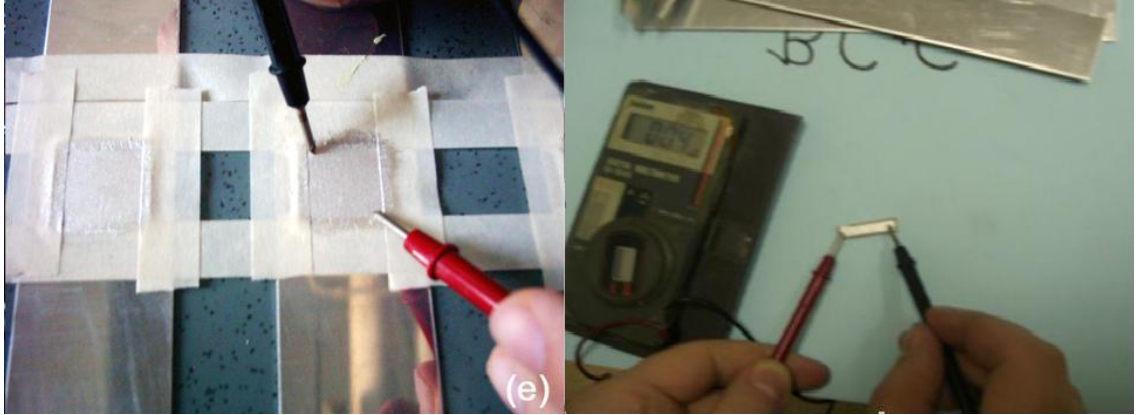
6.3.4 Yüzey Elektrotunun Hazırlanması

Numuneler alüminyum sac üzerine hazırlandığından, polarizasyon işlemi için alt elektrot hazırlamak gerekmemektedir. Fakat iletken olmayan yüzeyler üzerinde uygulama yaparken de yüzey elektrotunun hazırlanma şekli ile aynı prosedürde alt elektrot hazırlanabilir.

Numunelerin yüzeyine elektrod olarak iki uygulama yapıldı. Bunlardan birincisi gümüş iletken bant. Diğeri ise gümüş iletken boyadır. Her iki uygulamada da istenilen sonuçlar alınmıştır. Gümüş bandı kurumuş PZT boyanın üstüne yapıştırmak için uygun ebatlarda kesilir. Daha sonra da kesilen bant PZT boyanın üstüne yapıştırılır. Kullanım sırasında bandın çıkmasını engellemek için üzerine akrilik sürülür. İletken gümüş boyada ise istenilen ebatta sürmek için daha önce kullandığımız maskaleme batlarından yararlanılmıştır. Bu aşamada tek kat bant kullanarak çerçeve oluşturmak yeterlidir. Ön çalışmalar sırasında yüzey elektrotunun numunenin kenarlarına çok yakın yapılması durumunda polarizasyon sırasında kaçak akımların oluşmasıyla elektrik alanı kolayca bozulabilir olduğu fark edilmiştir. Bu durumun oluşmasına kenara yakın boyanın sızarak alt elektrot ile üst elektrot arasında iletkenliği sağlaması veya elektrotlar arasında akım atlaması neden olmaktadır. Alt elektrot ile üst elektrot arasında iletkenliğin sağlanması halinde numune üzerindeki elektrik alanın bozulmasının yanında, numuneler de kolayca hasara uğrayabilmektedir. Edinilen tecrübelerle dayanarak yüzey elektrotları numune kenarlarından yaklaşık 200µm içe hizalanmıştır ve yaklaşık 1.6x1.6 mm boyutlarında yüzey elektrotları oluşturulmuştur. İletken boyanın uygulanmasından sonra yüzeylerdeki iletkenlik (dirençölçer) multimetre kullanılarak kontrol edilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: Yüzey (üst) Elektodunu Hazırlanması (a-b) Gümüş Bandın Uygulanma şekli ve akrilik sürülmesi (c-d) Gümüş Boyanın Aktuatöre ve Sensöre Sürülmesi



Şekil 6.6: Yüzey (e) İletkenliğin Kontrol Edilmesi

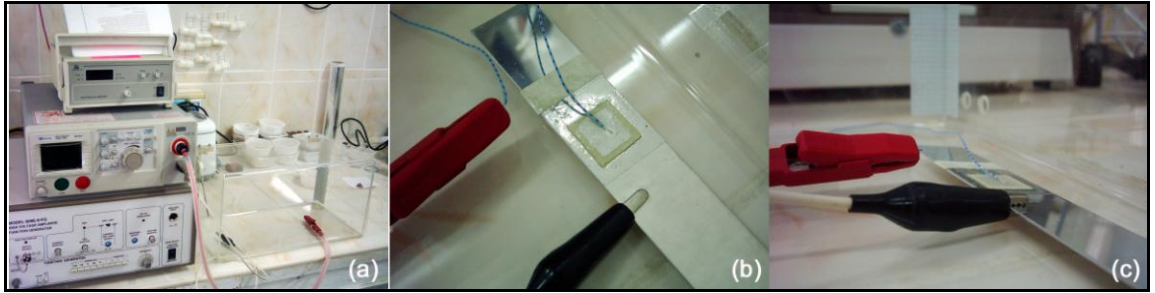
Numunenin üstüne yüzey elektodu oluşturmak için kullanılan gümüş boya yardımıyla yüzey elektrodunun kablosu da yerleştirilmiştir. Yüzey elektrotlarında, 7 telli yaklaşık 200 μ m çapında standart bir bakır kablolar kullanılmıştır. Yüzey elektrot kablosu için herhangi bir kurutma süresine ihtiyaç duyulmadan montajlama işlemine geçilebilir. Yalnız kablo monte edildikten sonra yerinden oynatılmadan oda şartlarında en az 5saat kurutma uygulanarak sertleşmesi sağlanmalıdır. Fakat 5 saat sonunda bile gümüş iletken boya yardımıyla monte edilen üst kablo kolayca kopabilmektedir. Hem bunu önüne geçmek hem de numunenin alüminyum sactan ayrılmadan kalabilmesi için piezoelektrik boyanın hazırlanmasında kullanılan

akrilikten bir katman oluşturulmuştur (Şekil 6.6). Bu katman, oda sıcaklığında en az 12 saat kurutulmuştur.

6.4 Polarizasyon

Polarizasyon işlemi, *GoodWill 815* yüksek voltaj üretici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon sırasında yüksek voltajlarla çalışıldığından güvenlik çok önemlidir. Buna yönelik olarak öncelikle cihaz topraklanmıştır ve pleksiglastan bir polarizasyon odası tasarlanmıştır. Ayrıca cihazın probları işlemi kolaylaştırmak için küçük timsah ağızlı kısıkaçlar ile değiştirilmiştir.

Polarizasyon için cihazın bir probları, Şekil 6.7’de de görüldüğü üzere, eksi kutup alüminyum saca, artı kutup yüzey elektrot kablosunda olacak şekilde bağlanmıştır. Polarizasyon işlemi sırasında problar hep aynı yere bağlanarak polarizasyon doğrultusunun standart kalması sağlanmıştır.



Şekil 6.7: Polarizasyon Aşaması (a) Polarizasyon Düzeneği (b-c) Polarizasyon İçin Numuneye Yapılan Bağlantılar

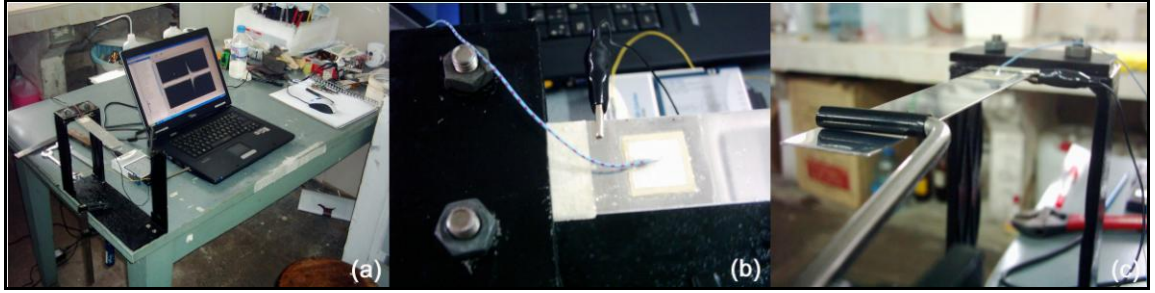
Ön çalışmalar dahilinde gerçekleştirilen deneylerde, %80 PZT-%20 akrilikten yapılan numunelerde, 0,3 mm kalınlık için 750V’den daha yüksek voltajlara çıkmak mümkün olamamıştır. Bu durum göz edilerek %80 PZT içeren numunelerin polarizasyonları; 250V, 500V ve 750V’de 60-2700 saniye arasında gerçekleştirilmiştir.

6.5 Sinyal Performans Testleri

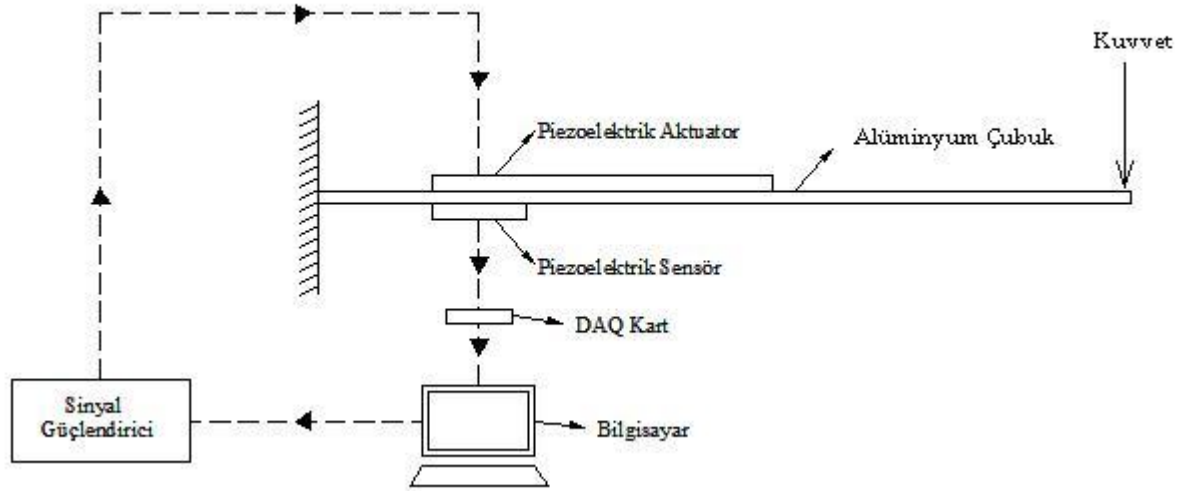
Polarize edilen numunelerin, sinyal performans testlerini gerçekleştirmek üzere kurulan düzenek Şekil 6.8’de verilmiştir. Bu düzenek yardımıyla farklı voltajlar ve süreler dahilinde polarize edilen numuneleri hep aynı noktadan bağlamak suretiyle aynı kuvveti uygulamak ve standart bir karşılaştırma yapmak mümkün olmuştur. Şekil 6.7’de verilen düzende titreştirilen numunelerden gelen sinyaller, National

Instruments'ın *USB 9221 DAQ* cihazı ve gene National Instrument'e ait olan *Measurement & Automation* ve *Signal Express* yazılımları yardımıyla toplanıp işlenmiştir.

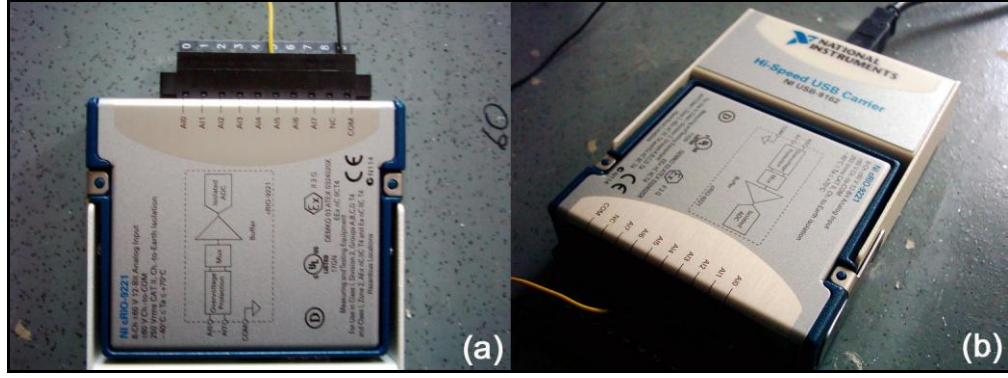
Numunelerin üst elektrot kabloları DAQ cihazının üzerinde bulunan 8 terminalinden birine bağlanmıştır (Şekil 6.8). Alt elektrot olarak kullandığımız alüminyum sac'lar ise DAQ'nun Com portuna bağlanmıştır (Şekil 6.8). Bağlantılara ilişkin örnek bir diagram Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.8: (a) Sinyal Performans Testleri İçin Kurulan Düzenek (b) Numunelerin Düzeneğe Bağlanması (c) Numune Üzerine Kuvvet Uygulayan Kol



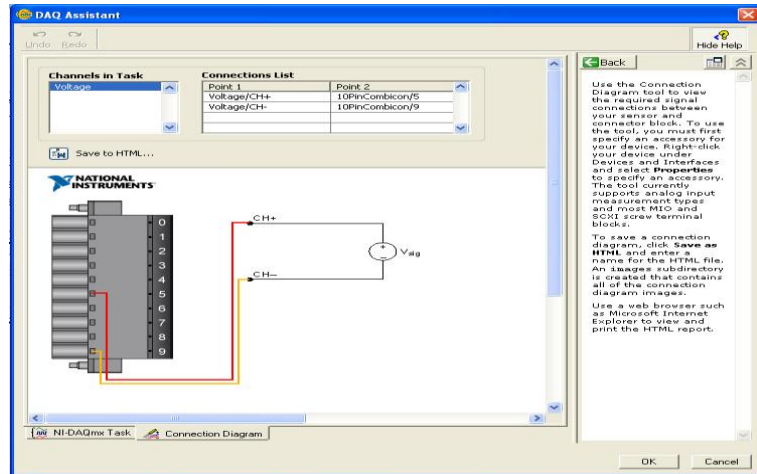
Şekil 6.9: Aktif Kontrol Testleri İçin Kurulan Şematik Düzenek



Şekil 6.10: DAQ Cihazı ve Terminalleri (a-b)

Sinyallerin kaydedilmesi DAQ cihazına bir arayüz ile erişebilmemizi sağlayan *Measurement&Automation* (Şekil 6.10) programı yardımıyla yapılmıştır. Bu test konfigürasyon ile uyguladığımız mekanik kuvvet sonucu oluşan titreşimle titreşen numunenin ürettiği elektrik sinyalini başarı ile ölçülmüştür.

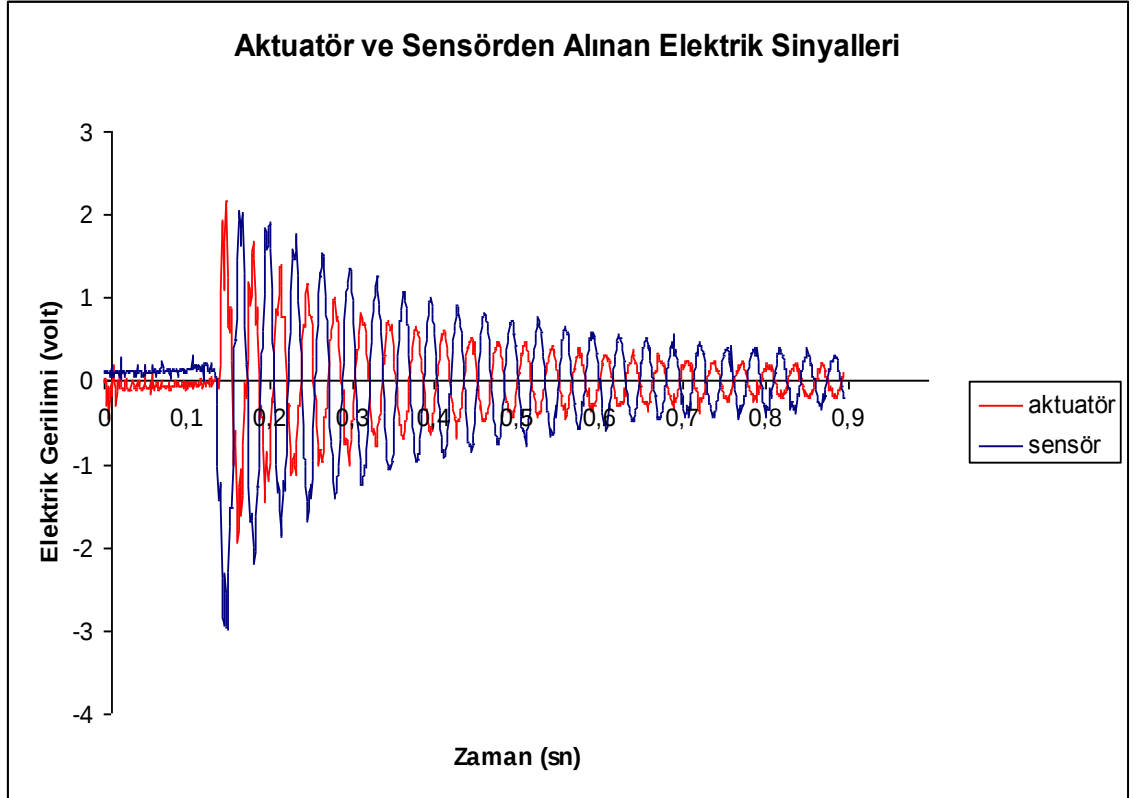
Uygulanan kuvvet sonucu oluşan elektrik sinyallerini değerlendirmek için kuvvetin uygulanmasından sonra geçen 0.1 saniyelik periyotta üretilen elektrik sinyalleri göz önüne alınmıştır. Kaydedilen sinyallerin 0.1 saniyelik periyotlarının ayıklanma işlemi *Signal Express* programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11). *Signal Express* programından, numuneye etkiyen kuvvet sonucu oluşan elektrik sinyallerinin maksimum ve minimum piklerinin belirlenmesinde de yararlanılmıştır.



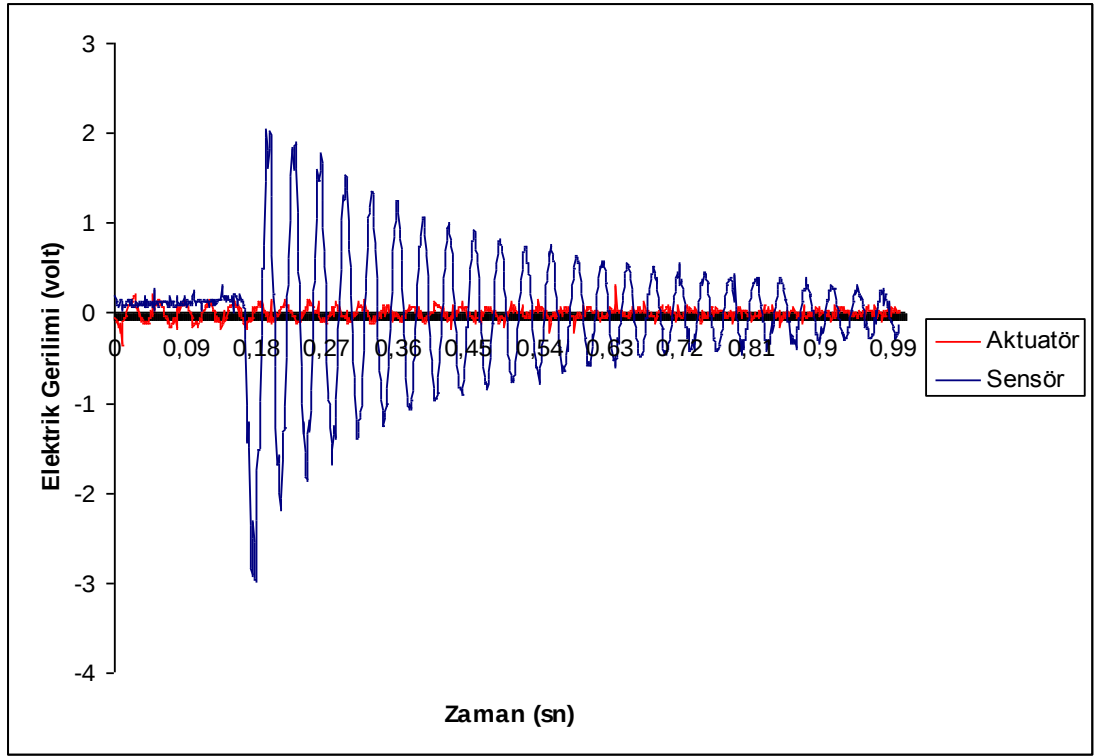
Şekil 6.11: DAQ Cihazı Bağlantı Şeması

6.6 Deney Sonuçları

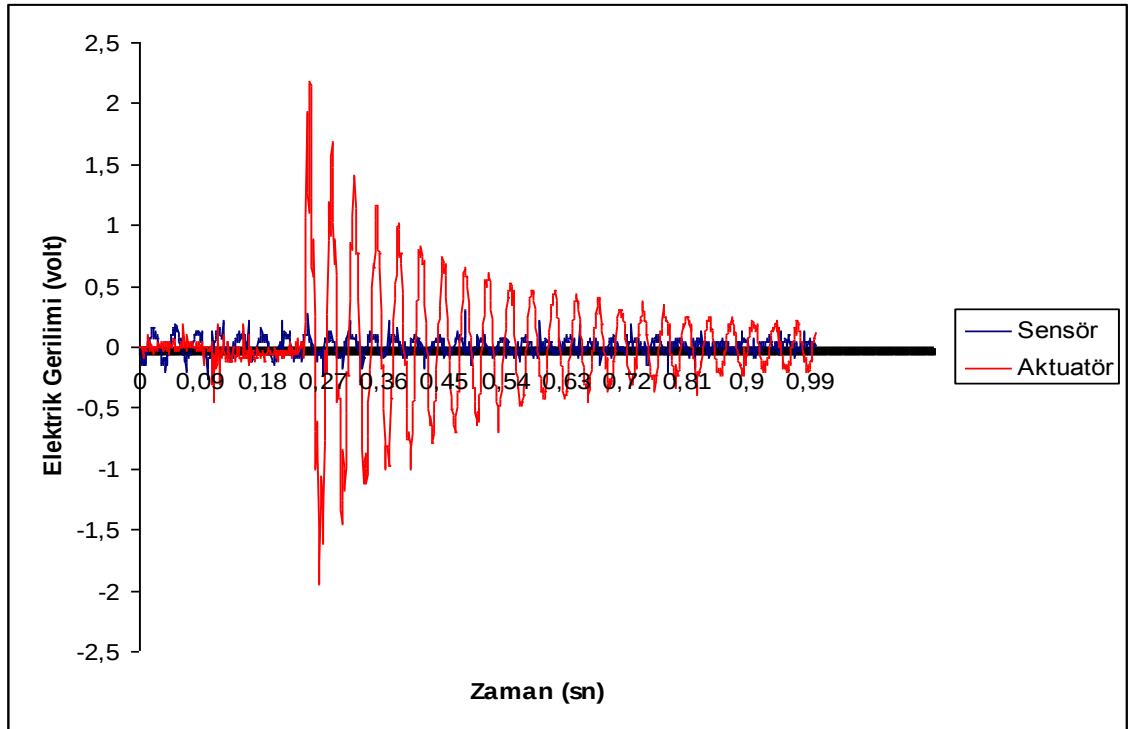
Yapılan çalışmalarda, kontrol makrosu ile sensörden gelen elektrik sinyalini güçlendirerek aktuatöre uygun elektrik gerilimi verip ankastre kirişin titreşimlerinin sönümlenmesi amaçlanıyordu. Ancak laboratuarda bulunan amplifier ile aktuatöre geri besleme ile verilen gerilim çok yüksek olduğundan aktuatörde yanmalar gerçekleşti. Bu nedenle kontrol sağlanamamıştır. Aşağıda ise deneyde kullandığımız ankastre kirişten elde edilen elektrik sinyalleri verilmiştir. Bu çalışmada üç tane numuneden elektrik sinyalleri okunabildi. Ancak aktuatör, istenilen voltaja dayanamadığından kontrol gerçekleştirilemedi. Bir numaralı numunenin hem aktuatöründen hem de sensöründen elektrik sinyali alınmıştır. Alınan sinyallerin birbiri ile ters yönlü olmasının sebebi aktuatörde çekme gerilmesi oluşurken çubuğun alt kısmında bulunan sensörde ise basma gerilmesi oluşmasıdır. İkinci numuneden sadece sensörden, üçüncü numuneden ise sadece aktuatörden sinyal alınabildi. Bunun sebebi ise laboratuvar ortamında hazırlanan numunelerin istenilen toleranslarda imalatının yapılamamasıdır.



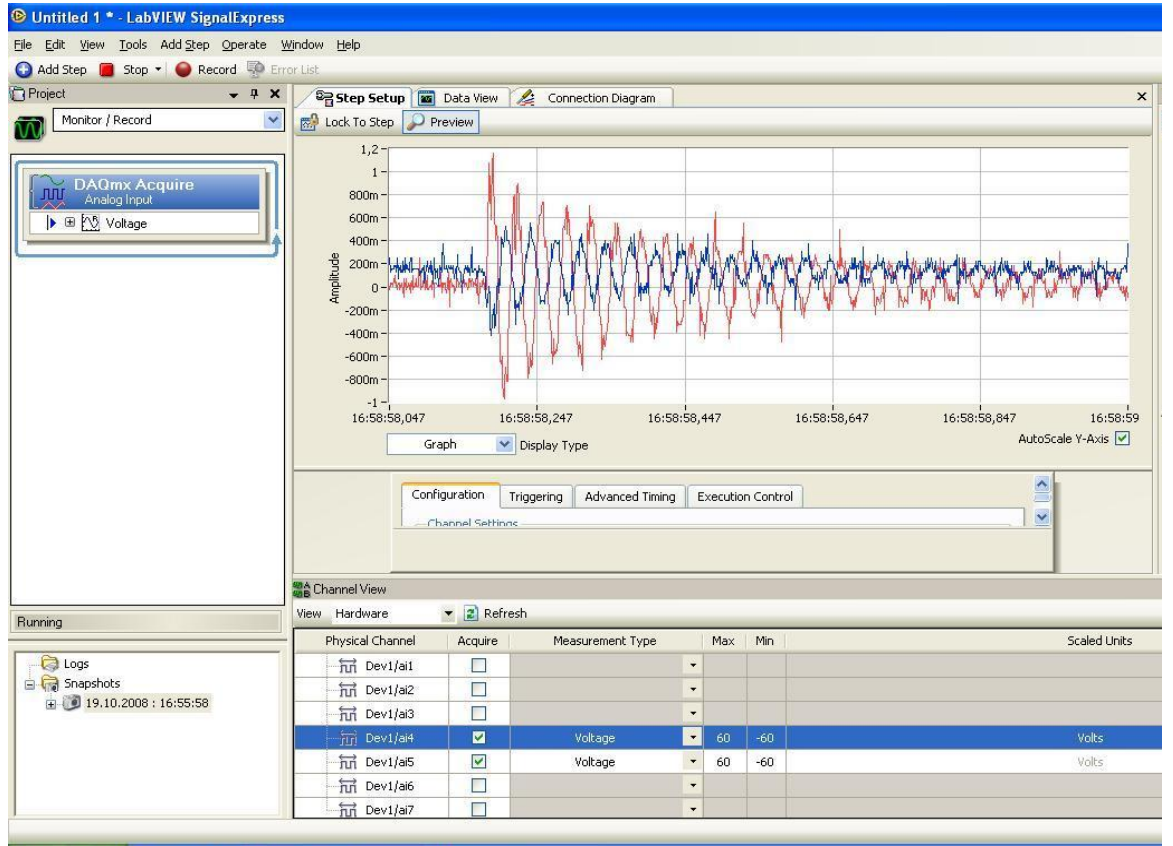
Şekil 6.12: Bir numaralı deney numunesinden alınan sinyaller



Şekil 6.13: İki numaralı deney numunesinden alınan sinyaller



Şekil 6.14: Üç numaralı deney numunesinden alınan sinyaller



Şekil 6.15: Signal Express programından bir görünüş. Kırmızı renkte olan aktuatör mavi renkte olan ise sensördür.

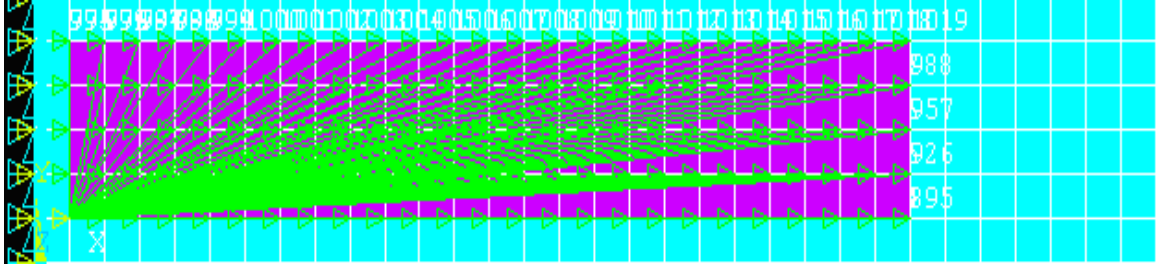
7. SAYISAL MODELLEME

7.1 Akıllı Çubuğun Modellenmesi

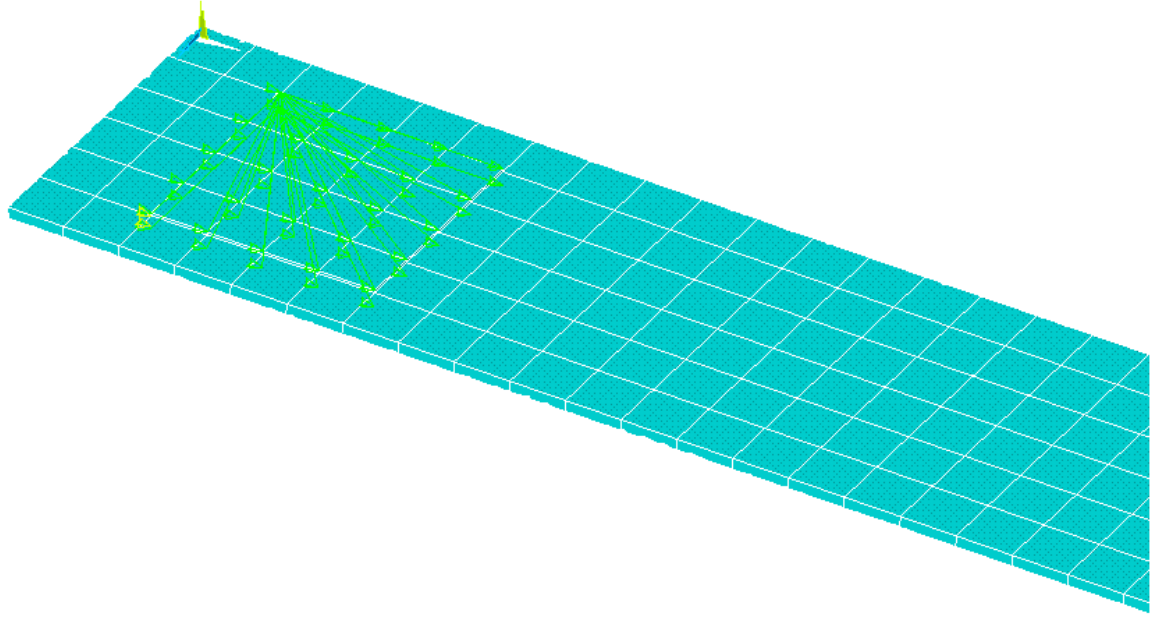
ANSYS 10 Programında grafik arabirim kullanılarak, üzerinde piezoelektrik seramik bulunan bir alüminyum çubuğun modellenmesi aşağıda adım adım anlatılmıştır:

1. "Preferences" bölümünden "Structural" ve "Electric" disiplinleri seçilir ve "h-Method" seçeneği işaretlenir.
2. "Preprocessor" kısmına girerek, eleman tipi olarak, alüminyum çubuk için "SOLID45" ve piezoelektrik malzeme için "SOLID5" eklenir. Aynı yerde "SOLID5" elemanının serbestlik derecesi olarak "UX UY UZ VOLT" seçilmelidir.
3. Alüminyum için gerekli malzeme özellikleri olan yoğunluk, poisson katsayısı, elastiklik katsayısı ile, piezoelektrik malzeme için gerekli olan yoğunluk, iletkenlik matrisi, rijitlik matrisi, piezoelektrik sabit matrisi programa tanıtılır.
4. Alüminyum çubuğu modellemek için öncelikle "Preprocessor – Modelling – Create – Volumes – Block – By Dimensions" seçilerek çubuğun boyutları metre cinsinden girilir (0,15x0,03x0,001m.) ve bir hacim oluşturulur.
5. PZT-akrilik karışımı (0,02x0,02x0,00025m.) sensör ve aktuatör çubuğun alt ve üst yüzeyinde olacak şekilde yerleştirilir.
6. Alüminyum çubuğu, sensörü ve aktuatörü programa önceden belirtilen malzeme olarak tanıtabilmek için ise "Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – Default Attribs" kısmından "Element type number" olarak SOLID45, "Material number" olarak alüminyum için girilen malzeme özelliklerinin numarası seçilir. Daha sonra da sensör ve aktuatör malzemeyi tanıtmak için, "Preprocessor – Modelling – Create – Elements – Elem Attributes" kısmında "Element type number" olarak "SOLID5", "Material number" olarak piezoelektrik için girilen malzeme özelliklerinin numarası seçilir.

7. Alüminyum çubuğa yerleştirilen sensör ve aktuatör henüz birbirlerine bağlı değildir. Bunun için iki işlem yapılabilir. Birincisi katı modeller birbirlerine yapıştırılabilir. “Preprocessor – Modelling – Operate – Booleans – Glue – Volumes” denilerek ekranda pick all seçilir ve ekranda birbirine temas eden bütün katılar yapıştırılmış olur. İkincisi ise bunları yapıştırma işlemi yapmadan, önceden oluşturulan nodlar birleştirilir. “Preprocessor – Numbering Ctrls – Merge Items” kısmında label olarak node seçilir ve başka işlem yapmadan sadece ok denilir. Biz bu çalışmada birinci yöntemi uygulayacağız.
8. “Preprocessor – Meshing – Size Controls – ManualSize – Global – Size” kısmına mesh elemanının boyutu metre cinsinden girilir.
9. Yapılan ayarları hacim şeklinde tanınan çubuğa aktarıp onu alüminyum malzemeye dönüştürmek için ise, son olarak “Preprocessor – Meshing – Mesh – Volumes – free” seçilerek çubuk mesh edilir.
10. Sistemi modellemek için son yapılması gereken işlem olarak, “Preprocessor – Coupling / Ceqn – Couple DOFs” seçilerek, piezoelektrik malzemenin üst ve alt alanındaki nodlar, her alan değişik bir “Set reference number” alacak şekilde “VOLT” serbestlik derecesinde birleştirilir.



Şekil 7.1 Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli (aktuatör)



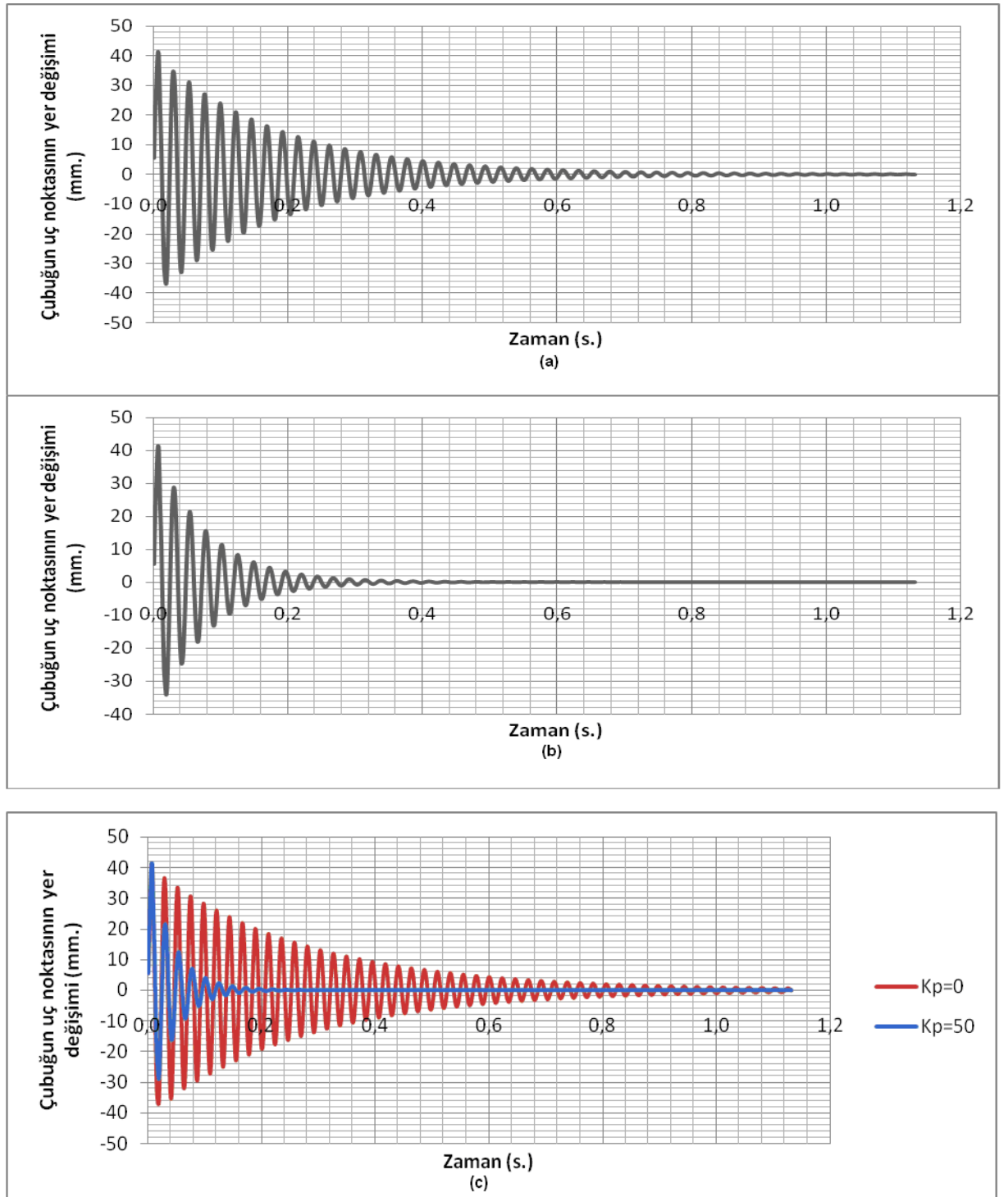
Şekil 7.2 Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli (sensör)

7.2 Serbest Titreşim İçin Aktif Kontrol

Ağırlıkça %100 PZT tozu içeren model alüminyum çubuğun alt ve üst yüzeylerine uygun bir şekilde yapıştırılır. (Yukarıda anlatılanlar deneysel çalışmalar kısmında detaylı olarak anlatılmıştır) ANSYS te çıkan sonuçlar şekil 7.3’ te gösterilmiştir.

Yukarıda anlatılan şekilde hazırlanan modeller üzerine aktif kontrol uygulamak için gerekli ANSYS makrosu açıklamalarıyla birlikte Ek A.1’de verilmiştir.

Bu makro, önce çubuğa modal analiz yaparak titreşim modlarını çıkartır. Bu modlardan ilkinin kullanarak daha sonra yapılacak transient analizdeki zaman aralığını belirler. Daha sonra çubukta belirlenen noktaya, belirlenen kuvveti bu zaman aralığında uygular. Bundan sonra kuvveti kaldırarak çubuğun titreşmesine izin verir. Çubuk titreşirken, her “dt” zamanında sensör piezoelektrikten sinyali alır, bu sinyali belirlenen güçlendirme katsayısıyla çarpar ve zıt yöndeki gerilimi aktüatörlere uygular. Bu sayede çubuk üzerine aktif kontrol uygulanmış olur.



Şekil 7.3 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun (%100 PZT) Serbest Titreşim Grafikleri (a)Kontrolsüz, (b) $K_p=50$, (c) Karşılaştırması

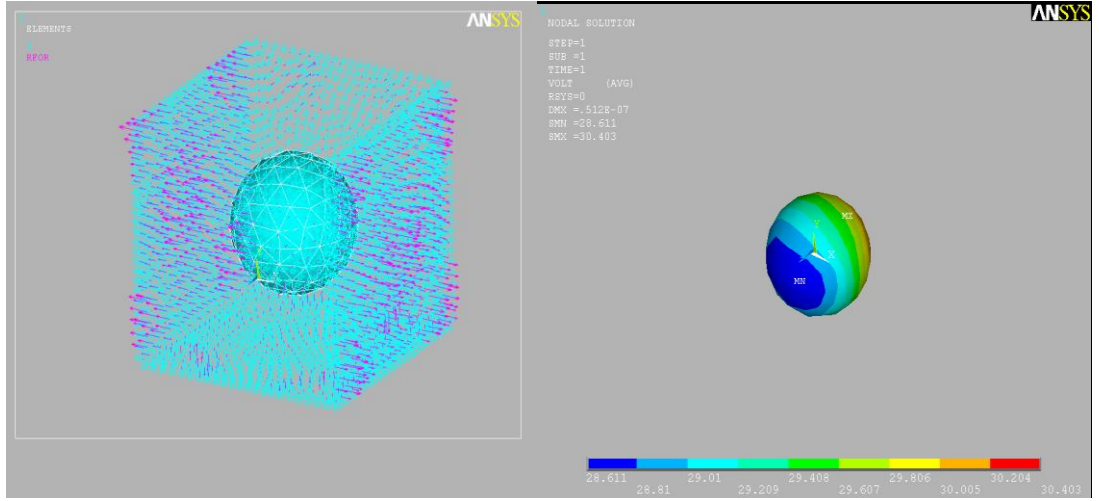
7.3 Malzemenin (PZT Kompozit) Sonlu Elemanlar Analizi

Ansysis 10.0 da yapılan bu çalışmada PZT-Akrilik karışımında PZT takviyenin ortam içindeki dağılım geometrisi Hacim Kübik ve Yüzey Merkezli Kübik olarak idealize edilmiştir. Hacim Merkezli ve Yüzey Merkezli olabileceği düşünülerek her iki durumda da analizler yapılmıştır. Piezoelektrik malzemenin (APC 856) yoğunluğunun 7,6 gr/cm³ olduğu bilinmektedir. Ağırlıkça %80 PZT - %20 Akrilik içeren karışımın teorik yoğunluğu 3.6 gr/cm³ tür. Ancak laboratuarda yapılan çalışmalarda PZT-Akrilik karışımının yoğunluğunun 2 gr/cm³ olduğu görülmüştür. Bu da malzemenin %42,5 kadar boşluklu bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Karışımındaki boşluk nedeniyle malzemenin Elastik modülü ve Poison oranı değişecektir. Bu amaçla akriliğin ortamda % 42,5 boşluk içermesi durumunda bu boşluğun idealize edilmiş halde Basit Kübik tarzında dağıldığı varsayılarak sonlu elemanlar analizleri ile boşluklu akriliğin E ve ν oranları hesaplanmıştır. Birim hücreler kirişin eğilmesi esnasında yüzeyde oluştuğundan $\epsilon = 0,88 \times 10^{-3}$ kadarlık çekme genlemesi uygulanmıştır. Boşluklu akriliğin beklenine uygun olarak elastiklik modülünün düştüğü, poison oranının ise arttığı görülmüştür.

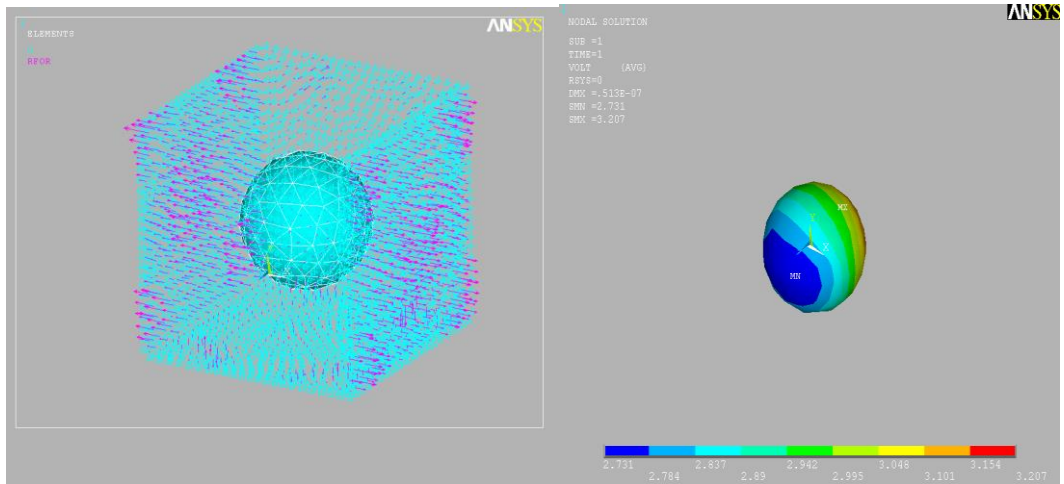
Bulgular şunlardır;

Teorik yoğunluğa göre hacim oranı	: %36 PZT, %64 Akrilik
Deneysel yoğunluğa göre hacim oranı	: %21 PZT, %36,5 Akrilik, %42,5 Boşluk
Boşluksuz Akrilik için Elastik Modülü (Normal)	: 2 Gpa
Boşluksuz Akrilik için Poison Oranı	: 0,4
Boşluklu Halde Akrilik için Elastik Modülü (zayıflatılmış)	: 0,5 Gpa
Boşluklu Halde Akrilik için Poison Oranı	: 0,43

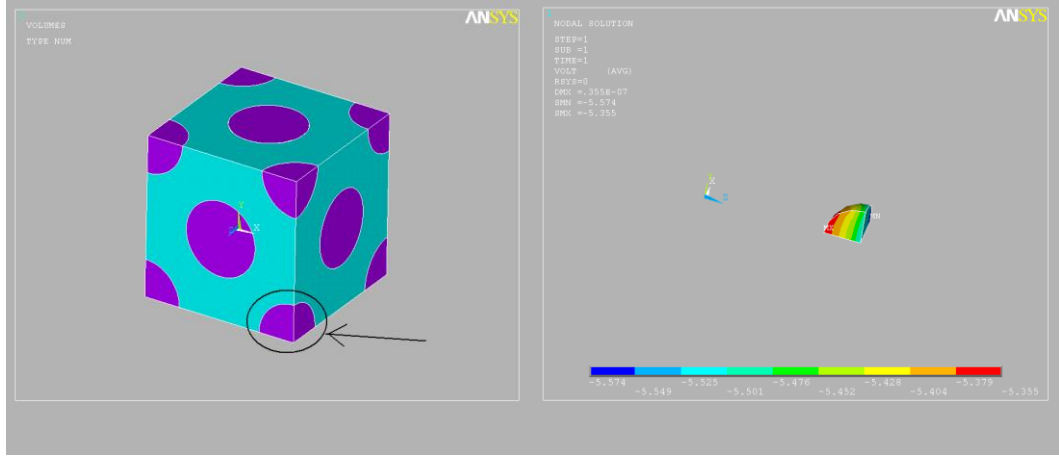
Yapılan çalışmada matris malzemesi için normal ve zayıflatılmış değerleri girilmiştir. Akrilik için normal malzeme değerleri kullanıldığında HMK ve YMK dağılımında kübün köşe noktalarda boşluklu olduğu varsayılarak model oluşturulmuştur. Zayıflatılmış değerler kullanıldığında modelde boşluk hacmi bulunmayacağı açıktır.



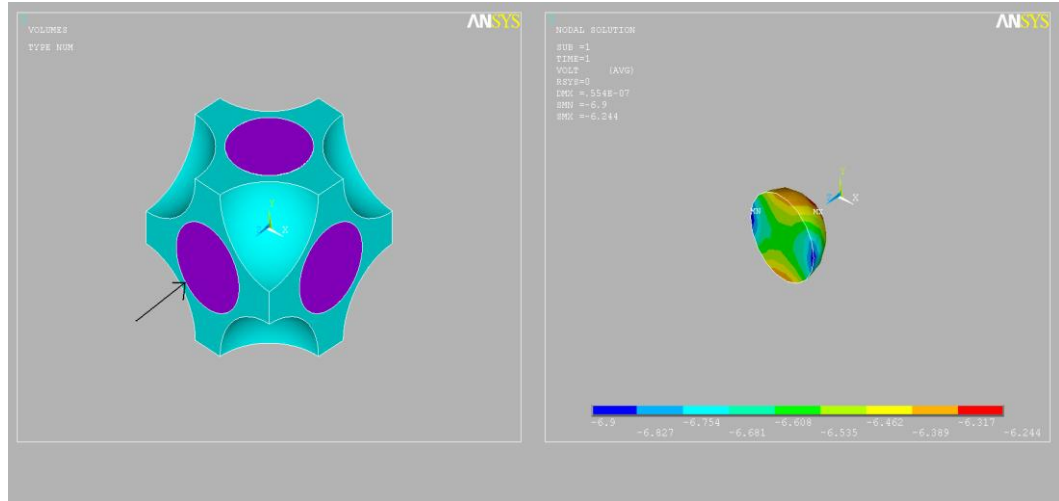
Şekil 7.4 Hacim Merkezli Boşluklu Kübik Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak elde edilen elektrik gerilimi değeri. (Max 30 volt)



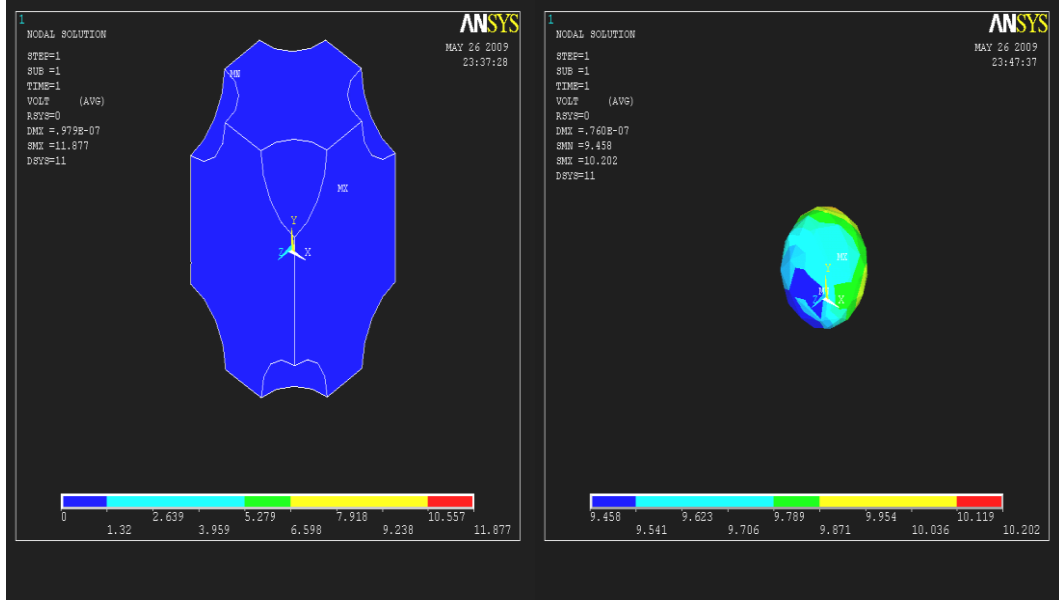
Şekil 7.5 Hacim Merkezli Boşluksuz Kübik Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak elde edilen elektrik gerilimi değeri. (Max 3,207 volt)



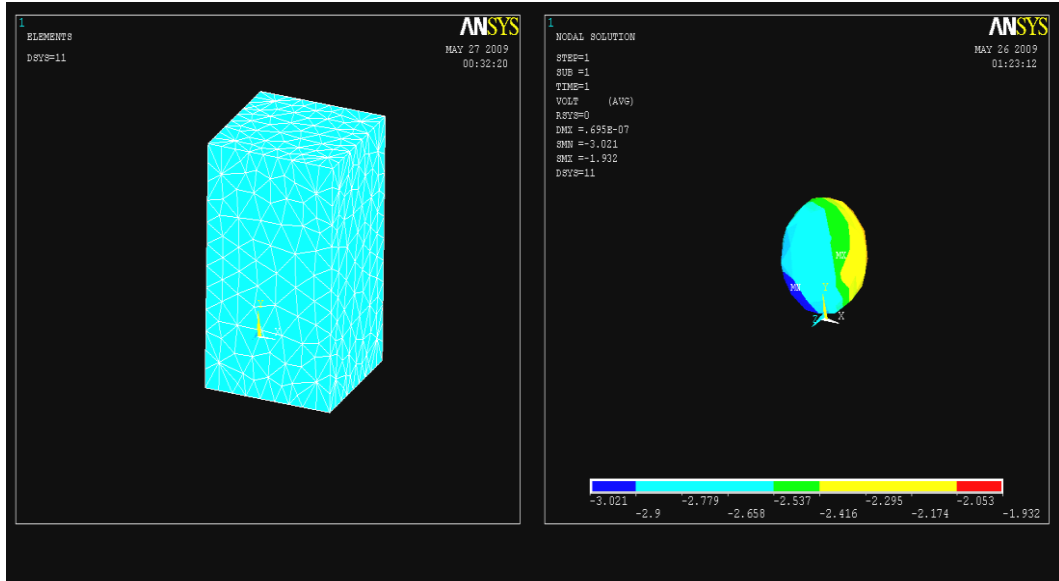
Şekil 7.7 Yüzey Merkezli Kübik Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri



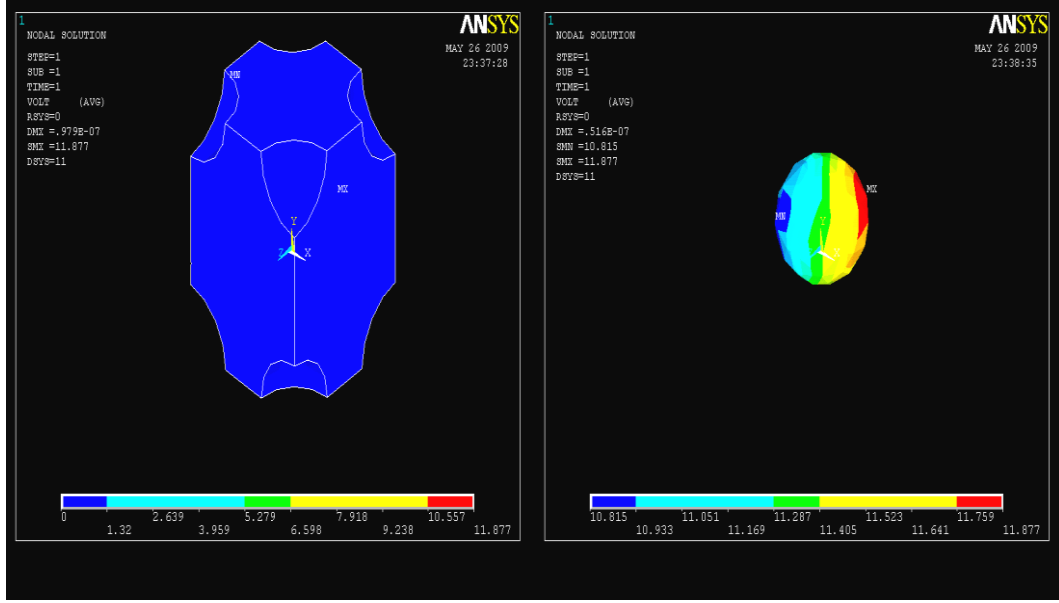
Şekil 7.8 Yüzey Merkezli Boşluklu Kübik Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri



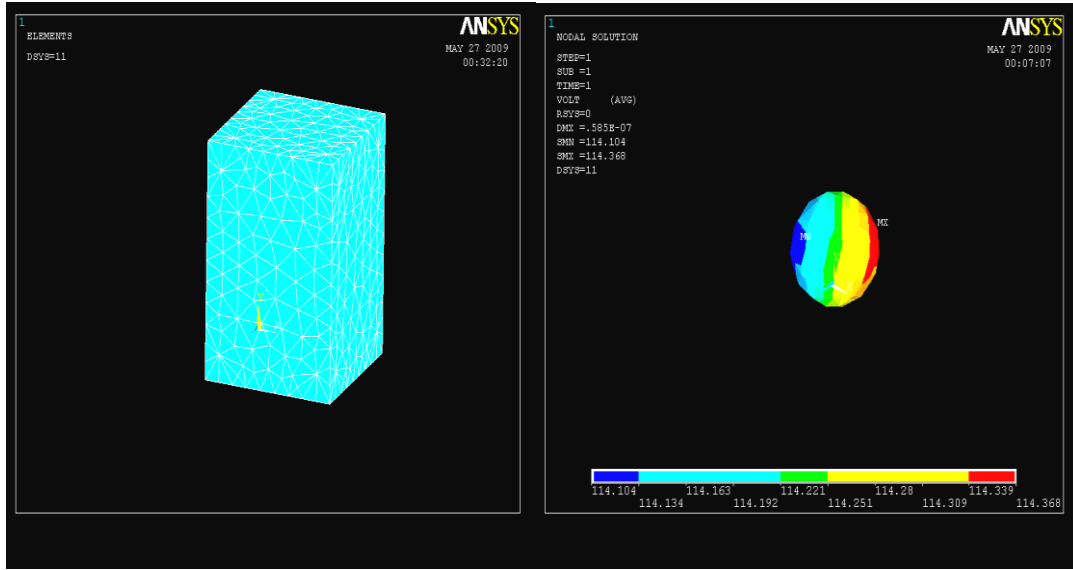
Şekil 7.9 YMK dağılımına denk gelen Hacim Merkezli Tetragonal Boşluklu Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri (X yönünde)



Şekil 7.10 YMK dağılımına denk gelen Hacim Merkezli Tetragonal Boşluksuz Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri (X yönünde)



Şekil 7.11 YMK dağılımına denk gelen Hacim Merkezli Tetragonal Boşluklu Birim Hücrede Normal Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri (Y yönünde)



Şekil 7.12 YMK dağılımına denk gelen Hacim Merkezli Tetragonal Boşluksuz Birim Hücrede Zayıflatılmış Malzeme Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Elektrik Gerilimi Değeri (Y yönünde)

Aşağıda sayısal çözümlerde ki iki duruma ait sonuçlar özetlenmiştir:

1. Durum; Kompozit malzemenin matrisinde gözenekler vardır ve matris malzemesi özellikleri bu nedenle zayıflamıştır. Matrisin sahip olduğu boşluğun hacim oranı %42,5 tir. Boşluk boyutu PZT tozlarının boyutuna yakındır, YMK ve HMK dağılımında köşelerde boşluk bulunmaktadır.

2.Durum; Kompozit malzemede hiç boşluk yoktur.Bu durumda PZT hacim oranı %36 dır. Ancak matris özellikleri gözenek dolayısıyla zayıflamıştır. Zayıflamış matris değerleri sayfa 88’ de verilmiştir.

Dağılım için dört farklı birim hücre kullanılmıştır:

- a) Basit Kübik Birim Hücre,
- b) Hacim Merkezli Kübik Birim Hücre,
- c) Yüzey Merkezli Kübik Birim Hücre (YMK),
- d) Hacim Merkezli Tetragonal Birim Hücre (HMT) X ve Y yönünde,

Çizelge 7.1: Sonlu Elemanlarda Çıkan Elektrik Gerilimi Sonuçları

	Boşluksuz Normal Akrilik	Boşluklu	Boşluksuz Zayıflatılmış Akrilik
Basit Kübik	-48 Volt	-----	3 Volt
HMK	30,4 Volt	-188,9 Volt	3,2 Volt
YMK	7,5 Volt	-6,9 Volt	-5,5 Volt
HMT (Y Yönünde)	-7,9 Volt	11,8 Volt	114,3 Volt
HMT (X Yönünde)	-3 Volt	10,2 Volt	-25,9 Volt

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. PZT kompozitler üretilirken yapılmış olabilecek hatalar, piezoelektrik seramik yapımı için yararlanılan malzemenin aktüatör olarak kullanılabilecek piezoelektrik seramik yapımına uygun olmaması, deney düzeneğinin bu işlem için tam olarak uygun olmaması
2. Yapılan çalışmalar sonucunda, ANSYS program modeli (Zayıflatılmış Basit Kübik, Zayıflatılmış HMK, Zayıflatılmış YMK ve Boşluksuz HMT (x yönünde) ve deneysel çalışma arasında büyük benzerlikler görülmüştür. PZT - Akrilik karşımının polarizasyonu için uygulanan elektrik geriliminin %100 PZT içeren sensör ve aktuatörden daha yüksek olması sebebiyle istenen deneysel kontrol gerçekleşmemiştir.

KAYNAKLAR

Alexander P.W., 2006. Dual Electro/Piezo Property Functionally Graded Piezoceramics, *PhD Thesis*, Mechanical Engineering in the University Of Michigan, Michigan.

ANSI/IEEE Std 176, 1987. IEEE Standard on Piezoelectricity, New York

ANSYS – Help (Documentation for Ansys / 3-Dcoupled field Solid)

APC International Ltd. Product Manual, 2006, Piezoelectric Ceramic: Principles And Applications, Pennsylvania, USA, <http://www.americampiezo.com>

Chen Y., 1999. Synthesis, Characterization and Transducer Applications Of Piezoelectric Ceramic/Polimer Composite Materials, *PhD Thesis*, The Pennsylvania State University The Graduate School Intercollege Graduate Program in Materials, Pennsylvania.

Ergun C., Yılmaz Ş., Özdemir E., Gül Ö., Kalenderli Ö., 2006, Piezoelektrik Malzemeler Ve Uygulama Alanları, *Denizli Uluslar arası Malzeme Konferansı*, Pamukkale, Türkiye

Günaydın, U., (2007), Sensörlerde Kullanılabilecek Polimer/PZT Kompozitlerin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hale J. M., 2004, Piezoelectric Paint: Thick-Film Sensors For Structural Monitoring Of Shock And Vibration, *7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, July 19-22, Manchester, United Kingdom

Hartog, J., (1985), Mechanical Vibrations, Dover Publications, New York

IEEE No:177, 1966. Standard Definitions und Methods of Measurement – for Piezoelectric Vibrations, New York.

Kınıkoğlu N., 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Kırcalı, Ö. F., (2006), Active Vibration Control of a Smart Beam: A Spatial Approach, Middle East Technical University, Ankara.

Klein K. A., Safari A., Newnham R.E. & Runt J., 1986, Composite Piezoelectric Paints, *Proc. IEEE 6th Int Symp on Applied Ferroelectrics (ISAF-86)*, Pennsylvania pp285-287.

- Maia, N.**, (1997), Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press, Forest Grove.
- Malgaca, L.**, (2007), Integration of Active Vibration Control Methods With Finite Element Models of Smart Structures, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Morgan Electro Ceramics, 2007**, Piezo Ceramics Tutorial, USA ([http:// www.morganelectroceramics.com](http://www.morganelectroceramics.com)) (04, 05, 2008)
- Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.Germany, 2007**, Piezo-Tutorial,Germany (<http://www.physikinstrumente.com>) (12, 01, 2009)
- Piezo Kinetics Inc.,2007**, PKI Catalog, USA, (<http://www.piezo-kinetics.com>) (01, 03, 2009)
- Rao, S.**, (1990), Mechanical Vibrations, Addison-Wesley, Redwood City. Sepulveda, A. E. ve Schmit Jr., L. A., (1990), “Optimal Placement of Actuators and Sensors in Control Augmented Structural Optimisation”, 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 2-4 Apr. 1990, Long Beach, CA.
- Raptis P. N., Stephenson R., Hale J. M., White J. R.**, 2004, Effect Of Exposure Of Piezoelectric Paint To Water And Salt Solution, *Journal Of Materials Science*, 39, 6079 – 6081
- Thompson, W.**, (1996), Theory of Vibrations, Nelson Thornes Ltd., Cheltenham.Yousefi-Koma, A., Sasiadek, J.Z., ve Vukovich, G., (1994a), “Control of Flexible Arm Space Based Robot Using Piezoelectric Transducers”, Proceeding of IFAC Symposium on Robot Control: SYROCO’94.
- Tressler, J. F., Alkoy, S., Newham, R. E.**, 1995, Piezoelectric Sensors And Sensor Materials, *Journal of Electroceramics* 2:4, 277-272.
- Yüklü, L.**, (2008) Elastik Piezoelektrik Bir Cismin Elektro-Termomekanik davranışı için Matematiksel Bir Model, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- White J. R., Poumeyrol B. D., Hale J. M., Stephenson R.**, 2004, Piezoelectric Paint: Ceramic-Polymer Composites For Vibration Sensors, *Journal Of Materials Science*, 39, 3105 – 3114

EKLER

EK A.1 : ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk serbest titreşim kontrol makrosu

EK A.1

ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk serbest titreşim kontrol makrosu

```
/solu
antype,modal,new          !modal analiz
modopt,redc,10            !reduced, 10 - number of modes to
extract
mxpand,10                 !10 - number of modes to expand
total,nd,1               !master DOFs = çubuğun node sayısı, 1 - exclude rotational and volt
DOFs
solve                     !çubuğun doğal titreşim modlarını
hesapla
*get,f1,mode,1,freq       !1. mode u f1 olarak
kaydet
finish
dt=1/f1/20                !dt birim adım zaman aralığını 1. moda göre
ayarla
/solu
d,nv0,volt,0             !nv0 nodunda volt=0
d,nv02,volt,0            !nv02 nodunda volt=0
d,nsv0,volt,0            !nsv0 nodunda volt=0
alphad,alpha             !alphad sönümleme katsayısı
betad,alpha              !betad sönümleme katsayısı

antype,trans,new         !transient analiz
outres,all,all           !write every substep
kbc,0 !ramped
tintp,,0.25,0.5,0.5     !transient analiz entegrasyon
parametreleri
deltim,dt                !çözümdeki her bir adımın zaman
aralığı=dt
d,nv,volt,0              !nv nodunda volt=0
d,nv2,volt,0            !nv2 nodunda volt=0
f,nf,fz,f0               !nf nodunda fz yönünde f0 kadar kuvvet
```

```
t=dt                                !t değerini dt'ye eşitle
time,dt                             !Time at the end of the load step = dt
solve                               !ilk adımı çöz (0-dt zamanında f0 kadar kuvvet uygulanan
adım)
f,nf,fz,0   !nf nodunda fz yönünde 0 kuvvet (kuvveti kaldırarak çubuğun titreşmesini
sağlar)
ts=ns*dt                                !ts=ns(adım sayısı) * dt(birim zaman)
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!Kontrol
Döngüsü!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*do,t,2*dt,ts,dt                      !t değeri, 2dt'den ts ye kadar dt adımlarla
ilerlesin
    *get,vs,node,nsv,volt              !nsv nodundaki volt değerini vs olarak al
err=0-vs      !hata hesapla (denge durumundan nsv nodunda ölçülen voltu çıkart)
va=kp*err     !aktüatöre uygulanacak gerilimi bulmak için hata ile kp katsayısını
çarp
d,nv,volt,va                          !nv numaralı noda va gerilimini uygula
d,nv2,volt,va                         !nv2 numaralı noda va gerilimini uygula
time,t                                 !Time at the end of the load step = t
solve                                  !Çöz
*enddo                                !t, istenen değere ulaşana kadar döngüyü başla
sar
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!Kontrol
Döngüsü!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

finish
/post26                              !time-history results postprocessor (grafikleri çizmek için
hazırla)
nsol,2,nf,u,z                        !çubuğun uç noktasının z yer değiştirme grafiği
nsol,3,nv,volt                       !aktüatör piezoelektriğe uygulanan elektrik gerilimi
nsol,4,nsv,volt                      !sensör piezoelektrikten alınan elektrik sinyali
plvar,2                              !çubuğun uç noktasının z yer değiştirmesi'nin grafiğini çiz
```


ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	10.11.1981	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1996-1999	Bağcılar Lisesi
Lisans	2000-2004	Trakya Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans	2006-2009	İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı