

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKILLI ÇUBUKLARIN TASARIM VE ANALİZİ**

Makine Müh. Oktay AYDOS

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Kontrol Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER**

**İSTANBUL, 2009**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
ÖNSÖZ .....	ix
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. PİEZOELEKTRİKLİK VE PİEZOELEKTRİK MALZEMELER .....	4
2.1 Piezoelektrik Özellik.....	4
2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler .....	6
2.2.1 Yaşlanma.....	7
2.2.2 Mekanik sınırlamalar .....	7
2.2.3 Elektriksel sınırlamalar .....	7
2.2.4 Isısal sınırlamalar.....	7
2.2.5 Frekansının etkisi.....	8
2.3 Piezoelektrik Malzemeler .....	10
2.3.1 Doğal piezoelektrik malzemeler (kristaller).....	10
2.3.2 Piezoelektrik seramik malzemeler.....	11
2.3.2.1 Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler .....	12
2.3.2.2 Piezoelektrik PZT .....	13
2.3.2.3 Yaygın kullanılan piezoelektrik seramikler ve özellikleri .....	16
2.3.3 Polimer piezoelektrikler .....	17
2.3.4 Kompozit piezoelektrikler.....	18
2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları .....	19
2.4.1 Sensörler.....	19
2.4.2 Üreteçler.....	19
2.4.3 Aktüatörler .....	20
2.4.4 Transdüserler .....	21
2.5 Piezoelektrik Sabitler .....	21
2.5.1 Piezoelektrik yük sabiti.....	22
2.5.2 Piezoelektrik voltaj sabiti.....	23
2.5.3 Dielektrik sabiti .....	24
2.5.4 Elektromekanik çift faktörü (katsayısı) .....	24
2.5.5 Elastik uygunluk .....	26
2.5.6 Elastiklik modülü.....	27
2.5.7 Frekans sabiti.....	27
3. TİTREŞİM VE AKTİF KONTROL.....	29

3.1	Titreşim .....	29
3.1.1	Titreşim analizi .....	29
3.1.1.1	Sönümsüz serbest titreşim .....	29
3.1.1.2	Sönümlü serbest titreşim .....	31
3.1.1.3	Sönümlü zorlamalı titreşim .....	33
3.1.1.4	Rezonans .....	34
3.1.2	Kirişlerde eğilme titreşimleri .....	35
3.1.2.1	Matematik modelin oluşturulması .....	36
3.1.2.2	Serbest titreşimler .....	37
3.1.2.3	Bir tarafından ankastre mesnetli sabit kesitli kirişin doğal frekanslarının teorik olarak hesaplanması .....	38
3.2	Akıllı Yapılar ve Sistemler .....	40
4.	AKILLI ÇUBUĞUN ANSYS MODELİ .....	42
4.1	ANSYS Modelleme Elemanları .....	42
4.1.1	SOLID5 .....	42
4.1.2	SOLID45 .....	42
4.2	Piezoelektrik Malzeme Değerleri Dönüşümü .....	43
4.2.1	Geçmiş bilgiler .....	43
4.3	Serbest Titreşim İçin Aktif Kontrol .....	46
4.4	Zorlamalı Titreşim İçin Aktif Kontrol .....	48
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA .....	51
5.1	Deney Düzeneginin Hazırlanması .....	51
5.2	Deney Düzeneginin Testi .....	56
5.3	Akıllı Çubuğun Zorlamalı Titreşim Altındaki Aktif Titreşim Kontrolü .....	57
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	64
	KAYNAKLAR .....	65
	EKLER .....	67
	Ek 1 ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk serbest titreşim kontrol makrosu ....	68
	Ek 2 ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk zorlamalı titreşim kontrol makrosu	70
	Ek 3 Üretici tarafından sunulan piezoelektrik malzeme değerlerinin ANSYS Programı için istenilen verilere çevrilmesi .....	73
	Ek 4 Akıllı çubuğun ANSYS Programı grafik arabirimi kullanılarak modellenmesi .....	78
	ÖZGEÇMİŞ .....	80

## SİMGE LİSTESİ

$c$	Sönüm katsayısı
$[c]$	Piezoelektrik rijitlik matrisi
$c_c$	Kritik sönüm katsayısı
$[d]$	Piezoelektrik sabit matrisi
$f_n$	Doğal frekans
$f_d$	Sönümlü doğal frekans
$[s]$	Piezoelektrik uyum matrisi
$[\epsilon]$	Piezoelektrik iletkenlik matrisi
$\varphi$	Faz farkı
$\zeta$	Sönüm oranı

## **KISALTMA LİSTESİ**

APC	American Piezo Ceramics
DAQ	Data Acquisition
DSP	Difference Scalar Potential
GSP	Generalized Scalar Potential
LQG	Linear Quadratic Gaussian
PT	Kurşun Titanat
PVDF	Polyvinylidene Difluoride
PZN	Kurşun Çinko Niobat
PZT	Kurşun Zirokonat Titanat
RSP	Reduced Scalar Potential

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bölge Hareketlerinin Çizgisel Gösterimi, (a) Polarizasyon Öncesi, (b) Polarizasyon, (c) Polarizasyon Sonrası (APC International, 2006).....	5
Şekil 2.2 Piezoelektrik Elemanın Davranışı (a) Elemandaki Polarizasyon Doğrultusu (b-c) Üreteç Davranışı (d-e) Motor Davranışı (APC International, 2006).....	6
Şekil 2.3 Frekansın Fonksiyonu Olarak Empedans (APC International, 2006).....	8
Şekil 2.4 Piezoelektrik Bir Elemanın Rezonans ve Anti-Rezonans Frekanslarını Belirlemek İçin Dizayn Edilmiş Sistem (APC International, 2006).....	9
Şekil 2.5 Provskit Kristalinin Şematik Görüntüsü (Physik Instrumente, 2007).....	11
Şekil 2.6 PZT Yapısı, (a) Sıcaklık>Tc, (b) Sıcaklık<Tc (Piezo Kinetics Inc., 2007).....	14
Şekil 2.7 PVDF $\beta$ Fazının Moleküler Dizilimi.....	18
Şekil 2.8 Temel Piezoelektrik Sensör Çeşitleri, (a) Eksenel Sensör, (b) Fleksör Sensör.....	19
Şekil 2.9 Piezoelektrik Eleman Kullanılarak Oluşturulan Elektrik Enerjisi, (a) Ark Üretimi, (b) Şarj Üretimi.....	20
Şekil 2.10 Temel Aktüatör Çeşitleri (a-c).....	20
Şekil 2.11 Piezoelektrik Malzemeler İçin Koordinat Sistemi (Physik Instrumente, 2007).....	21
Şekil 3.1 Basit Kütle–Yay Sistemi.....	30
Şekil 3.2 Basit Kütle–Yay–Sönüm Sistemi.....	31
Şekil 3.3 Sönümlü Serbest Titreşim (a) $\zeta = 0.1$ , (b) $\zeta = 0.3$ .....	33
Şekil 3.4 Zorlamalı Titreşim İçin Frekans Cevabı (a) Genlik, (b) Faz.....	34
Şekil 3.5 Kirişlerde Eğilme.....	35
Şekil 3.6 Bir Tarafından Ankastre Mesnetli Kiriş.....	38
Şekil 4.1 ANSYS Programındaki SOLID5 Elemanı.....	42
Şekil 4.2 ANSYS Programındaki SOLID45 Elemanı.....	43
Şekil 4.3 Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli.....	46
Şekil 4.4 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Serbest Titreşim Grafikleri (a)Kontrolsüz, (b)Kp=20, (c)Kp=40.....	47
Şekil 4.5 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Serbest Titreşim Grafiklerinin Kıyaslanması	48
Şekil 4.6 Zorlamalı Titreşim Analizinde Kullanılacak Akıllı Çubuğu ANSYS Modeli.....	48
Şekil 4.7 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Zorlanmış Titreşim Altındaki Sensör Gerilimleri (a)Kontrolsüz, (b)Kp=15, (c)Kp=30.....	49
Şekil 4.8 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Zorlamalı Titreşim Durumunda Sensör Gerilimi Değişimi Grafiklerinin Kıyaslanması.....	50
Şekil 5.1 Metcon MICRACUT 150 Hassas Kesici.....	51

Şekil 5.2 Piezoseramik Parçalar .....	53
Şekil 5.3 Gümüş Boyanın İletkenliğinin Ölçülmesi .....	53
Şekil 5.4 Piezoelektrik Seramik Parçayı Polarize Etmek İçin Kullanılan Aparat .....	54
Şekil 5.5 GW Instek AC/DC Gerilim Test Edici GPT-815 .....	54
Şekil 5.6 Piezoseramiklerin Alüminyum Çubuğa Yapıştırılması.....	55
Şekil 5.7 Piezoseramiklerden Sinyal Almak İçin Yapıştırılan Kablolar.....	55
Şekil 5.8 Deney Düzeneginin Sinyal Testi.....	56
Şekil 5.9 Serbest Titreşim Altındaki Sensör Geriliminin Değişimi .....	56
Şekil 5.10 370V Gerilim Altında Sensör Geriliminin Değişimi .....	57
Şekil 5.11 Shaker (sağda) ile Tahrik Edilen Akıllı Çubuk (solda).....	58
Şekil 5.12 Deney Düzenegi .....	58
Şekil 5.13 Deney Düzenegi Şeması .....	59
Şekil 5.14 300 Volt ile Yapılan Aktif Kontrolde Amplifikatör Monitör ve Giriş Sinyalleri... 59	
Şekil 5.15 Deney Sonucunda Elde Edilen Sensör Gerilimleri (a)Kontrolsüz, (b)200V ile, (c)300 Volt ile.....	60
Şekil 5.16 400 Volt ile Kontrol Yapılırken 6s. Sonra Amplifikatör Kapatılınca Elde Edilen Grafikler .....	61
Şekil 5.17 Kontrol Yapılmadan ve 300 Volt ile Kontrol Durumlarındaki Grafikler.....	61
Şekil 5.18 Alüminyum Çubuğun (a)ANSYS ve (b)DeneySEL Olarak Elde Edilen Serbest Titreşimdeki Sensör Gerilimi Değerleri .....	62
Şekil 5.19 Zorlamalı Titreşim Altındaki Yay Çeliği Akıllı Çubuğun (a)ANSYS ve (b)DeneySEL Olarak Aktif Titreşim Kontrolü Grafikleri .....	63

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Bazı Piezo Kristallerin Oda Sıcaklığındaki Özellikleri (Tressler vd., 1995).....	11
Çizelge 2.2 Yumuşak ve Sert Piezoseramiklerin Karşılaştırılması (APC International, 2006)	13
Çizelge 2.3 PZT Seramiklerinin Özellikleri (Tressler vd., 1995) .....	15
Çizelge 2.4 PZT Türleri ve Özellikleri (Piezo Kinetics Inc., 2007) .....	16
Çizelge 2.5 Bazı Piezoelektrik Seramiklerin Özellikleri (Tressler vd., 1995).....	16
Çizelge 2.6 Piezoelektrik Yük Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006) .....	22
Çizelge 2.7 Piezoelektrik Voltaj Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006).....	23
Çizelge 2.8 Dielektrik Sabiti İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006) .....	24
Çizelge 2.9 Elektromekanik Çift Katsayısı İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006) .	25
Çizelge 2.10 Elastik Uygunluk İndislerinin İfadeleri (APC International, 2006).....	27
Çizelge 5.1 APC 856 Tipi Piezoelektrik Malzemenin Özellikleri .....	52

## ÖNSÖZ

Akıllı yapılar, günümüzde yeterince yaygın olmasa da yakın gelecekte üzerinde düşünülmesi gereken sistemlerdir. Bu çalışma, akıllı yapılara bir giriş niteliğinde olan akıllı çubukların titreşim davranışlarının incelenmesi üzerine hazırlanmıştır. İlerleyen sayfalarda, bu yapılar hakkında teorik, bilgisayar yardımıyla sonlu elemanlar ve deneysel olarak bilgilerden bahsedilmektedir.

Bu çalışmada yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER ve İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarının imkânlarından faydalanmamı sağlayıp yardımcı olan Doç. Dr. Celalettin ERGÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

## **ÖZET**

Akıllı çubuklar, üzerlerindeki piezoelektrik malzeme ve kontrol sistemi sayesinde titreşimleri sönümlenen sistemlerdir. Bu tezde, bir tarafından ankastre mesnetli bir 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 laboratuvarında deneysel olarak analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı çubuk, piezoelektrik, PZT, sonlu eleman analizi

## **ABSTRACT**

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 mentions about smart structures and their history, then 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 laboratory.

**Keywords:** Smart beam, piezoelectric, PZT, finite element analysis

## 1. GİRİŞ

Yakın geçmişte akıllı yapılar ve sistemler yeni ve disiplinler arası bir araştırma alanı olmuştur. Bu konuyla ilgili disiplinlerden bazıları arasında, makine mühendisliği, elektrik mühendisliği, malzeme bilimi, bilgisayar bilimi gibi dallar bulunmaktadır. Bu teknoloji, yüksek performanslı yapılar, uyarlanabilir yapılar, yüksek hassasiyetli sistemler gibi yerlerde katkı sağlayacaktır. Bu gelişmekte olan alan son birkaç yılda hızlı bir momentum kazanmış olsa da, araştırmacılar daha önce yapılan araştırmalardan da yararlanmaktadır. Akıllı yapılar ve sistemler konusundaki son gelişmeler, aktif piezoelektrik yapıların hem statik hem dinamik uygulamalarda oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Akıllı yapılardaki gelişmeler, muhtemelen gelecek yıllarda akıllı malzemeler ismini vereceğimiz malzemelerin geliştirilmesine kadar gidecektir. Bu malzemeler, şu an incelenen akıllı yapıların karakteristiklerini taşıyan daha gelişmiş sistemler olarak karşımıza çıkacaktır. Örneğin, malzeme, içine gömülmüş bütünleşmiş sensör, aktüatör ve kontrol sistemi sayesinde verilen uyarıyı algılayacak ve daha önceden belirlenmiş kontrol parametrelerine göre buna cevap verecektir.

Piezoelektriklik olayının Curie kardeşler tarafından bulunmasından (1880) beri, 128 yıldan fazla zaman geçmiştir. Yıllar geçtikçe daha gelişmiş piezoelektrik teorileri bulunmuştur. Değişik piezoelektrik donanımlar bulunarak çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır.

Geçmiş yıllarda, piezoelementler kullanarak esnek yapıların aktif kontrolü birçok araştırmacı tarafından çalışıldı. Plumb vd. (1987), yayılmış piezofilm kullanarak esnek bir bağlantıyı kontrol etmek için lineer olmayan kontrol algoritması kullanmışlardır. Piezoelektrik dönüştürücüler Yousefi-Koma vd. (1994a) tarafından esnek bir bağlantı için aktif kontrol sistemi içerisinde deneysel olarak kullanılmışlardır. Bunun dışında LQG kontrolörü, piezoeleman kullanarak esnek yapıların gürültü kompanzasyonunda kullanmışlardır (1994b). Piezoaktüatörler ayrıca de Luis ve Crawley (1990) tarafından esnek yapılar için optimum kontrolör olarak kullanılmıştır.

Aktif kontrol sisteminin etkili olması aktüatör ve sensör boyutları ve yerlerine oldukça bağlıdır. Aktif kontrol sistemlerinde en önemli sorulardan biri sensör/aktüatörlerin yerleştirilmesi ve boyutlandırılması ile kontrolde en iyi performansı elde etmektir. Kondoh vd. (1990) nokta sensörlerin ve aktüatörlerin optimum pozisyonlarını bulmakta bir metot tanıtmışlardır. Bu metodu bir esnek çubuğa uyguladıklarında, sistemin aktüatörün konumuna

sensörünkinden daha duyarlı olduğu çıkmıştır. Esnek yapıların aktif kontrolünde nokta aktüatör ve sensörlerin optimum yerleştirilmesi üzerine yapılan bazı diğer araştırmalar da bulunmaktadır (Lindberg ve Longman, 1984; Sepulveda ve Schmit, 1990; Smith ve Clark, 1997).

Piezoelektrik aktüatörün dağılık doğası yerleştirme ve şekillendirmede optimizasyona izin verirken, tork motorları gibi nokta aktüatörler fiziksel olarak genişlemezler. Önemine rağmen, esnek yapıların aktif kontrolünde gömülü veya bağlanmış piezoelemanların optimizasyonundan çok fazla bahsedilmemiştir. Lee ve Han (1996) esnek plaka üzerinde bağlanan aktüatör elektrotun optimum biçimi bulmak için kalıtsal algoritmaları kullanmışlardır. Esnek yapının dinamik performansında esnek çubuğa bağlanmış piezoaktüatörün inceliğinin etkisi Chaudhry ve Rogers (1993) tarafından çalışılmıştır. Onların analizleri aktüatör incelik optimizasyonu ile ilgili parametreleri bulmakta yardımcı olmuştur. Main vd. (1994) esnek yapıya bağlı veya gömülmüş aktüatörün optimum inceliği ve yapısal merkez çizgisinden uzaklığı üzerine çalışmışlardır. Hanagud vd. (1988), esnek yapıların kapalı çevrim performansında, dizilmiş piezoelektrik sensör ve aktüatörlerin yerleştirilmesinin etkisini çalışmışlardır. Onların çalışmasında herhangi bir optimizasyon prosedürü olmadan değişik durumlar için bazı zaman domeni yanıtları kıyaslanmıştır. Buna ek olarak, piezoelemanın boyut ve şekline dair bir bahis yoktur. Sıralı aktüatörler ve sadece gerilimli piezosensörlerin kullanıldığı, esnek çubuğun aktif kontrolünde, bağlı piezoaktüatörlerin boyut ve yerleştirilmesine yönelik ilginç bir optimizasyon çalışması da Devasia vd. (1993) tarafından yapılmıştır. Onların çalışmasında şekil optimizasyonu araştırılmamıştır. Piezoelemanların dizilimli biçimi, fiziksel modelde bazı kısıtlamalar sunarak metodlarının etkinliğini sınırlamaktadır.

Akıllı çubuklarla ilgili yapılan son çalışmalar arasında,  $H_{\infty}$  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.

Bu çalışma kapsamında, üzerine piezoelektrik malzemeler yapıştırılmış bir tarafından ankastre mesnetli bir çubuğun titreşim davranışları, ANSYS ortamında modellenerek ve deneysel bir düzenek hazırlanarak kıyaslanacaktır.

Düzeneğin üç boyutlu ANSYS modeli yapılırken alüminyum çubuk için SOLID45, piezoelektrik malzeme için ise SOLID5 elementleri kullanılmıştır. Deney düzeneğinde ise, uygun boyutlarda kesilmiş bir alüminyum çubuk, yapıştırıcı olarak Uhu Metall Epoxy marka

yapıştırıcı, piezoseramik için yüzey elektrotu olarak FAME firmasından tedarik edilen gümüş boya ve piezomalzeme olarak APC International firmasının 856 tipi PZT tozundan hazırlanan piezoseramik kullanılmıştır.

## 2. PİEZOELEKTRİKLİK VE PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

### 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 ısıl uzamalar veya büzülme dahi yüzeylerinde elektrik yükü oluşması için yeterlidir. Bu malzemeler piroelektrik malzemeler olarak adlandırılırlar. Her piroelektrik malzeme piezoelektriktir fakat her piezoelektrik malzeme piroelektrik değildir (Tressler vd., 1995; Ergun vd., 2006).

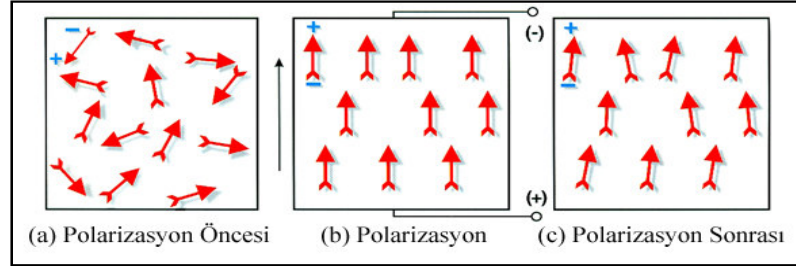
Elektrik alan içerisinde bulunmayan katı maddelerin yapısında, pozitif ve negatif yüklerin sayıları birbirlerine eşittir. Başka bir deyişle elektriksel olarak nötr durum yani denge hali söz konusudur. Teorik olarak bu dengenin, yapıda boyutsal bir şekil değişimi ile bozulması ve malzeme yüzeylerinde 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 açısız 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 bağlı olacaktır ve her piezoelektrik malzeme için kristal yapısına göre karakteristik bir değer olacaktır (Tressler vd., 1995; Ergun vd., 2006).

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

Ferroelektrik malzemeler, kristal yapısı yüksek elektrik alan ( $\approx 10^6$  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 rastgele doğrultularda polarizasyona sahip bölgeler (domainler) içerirler (Şekil 2.1a). Bu rastgele 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.

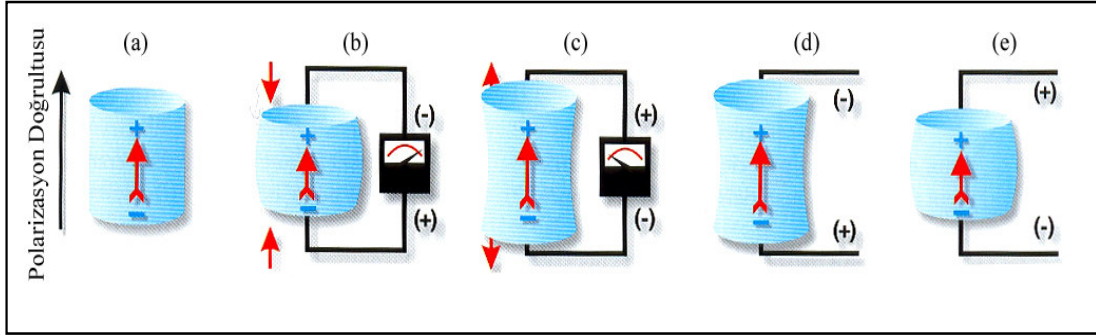


Şekil 2.1 Bölge Hareketlerinin Çizgisel Gösterimi, (a) Polarizasyon Öncesi, (b) Polarizasyon, (c) Polarizasyon Sonrası (APC International, 2006)

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 yönlendirilmesi 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 yönlendirilir ve polikristallerden oluşan tüm yapıda net bir elektriksel dipol momentini oluşturur. Bu yapıda aynı yöne yönlendirilmiş izole dipollerin oluşturduğu bölgeler vardır (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007).

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 2.2b). Polarizasyon yönünde çekme veya polarizasyon doğrultusuna dik yönde basma uygulandığında ise piezoelektrik seramik eleman, polarizasyon voltajına zıt polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 2.2c). 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).



Şekil 2.2 Piezoelektrik Elemanın Davranışı (a) Elemandaki Polarizasyon Doğrultusu (b-c) Üreteç Davranışı (d-e) Motor Davranışı (APC International, 2006)

Seramik elemana polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığı takdirde, seramik eleman uzayacak ve çapı küçülecektir (Şekil 2.2d). Polarizasyon voltajı ile ters polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığında ise, seramik elemanın boyu kısalmak ve çaptan genişleyecektir (Şekil 2.2e) (APC International, 2006).

Seramik eleman üzerine AC voltajı uygulanırsa, eleman uygulanan voltajın frekansında sinüzoidal bir şekilde sırayla uzayıp kısılacaktır. 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 gerinim 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 performans 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 özelliklerini belirleyen piezoelektrik sabitlerde kayıp oluşmasına sebep olabilmektedir. Piezoelektrik seramik bir elemanın birçok özelliği polarizasyondan sonra zamanla logaritmik bir şekilde

azalır (Ergun vd., 2006; APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

### **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 vd., 2006).

### **2.2.2 Mekanik sınırlamalar**

Bir piezoelektrik malzemede, mekanik gerilme seviyeleri bölgelerin yönlendirmelerini bozmaya yetecek büyüklükte ise, bölgelerin 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; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

### **2.2.3 Elektriksel sınırlamalar**

Polarize edilmiş piezoelektrik bir malzeme, polarizasyondan sonra polarizasyon doğrultusuna ters yönde güçlü bir elektrik alana 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 çevrinde gerçekleşir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2007; Piezo Kinetics Inc., 2007).

### **2.2.4 Isısal sınırlamalar**

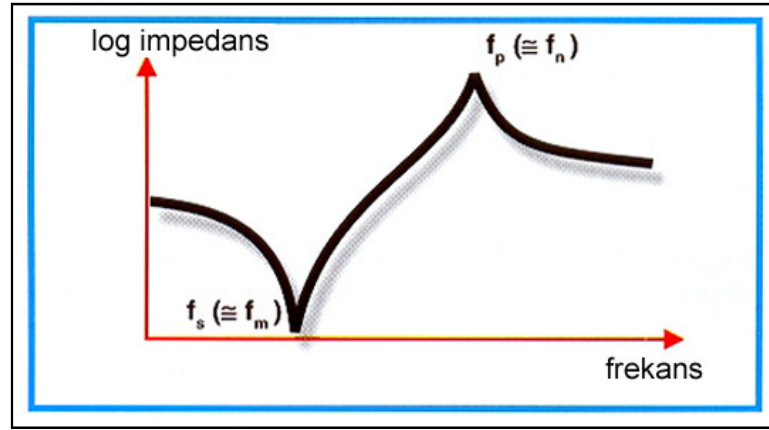
Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik özellikler artan sıcaklığa bağlı olarak azalma gösterir. Eğer bir piezoelektrik malzeme, piezoelektrik malzemeler için kritik sıcaklık değeri olan Kuri sıcaklığına ısıtılacak olursa, malzeme içindeki bölgeler yok olacak ve malzeme depolarize olacaktır. Artık bu noktadan sonra piezoelektrik malzeme oda sıcaklığına veya uygun çalışma sıcaklığına getirilse bile piezoelektrik özellik göstermeyecektir. Dolayısıyla piezoelektrik malzemelerin çalışma sıcaklıkları Kuri sıcaklıklarının altında olmak zorundadır. Piezoelektrik seramik bir eleman için tavsiye edilen en üst kullanma sıcaklığı, Kuri sıcaklığının yarısıdır.

Tavsiye edilen sıcaklık aralığındaki kullanımlarda, domenlerin dizilimindeki değişimler geri dönüşümlüdür. 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).

Sonuç 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 çalışma koşulları altında bozulma veya değişime uğrama süresi ne kadar uzunsa malzeme o kadar karardır denilebilir.

### 2.2.5 Frekansın etkisi

Bir piezoelektrik eleman AC elektrik alanına maruz kaldığında, elemanın boyutları elektrik alanının frekansına bağlı olarak titreşim şeklinde sürekli bir artma/azalma gösterir. Seramik elemanın elektrik alanına verdiği tepki olan titreşim, yani elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmüş hali, seramik malzemenin bileşimi, şekli ve hacmi tarafından belirlenir. Seramik elemanın en kolay şekilde titreştiği ve en etkin şekilde elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürdüğü frekans, rezonans frekansı olarak adlandırılır (APC International, 2006; Alexander, 2006).



Şekil 2.3 Frekansın Fonksiyonu Olarak Empedans (APC International, 2006)

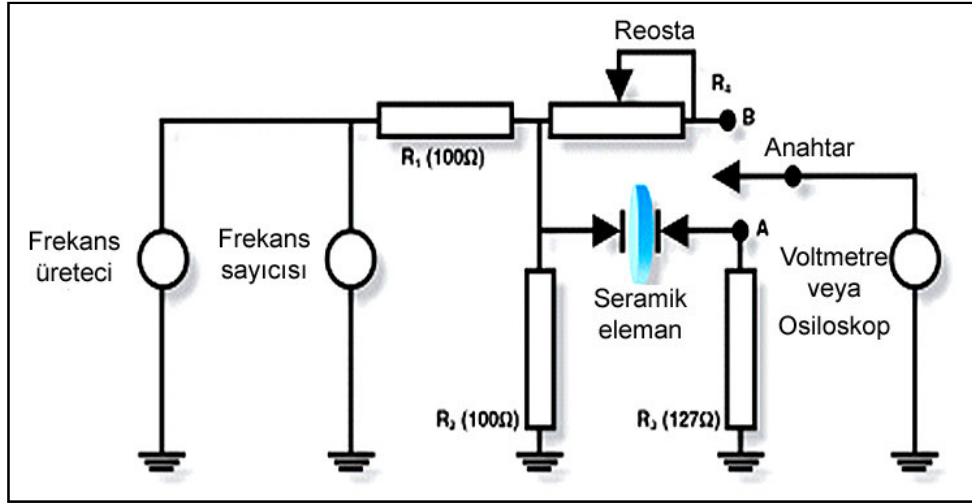
Piezoelektrik seramik bir elemanın bu davranışı Şekil 2.3'de verilmiştir. Şekil 2.3'den de anlaşılacağı gibi frekans arttıkça elemanın salınımı ilk önce empedansın minimum olduğu bir frekansa ulaşır. Bu minimum empedans frekansı, rezonans frekansıdır ( $f_r$ ). Genellikle kalın elemanlar, ince elemanlardan daha düşük rezonans frekansına sahiptir.

Frekans biraz daha arttırıldığında empedans maksimuma tırmanır. Bu maksimum empedans frekansı, anti-rezonans frekansıdır ( $f_a$ ). Eleman en verimli şekilde  $f_r$  ile  $f_a$  arasında piezo etki

verir (APC International, 2006; Alexander, 2006).

Minimum rezonans frekansı ve maksimum rezonans frekansının değerleri deneysel olarak ölçülerek bulunur. Bu değerleri belirlemek için tasarlanmış bir sistem Şekil 2.4’de verilmiştir. Şekil 2.4’de verilen devrede rezonans ve anti-rezonans frekanslarının bulunabilmesi için izlenmesi gereken prosedür şöyledir:

1. Anahtarı A konumuna getirin.
2. Seramik elemanı devreye yerleştirin.
3. Frekans üreticini voltmetrede ölçülen voltajı maksimum verecek şekilde ayarlayın. Bu değer rezonans frekansıdır.
4. Anahtarı B konumuna getirin.
5. Reostayı, 3. adımda voltmetreden okunan değeri verecek şekilde ayarlayın. Bu değer empedans rezonansıdır ( $Z_r$ ).
6. Anahtarı A konumuna getirin.
7. Frekans üreticini voltmetrede ölçülen voltajı minimum verecek şekilde ayarlayın. Bu değer anti-rezonans frekansıdır.



Şekil 2.4 Piezoelektrik Bir Elemanın Rezonans ve Anti-Rezonans Frekanslarını Belirlemek İçin Dizayn Edilmiş Sistem (APC International, 2006)

Minimum empedans frekans ve maksimum empedans için olan değerler elektromekanik çift faktörünü ( $k$ ), hesaplamada kullanılabilir. Çünkü elektromekanik çift faktörü değeri bir piezoelektrik malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ne kadar verimli dönüştürdüğünün bir işaretiçisidir. Elektromekanik çift faktörü,

titreşim moduna ve seramik elemanın şekline bağlıdır. Dielektrik ve mekanik kayıplar da enerji dönüşümünün verimliliğini etkiler. Genellikle dielektrik kayıplar mekanik kayıplara göre daha baskındırlar (APC International, 2006).

### 2.3 Piezoelektrik Malzemeler

Bu başlık altında kullanılan çeşitli 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 (naylon, vinilidin florür, trifloretilen, tetrafloretillen vb.) ve kompozit piezoelektrik malzemeler olmak üzere dört genel başlık altında toplayabiliriz.

#### 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.

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.

Yüksek  $g_h$  sabitlerinden dolayı lityum sülfat ve turmalin ticari hidrafonlarda hala kullanılan iki kristal piezoelektrik malzemedir. Bu kristaller şok ve hava akımı ölçümleri için de kullanılmışlardır.

Lityum niyobat ( $LiNbO_3$ ) ve lityum tantalat ( $LiTaO_3$ ),  $400^{\circ}C$ 'ye kadar yüksek hassasiyetlerini korumalarından dolayı yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde tercih edilmektedir. Lityum niyobat ve lityum tantalat dışında yüksek sıcaklıklarda kararlı oldukları için tercih edilen diğer kristaller;  $Sr_2Nb_2O_7$  ve  $La_2Ti_2O_7$  kristalleridir (Tressler vd., 1995).

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

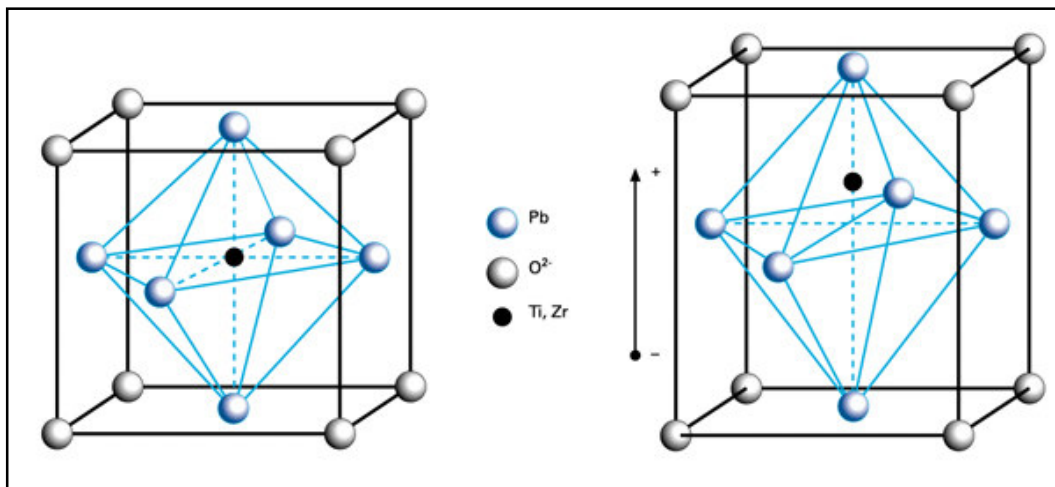
Çizelge 2.1 Bazı Piezo Kristallerin Oda Sıcaklığındaki Özellikleri (Tressler vd., 1995)

Kristal	Kimyasal Formülü	d (pC/N)	$K_{11}^T$	$K_{33}^T$
Rochelle tuzu	(NaKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> .4H <sub>2</sub> O)	2300 (d <sub>14</sub> )	1100	9,2
Turmalin	(CaAl <sub>3</sub> Mn <sub>6</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub> )	3,6 (d <sub>15</sub> )	8,2	7,5
Kuvarz	(SiO <sub>2</sub> )	2,3 (d <sub>11</sub> )	4,6	4,7
Lityum Niyobat	(LiNbO <sub>3</sub> )	68 (d <sub>15</sub> )	84	30
Lityum Tantalat	(LiTaO <sub>3</sub> )	26 (d <sub>15</sub> )	51	45

### 2.3.2 Piezoelektrik seramik malzemeler

Piezoelektrik seramik 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 vd., 1995).

Geleneksel bir piezoelektrik seramik, genelde perovskit kristal yapısına sahiptir. Şekil 2.5’de olduğu gibi perovskit 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 2.5) (APC International, 2006).



Şekil 2.5 Provskit 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 da 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 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 histerisizleri daha büyüktür ve gerek depolarizasyon olsun gerekse de olumsuzluk yaratacak diğer etmenlere karşı daha hassastırlar. Yumuşak seramiklerin Küri 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.

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 Küri 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 gerçekleştirmezler. 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 Piezoseramiklerin Karşılaştırılması (APC International, 2006)

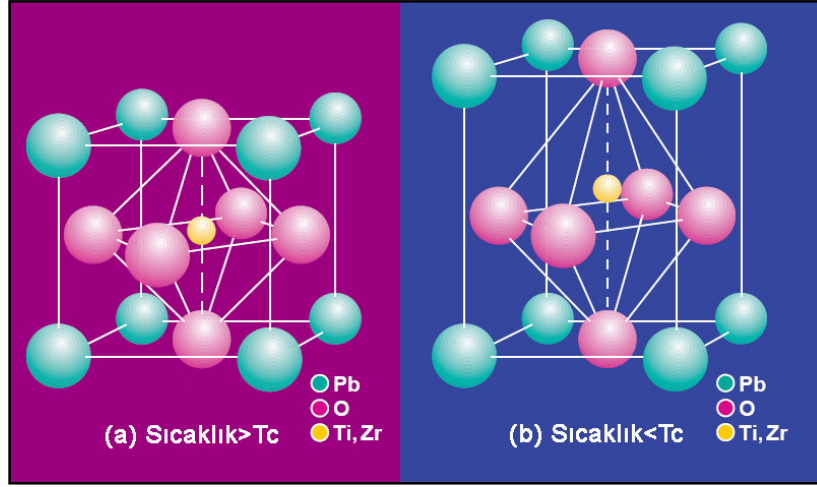
Özellikler	Yumuşak Seramikler	Sert Seramikler
Piezoelektrik sabitler	Büyük	Küçük
Permitive	Yüksek	Düşük
Dielektrik Sabitler	Büyük	Küçük
Dielektrik Kayıplar	Yüksek	Düşük
Elektromekanik Çift Faktörü	Büyük	Küçük
Elektrik Direnç	Çok yüksek	Düşük
Mekanik Kalite Faktörü	Düşük	Yüksek
Polarizasyon/Depolarizasyon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

### 2.3.2.2 Piezoelektrik PZT

Piezoelektrik seramik sensörlerin çoğu PZT esaslıdır. PZT dediğimiz  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (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 oluşturdukları katı çözeltilerin genel adı haline gelmiştir. PZT, perovskit yapıda olan ferroelektrik bir malzemedir (Şekil 2.6) (Tressler vd., 1995).

PZT’nin birim kafes yapısında kurşun atomları kafes köşelerinde, oksijen atomları ise yüzey merkezine yerleşmiş durumdadırlar (Şekil 2.6). Kurşun ve oksijen atomlarının her ikisi de yaklaşık  $1.4\text{Å}$ ’luk bir çapa sahiplerdir. Bu iki iyon kafes parametresi  $4\text{Å}$  olan yüzey merkezli kübik bir kristal sistem oluştururlar. Oktahedral olarak konumlanmış olan titanyum ve zirkonyum atomları ise birim kafesin merkezinde yer alırlar (Tressler vd., 1995; Ergun vd.,

2006; APC International, 2006).



Şekil 2.6 PZT Yapısı, (a) Sıcaklık > Tc, (b) Sıcaklık < Tc (Piezo Kinetics Inc., 2007)

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 Type I, Type II, Type III gibi US Navy standartlarına göre olanıdır. US Navy ile gruplandırılan PZT’lerin özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir. Çizelge 2.3’e ek olarak diğer önemli piezoelektrik sensör malzemeleri ve özellikleri Çizelge 2.5’de verilmiştir (Tressler vd., 1995; Ergun vd., 2006).

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 vd., 1995).

Çizelge 2.3 PZT Seramiklerinin Özellikleri (Tressler vd., 1995)

PZT Türü	$T_c(^{\circ}C)$	$d_{33}(pC/N)$	$d_{31}(pC/N)$	$d_{15}(pC/N)$	$K_{33}^T$	$k_{33}$	$k_{31}$	$k_{15}$
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-8	300	225	-97	330	1000	0.64	-0.34	0.55

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. Akış metreler, akış ve ses detektörleri, hızlandırıcılar, hidrafonlar başlıca kullanıldıkları yerlerdir.
Navy Type III	Mekanik kalite faktörünün yüksek olması istenilen uygulamalarda kullanılırlar.
Navy Type V	Düşük empedanslı, 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 vd., 1995)

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

Kurşun zirkonat ve kurşun titanatın dışında kurşun içeren diğer bir bileşik de kurşun magnezyum niyobattır ( $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ). Bu piezoelektrik seramik, sağladığı avantajlar ve ayrıca piezoelektrik özellikler bakımından PZT'den az da olsa üstündür (Tressler vd., 1995).

Baryum titanatın ( $BaTiO_3$ ) Küri sıcaklığı yaklaşık  $120^\circ C$ '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.

PT, kurşun titanat, ( $PbTiO_3$ ) piezo seramikler yüksek bir Küri sıcaklığına ( $490^\circ C$ ), düşük dielektrik sabitine ( $\sim 200$ ) 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 katışıklar 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 hidrafon malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. PZT ile karşılaştırıldığında tepki süresi daha kısadır.

Kurşun nikel niyobatlar, ( $Pb(NiNb)O^3$ ), 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 vd., 1995; Ergun vd., 2006).

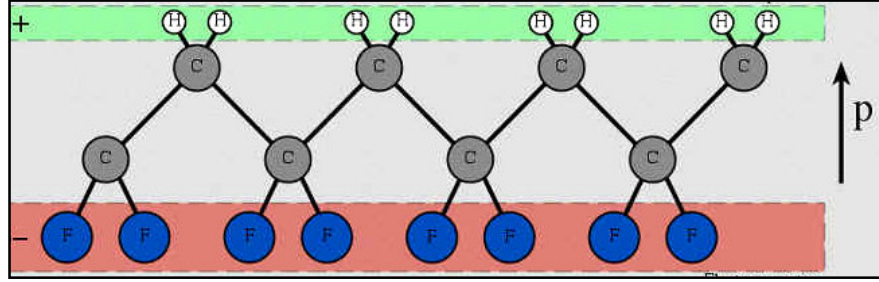
PZN, kurşun çinko niyobatlar, ( $Pb(Zn_{1=3}Nb_{2=3})O^3$ ) kurşun esaslı kompleks perovskit yapıya sahip ferroelektrik seramik malzemedir. Çok tabakalı seramik kapasitör, tahrikçi ve elektromekanik dönüştürücü uygulamaları için çok uygun malzemelerdir. Diğer normal ferroelektrik malzemelere göre polarizasyona çok yavaş cevap verirler ve bu durum polarizasyonlarının ani olarak kaybetmemelerini sağlar (Tressler vd., 1995).

### 2.3.3 Polimer piezoelektrikler

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

PVDF,  $(-CH_2-CF_2-)_n$  tekrar grubuna sahip, en basit florakarbon grubudur. PVDF, yüksek

oranda kristal bir yapıya sahiptir, yapıdaki kristallik %50 ile %70 arasında değişmektedir. Bu değişimin sebebi  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  olarak adlandırılan üç farklı faz durumundan ileri gelmektedir. Bu üç yapı arasında çeşitli kimyasal ve fiziksel teknikler kullanılarak dönüşüm gerçekleştirilebilir.  $\beta$  ve  $\gamma$  formlarında molekül eksenine dik doğrultuda dipoller mevcut olduğundan malzemede kutup söz konusudur ve piezoelektrik özellik gösterirler. PVDF'nin  $\beta$  fazı en güçlü piezoelektrik özelliği gösterir.  $\beta$  fazının kristal yapısı Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 PVDF  $\beta$  Fazının Moleküler Dizilimi

Piezoseramiklerle karşılaştırdığımız zaman PVDF'lerin bazı avantajları söz konusudur. Bunların başında iyi mekanik dayanım, düşük akustik empedans, 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 hidrafonlardır. Kompozit hidrafonların 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 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 ısı direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir (Tressler vd., 1995).

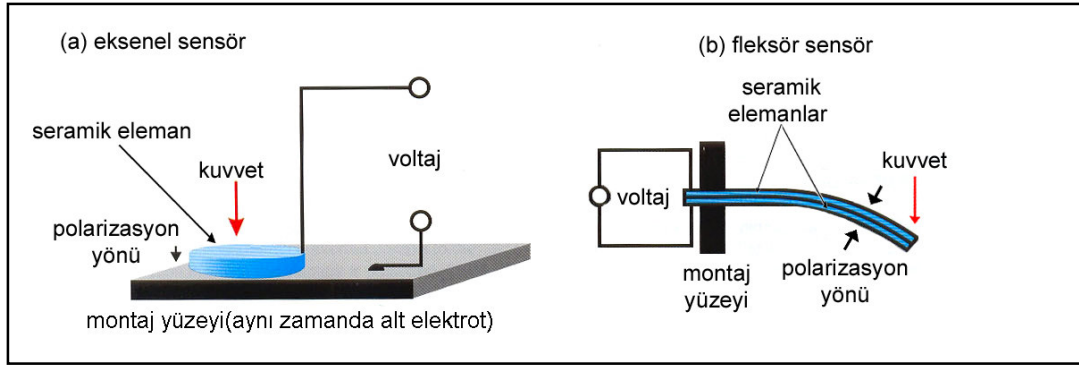
## 2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları

Piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı cihazlar dört genel başlık altında toplanabilir. Bunlar: sensörler, üreteçler, aktüatörler (tahrikçiler) ve transdüserlerdir (dönüştürücüler).

### 2.4.1 Sensörler

Sensör, ivmelenme veya basınç gibi fiziksel bir parametreyi 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.

Piezoelektrik eleman kullanılarak yapılan sensörlerin aksenel ve fleksör olmak üzere iki temel çeşidi mevcuttur. Bu sensörlerin basitçe yapıları Şekil 2.8’de verilmiştir (APC International, 2006).



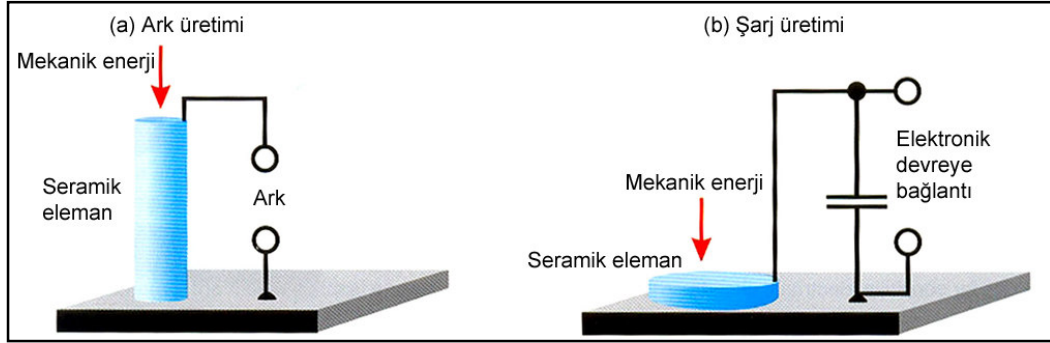
Şekil 2.8 Temel Piezoelektrik Sensör Çeşitleri, (a) Aksenel Sensör, (b) Fleksör Sensör

### 2.4.2 Üreteçler

Üreteç olarak dizayn edilen piezoelektrik malzemeler, gerilim (voltaj) üretirler. Bu özelliklerinden ötürü herhangi bir elektrot aralığında ark oluşturabildiklerinden (Şekil 2.9a) yakıt ateşleyicilerinde, gaz sobaları, kombi gibi cihazlarda, kaynak ekipmanlarında ve daha birçok cihazda piezo çakmak (ateşleme aparatı) olarak kullanılırlar.

Piezoelektrik ateşleme sistemleri, küçük ve basittirler. Bu özellikleri bazı durumlarda, kalıcı mıknatıslar veya yüksek voltaj dönüştürücüler ve kapasitörler gibi, alternatif sistemlere göre avantaj sağlar. Ayrıca piezoelektrik bir elmandan elde edilen elektrik enerjisini depolama imkânı da mevcuttur. Çok katlı kapasitörleri oluşturmada kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteçlerinin yapımında da kullanılmıştır. Bu şekilde (Şekil 2.9b) üretilen

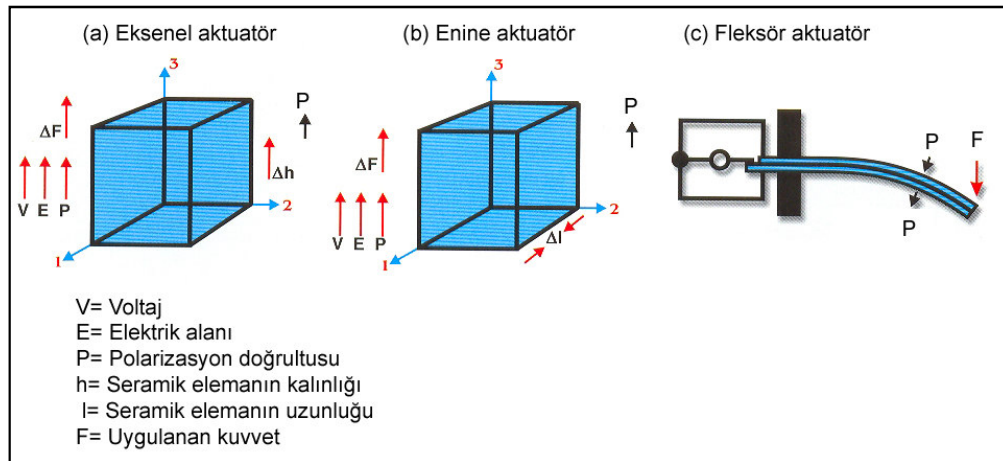
üreteçler elektronik devreleri beslemede kullanılan kuru pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok elverişlidirler (APC International, 2006).



Şekil 2.9 Piezoelektrik Eleman Kullanılarak Oluşturulan Elektrik Enerjisi, (a) Ark Üretimi, (b) Şarj Üretimi

### 2.4.3 Aktüatörler

Tetikleyici veya tahrikçi olarak da adlandırılabilen aktüatörler, elektrik sinyalini hassas ötelenmeye (yer değişimine) çevirirler. Aktüatörler, temel olarak aksel, enine ve fleksör aktüatörler olarak gruplandırılırlar (Şekil 2.10). Aktüatörlerin gösterdiği yüksek hassasiyetteki hareketten makinelerde kullanılan takımların hassas şekilde kalibrasyonundan, çeşitli sistemlerde kullanılan optik lens veya aynaların kalibrasyonuna kadar birçok yüksek duyarlılık gerektiren uygulamada yararlanılır. Ayrıca piezoelektrik aktüatörler, uygulamasına göre hidrolik valfleri, küçük hacimdeki motorları veya özel amaçlı motorları kontrol etmede de kullanılabilirler. Aktüatörler, bir çeşit piezoelektrik motorlardır ve en büyük avantajları elektromanyetik gürültü oluşturmamalarıdır. Ayrıca eğer aktüatörün gerçekleştirdiği ötelenme engellenirse, aktüatör kullanılabilir bir kuvvet üretmiş olur (APC International, 2006).



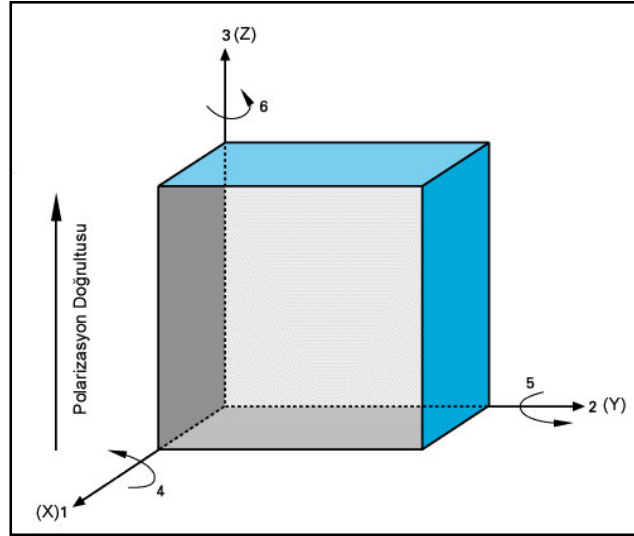
Şekil 2.10 Temel Aktüatör Çeşitleri (a-c)

#### 2.4.4 Transdüserler

Piezoelektrik transdüserler, elektrik enerjisini ses veya ses üstü 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 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 yararlıdır (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 2.11).



Şekil 2.11 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 (birimi: C/N) veya uygulanan birim elektrik alan sonucu piezoelektrik malzemedeki mekanik gerinim ( $S$ ) olarak tanımlanabilir (birimi: m/V). Piezoelektrik yük sabitinin ilk alt indisi elektrik alan,  $E$ , sıfır olduğunda malzemede 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 gerinim, elektrik alanıyla ve piezoelektrik yük sabitiyle ilişkili olduğundan, piezoelektrik yük sabiti aktüatör gibi gerinime bağlı uygulamalar için malzemenin uygunluğunu sınavan önemli bir sabittir. “ $d$ ”nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlardan bazıları Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Piezoelektrik yük sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.1’de verilmiştir.

$$d = k\sqrt{(s^E \varepsilon^T)} \quad (2.1a)$$

$$d_{31} = k_{31}\sqrt{(s_{11}^E \varepsilon_{33}^T)} \quad (2.1b)$$

$$d_{33} = k_{33}\sqrt{(s_{33}^E \varepsilon_{33}^T)} \quad (2.1c)$$

$$d_{15} = k_{15}\sqrt{(s_{55}^E \varepsilon_{11}^T)} \quad (2.1d)$$

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

<b>d</b>	<b>Açıklama</b>
$d_{33}$	3 yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 3 yönünde oluşan gerinim
$d_{31}$	1 yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 1 yönünde oluşan gerinim
$d_{15}$	2 yönünde uygulanan birim kayma gerilmesi sonucu 1 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 1 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 2 yönünde oluşan kayma gerinim.

### 2.5.2 Piezoelektrik voltaj sabiti

Piezoelektrik voltaj sabiti,  $g$ , uygulanan birim mekanik gerilme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan elektrik alan (birimi: Vm/N) veya uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan mekanik gerinimdir (birimi:  $m^2/C$ ). 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 gerinimin 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.

Piezoelektrik voltaj sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.2'de verilmiştir.

$$g = d/\varepsilon^T \quad (2.2a)$$

$$g_{33} = d_{31}/\varepsilon_{33}^T \quad (2.2b)$$

$$g_{31} = d_{31}/\varepsilon_{33}^T \quad (2.2c)$$

$$g_{15} = d_{15}/\varepsilon_{11}^T \quad (2.2d)$$

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

<b>g</b>	<b>Açıklama</b>
$g_{33}$	3 yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 3 yönünde oluşan gerinim
$g_{31}$	1 yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 1 yönünde oluşan gerinim
$g_{15}$	2 yönünde uygulanan birim kayma gerilmesi sonucu 1 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 1 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 2 yönünde oluşan kayma gerinim.

### 2.5.3 Dielektrik sabiti

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

Relatif dielektrik sabiti  $K$ , ise  $\epsilon$ 'nin (seramik malzemeden yapılmış bir elemanın depolayabileceği yük miktarının)  $\epsilon_0$ 'a (vakumda depolanana,  $8,85 \times 10^{-12}$  farad/metre) oranlanmasıyla bulunur (Eşitlik 2.3).

$$K^T = \epsilon^T / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

Piezoelektrik sabitleri  $d$ ,  $\epsilon^T$  ve  $g$  arasındaki ilişki ise Eşitlik 2.4'deki gibidir.

$$g = d / \epsilon^T \quad (2.4)$$

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

$\epsilon$	Açıklama
$\epsilon_{11}^T$	Sabit gerilme altında 1 doğrultusundaki dielektrik ötelenme ve elektrik alanının permitivesi.
$\epsilon_{33}^S$	Sabit gerinim altında 3 doğrultusundaki dielektrik ötelenme ve elektrik alanının permitivesi.

### 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 ifadeler 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 doğrultularına 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 İfadeleri (APC International, 2006)

<b>k</b>	<b>Açıklama</b>
$k_{33}$	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 bir elemanın elektromekanik çift faktörüne ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.5'de verilmiştir. Eşitlik 2.5 statik veya düşük frekanslar için geçerlidir.

$$k^2 = d^2/(s^E \epsilon^T) \quad (2.5a)$$

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = d_{31}^2 (s_{11}^E \varepsilon_{33}^T) \quad (2.5b)$$

Seramik disk için:

$$k_p^2 = 2d_{31}^2 ((s_{11}^E + s_{12}^E) \varepsilon_{33}^T) \quad (2.5c)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 (s_{55}^E \varepsilon_{11}^T) \quad (2.5d)$$

Eşitlik 2.5’de piezoelektrik seramik elemanlar için verilen elektromekanik çift katsayıları yüksek frekanslar için Eşitlik 2.6’da verilen şekle dönüşür.

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_n}{f_m}\right) \tan\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_n - f_m}{f_m}\right)\right]}{1 + \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_n}{f_m}\right) \tan\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_n - f_m}{f_m}\right)\right]} \quad (2.6a)$$

Seramik disk için:

$$k_p \approx \sqrt{[(2.51 (f_n - f_m)/f_n) - ((f_n - f_m)/f_n)^2]} \quad (2.6b)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = (\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n - f_m)/f_n)] \quad (2.6c)$$

Herhangi bir şekildeki piezoelektrik eleman için ise elektromekanik çift katsayısı Eşitlik 2.7’de verilmiştir.

$$k_{\text{eff}}^2 = (f_n^2 - f_m^2)/f_n^2 \quad (2.7)$$

### 2.5.5 Elastik uygunluk

Elastik Uygunluk (compliance),  $s$ , bir piezoelektrik malzemeye 11 ve 33 doğrultularında uygulanan birim gerilme sonucunda oluşan gerinimdir. Aynı zamanda elastiklik modülünün tersidir (gerinim/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 gerinimin doğrultusunu, ikinci alt indisleri gerilmenin doğrultusunu belirtir.  $S$ ’nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.10’da verilmiştir.

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

s	Açıklama
$s_{11}^E$	Sabit elektrik alan altında 1 doğrultusunda uygulanan gerilme sonucu gene 1 doğrultusunda oluşan gerinim için elastik uygunluk
$s_{33}^D$	Sabit elektrik ötelenme altında 3 doğrultusunda uygulanan gerilme sonucu gene 3 doğrultusunda oluşan gerinim için elastik uygunluk

Piezoelektrik seramik bir elemenda elastik uygunluğa ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.8'de verilmiştir.

$$s = 1/\nu^2 \quad (2.8a)$$

$$s_{33}^D = 1/Y_{33}^D \quad (2.8b)$$

$$s_{33}^E = 1/Y_{33}^E \quad (2.8c)$$

$$s^{D11} = 1/Y_{11}^D \quad (2.8d)$$

$$s_{11}^E = 1/Y_{11}^E \quad (2.8e)$$

### 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 gerinime bölünerek elde edilir (Eşitlik 2.9) (APC International, 2006).

$$E = (F/A) / (\Delta l/l) = T/S \quad (2.9)$$

### 2.5.7 Frekans sabiti

Hareketi kısıtlanmamış bir piezoelektrik seramik eleman, uygun frekansa sahip bir değişken (AC) elektrik alana maruz kaldığında, düzlemsel veya radyal rezonans frekansı, seri rezonans frekansı,  $f_s$ , ile çakışır. Radyal mod rezonans frekans sabiti,  $N_p$ , ile seramik elemanın çapı,  $D_0$ , arasındaki ilişki Eşitlik 2.10a ile ifade edilebilir (APC International, 2006).

$$N_p = f_s \cdot D_0 \quad (2.10a)$$

Diğer bir frekans sabiti ise kalınlık modu frekans sabiti,  $N_T$ , seramik elemanın kalınlığı, h, ile Eşitlik 2.10b'deki gibi ilişkilendirilebilir.

$$N_T = f_s \cdot h \quad (2.10b)$$

Üçüncü bir frekans sabiti de boyuna mod frekans sabitidir. Bu sabitin elemanın boyuyla olan ilişkisi ise Eşitlik 2.10c'de verilmiştir.

$$N_L = f_s \cdot l \quad (2.10c)$$

### 3. 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.

#### 3.1 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, 1990; Thompson, 1996; Maia, 1997).

#### 3.1.1 Titreşim analizi

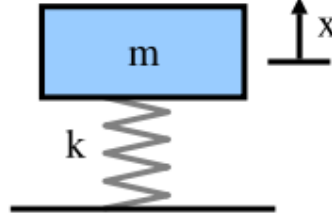
Titreşim analizinin temelleri, basit kütle-yay-sönüm elemanı modeli incelenerek anlaşılabilir. Aslında bir otomobil gibi karmaşık bir yapı dahi bir basit kütle-yay-sönüm modellerinin toplamı olarak modellenebilir.

##### 3.1.1.1 Sönümsüz serbest titreşim

Kütle-yay-sönüm modelini incelemek için sönümün göz ardı edilebilir olduğunu ve kütleyle

hiçbir dış kuvvetin etkimeydiğini varsayıyoruz (örneğin: serbest titreşim).

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



Şekil 3.1 Basit Kütle–Yay Sistemi

$$F_s = -k \cdot x \quad (3.1)$$

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

$$\sum F = ma = m\ddot{x} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.2)$$

Kütle üzerindeki kuvvetleri toplayıp aşağıdaki adi diferansiyel denkleme ulaşırız:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.3)$$

Eğer sistemi, yayı “A” çekerek titreşime başlattığımızı ve sonra serbest bıraktığımızı varsayarsak, kütleinin hareketini tanımlayan yukarıdaki denklemin çözümü şöyle olur:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_n t) \quad (3.4)$$

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:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.5)$$

Eğer sistemin kütleini ve yay sabitini 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 direngenlik eklediğimizde ne olduğunu

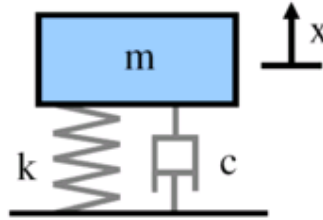
açıklar.

Bu formüller, sistemin son hareketini tanımlamakla beraber sistemin neden salındığını açıklamazlar. Bu salınım (osilasyon), enerjinin korunumundan kaynaklanmaktadır. Yukarıdaki örnekteki yayı “A” kadar uzattık ve böylece yayda bir potansiyel enerji depoladık. Serbest bıraktığımızda ise yay uzatılmamış durumuna dönmek ister ve bu yüzden kütleyi ivmelendirir. Yayın uzatılmamış ilk haline döndüğü nokta artık depolanmış enerjiye sahip değildir fakat kütle maksimum hızına ulaşmıştır ve bu yüzden tüm enerji kinetik enerjiye dönmüştür. Ardından kütle ivmesini kaybetmeye başlar çünkü şimdi yayı sıkıştırıyor ve kinetik enerjisini potansiyel enerjiye dönüştürüyor. Kütledeki kinetik enerjinin yaydaki potansiyel enerjiye ve yaydaki potansiyel enerjinin kütledeki kinetik enerjiye dönüşümü salınımına sebep olmaktadır.

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.

### 3.1.1.2 Sönümlü serbest titreşim

Şimdi sisteme kütle 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 3.2 Basit Kütle–Yay–Sönüm Sistemi

$$F_d = -cv = -c\dot{x} = -c \frac{dx}{dt} \quad (3.6)$$

Kütle üzerindeki kuvvetleri toplayarak aşağıdaki adi diferansiyel denklemi elde ederiz:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.7)$$

Bu denklemin çözümü sönümün miktarına bağlıdır. Eğer sönüm yeterince küçükse, sistem titreşecek fakat zaman geçtikçe titreşmesi 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:

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (3.8)$$

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 ( $\zeta$ ) formülü ise şöyledir:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.9)$$

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

Az sönümlü kütle yay sönüm sistemi için çözüm aşağıdaki gibidir:

$$x(t) = X e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n t - \phi), \omega_n = 2\pi f_n \quad (3.10)$$

Başlangıç genliği (X) ve faz farkı ( $\phi$ ) yayın ne kadar sıkıştırıldığına göre değişir.

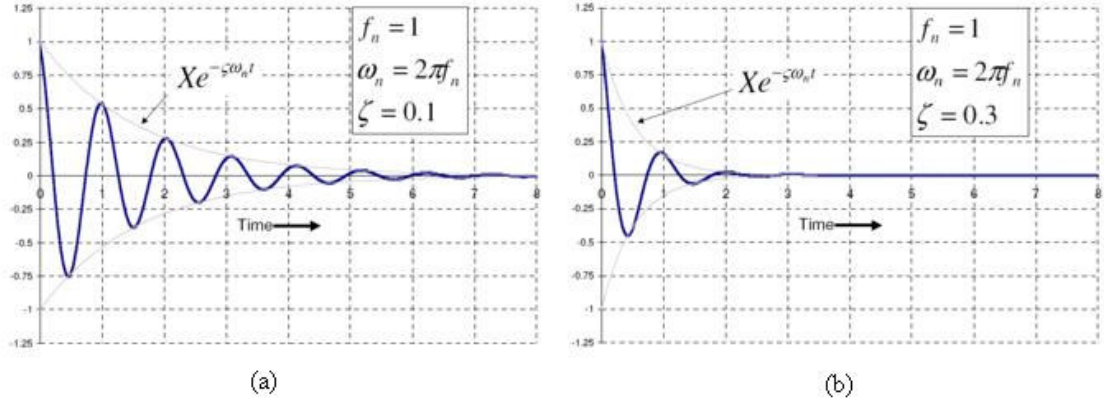
Bu çözümde fark edilmesi gereken önemli nokta eksponansiyel terim ve kosinüs fonksiyonudur. Eksponansiyel terim sistemin ne kadar hızlı sönümleneceğini belirleyen terimdir (sönüm oranı büyüdükçe sistem daha hızlı sönümlenir). Kosinüs fonksiyonu ise çözümün salınım yapan kısmıdır ve salınımın frekansı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

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

$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} f_n \quad (3.11)$$

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 3.3’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.



Şekil 3.3 Sönümlü Serbest Titreşim (a)  $\zeta = 0.1$ , (b)  $\zeta = 0.3$

### 3.1.1.3 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 dönmeye dengersizlikten kaynaklanabilir.

$$F = F_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (3.12)$$

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

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(2\pi f \cdot t) \quad (3.13)$$

Bu problemin kararlı durum çözümü şu şekilde yazılabilir;

$$x(t) = X \cdot \cos(2\pi f \cdot t - \phi) \quad (3.14)$$

Sonuç, kütle için uygulanan kuvvetle aynı frekansta ( $f$ ) salınacağını fakat arada bir faz farkı  $\phi$  olacağını gösterir.

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

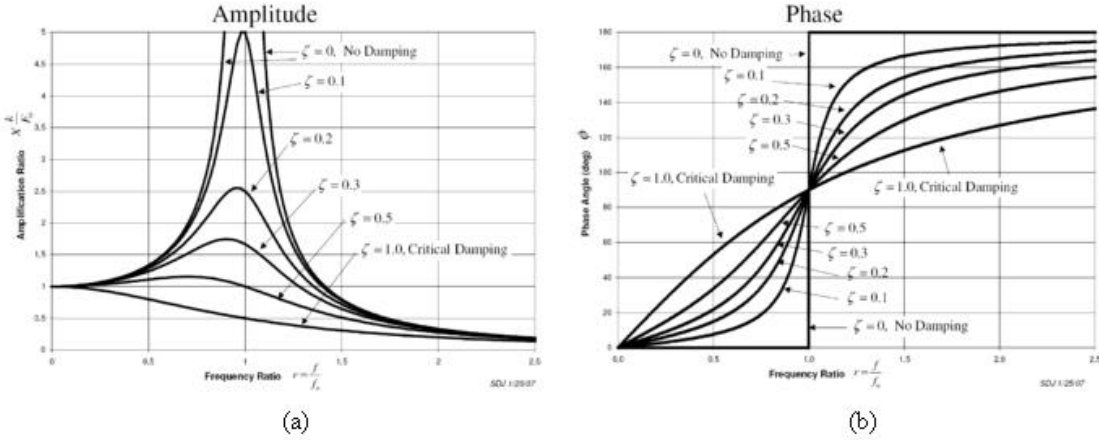
$$X = \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3.15)$$

Burada "r", harmonik kuvvetin frekansının sönümsüz kütle-yay-sönüm modelinin doğal frekansına oranı olarak tanımlanır.

$$r = f / f_n \quad (3.16)$$

Faz farkı ( $\phi$ ) ise aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$\phi = \arctan\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (3.17)$$



Şekil 3.4 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 3.4(a), genlik çizimlerinde görüldüğü gibi, sönüm eklemek titreşimin genliğini önemli derecede azaltır. Aynı zamanda genlik, sistemin kütlesi veya direngenliği değiştirilerek doğal frekansın zorlama frekansından uzaklaştırılmasıyla da düşürülebilir. Eğer sistem değiştirilemiyorsa, belki zorlama frekansı değiştirilebilir (örneğin: kuvvete sebep olan makinenin dönme hızını değiştirerek).

#### 3.1.1.4 Rezonans

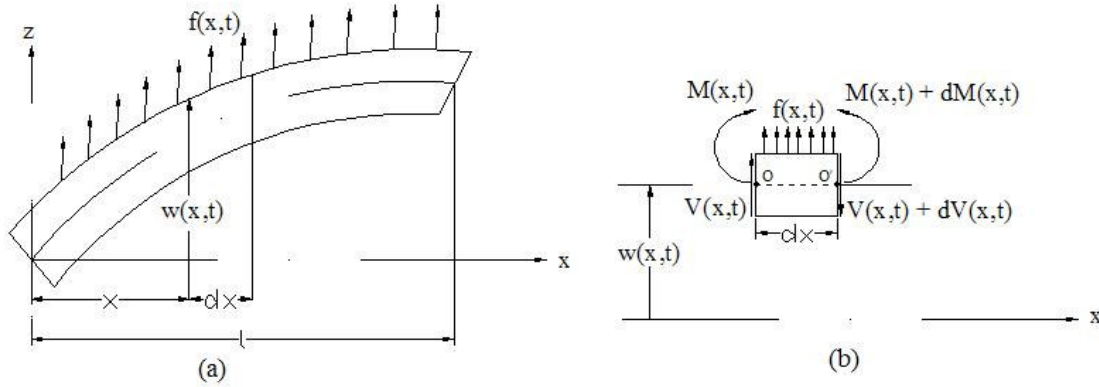
Eğer kütle ve yayı enerji depolama elemanları olarak görürseniz rezonansı anlamak çok kolaydır. Kütle kinetik enerji depolarken yay ise potansiyel enerji depolar. Daha önce de bahsedildiği gibi, kütle ve yay, üzerinde hiçbir kuvvet yokken, enerjilerini doğal frekansa eşit oranda bir ileri bir geri dönüştürürler. Diğer bir deyişle, eğer enerji verimli bir şekilde kütle ve yayın içerisine pompalansaydı, enerji kaynağının doğal frekansa eşit oranda beslenmesi gerekirdi. Bir kütle ve yaya bir kuvvet uygulamak bir çocuğu salıncakta sallamaya benzer,

eğer daha yükseğe sallamak istiyorsanız doğru zamanda ittirmek zorundasınızdır. Aynen salıncak örneğinde olduğu gibi, daha büyük bir hareket elde etmek için uygulanan kuvvetin illa ki çok yüksek olması gerekmemektedir. Bu itmeler sadece enerjinin sistemin içine eklenmesini sağlar.

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.

### 3.1.2 Kirişlerde eğilme titreşimleri

Kirişlerdeki yanal titreşimlerin diferansiyel hareket denklemini türetmek için kirişin bir elementine etki eden  $M(x,t)$  eğilme momenti,  $V(x,t)$  kesme gerilmesi ve dış kuvvet  $f(x,t)$  Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5 Kirişlerde Eğilme

Atalet kuvveti kirişin bir parçası üzerine etki ettiğinde,

$$\rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (3.18)$$

Hareketin z yönündeki kuvvet denkleminde;

$$-(V + dV) + f(x, t) dx + V = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (3.19)$$

Y ekseninde 0 noktasına göre moment denkleminde;

$$(M + dM) - (V + dV) dx + f(x, t) dx \frac{dx}{2} - M = 0 \quad (3.20)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx \quad (3.21)$$

$$dM = \frac{\partial M}{\partial x} dx \quad (3.22)$$

(3.19) ve (3.20) denklemlerinde her iki tarafı da  $dx$ 'e bölerek ve ikinci türev  $dx$  içeren terimleri de ihmal ederek;

$$-\frac{\partial V}{\partial x}(x, t) + f(x, t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (3.23)$$

$$-\frac{\partial M}{\partial x}(x, t) - V(x, t) = 0 \quad (3.24)$$

(3.24) denklemini (3.19) denkleminde yerine koyarak;

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}(x, t) + f(x, t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (3.25)$$

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

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \quad (3.26)$$

(3.26) denklemini (3.25)'de yerine koyarsak;

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \right) + \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (3.27)$$

Uniform bir kiriş için (3.27) denklemi;

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (3.28)$$

Serbest titreşim için dış kuvvet  $f(x,t)=0$  olduğundan, (3.28) denklemini;

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad (3.29)$$

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.30)$$

(3.30) denklemini (3.29) denkleminde yerine koyarsak;

$$c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) = 0 \quad (3.31)$$

### 3.1.2.1 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;

$$w(x, t = 0) = w_0(x) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}(x, t = 0) = \dot{w}_0(x) \quad (3.33)$$

### 3.1.2.2 Serbest titreşimler

Değişkenlere ayırma metodu ile serbest titreşim denklemi çözülebilir.

$$w(x, t) = W(x)T(t) \quad (3.34)$$

(3.34) denklemi (3.31) denkleminde yerine koyularak;

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} (x, t) = 0 = a = \omega^2 \quad (3.35)$$

$a = \omega^2$  pozitif değişken

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (3.36)$$

(3.36) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) = 0 \quad (3.37)$$

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} - \omega^2 T(t) = 0 \quad (3.38)$$

(3.36) denkleminin çözümü aşağıdaki gibidir.

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

A ve B sabitleri başlangıç koşullarını kullanarak hesaplanır.

$$W(x) = C e^{st} \quad (3.39)$$

C ve s değerleri sabit değerlerdir. Bu durumda (3.39) denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$s^4 - \beta^4 = 0 \quad (3.40)$$

Bu denklemin kökleri

$$s_{1,2} = \pm \beta \quad (3.41)$$

$$s_{3,4} = \pm i\beta \quad (3.42)$$

(3.41) ve (3.42) denklemleri kullanılarak (3.39) denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$W(x) = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + C_3 e^{i\beta x} + C_4 e^{-i\beta x} \quad (3.43)$$

$C_1, C_2, C_3$  ve  $C_4$  denklemin sabitleridir.

(3.43) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

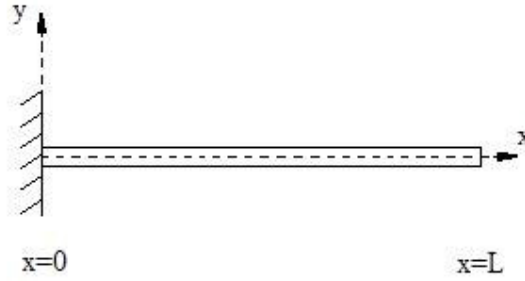
$$W(x) = C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x) + C_3 \cosh(\beta x) + C_4 \sinh(\beta x) \quad (3.44)$$

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

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

$$\omega_n = \beta_n \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.45)$$

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



Şekil 3.6 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:

$$w(0, t) = 0 \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (3.47)$$

Kirişin ankastre mesnetli tarafında, (3.46) denklemi düşey yer değiştirmenin sıfır olduğunu ve (3.47) denklemi de dönmenin (açısal yer değiştirme) sıfır olduğunu göstermektedir.

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) = 0 \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{(l,t)} = 0 \quad (3.49)$$

Kirişin serbest tarafında, (3.48) denklemi eğilme momentinin sıfır olduğunu ve (3.49) denklemi de kesme kuvvetinin sıfır olduğunu göstermektedir.

$$w(0, t) = (C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0 + C_3 \cosh 0 + C_4 \sinh 0)(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (3.50)$$

$$w(0, t) = (C_1 + C_3)(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (3.51)$$

$$C_1 + C_3 = 0 \quad (3.52)$$

(3.52) denklemi 1. sınır şarttır.

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = \quad (3.53)$$

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

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0, t) = \beta(C_2 + C_4)(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = 0 \quad (3.54)$$

$$C_2 + C_4 = 0 \quad (3.55)$$

(3.55) denklemi ikinci sınır şartıdır.

$$EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(l, t) = 0 = \quad (3.56)$$

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

$$-C_1 \cos(\beta l) - C_2 \sin(\beta l) + C_3 \cosh(\beta l) + C_4 \sinh(\beta l) = 0 \quad (3.57)$$

(3.57) denklemi üçüncü sınır şartıdır.

$$\left( EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}(l, t) \right)_{(l,t)} = \quad (3.58)$$

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

$$(C_1 \sin(\beta l) - C_2 \cos(\beta l) + C_3 \sinh(\beta l) + C_4 \cosh(\beta l)) = 0 \quad (3.59)$$

(3.59) denklemi 4. sınır şarttır.

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

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\cos(\beta l) & -\sin(\beta l) & \cosh(\beta l) & \sinh(\beta l) \\ \sin(\beta l) & -\cos(\beta l) & \sinh(\beta l) & \cosh(\beta l) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.60)$$

$$2(1 + \cos(\beta l)\cosh(\beta l)) = 0 \quad (3.61)$$

$$\cos(\beta l)\cosh(\beta l) = -1 \quad (3.62)$$

$$\cos(\beta_n l) + \cosh(\beta_n l) = -1 \quad (3.63)$$

### 3.2 Akıllı Yapılar ve Sistemler

Akıllı yapılar, görevleri sistemi sönmölemek olan sensör ve aktüatör elemanlarının gövde üzerine yapıştırılması veya gömülmesiyle oluşan yapılar olarak görölebilir. Örneğın, 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 ispatlıyorlar. 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 sönmölenmiş olur.

Az önce bahsedilen araştırmalar sayesinde, bilim adamlarının hayal güçlerini kullanmasıyla, havacılık, kara taşıtları, denizaltılar, uzay araçları, silah sistemleri ve endüstriyel makineler gibi alanlarda kullanılabilir yeni nesil ürünlerin üretilmesinde akıllı yapıların sunabileceği potansiyel çok yüksektir. Bu şekilde az bulunur yapıların gerçekleştirilmesi için, piezoelektrik malzemelerin nasıl çalıştığı ve kontrol edildiğinin temellerinin anlaşılması yönünde ek araştırmalar yapmak gerekiyor.

Aktüatör ve sensör için uygun malzeme seçildikten sonra, bunlar yapıya kontrolör için gerekli elektrik bağlantıları ile entegre edilmelidir. Kompozit bir yapıda (gömölmüş aktüatör), bütün parçalar yapının bütünleşmiş parçalarıdır ve yapısal dizaynın bir parçası olmalıdır. Bununla birlikte, birçok yapıda aktüatör ve sensörler yüzeye yapıştırılmış olarak bulunabilir. Çelik ve alüminyum yapılarda bu tek pratik yoldur.

Her iki yapının da avantajları ve dezavantajları vardır. Kompozit yapılarda, aygıtlardan birisi üretim veya çalışma sırasında bozulursa bütün kompozit bölüm değiştirilmelidir. Diğer taraftan, yüzeye bağlı aygıtlar bozulma durumunda kolayca erişilebilir. Fakat bunlar da dış etkenlerden daha kolay etkilenirler. Bununla birlikte, eğer sensör veya aktüatör

değiştiriliyorsa her iki durumda da yapının parçalanma olasılığı vardır. Yüzeye bağlı yapılar eğilme dalgalarını kontrol etmekte ek yarar sağlar. Bunun nedeni, aktüatörün yapının doğal ekseninden uzağa yerleştirilmesinden dolayı sağlayacağı daha fazla yapısal yer değiştirmedir (Sözen, 2002).

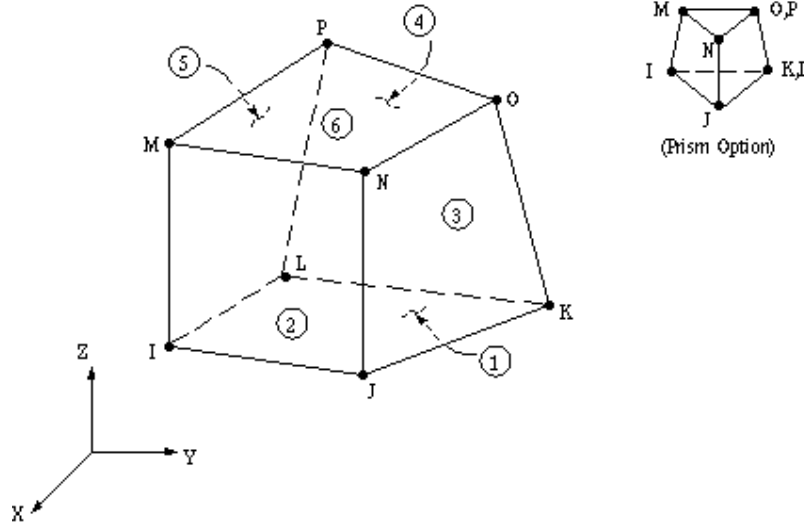
## 4. AKILLI ÇUBUĞUN ANSYS MODELİ

Bu bölümde, üzerinde bir sensör ve iki aktüatör piezoelektrik seramik bulunan bir ankastre alüminyum çubuğun ANSYS programında 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

### 4.1 ANSYS Modelleme Elemanları

#### 4.1.1 SOLID5

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 4.1'de, bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimleri ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Eleman, 8 düğüm noktası ve malzeme özellikleriyle tanımlanır.

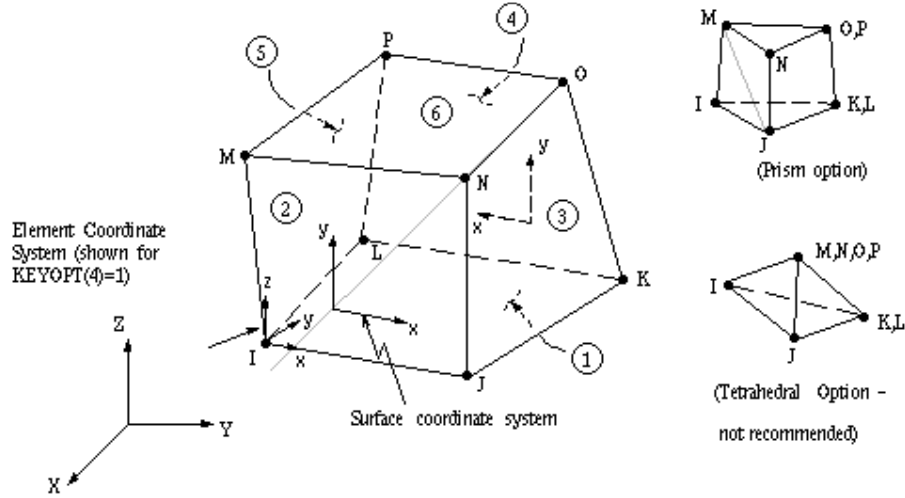


Şekil 4.1 ANSYS Programındaki SOLID5 Elemanı

#### 4.1.2 SOLID45

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 4.2 ANSYS Programındaki SOLID45 Elemanı

Şekil 4.2'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.

## 4.2 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 irdelemeler için çerçeveselendirir. 2-5 arası kısımlar, üreticinin verisini, rijitlik matrisi, dielektrik sabitler ve piezoelektrik sabitler olarak ANSYS verisine çevirmeyi kapsar (Imaoka, 1999).

### 4.2.1 Geçmiş bilgiler

Dönüşüm rutinlerine geçmeden önce, piezoelektrik malzemelerin temel esas ilişkileri özetlenecektir.

T = mekanik gerilim

S = mekanik gerinim

D = elektrik yer değiştirmesi (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:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (4.1)$$

$$\{D\} = [d]^t \{T\} + [\epsilon^T]\{E\} \quad (4.2)$$

Burada;

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

$\{S\}$  = gerinim 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)

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

$[d]^t$  = gerinim/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:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (4.3)$$

$$\{D\} = [e]^t \{S\} + [\epsilon^S]\{E\} \quad (4.4)$$

Burada;

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

$\{S\}$  = gerinim 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)

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

Denklem 4.1 ve 4.2 şeklinde verilen üreticinin verisini, denklem 4.3 ve 4.4 şeklinde ANSYS notasyonuna çevirmek için, denklem 4.1'in gerinim yerine gerilmeyi temel alması gerekir. Aşağıdaki ayarlamalar yapılabilir:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (4.5)$$

$$[s^E]\{T\} = \{S\} - [d]\{E\} \quad (4.6)$$

$$\{T\} = [s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\} \quad (4.7)$$

Denklem 4.2 elektrik yer değiştirmesini gerilme yerine gerinime bağladığı için, denklem 4.7 denklem 4.2 içine koyulabilir:

$$\{D\} = [d]^t \{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad (4.8)$$

$$\{D\} = [d]^t ([s^E]^{-1}\{S\} - [s^E]^{-1}[d]\{E\}) + [\varepsilon^T]\{E\} \quad (4.9)$$

$$\{D\} = [d]^t [s^E]^{-1}\{S\} + ([\varepsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1}[d])\{E\} \quad (4.10)$$

Denklem 4.7 ve 4.10'un denklem 4.3 ve 4.4 ile karşılaştırılması ile, üretici verisi ile ANSYS için gerekli değerler arasındaki ilişki elde edilebilir.

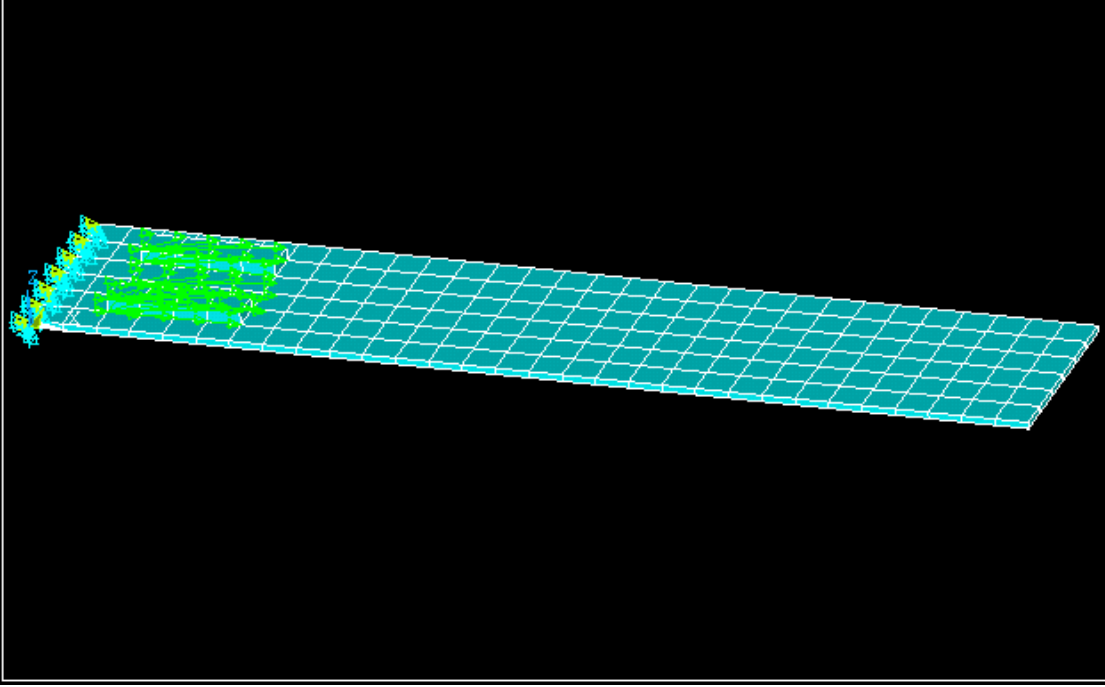
$$[c^E] = [s^E]^{-1} \quad (4.11)$$

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1}[d] \quad (4.12)$$

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (4.13)$$

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.

Üretici tarafından sunulan piezoelektrik malzeme değerlerinin ANSYS Programı için istenilen verilere çevrilmesi Ek-3'de anlatılmıştır.



Şekil 4.3 Akıllı Çubuğun ANSYS10 Programındaki Modeli

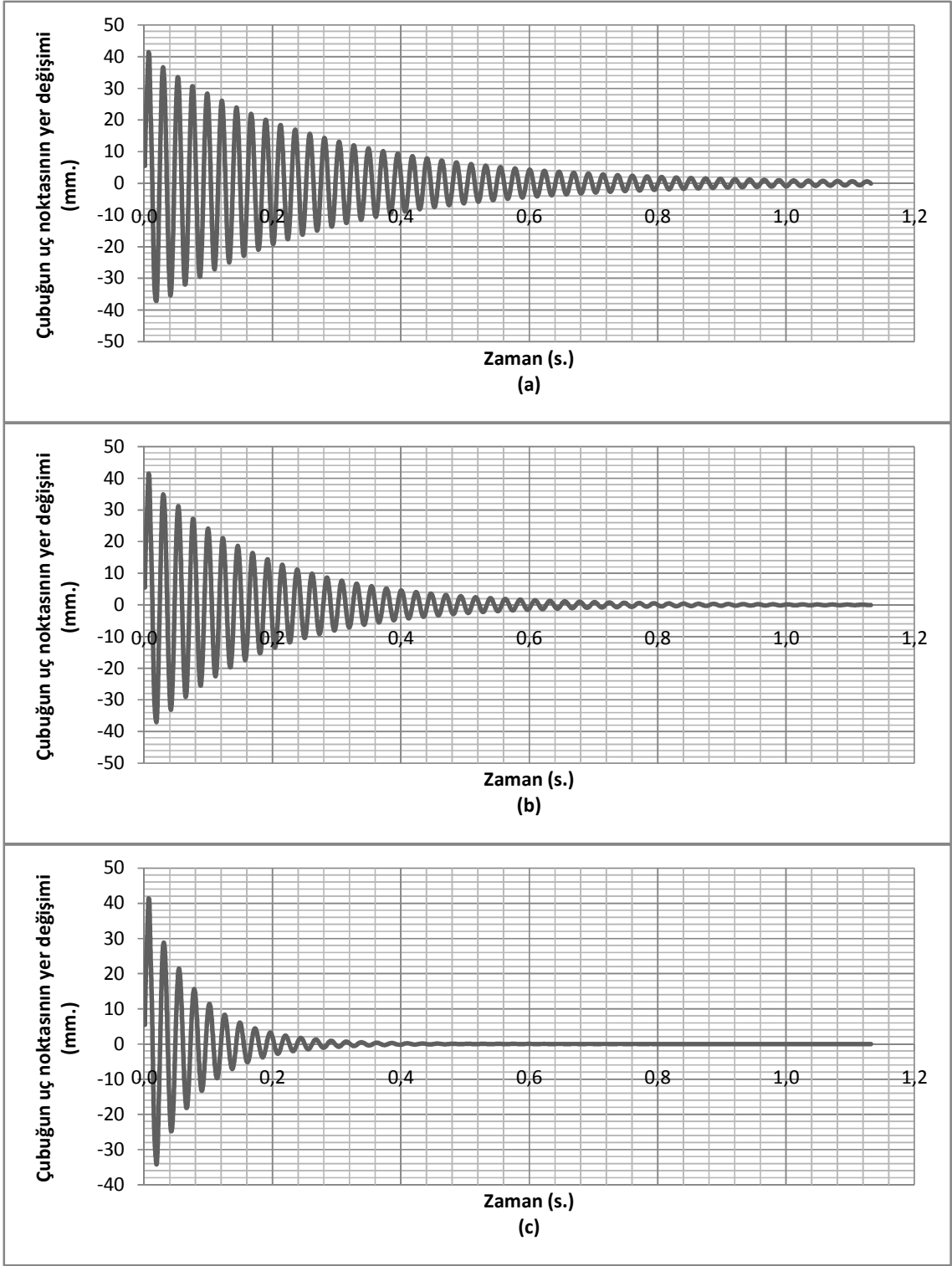
### 4.3 Serbest Titreşim İçin Aktif Kontrol

Ek-4'deki makroya uygun olarak hazırlanan model Şekil 4.3'de görülmektedir. Bu model üzerine aktif kontrol uygulamak için gerekli ANSYS makrosu açıklamalarıyla birlikte Ek-1'de verilmiştir (Malgaca, 2007).

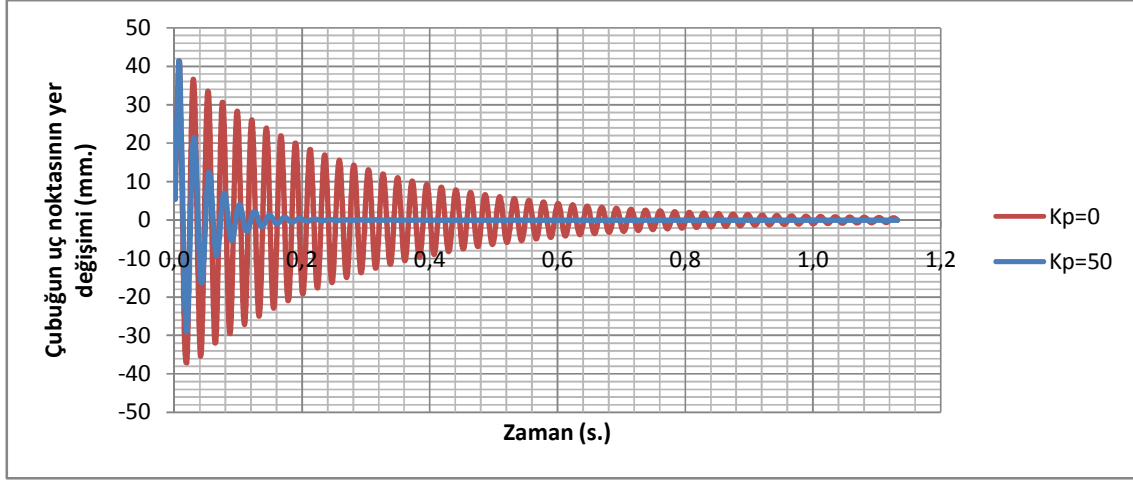
Bu makro, önce çubuğa modal analiz yaparak titreşim modlarını çıkartır. Bu modlardan ilkinin kullanarak daha sonra yapılacak transient analizdeki zaman aralığını belirler. Daha sonra çubukta belirlenen noktaya, belirlenen kuvveti bu zaman aralığında uygular. Bundan sonra kuvveti kaldırarak çubuğun titreşmesine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

Güçlendirme katsayısı ( $K_p$ ) değerinin bulunmasında deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. Düşük  $K_p$  değerleri sistemin az sönümlenmesine, yüksek  $K_p$  değerleri ise sistemin kararsız olmasına neden olur.

Şekil 4.4'de, kontrol yapılmadan (çubuğun doğal sönümüyle),  $K_p=20$  (sensörden alınan sinyalin 20 katını aktüatörlere yollayarak) ve  $K_p=40$  (sensörden alınan sinyalin 40 katını aktüatörlere yollayarak) ile elde edilen titreşim grafikleri verilmiştir.



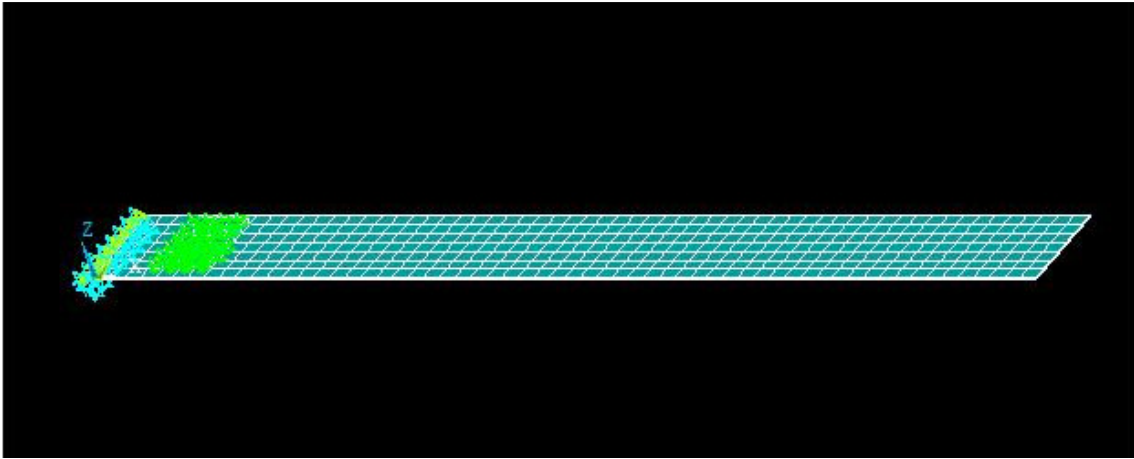
Şekil 4.4 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Serbest Titreşim Grafikleri (a)Kontrolsüz, (b) $K_p=20$ , (c) $K_p=40$



Şekil 4.5 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Serbest Titreşim Grafiklerinin Kıyaslanması

#### 4.4 Zorlamalı Titreşim İçin Aktif Kontrol

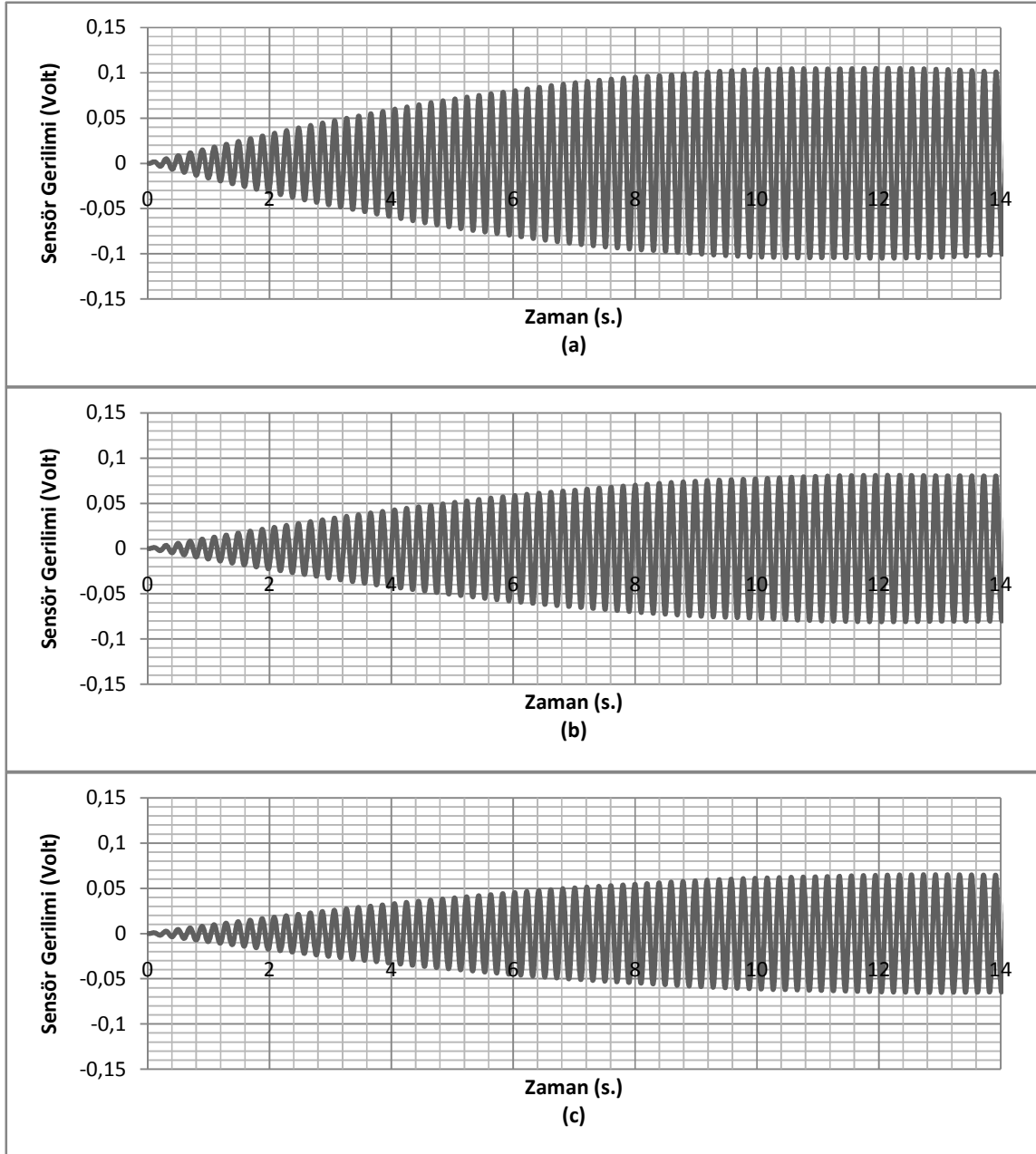
Zorlamalı titreşim için aktif kontrol modeli, deney düzeneği ile uyum sağlaması için değişik bir model üzerinden yapılmıştır. Zorlamalı titreşim için kullanılan modelde 300x35x0,5mm. boyutlarında yay çeliği modellenmiştir (Şekil 4.6). Çubuğun bir yüzünde 15x5x2mm. boyutlarında 3 aktüatör piezoelektrik, diğer yüzünde 1 adet aynı boyutlarda sensör piezoelektrik kullanılmıştır.



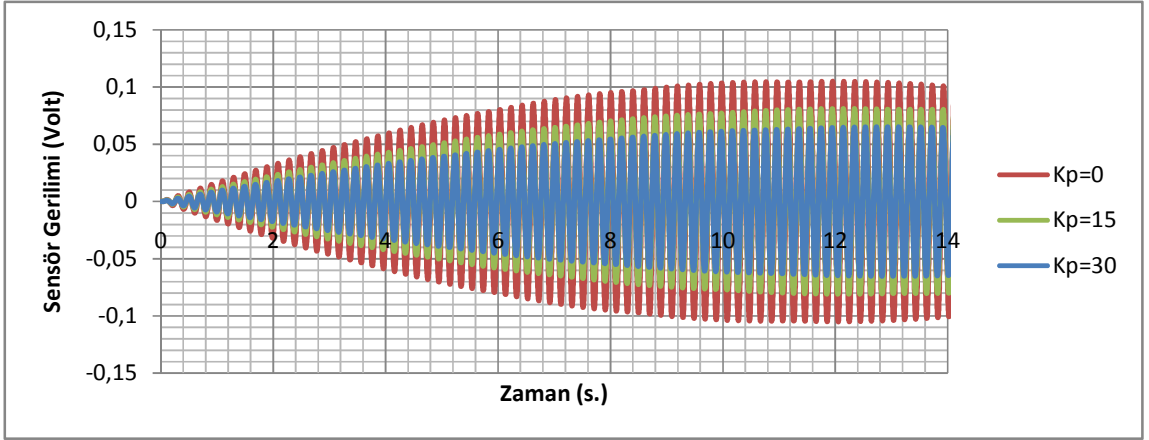
Şekil 4.6 Zorlamalı Titreşim Analizinde Kullanılacak Akıllı Çubuğu ANSYS Modeli

Çubuğa zorlamalı titreşim yaptırabilmek için, üzerindeki bir noktadan, frekansı çubuğun doğal frekansına eşit bir sinüs dalgası şeklinde kuvvet uygulanır. Bu arada, sensör piezoelektriğin topladığı elektrik sinyali güçlendirme katsayısıyla çarpılarak aktüatör piezoelektriklere gönderilir ve aktif kontrol yapılmış olur. Modelin aktif kontrolü Ek-2'deki makroda daha detaylı bir şekilde anlatılmıştır (Malgaca, 2007).

Şekil 4.7’de, kontrol yapılmadan,  $K_p=15$  (sensörden alınan sinyalin 15 katını aktüatörlere yollayarak) ve  $K_p=30$  ile elde edilen zorlanmış titreşim altındaki sensör gerilim değişimi grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.7 ANSYS’te Modellenen Akıllı Çubuğun Zorlanmış Titreşim Altındaki Sensör Gerilimleri (a)Kontrolsüz, (b) $K_p=15$ , (c) $K_p=30$



Şekil 4.8 ANSYS'te Modellenen Akıllı Çubuğun Zorlanmış Titreşim Durumunda Sensör Gerilimi Değişimi Grafiklerinin Kıyaslanması

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan deneysel çalışmada, alüminyum çubuk üzerine yapıştırılmak üzere (2'si aktüatör 1'i sensör olarak) 3 adet piezoelektrik seramik hazırlanmış, bunlar, polarizasyon işlemleri yapıldıktan sonra alüminyum çubuk üzerine yapıştırılmıştır.

Hazırlanan düzenek ile ANSYS'te yapılan model aynı boyutlardadır ve son bölümde ANSYS modeli ile deney düzeneğinin kıyaslaması yapılacaktır.

### 5.1 Deneysel Düzenekinin Hazırlanması

Piezo seramik hazırlamak için APC International firmasının APC 856 tipi ürünü kullanılmıştır. Firma tarafından verilen bu ürünün özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. 856 başlıca, aktüatörlerde, akış metrelerde, kalınlık ölçüm cihazlarında, hidrafonlarda, mikrofonlarda, basınç sensörlerinde, darbeli tip gaz ateşleme sistemlerinde, hassas hareket kontrolünde ve medikal görüntüleme/teşhis cihazlarında kullanılmaktadır.

Piezo malzemeyi hazırlamak için, öncelikle toz halinde olan APC 856 malzemesi uygun basınç ve sıcaklık ile sinterlenmiş ve seramik hale gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra, seramik malzemedan istenilen boyutlardaki seramik parçaların kesilmesi için "Metcon MICRACUT 150 Hassas Kesici" tipi cihaz kullanılmıştır (Şekil 5.1).



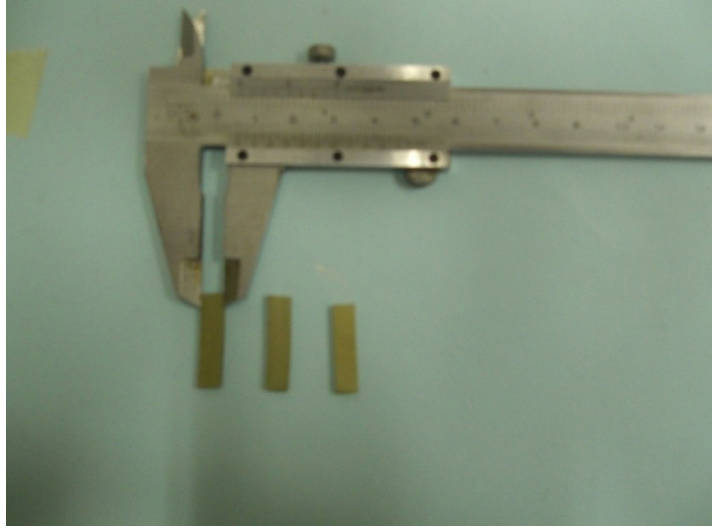
Şekil 5.1 Metcon MICRACUT 150 Hassas Kesici

Çizelge 5.1 APC 856 Tipi Piezoelektrik Malzemenin Özellikleri

<b>APC 856</b>	
<b>Relatif Dielektrik Sabiti (<math>K^T</math>)</b>	4100
<b>Dielektrik Kayıp Faktörü (%)<sup>1</sup></b>	2.7
<b>Küri Sıcaklığı (°C)<sup>2</sup></b>	150
<b>Yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>)</b>	7.5
<b>Mekanik Kalite Faktörü (<math>Q_m</math>)</b>	72
<b>Elektromekanik Çift Katsayısı (%)</b>	
$k_p$	0.65
$k_{33}$	0.73
$k_{31}$	0.36
$k_{15}$	0.65
<b>Piezoelektrik Yük Sabiti (<math>10^{-12}</math> C/N veya <math>10^{-12}</math> m/V)</b>	
$d_{33}$	620
$-d_{31}$	260
$d_{15}$	710
<b>Piezoelektrik Voltaj Sabiti (<math>10^{-3}</math> Vm/N veya <math>10^{-3}</math> m<sup>2</sup>/C)</b>	
$g_{33}$	18.5
$-g_{31}$	8.1
$g_{15}$	25
<b>Young Modülü (<math>10^{10}</math> N/m<sup>2</sup>)</b>	
$Y_{11}^E$	5.8
$Y_{33}^E$	4.5
<b>Frekans Sabitleri (Hz·m veya m/s)</b>	
$N_L$ (boylamsal)	---
$N_T$ (kalınlık)	1980
$N_P$ (yüzeysel)	---

<sup>1</sup> 1 kHz'de<sup>2</sup> Maksimum çalışma sıcaklığı = Küri Sıcaklığı / 2

Bu cihaz sayesinde çok hassas boyutlarda kesim yapılabilir. Cihazın sağ arka tarafında bulunan dijital ölçme aparatı milimetrenin binde biri hassasiyetle ayarlanabilir. Bu şekilde kesilen 20x5x2mm. boyutundaki üç adet piezoelektrik seramik Şekil 5.2’de görülmektedir.



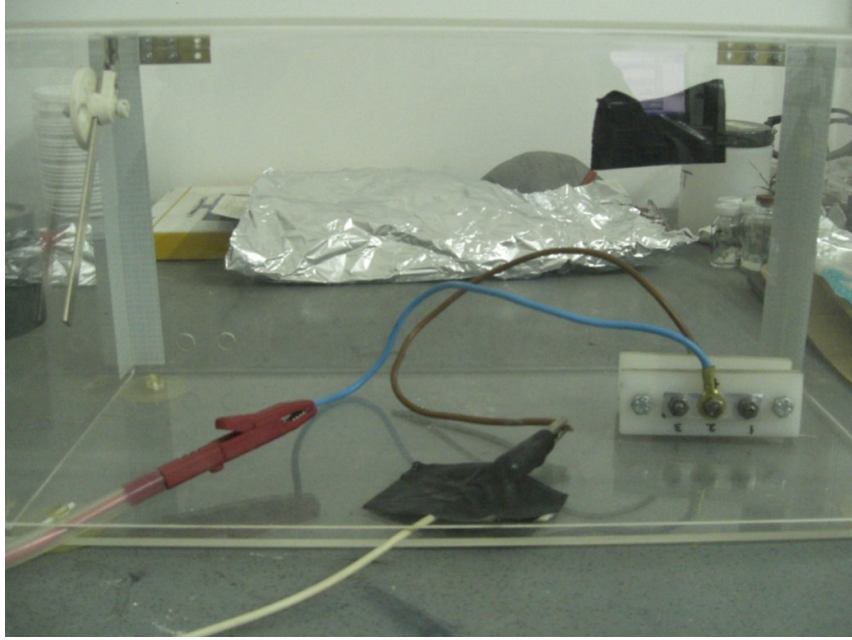
Şekil 5.2 Piezoseramik Parçalar

Bu aşamada, hazırlanan piezo seramiklere yüzey elektrotu oluşturmak için FAME firmasının gümüş iletken boyası kullanılmıştır. Bunun yapılmasındaki amaç bundan sonra yapılacak olan polarizasyon işleminde parçanın daha iyi polarize olmasını sağlamaktır. Boyanın başarılı olup olmadığı iletkenlik ölçen bir cihazla Şekil 5.3’deki gibi ölçülmüştür.

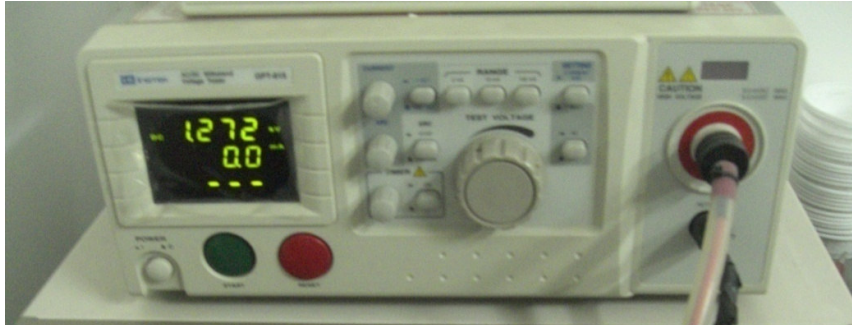


Şekil 5.3 Gümüş Boyanın İletkenliğinin Ölçülmesi

Bu işlemden sonra hazırlanan piezoelektrik seramik parçaların polarizasyonuna geçilmiştir. Polarizasyon için uygun aparatla sabitlenen parçalar, sırayla “GW Instek AC/DC Gerilim Test Edici GPT-815” tipi cihaza bağlanarak 60’şar dakika süreyle 1200 Volt doğru akıma maruz bırakılmışlardır (Şekil 5.4 ve 5.5).



Şekil 5.4 Piezoelektrik Seramik Parçayı Polarize Etmek İçin Kullanılan Aparat

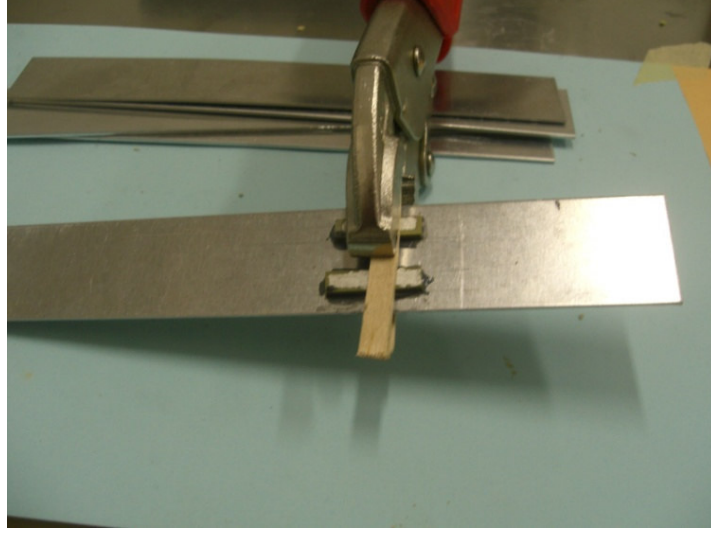


Şekil 5.5 GW Instek AC/DC Gerilim Test Edici GPT-815

Bundan sonra, APC’nin “YE2730A Wide-Range  $d_{33}$  Test Edici” cihazı kullanılarak bir seramik parçanın  $d_{33}$  katsayısı ölçülmüş,  $250 \times 10^{-3} \text{N}$ . kuvvetle sıkıştırılarak ölçüm yapılan parçanın  $d_{33}$  katsayısı  $420 \times 10^{-12} \text{C/N}$  çıkmıştır.

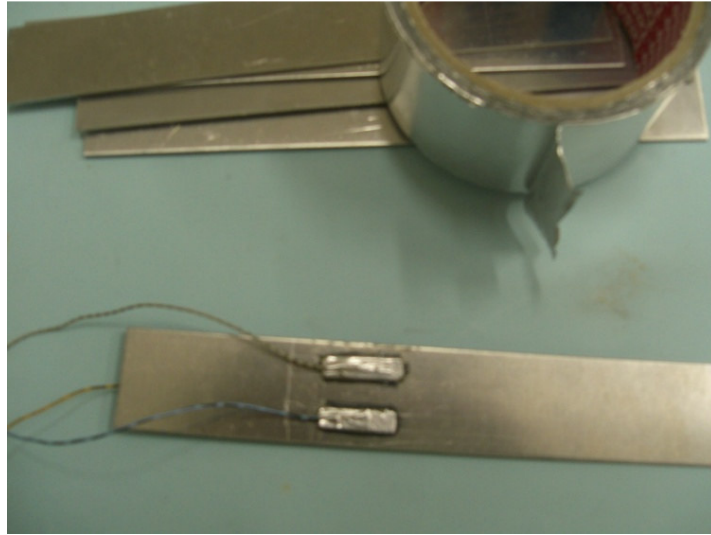
Hazırlanan piezo seramik parçalar  $150 \times 30 \times 1 \text{mm}$ . boyutlarında (ankastre olarak bağlanabilmesi için boyu 150mm.’den daha fazla) kesilmiş alüminyum çubuk üzerine “Uhu Metall Epoxy” marka yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi sırasında

parçaların alüminyum çubuğa baskı yapması için pens kullanılmış, ve seramik parçalara zarar vermesini engellemesi için araya tahta koyulmuştur (Şekil 5.6).



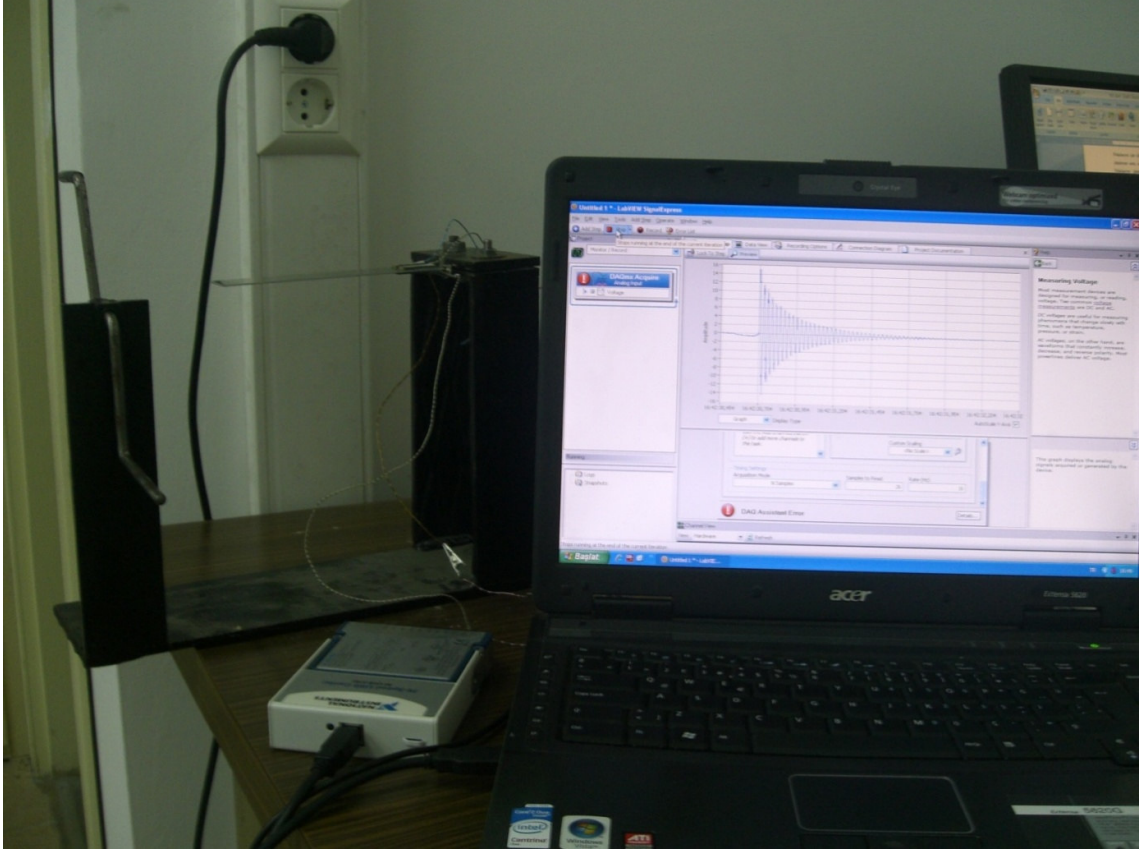
Şekil 5.6 Piezoseramiklerin Alüminyum Çubuğa Yapıştırılması

Yapıştırıcının kuruması için yeterli süre geçtikten sonra, piezoseramik parçaların pozitif (+) akım verilerek polarize edilen yüzlerine (her bir parça için açıkta kalan yüzler) alüminyum bant yardımıyla kablolar bağlanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Piezoseramiklerden Sinyal Almak İçin Yapıştırılan Kablolar

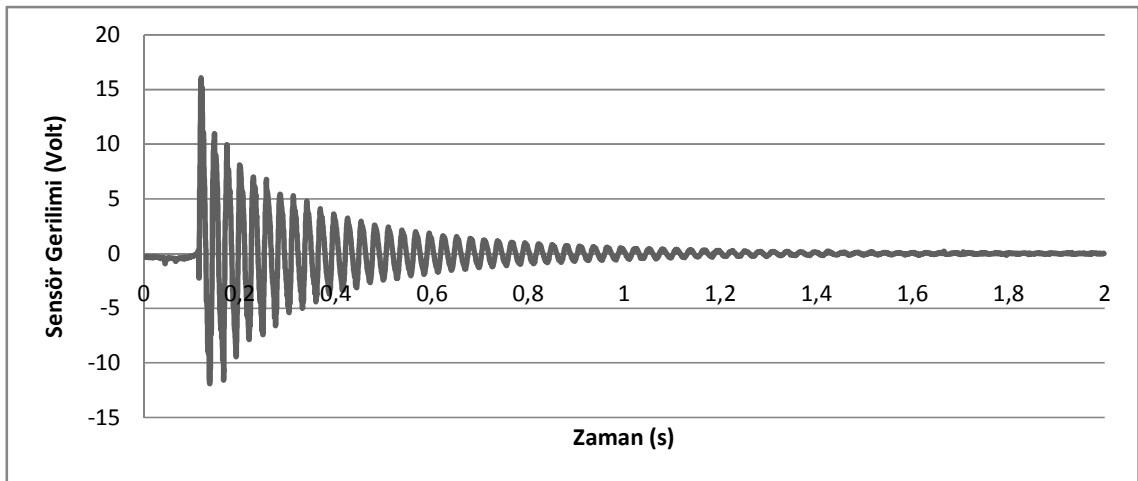
Tamamen hazır olan numune, sinyal testi için titreşim yapabileceği bir düzeneğe bağlanmış ve piezoseramiklerden çıkan kablolar “NI cRIO-9221” DAQ kartı ve “Yüksek Hızlı USB Taşıyıcı NI USB-9162” ile bilgisayara bağlanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Deneş Düzeneğinin Sinyal Testi

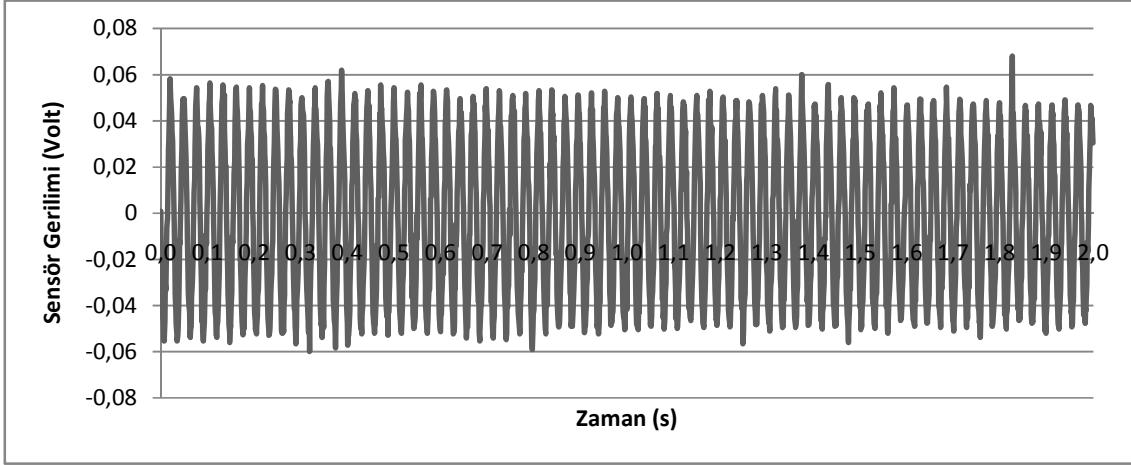
## 5.2 Deneş Düzeneğinin Testi

Bilgisayara bağlanan düzeneğin serbest titreşim yapması sonucu ortaya çıkan gerilim grafiği Şekil 5.9'daki gibidir. Grafikte görülen sönüm çubuğun doğal sönümüdür.



Şekil 5.9 Serbest Titreşim Altındaki Sensör Geriliminin Değişimi

Bundan sonra aktüatör piezoelemanların çalıştığını görmek için yapılan deneyde ise aktüatörlere 30Hz. frekansında 370 Volt (Trek - MODEL 609E-6-FG Yüksek Gerilim Güçlendirici Fonksyon Üretici cihazı ile) verilerek çubuğun rezonans frekansında titreşmesi sağlanmıştır. Bunun sonucunda sensörden elde edilen gerilim grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir.

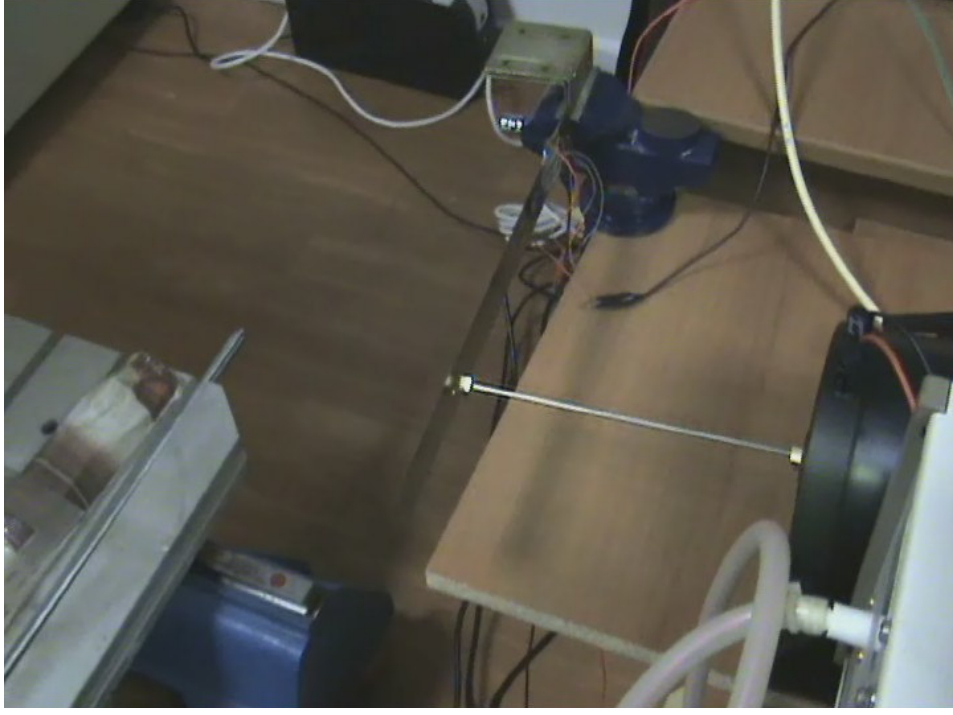


Şekil 5.10 370V Gerilim Altında Sensör Geriliminin Değişimi

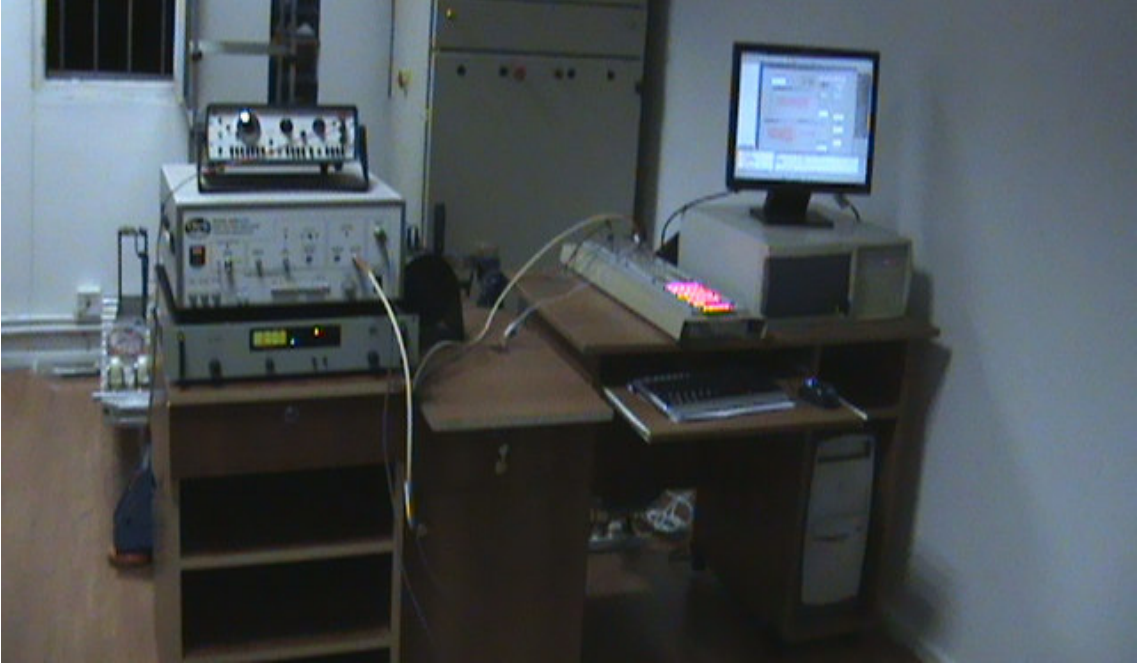
### 5.3 Akıllı Çubuğun Zorlamalı Titreşim Altındaki Aktif Titreşim Kontrolü

Zorlamalı titreşim altındaki aktif kontrol için 300 x 35 x 0,5mm. boyutlarında yay çeliği çubuk kullanılmıştır. Aktüatör olarak ise önceki bölümlerde anlatılan şekilde hazırlanan 3 adet piezoelektrik seramik çubuğun üzerine “Uhu Metall Epoxy” marka yapıştırıcıyla yapıştırılmıştır. Hazırlanma metodundaki tek fark olarak, kabloların piezoelektrik üzerine alüminyum bant yerine gümüş boya ile tutturulması ve üzerine akrilik uygulanarak sabitlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede hem kablolar sağlam bir şekilde yüzeye tutturulmuş, hem de akrilik elektriği iletmediği için bir miktar yalıtım sağlanmıştır.

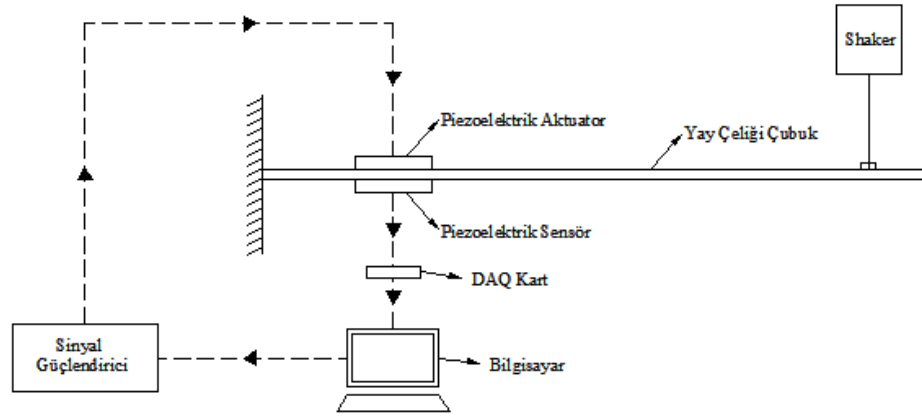
Sistem, shaker ile rezonans frekansında titreşime maruz bırakılmıştır. Bu arada DAQ kartı yardımıyla bilgisayara bağlanan sensör piezoelektrikden sinyal okunmaya başlanmıştır. Bu sinyal, kontrol olmadan okunan çubuğun zorlamalı titreşim grafiğidir (Şekil 5.15a). Bilgisayarda, “Matlab” programı sayesinde, giriş sinyali istenilen katsayıyla çarpılarak sinyal güçlendiricinin (Trek - MODEL 609E-6-FG Yüksek Gerilim Güçlendirici Fonksyon Üretici) girişine yönlendirilmiştir. Bu cihaz, aldığı sinyali 1000 kat güçlendirerek vermektedir. Cihazın çıkışı aktüatör piezoelektriklere bağlanarak sistem tamamlanmıştır (Şekil 5.13). Deney süresince, güçlendirme katsayısı yavaş yavaş artırılarak giriş sinyalinin 3 katına çıkılmış, yani amplifikatör girişine 0,3 V. gönderilmiştir. Bunun sonucunda aktüatör piezoelektriklere 300V gerilim uygulanarak aktif kontrol sağlanmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.11 Shaker (sağda) ile Tahrik Edilen Akıllı Çubuk (solda)

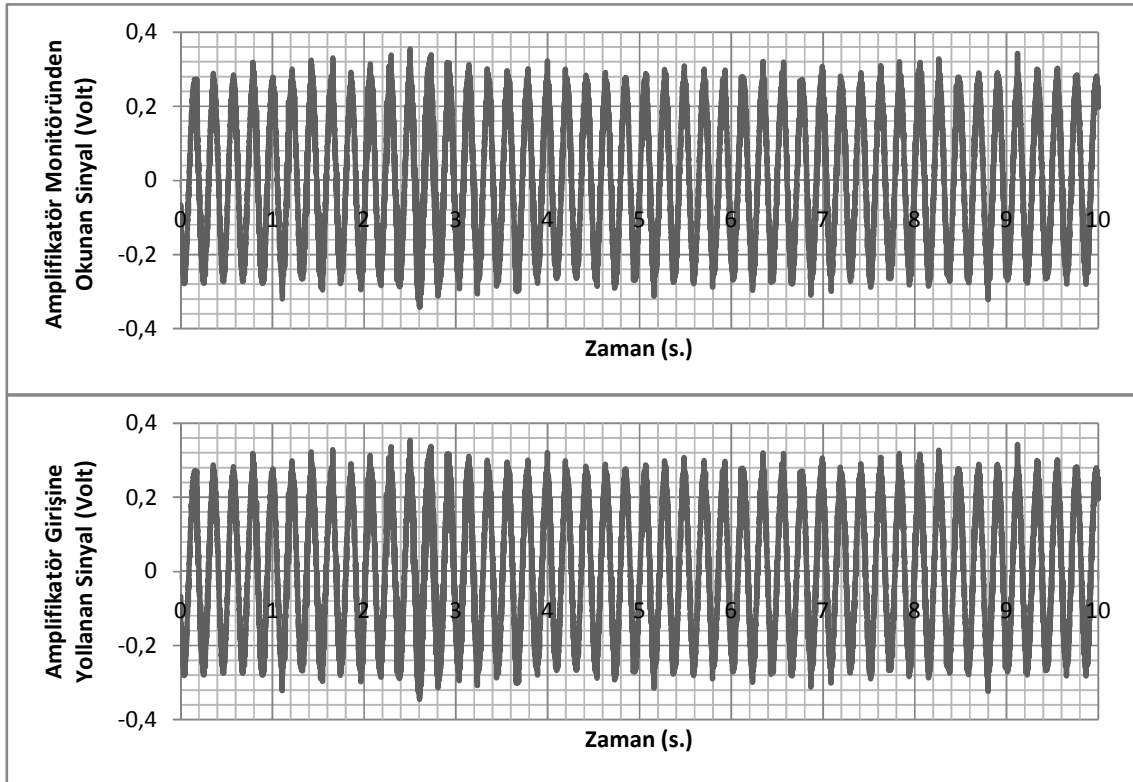


Şekil 5.12 Deney Düzeneği

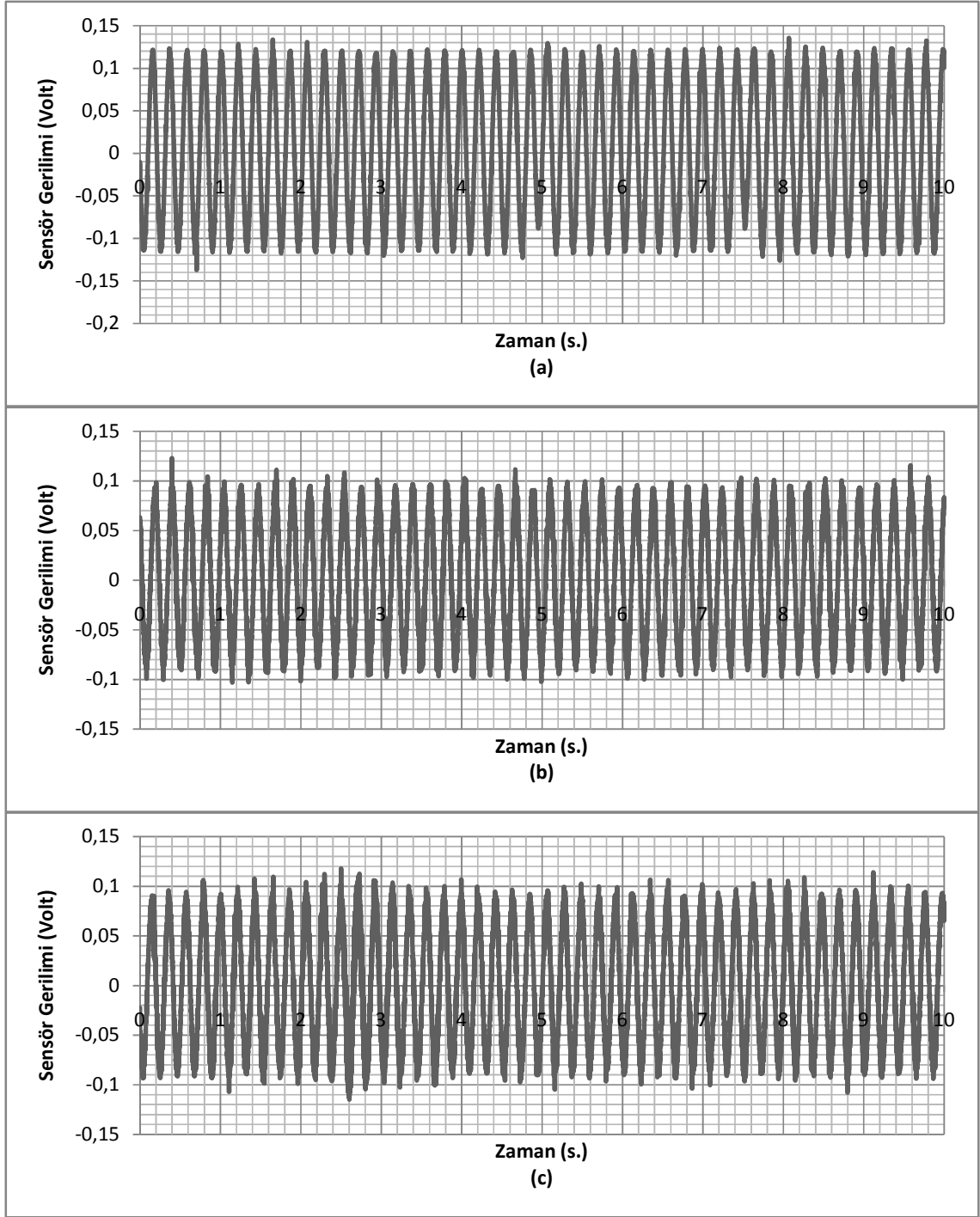


Şekil 5.13 Deney Düzenegi Şeması

Deney süresince, Matlab programı sayesinde, sensör gerilimi, amplifikatör girişine yollanan sinyal ve amplifikatör monitöründen alınan (çıkışın 1/1000'i kadar olan) sinyal okunmuştur. Amplifikatör girişine yollanan ve monitörden okunan sinyaller birbirinin aynısı sayılabilecek kadar benzerdir. Şekil 5.14'de, 300 Volt ile yapılan kontrolde cihaza yollanan ve cihazın monitöründen okunan sinyaller gösterilmiştir.

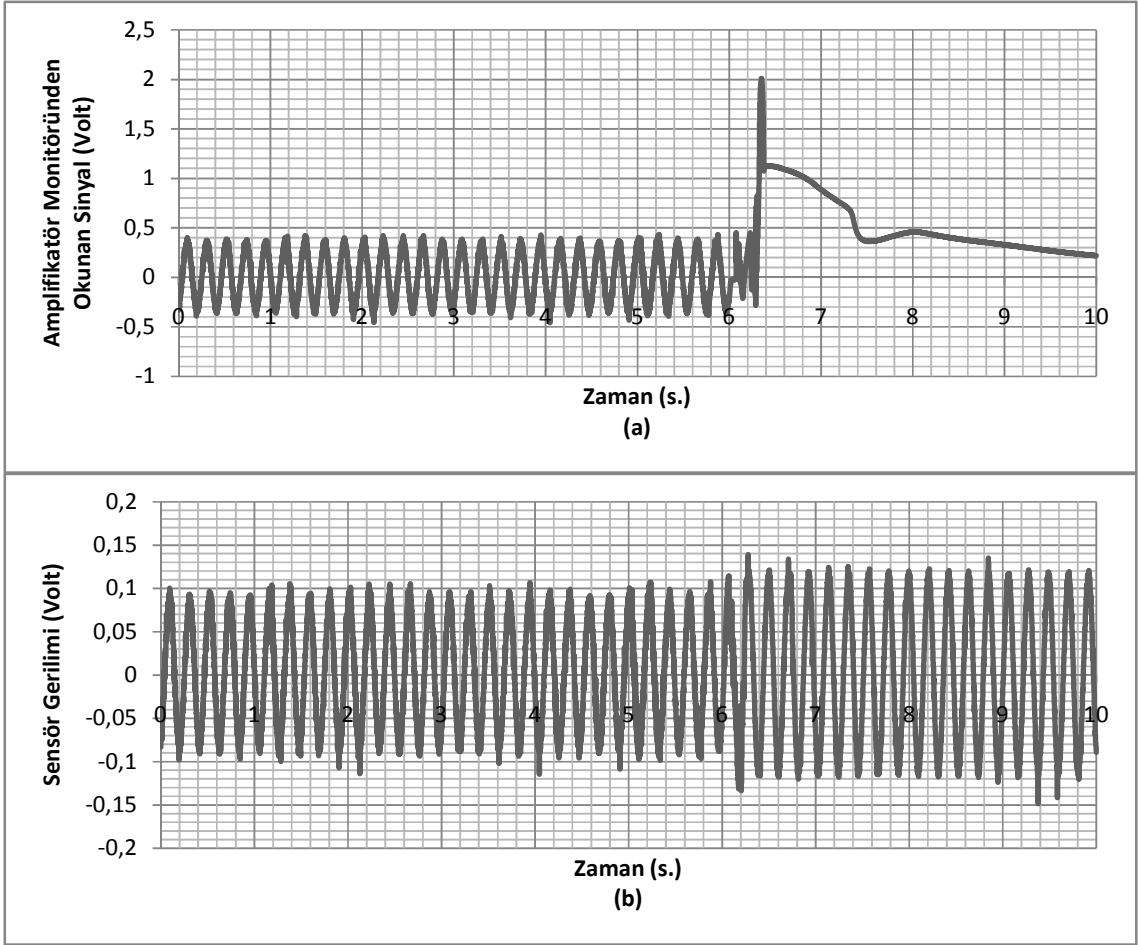


Şekil 5.14 300 Volt ile Yapılan Aktif Kontrolde Amplifikatör Monitör ve Giriş Sinyalleri

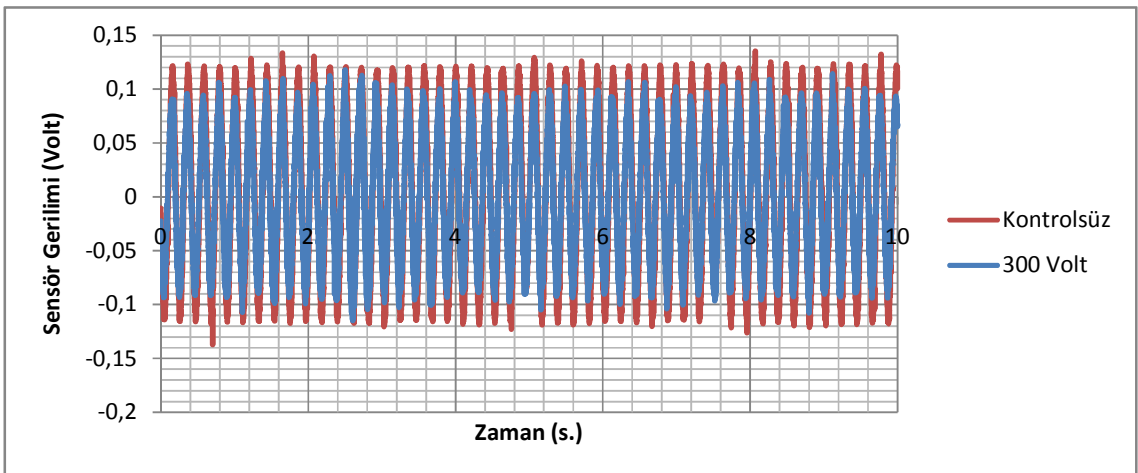


Şekil 5.15 Deney Sonucunda Elde Edilen Sensör Gerilimleri (a)Kontrolsüz, (b)200V ile, (c)300 Volt ile

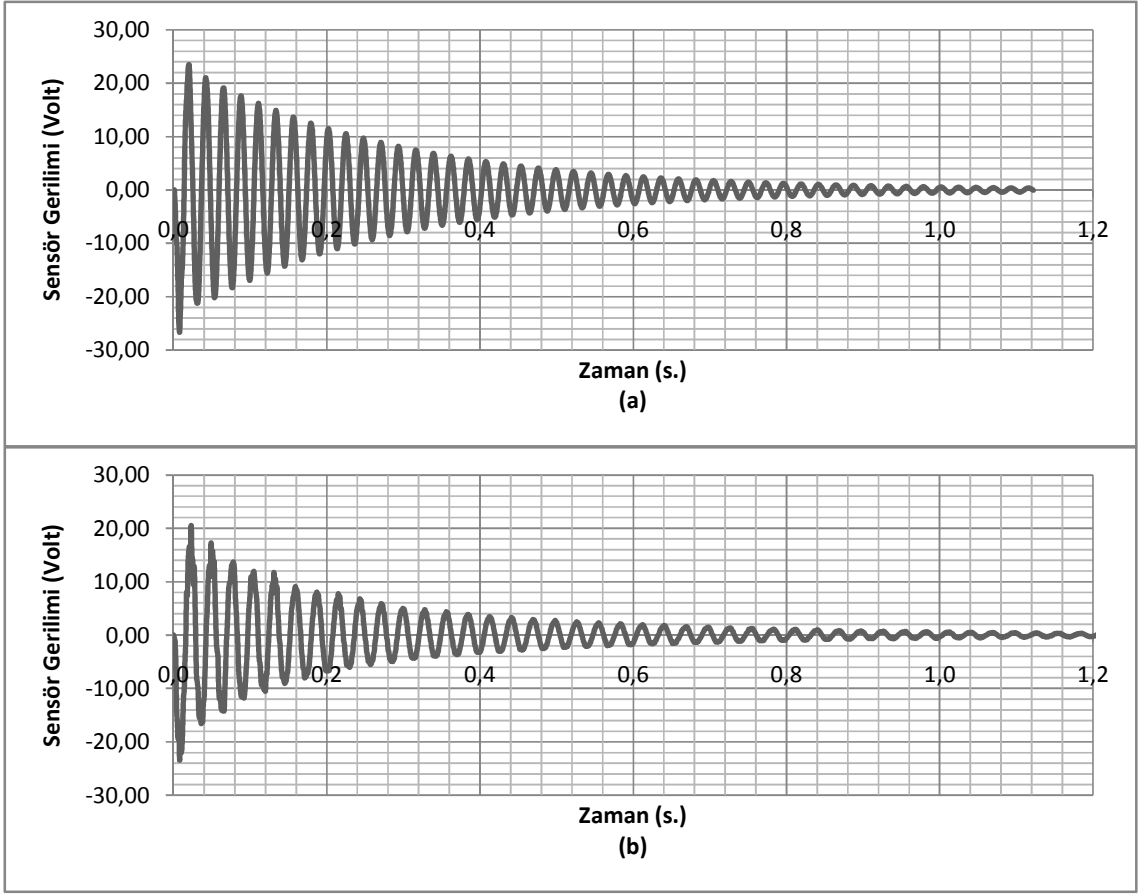
Şekil 5.16'da, sistem 400 Volt ile kontrol durumundayken 6s. sonra amplifikatör kapatılmış ve titreşim grafiğinin daha net görülmesi sağlanmıştır. Şekil 5.17 ise kontrolsüz ve 300 Volt ile kontrol durumlarını birlikte gösterir.



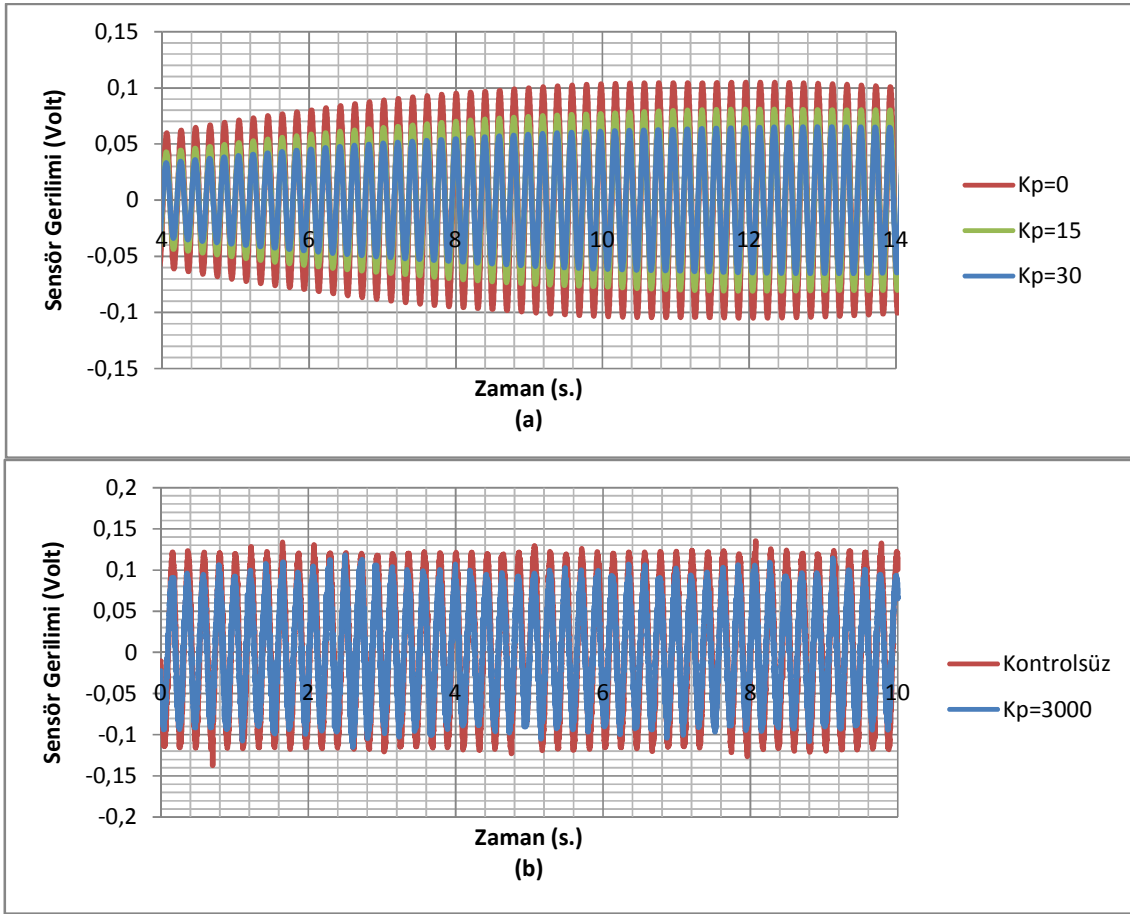
Şekil 5.16 400 Volt ile Kontrol Yapılırken 6s. Sonra Amplifikatör Kapatılınca Elde Edilen Grafikler



Şekil 5.17 Kontrol Yapılmadan ve 300 Volt ile Kontrol Durumlarındaki Grafikler



Şekil 5.18 Alüminyum Çubuğun (a)ANSYS ve (b)Deneyisel Olarak Elde Edilen Serbest Titreşimdeki Sensör Gerilimi Değerleri



Şekil 5.19 Zorlanmış Titreşim Altındaki Yay Çeliği Akıllı Çubuğun (a)ANSYS ve (b)DeneySEL Olarak Sensör Gerilimi Değişimi Grafikleri

Deney sırasında alınan veriler sistemin sürekli rejim durumunda alınan veriler iken, ANSYS'den alınan veriler sırasında sistemin sürekli rejime ulaşması için belirli bir süre geçtiği için 4-14 s. arasındaki değerler gösterilmiştir.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda, ANSYS program modeli ve deneysel çalışma arasında büyük benzerlikler görülmüştür. Buna rağmen, piezoelektrik seramiklerin mükemmel bir yapıştırıcıyla yapıştırılmaması, seramikler üretilirken yapılmış olabilecek hatalar, piezoelektrik seramik yapımı için yararlanılan malzemenin aktüatör olarak kullanılabilir piezoelektrik seramik yapımına uygun olmaması, deney düzeneğinin bu işlem için tam olarak uygun olmaması gibi nedenlerden kaynaklanabilecek, ANSYS modeli ve deney sonuçları arasındaki farklar da mevcuttur.

4. Bölüm'de ANSYS programında incelenen serbest titreşim aktif kontrolü, yukarıda belirtilen nedenler ve sonuçların gözlenmesinin zorluğundan dolayı deneysel olarak gerçekleştirilememiştir. Bunun yerine, izlenmesi ve farkların anlaşılması mümkün olan zorlamalı titreşim altındaki çubuğun analizi hem ANSYS modeli hem de deneysel olarak yapılmıştır.

Aktüatör olarak kullanılan piezoelektrik seramiklerin orjinal olması ve farklı kontrol yöntemleriyle deneysel olarak daha başarılı sonuçlar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Alexander P.W., (2006), Dual Electro/Piezo Property Functionally Graded Piezoceramics, PhD Thesis, Mechanical Engineering in the University of Michigan, Michigan.
- APC International Ltd. Product Manual, (2006), Piezoelectric Ceramic: Principles and Applications, Pennsylvania, USA. <http://www.americampiezo.com>
- Chaudhry, Z. ve Rogers, C. A., (1993), "Performance and Optimization of Induced Strain Actuated Structures Under the Action of External Loads", Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structural Dynamics, and Material Conference, 19-22 Apr. 1993, La Jolla, CA.
- 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.
- De Luis, J., ve Crawley, E.F., (1990), "Experimental Results of Active Control on a Prototype Intelligent Structure", 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, 2-4 Apr. 1990, Long Beach, CA.
- Devasia, S., Meressi, T., Paden, B. ve Bayo E., (1993), "Piezoelectric Actuator Design for Vibration Suppression: Placement and Sizing", Journal of Guidance, Control and Dynamics, 16(5): 859-864.
- Ergun C., Yılmaz Ş., Özdemir E., Gül Ö. ve Kalenderli Ö., (2006), "Piezoelektrik Malzemeler ve Uygulama Alanları", Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı, Pamukkale.
- Gözen, Ş., (2002), Effects of Surface-Bonded Piezoelectric on Beam Structures, İstanbul Technical University, İstanbul.
- Günaydın, U., (2007), Sensörlerde Kullanılabilecek Polimer/PZT Kompozitlerin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hanagud, S., Won, C. C. and Obal, M. W., (1988), "Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators", Proceedings of American Control Conference, 15-17 June 1988, Atlanta, USA.
- Hartog, J., (1985), Mechanical Vibrations, Dover Publications, New York.
- IEEE No:177, (1966), Standard Definitions and Methods of Measurement – for Piezoelectric Vibrations, New York.
- Imaoka, S., (1999), "ANSYS Tip of the Week: Conversion of Piezoelectric Material Data", CSI ANSYS Tips, <http://ansys.net>
- Kırcalı, Ö. F., (2006), Active Vibration Control of a Smart Beam: A Spatial Approach, Middle East Technical University, Ankara.
- Kondoh, S., Yatomi, C. ve Inoue, K., (1990), "The Positioning of Sensors and Actuators in the Vibration Control of Flexible Systems", JSME International Journal, Series III, 33(2): 145-152.
- Lee, I., ve Han, J. H., (1996), "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators in Intelligent Structures Using Genetic Algorithm", SPIE Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Materials and 3rd European Conference on Smart Structures and Materials, 3 June 1996, Lyon, France.

- Lindberg, R. E. ve Longman, R.W., (1984), "On the Number and Placement of Actuators for Independent Modal Space Control", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 7(2): 215-221.
- Maia, N., (1997), *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press, Forest Grove.
- Main, J. A., Garcia, E. ve Howard, D., (1994), "Optimal Placement and Sizing of Paired Piezoactuators in Beams and Plates", *Journal of Smart Materials and Structures*, 3: 373-381
- 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>)
- Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. Germany, (2007), *Piezo-Tutorial*, Germany. (<http://www.physikinstrumente.com>)
- Piezo Kinetics Inc., (2007), *PKI Catalog*, USA. (<http://www.piezo-kinetics.com>)
- Plumb, J. M., Hubbard Jr., J.E. ve Bailey, T., (1987), "Nonlinear Control of a Distributed System: Simulation and Experimental Results", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 109: 133-139.
- 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.
- Smith, G. C., ve Clark, R. L., (1997), "Optimal Transducer Placement for Output Feedback Control of Broadband Structural Acoustic Radiation", 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Material Conference, Adaptive Structures Forum, 7-10 Apr. 1997, Kissimmee, FL.
- Thompson, W., (1996), *Theory of Vibrations*, Nelson Thornes Ltd., Cheltenham.
- Tressler, J. F., Alkoy, S., Newham, R. E., (1995), "Piezoelectric Sensors and Sensor Materials", *Journal of Electroceramics* 2:4, 277-272.
- 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*.
- Yousefi-Koma, A., Sasiadek, J.Z., ve Vukovich, G., (1994b), "LQG Control of Flexible Structures Using Piezoelements", *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.

**EKLER**

- Ek 1 ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk serbest titreşim kontrol makrosu
- Ek 2 ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk zorlamalı titreşim kontrol makrosu
- Ek 3 Üretici tarafından sunulan piezoelektrik malzeme değerlerinin ANSYS Programı için istenilen verilere çevrilmesi
- Ek 4 Akıllı çubuğun ANSYS Programı grafik arabirimi kullanılarak modellenmesi

**Ek 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

```



**Ek 2 ANSYS 10 Programı için hazırlanmış akıllı çubuk zorlamalı 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,nv03,volt,0        !nv03 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

```





### Ek 3 Üretici tarafından sunulan piezoelektrik malzeme değerlerinin ANSYS Programı için istenilen verilere çevrilmesi

#### Rijitlik/uyum matrisi

Kullanıcının gerilme-gerinim 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 ulaşamıyorsa,  $s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E)$  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:

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

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

$$EX = \frac{1}{s_{11}^E} = EY \quad (4.14)$$

$$EZ = \frac{1}{s_{33}^E} \quad (4.15)$$

$$GXY = \frac{1}{s_{66}^E} = \frac{1}{2(s_{11}^E - s_{12}^E)} \quad (4.16)$$

$$GYZ = \frac{1}{s_{44}^E} = GXZ \quad (4.17)$$

$$NUXY = \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E} \quad (4.18)$$

$$NUYZ = \frac{s_{13}^E}{s_{33}^E} = NUXZ \quad (4.19)$$

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.

### İletkenlik matrisi

Sabit gerinimde değerlendirilen iletkenlik matrisi ANSYS’e girilir. Genellikle, üreticinin verisi sabit gerilmeye değerlendirilmiştir. Bu nedenle bir dönüşüm gerekir.

Denklem 4.12’de belirtildiği gibi, sabit gerinime dayalı dielektrik sabitleri aşağıdaki ilişkiyle hesaplanabilir:

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \quad (4.12)$$

Kullanıcı, yukarıdaki denklem 4.12’yi değerlendirdikten sonra iletkenliği girebilir. İletkenlik matrisi sadece diyagonal maddelere sahiptir:

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ & & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} K_{11}^S & 0 & 0 \\ & K_{11}^S & 0 \\ & & K_{33}^S \end{bmatrix}$$

$$K_{11}^S = \frac{\varepsilon_{11}^S}{\varepsilon_0} \quad (4.20)$$

ANSYS’te, kullanıcı iletkenlik değerini  $\varepsilon_{33}^T$  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,reprs11

! Malzeme numarası #1

MP,PERY,1,reprs11

MP,PERZ,1,reprs33

Yukarıdaki “reprs11” şeklindeki yazıları, bağıl iletkenlik matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir.

### 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.

### Piezoelektrik sabit matrisi

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

Denklem 4.13,  $[e]$  ile  $[d]$  arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde kurmuştur:

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (4.13)$$

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.

#### **Ek 4 Akıllı çubuğun ANSYS Programı grafik arabirimi kullanılarak modellenmesi**

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. Çubuğu programa alüminyum 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.
6. "Preprocessor – Meshing – Size Controls – ManualSize – Global – Size" kısmına mesh elemanının boyutu metre cinsinden girilir.
7. Yapılan ayarları hacim şeklinde tanınan çubuğa aktarıp onu alüminyum malzemeye dönüştürmek için ise, son olarak "Preprocessor – Meshing – Mesh – Volumes – Mapped – 4 to 6 sided" seçilerek çubuk mesh edilir.
8. Bundan sonra yapılması gereken alüminyum çubuğun üzerine piezoelektrik malzemeleri koymaktır. Bunu yapabilmek için, program menüsünden "Plot – Nodes" seçilerek malzemenin nodlar şeklinde görüntülenmesi sağlanır. Bu görüntüde uygun açı seçilerek, alüminyum malzemenin üzerine piezoelektrik malzeme gelmesi gereken bölgedeki nodlar, "Preprocessor – Modelling – Copy – Nodes – Copy" seçilerek piezoelektrik malzeme kalınlığı kadar bir offset ile kopyalanır.
9. Bu kopyalanan nodları kullanarak piezoelektrik malzemeyi oluşturmak için, öncelikle "Preprocessor – Modelling – Create – Elements – Elem Attributes" kısmında "Element type number" olarak "SOLID5", "Material number" olarak piezoelektrik için girilen malzeme özelliklerinin numarası seçilir.

10. “Preprocessor – Modelling – Create – Elements – Auto Numbered – Thru Nodes” seçilip her seferinde 8'er nod kullanarak çubuktaki nodlar ve kopyalanan nodlar arasında piezoelektrik malzeme oluşturulur. Bu sayede çubuk ve piezoelektrik malzemenin bir yüzünün nodları ortak olacağından, piezoelektrik malzeme çubuğa bağlı olacaktır.
11. 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” olacak şekilde “VOLT” serbestlik derecesinde birleştirilir.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 09.03.1983

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2000 Yedikule Lisesi

Lisans 2001-2005 Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve  
Kontrol Programı

**Çalıştığı kurum(lar)**

2005-2006 Albiso Soğutma Ltd. Şti.