

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SENSÖR VE AKTUATÖR UYGULAMALARI İÇİN POLİMER/PZT
KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa ONAY**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Malzeme ve İmalat

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Celaletdin ERGUN

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SENSÖR VE AKTUATÖR UYGULAMALARI İÇİN POLİMER/PZT
KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa ONAY
(503081312)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Celaletdin ERGUN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Şafak YILMAZ (İTÜ)
Doç. Dr. Halit TÜRKMEN (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

Şebnem'e,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bana zaman ayıran, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek deneysel bir çalışma için ortam hazırlayan değerli hocam Doç. Dr. Celalettin ERGUN'e, çalışmalarında yardımcı olan başta Kaan BERİTAN ve Ar.Gör. Özkan GÖKÇEKAYA olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için maddi katkı sağlayan İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü'ne saygılarımı arz ederim.

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

Haziran 2011

Mustafa ONAY

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. PİEZOELEKTRİKLİK.....	5
2.1 Piezoelektrik Özellik	5
2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler	10
2.2.1 Yaşlanma.....	10
2.2.2 Mekanik sınırlamalar	10
2.2.3 Elektriksel sınırlamalar	10
2.2.4 Isısal sınırlamalar	11
2.3 Piezoelektrik Malzemeler.....	11
2.3.1 Doğal piezoelektrik malzemeler (Kristaller).....	12
2.3.2 Piezoelektrik seramik malzemeler	13
2.3.2.1 Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler.....	13
2.3.2.2 Piezoelektrik PZT	15
2.3.2.3 Yaygın kullanılan piezoelektrik seramikler ve özellikleri	20
2.3.3 Polimer piezoelektrikler.....	21
2.3.4 Kompozit piezoelektrikler.....	22
2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları	23
2.4.1 Sensörler.....	23
2.4.2 Üreteçler.....	23
2.4.3 Aktuatörler (Öteleyiciler).....	24
2.4.4 Transdüserler (Dönüştürücüler)	25
2.5 Piezoelektrik Sabitler	25
2.5.1 Piezoelektrik yük sabiti	26
2.5.2 Piezoelektrik voltaj sabiti.....	27
2.5.3 Dielektrik sabiti.....	28
2.5.4 Elektromekanik çift faktörü (Katsayısı).....	29
2.5.5 Elastik uygunluk	31
2.5.5 Elastiklik modülü	32
3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER VE AKTUATÖRLER.....	33
3.1 Giriş.....	33
3.2 Sensör Çeşitleri	34
3.2.1 Eksenel sensör elemanları.....	34
3.2.2 Fleksör sensör elemanları.....	37
3.3 Piezoelektrik Kompozit Sensörler	37

3.3.1 0-3 Piezoelektrik seramik-polimer kompozit sensörler	38
4. ANSYS İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER.....	39
4.1 ANSYS Modelleme Elemanları	39
4.1.1 Solid45	39
4.1.2 Solid5	40
4.2 Piezoelektrik Malzeme Dönüşüm Değerleri	40
4.2.1 Temel bilgiler	40
4.2.2 Rijitlik/uyum matrisi	42
4.2.3 İletkenlik matrisi	44
4.2.4 Yoğunluk girişi.....	45
4.2.5 Piezoelektrik sabit matrisi	45
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	47
5.1 Ön Çalışmalar.....	47
5.2 PZT Tozunun Hazırlanması	47
5.3 Numuneleri Hazırlanması.....	50
5.4 Yüzey Elektrodunun Hazırlanması.....	54
5.5 Polarizasyon	56
5.6 d_{33} Ölçümü.....	58
5.7 Sinyal Performansı Testleri	59
6. ANSYS İLE MODELLEME	63
6.1 ANSYS ile Model Koşulları.....	63
6.2 Kompozit Malzemenin Piezoelektrik Özelliklerinin Belirlenmesi	63
7. SONUÇLAR	67
8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	79

KISALTMALAR

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

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Bazı piezoelektrik kristallerin oda sıcaklığındaki özellikleri.	12
Çizelge 2.2	: Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması.....	15
Çizelge 2.3	: PZT seramiklerinin özellikleri.....	19
Çizelge 2.4	: PZT türleri ve özellikleri.	20
Çizelge 2.5	: Bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri.....	20
Çizelge 2.6	: PVDF'nin piezoelektrik özelliklerinin seramiklerle karşılaştırılması.....	22
Çizelge 2.7	: Piezoelektrik yük sabiti indislerinin ifadeleri.....	27
Çizelge 2.8	: Piezoelektrik voltaj sabiti indislerinin ifadeleri.....	28
Çizelge 2.9	: Dielektrik sabiti indislerinin ifadeleri.....	29
Çizelge 2.10	: Elektromekanik çift katsayısı indislerinin ifadeleri.....	30
Çizelge 2.11	: Elastik uygunluk indislerinin ifadeleri.	31
Çizelge 5.1	: APC 856 PZT piezoelektrik seramiğinin özellikleri.	48
Çizelge 5.2	: Spurrs epoksi reçine karışım oranları.	51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Doğrudan ve dolaylı piezoelektrik etkinin şematik gösterimi: (a)Elektrik uygulandığında malzemedeki değişim. (b)Malzeme üzerine kuvvet uygulandığında elektrik alan oluşumu.	5
Şekil 2.2	: Bölge hareketlerinin çizgisel gösterimi: (a)Polarizasyon öncesi. (b)Polarizasyon sonrası	7
Şekil 2.3	: Piezoelektrik elemanda oluşan : (a)Histerisiz.(b)Boyut değişimi	8
Şekil 2.4	: Piezoelektrik elemanın davranışı: (a)Elemandaki polarizasyon doğrultusu. (b-c)Üreteç davranışı. (d-e)Motor davranışı.	9
Şekil 2.5	: Provskit kristalinin şematik görüntüsü.	13
Şekil 2.6	: PZT yapısı: (a)Sıcaklık>T _C . (b)Sıcaklık<T _C	16
Şekil 2.7	: PZT sisteminin faz diyagramı.	16
Şekil 2.8	: Farklı bileşimlerdeki PZT’lerdeki piezoelektrik yük sabiti değişimi.....	17
Şekil 2.9	: Mekanik gerilme sonucu yapıda meydana gelen çarpılmalar: (a)Gerilmesiz durum.(b-d)Gerilme sonucu meydana gelen çarpılma.....	18
Şekil 2.10	: Piezoelektrik sensör çeşitleri (a)Eksenel sensör (b)Fleksör sensör.....	23
Şekil 2.11	: Piezoelektrik eleman kullanılarak oluşturulan elektrik enerjisi: (a)Ark üretimi. (b)Şarj üretimi.....	24
Şekil 2.12	: Temel aktuatör çeşitleri (a-c).	25
Şekil 2.13	: Piezoelektrik malzemeler için koordinat sistemi.....	26
Şekil 3.1	: Eksenel piezoelektrik seramik sensör elemanı.	34
Şekil 3.2	: Çok elemanlı eksenel sensör.	35
Şekil 3.3	: Sismik kütleli eksenel akselerasyon sensörü.....	36
Şekil 3.4	: 0-3 Piezoelektrik seramik-polimer kompozit sensörler.	38
Şekil 4.1	: ANSYS programındaki Solid45 elemanı	39
Şekil 4.2	: ANSYS programındaki Solid5 elemanı	40
Şekil 5.1	: PZT tozlarının sinterlenmesi.	49
Şekil 5.2	: Seramik kaplar içerisinde fırına yerleştirilen PZT tozları.....	49
Şekil 5.3	: PZT tozunun hazırlanması: (a) Sinterlemeden çıkan tozlar (b) Tozların havanda dövülmesi (c) Tozların elekten geçirilmesi	50
Şekil 5.4	: Numunelerin hazırlanması ve deney basamakları.....	51
Şekil 5.5	: Filtreleme sistemi: (a) Genel görüntü (b) PZT/Epoksi karışımının ilavesi.	52
Şekil 5.6	: Kütleme sonrası numune kesimi.	53
Şekil 5.7	: Kütleme sonrası zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapılması.....	53
Şekil 5.8	: Maskeleme bantları ile numunenin hazırlanması.	54
Şekil 5.9	: Gümüş boyanın uygulanması	55
Şekil 5.10	: Alüminyum çubukların hazırlanması	55
Şekil 5.11	: Vernik damlatılması	56
Şekil 5.12	: GoodWill 815 yüksek voltaj üretici ile polarizasyon uygulanması.....	57
Şekil 5.13	: Pleksiglastan üretilen polarizasyon odası.....	57
Şekil 5.14	: Polarizasyon işlemi.....	58
Şekil 5.15	: d ₃₃ ölçümünün gerçekleştirildiği düzenek.....	58

Şekil 5.16 : Sinyal performansı testi için kurulan düzenek	59
Şekil 5.17 : DAQ cihazının düzeneğe bağlanması	59
Şekil 5.18 : DAQ cihazı bağlantı şeması	60
Şekil 5.19 : Signal Express programı ara yüzü	60
Şekil 6.1 : $-d_{31}$ Hacim oranı ilişkisi.....	64
Şekil 6.2 : ANSYS ile elde edilen sonuçlar	65
Şekil 7.1 : (+) ortalamanın değişimi	67
Şekil 7.2 : (-) ortalamanın değişimi	68
Şekil 7.3 : (+) piklerin değişimi	68
Şekil 7.4 : (-) piklerin değişimi	69
Şekil 7.5 : d_{33} ölçüm sonuçları.....	70
Şekil 7.6 : Hasara uğrayan numune	71
Şekil 7.7 : Hasara uğrayan numunenin optik mikroskop altındaki kesit görüntüsü ..	71
Şekil 7.8 : Hasara uğrayan numunenin optik mikroskop altındaki üstten görüntüsü ..	72
Şekil 7.9 : Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (1000V).....	72
Şekil 7.10 : Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (2000V).....	73
Şekil 7.11 : Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (2500V).....	73

SENSÖR VE AKTUATÖR UYGULAMALARI İÇİN POLİMER/PZT KOMPOZİTLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi, bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır. Piezoelektrik malzemeler, boyutsal şekil değişimine maruz kaldıklarında veya titreştiklerinde elektrik sinyal üretirler. Bu özellikleri sayesinde piezoelektrik malzemeler sensör, aktüator ve transdüser gibi uygulamalarda kullanılabilir.

Piezoelektrik malzeme olarak seramik veya polimer tercih edilebilmektedir. Seramik olarak kullanılan piezoelektrik malzemelere örnek olarak PZT (Kurşun Zirkonat Titanat), BT (Baryum Titanat) ve PT (Kurşun Titanat), polimer olarak kullanılan piezoelektrik malzemelere ise PVDF (Poliviniliden Florid) örnek olarak verilebilir. Elektriksel olarak yalıtkanlık ve yüksek korozyon dirençleri bu iki malzeme grubunun ortak avantajları olarak görülmektedir. Seramiğin kırılkan olması ve işlenmesinin pahalı olması, polimerlerin ise esnek olması ve ucuz olarak üretilmesine rağmen sertlik değerlerinin istenilen seviyelerde olmaması yeni tür malzeme ihtiyacını ortaya çıkartmıştır. Polimer matrisli seramik malzemelerin geliştirilmesi ile daha kolay ve düşük maliyetli üretim yapılabilecektir.

Bu çalışmada piezoelektrik polimer ve seramiklerin sensör ve aktüator olarak değerlendirilmesine çalışılacaktır. Diğer seramiklere göre daha iyi piezoelektrik özellik gösteren PZT seramik toz olarak kullanılacaktır. Polimer olarak ise oldukça iyi yapışma özelliği ve elektrik yalıtkanlık özelliğinden ötürü epoksi kullanılacaktır. Elde edilen yeni malzemelerin piezoelektrik özelliklerinin incelenmesi, titreşim kontrolünün yapılması bu tez kapsamında çalışılacak konular arasındadır.

DEVELOPMENT OF POLYMER/PZT COMPOSITES FOR SENSOR AND ACTUATOR APPLICATIONS

SUMMARY

Piezoelectricity is the ability of asymmetric crystals to generate electric when mechanical stress or resonance is applied. On the other hand strain changes in the materials if the electric field is applied. All of these properties make piezoelectric materials useful for sensor, actuator, transducer, vibration control applications.

Notably ceramics (generally PZT-lead zirconate titanate, PZN-lead zinc niobate, PT-lead titanate) and polymers (PVDF- polyvinylidene fluoride) are used as piezoelectric materials. Piezoelectric composites which include ceramic and polymer have the better performance both of ceramic and polymer. Piezoelectric composites electromechanical properties are close to monolithic ceramics and however their acoustic impedance is close to polymers. Electrical non-conductivity high corrosion resistance are the common and main advantages of these two materials groups. Adding to this, producing ceramics which needed on applications are expensive and brittle. On the other and polymers are cheap to produce but have low hardness values.

In this study piezoelectric polymer and ceramics will be investigated as sensors and actuators. Cause of its excellent piezo properties PZT will use as piezoelectric phase and as a polymer phase epoxy will be use due to its outstanding adhesion to variety of materials and excellent electrical insulator.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Malzeme bilimlerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, yapısal malzemelerden fonksiyonel ve son olarak da akıllı malzemelere doğru bir gelişme görülmektedir. Yapısal malzemeler (örneğin; çelik, tahta, demir, çimento vb.) mekanik kuvvet ve yük taşıma kapasitelerine göre tanımlanır. Fonksiyonel malzemeler ise sahip olduğu belirli fonksiyonlara göre teknolojik amaçlarına göre tanımlanırlar. Bir malzeme kendi içerisindeki ve çevresindeki değişikliklere tepki verebiliyor ve kendisinden beklenen davranışı tüm kullanım süresince uygun biçimde yerine getirebiliyorsa akıllı malzeme olarak tanımlanır. Piezoelektrik malzemeler de akıllı malzemeler sınıfına girmektedir. Günümüzde ileri imalat tekniklerinin ortaya çıkması ve gelişmesi, akıllı malzemelerin gelişimini hızlandırmıştır (Yazıcı ve diğ. 2004; Türker, 2009).

Piezoelektrik sözcüğü, Latince “bastırmak-press” anlamına gelen “piezo” ön ekinden türetilen “piezoelektrik” kavramından gelir ve basitçe, üzerine mekanik bir basınç uygulanan bazı kristal ve seramik malzemelerde bir elektriksel gerilimin oluşması olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik etki denen bu olgunun terside söz konusudur (Tressler ve diğ. 1998).

"Piezoelektrik etki" kavramı ilk kez Fransız mineralog René Just Haüy (1817) tarafından anılmış ve 1880 yılında Jacques-Pierre Curie kardeşlerin bazı kristaller üzerinde (kuvars, turmalin, topaz, Rouchelle tuzu, vs.) yaptıkları çalışmalar sonucunda bilimsel olarak kanıtlanmıştır. Piezoelektriklik; Kuvars (SiO_2), Turmalin, Lityum Sülfat, Kadmiyum sülfid, Çinko oksit (ZnO), Rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Baryum titanat (BaTiO_3), Kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi tek kristal polar eksenine sahip maddelerde görülür. Amonyum dihidrojen fosfat (ADP), Lityum fosfat (LP), Etilen diamin tartarat (EDT), Dipotasyum tartarat (DPT) gibi suni

kristallerde daha az oranlarda olmakla beraber piezoelektrik kristal yapımında kullanılır. Teorik olarak simetri merkezi olmayan bütün maddelerin piezoelektrik olması gerekmektedir. Ancak pratikte, bu tür maddelerin çoğunda bu özellik zayıf niteliktedir (Bottom, 1981; Yazıcı ve diğ. 2004).

Piezoelektrik özellik gösteren bir malzemeye mekanik basınç uygulandığında malzemenin yüzeylerinde elektrik yüklerinin oluşmasına direkt piezoelektrik etki denir. Lippmann'ın (1881) direkt etki gösteren malzemenin ters etki göstermesi gerektiğini öne sürmesinden sonra ters piezoelektrik etki Cune kardeşler tarafından aynı yıl deneysel olarak ispatlanmıştır (Yazıcı ve diğ. 2004).

1940'larda araştırmalar ferroelektrik, çok kristalli seramikler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlar bu tez kapsamında kullanılacak olan kurşun, zirkon ve titanat (PZT), lityum niobat ve baryum titanattır. 1960'ların ortalarına gelindiğinde plastiklerinde piezo etkiye sahip olabileceklerine kanaat getirilmiştir ve 1969 yılında polivinilden florüd (PVDF)'deki piezoelektrik etki Kawai tarafından bulunmuştur (Schwartz, 2002).

Günümüzde piezoelektrik malzemelerin ikili özelliğinden endüstride bir çok uygulamada yararlanılmaktadır. Doğrudan etki özelliği, dinamik basınç ve kuvvetlerdeki değişimlerin, şok ve titreşimlerin algılanmasında kullanılırken; dolaylı etki özelliğinden ise tahrik mekanizmalarının tasarımında yararlanılmaktadır. Mekanik kuvvetlerin elektrik sinyaline dönüştürülmesine örnek olarak, geniş bir frekans aralığında hızlanmaları ölçen ivmeölçerler, piezoelektrik algılayıcılar (sensörler), plaklardaki izler dolayısı ile titreşen iğnenin yarattığı elektriksel tepkileri toplayan pikap kartuşlarını verebiliriz. Elektrik sinyallerinin mekanik tepkiye dönüşümüne örnek olarak da dalgalı akım girişiyle (AC) titreşen ve bir kap içindeki sıvının şiddetle karışmasını sağlayan ultrasonik temizleme cihazının transdüseri gösterilebilir. Ayrıca piezoelektrik malzemelerden, piezoelektrik motorlar, nanometre hassasiyetinde hareketler ve ayarlamalar, ultrasonik enerji üretimi, sonar sinyal üretimi, akışmetreler, seviye ölçerler, hidrofonlar, hızlandırıcılar, kimya ve gıda endüstrisinde kimyasal reaksiyonların kontrolünde kullanılan sonokimyasal uygulamalar, gaz alma ve cüruf kırma uygulamaları, ink-jet printing, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), NEMS (Nano Electro Mechanical Systems) veya MENS (Micro Electro Nano Systems) cihazları ve diğer sensör uygulamalarını kapsayan geniş bir yelpazede yararlanılmaktadır (Tressler ve diğ. 1998).

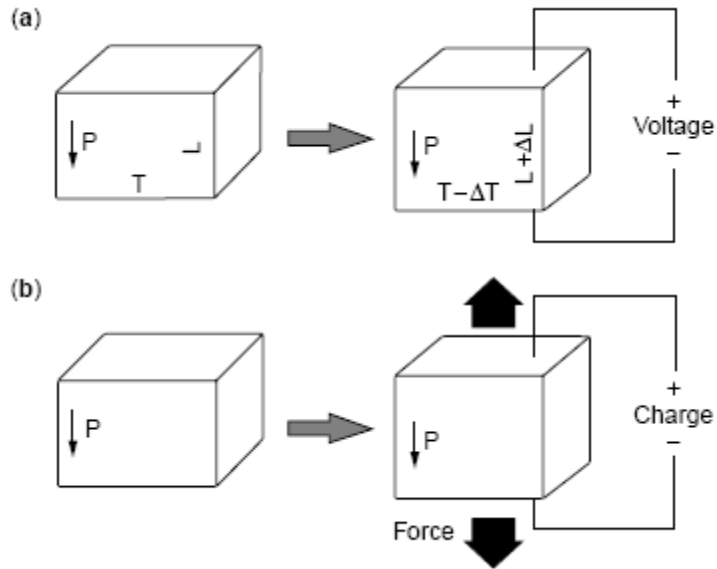
Yaklaşık 30 yıllık bir süredir seramik/polimer kompozitlerin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Daha sonra detaylı olarak açıklanacağı üzere sensör/aktüatör uygulamaları için istenilen özellikler şu şekilde sıralanabilir; yüksek dielektrik sabit (K), yüksek hassaslık (g,d) düşük dielektrik kayıp. Piezoelektrik seramikler (PZT) genel olarak yüksek dielektrik sabite sahip olmalarına rağmen düşük duyarlılıktadır ve kırılgan yapıdadır. Piezoelektrik polimerler (PVDF) ise daha kolay şekil alabilmesine rağmen düşük dielektrik sabite sahiptir. Bunun yanı sıra piezoelektrik seramikler çift kutupların oluşması için gerekli olan polarizasyona kolayca uyum sağlamasına rağmen polimerler daha güç polarize olmaktadır (Chen, 1999).

Bu çalışma kapsamında PZT/Epoksi kompozit piezoelektrik malzemelerinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Laboratuvarlarda geliştirilen bu kompozitlerin dielektrik ve piezoelektrik özellikleri geliştirilerek, sensör ve aktüatör olarak kullanılarak titreşim sönümleyici işlevi görülmesi hedeflenmiş ve böylece yapıların ömrünün uzatılması amaçlanmıştır.

2. PİEZOELEKTRİKLİK

2.1 Piezoelektrik Özellik

Sürekli kutuplaşmaya sahip bir asimetrik iyonsal kristale basınç uygulandığında kutuplararası uzaklık azalır, yüzeyinde yük birikimi artar, dolayısıyla iki uç arasında bir gerilim farkı doğar ve bir iletkenle birleştirilirse akım artar. Böylece mekanik etki elektriksel büyüklüğe dönüşür. Bu davranışa doğrudan piezoelektrik etki denir. Diğer taraftan aynı kristalin iki ucu arasına gerilim uygulanırsa eksi yükler artı elektroda, artı yükler eksi elektroda doğru çekilir, eksi ve artı yük merkezleri arasında uzaklık artar ve bunun sonucu kristalin boyu büyür. Alanın yönü değişirse aynı işaretli yükler birbirlerini iter ve kristalin boyu kısılır. Böylece elektriksel etki mekanik büyüklüğe dönüşür. Bu davranışa dolaylı piezoelektrik etki denir. Şekil 2.1’ de bu etkiler şematik olarak da görülebilmektedir (Leo, 2007; Onaran, 1995; Schwartz, 2002).



Şekil 2.1 : Doğrudan ve dolaylı piezoelektrik etkinin şematik gösterimi (a) Elektrik uygulandığında malzemedeki değişim (b) Malzeme üzerine kuvvet uygulandığında elektrik alan oluşumu (Schwartz, 2002).

Tüm kristaller kristal simetrilerine göre 32 gruba ayrılırlar. Bunlar da kendi içinde simetriye sahip olanlar ve olmayanlar olmak üzere ikiye ayrılır. 21 adet kristal simetriye sahip olmayan kristalden 20'sinde piezoelektrik etki gözlemlenmektedir. Bunların 10 tanesi birim kafes yapılarında dipole sahiptirler ve ısıl uzamalar veya büzölmeler dahi yüzeylerinde elektrik yükü oluşması için yeterlidir. Bu malzemeler piezoelektrik malzemeler olarak adlandırılırlar (Schwartz, 2002; Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

Piezoelektrik özelliğe sahip malzemelerde yerel kutuplar rastgele yönlenmiş halde iken parça net bir kutba sahip olmaz. Bu durumda belirli bir sıcaklıkta (Curie sıcaklığı) kuvvetli elektrik alan uygulayarak yerel kutuplar yönlendirilir ve böylece parça net bir kutba sahip olur (Onaran, 1995).

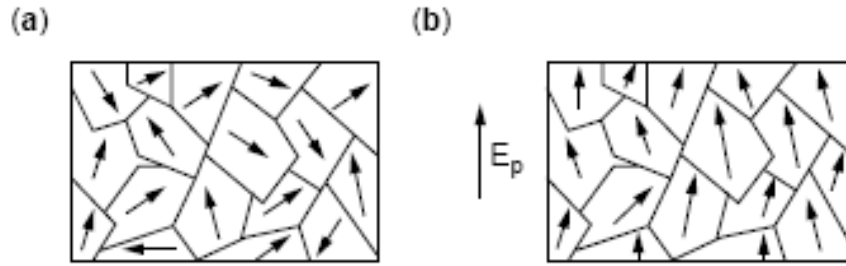
Curie sıcaklığı piezoelektrik malzemelerin karakteristik bir özelliğidir. Daha önce de belirtildiği gibi bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında dipoller yönlenmelerini değiştirir. Polarizasyon esnasında, malzeme curie sıcaklığının üzerine ısıtılır ve kuvvetli bir elektrik alan uygulanır. Bu alanın doğrultusu polarizasyonun yönünü gösterir. Malzeme curie sıcaklığının altına soğutulduğunda dipollerin yeri sabit kalır ve malzeme polarize edilmiş olur (Srinivasan ve diğ., 2001).

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 yönlenme ve uygulanan mekanik gerilme ile oluşan uzamanın yönü arasındaki açılal değerlere bağlıdır. Yani, mekanik uzamalar tensörel olarak ifade edilir ve aksi yönlerde değer olarak farklılık göstermezler ($\epsilon_{12} = \epsilon_{21}$ gibi). Piezoelektrik malzemelerde oluşan elektriksel kutuplama ve elektriksel alan ise vektörel büyüklüklerdir ve değerleri yöne bağlıdır ve malzemenin kristal yapısı tarafından belirlenir, ayrıca malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Dolayısıyla mekanik bir gerilmenin malzemede oluşturacağı elektriksel kutuplama, malzemeye bağlıdır ve her piezoelektrik malzeme için kristal yapısına göre karakteristik bir değer alır (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

İzotropik malzemelerde, elektrik alanın sebep olduğu gerilme veya deformasyon ters yönlerde birbirine eşit olurken, izotropik olmayan malzemelerde, farklı bir ilişki gözlenir. Bu özellik sadece yüksek dielektrik sabitli malzemelerde yani ferroelektrik malzemelerde gözlenir (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

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

Çok kristalli ferroelektrik seramikler, başlangıçta toplam elastik enerjileri en az olacak şekilde her bir tane içerisinde dipolleri rasgele doğrultularda polarizasyona sahip bölgeler (domainler) içerirler (Şekil 2.2a). Bu rasgele dizilişten dolayı ferroelektrik malzemeler piezoelektrik özellik göstermezler. Ancak, Küri sıcaklıklarının altında, bir eşik değerden daha büyük bir statik elektrik alanına maruz kaldıklarında başka bir deyişle kutuplandıklarında piezoelektrik özellik kazanabilirler.

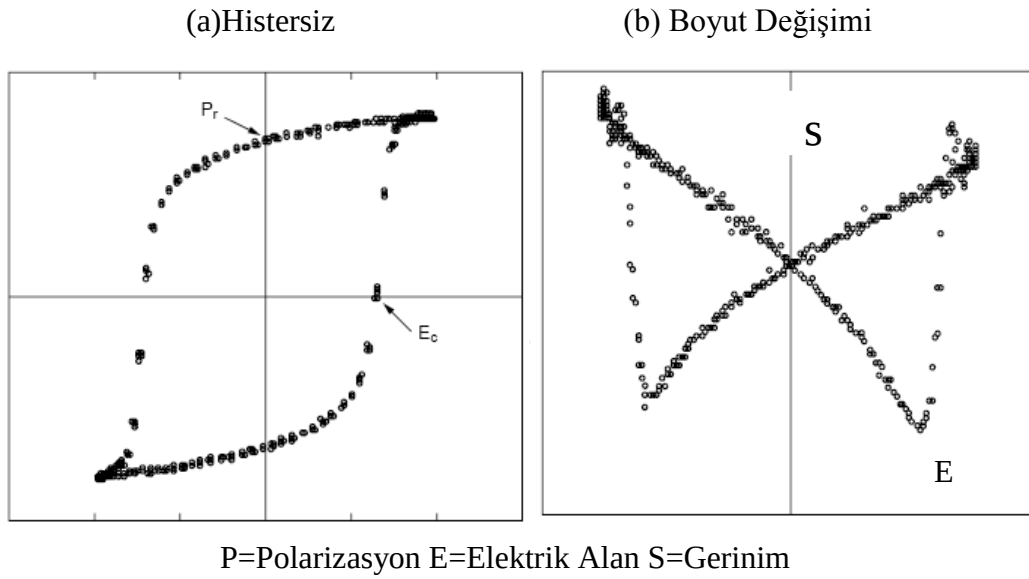


Şekil 2.2 : Bölge Hareketlerinin Çizgisel Gösterimi, (a) Polarizasyon Öncesi, (b) Polarizasyon Sonrası (Schwartz, 2002)

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 yönlenmesi sağlanır. 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 2.2b). Dolayısıyla polarizasyon öncesi malzeme, izotropiktir ve bu durumda piezoelektrik davranış göstermez. Polarizasyon

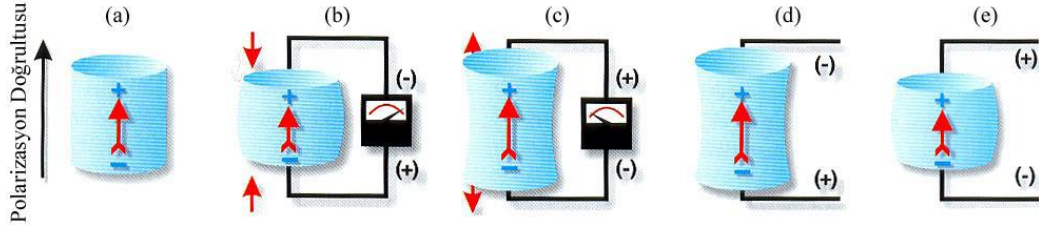
sonunda ise uygulanan elektrik alanı ile dipoller bir eksene doğru yönlenirler ve polikristallerden oluşan tüm yapıda net bir elektriksel dipol momenti oluşur. Bu yapıda aynı yöne yönlenmiş izole dipollerin oluşturduğu bölgeler vardır. (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011).

Ferromanyetik malzemeler gibi, kutuplanmış bir ferroelektrik malzeme de histersiz gösterir. Şekil 2.3a’da piezoelektrik seramik bir elemana uygulanan bir elektrik alan sonucunda oluşan tipik histersiz ve Şekil 2.3b’ elemanın boyut değişimi verilmiştir (Schwartz, 2002).



Şekil 2.3 : Piezoelektrik elemanda oluşan histersiz (a) ve Boyut Değişimi (b) (Schwartz, 2002)

Histersiz elde edilirken öncelikle piezoelektrik seramik eleman, maksimum polarizasyon, P_s , elde edilinceye kadar elektrik alana maruz kalır. Artık (Remanent) polarizasyonun, P_r , belirlenmesi için ise elektrik alanı sıfıra düşürülmelidir. Daha sonra elektrik alan tersine çevrilerek ters yönde maksimum bir polarizasyon elde edilir ve negatif artık polarizasyonun belirlenmesi için elektrik alan sıfırlanır. Histersis eğrileri altında kalan alan, seramik elemanın elektrik alanındaki değişimlere uyan polarizasyon doğrultusundaki boyut değişimlerine bağlı olarak değişir (Şekil 2.3b). Elektrik alanına paralel doğrultuda olan boyuttaki görelî artış/azalış elektrik alanına dik doğrultuda olan boyuttaki görelî azalış/artış ile karşılanır (APC International, 2006; Alexander, 2006).



Şekil 2.4 : Piezoelektrik elemanın davranışı (a) Elemandaki polarizasyon doğrultusu (b-c) Üreteç davranışı (d-e) Motor davranışı (APC International, 2006)

Herhangi bir piezoelektrik seramik eleman üzerine uygulanan mekanik basma veya çekme gerilmesi, voltaj üreterek elemanın dipol momentini bozar, polarizasyon doğrultusunda basma veya polarizasyona dik yönde çekme, polarizasyon voltajıyla aynı polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 2.4b). Polarizasyon yönünde çekme veya polarizasyon doğrultusuna dik yönde basma uygulandığında ise piezoelektrik seramik eleman, polarizasyon voltajına zıt polariteye sahip bir voltaj üretir (Şekil 2.4c). Seramik elemanın bu şekildeki basma ve çekme mekanik enerjilerini elektrik enerjisine çevirmesine üreteç davranışı denir. Bu davranış; ateşleme sistemlerinde, kuru pillerde, sensör cihazlarda vb. ürünlerde kullanılır (APC International, 2006).

Eğer seramik elemana polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusunda uygulandığı takdirde, seramik eleman uzayacak ve çapı küçülecektir (Şekil 2.4d). Polarizasyon voltajı ile aynı polariteye sahip bir voltaj, polarizasyon doğrultusuna dik uygulandığında ise, seramik elemanın boyu kısalacak ve çaptan genişleyecektir (Şekil 2.4e) (APC International, 2006).

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

2.2 Piezoelektrik Davranışı Etkileyen Faktörler

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

2.2.1 Yaşlanma

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

2.2.2 Mekanik sınırlamalar

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

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 alanın 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).

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 Küri sıcaklıklarının altında olmak zorundadır. Piezoelektrik seramik bir eleman için tavsiye edilen en üst kullanma sıcaklığı, Küri sıcaklığının yarısıdır. Tavsiye edilen sıcaklık aralığındaki kullanımlarda, domainlerin dizilimindeki değişimler geri dönüşümlüdür. Ayrıca ani sıcaklık dalgalanmaları, piezoelektrik seramik bir elemanı depolarize edebilecek nispeten yüksek voltajlar üretebilirler (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011; Piezo Kinetics Inc., 2011).

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 kararlıdır denilebilir.

2.3 Piezoelektrik Malzemeler

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

2.3.1 Doğal piezoelektrik malzemeler (Kristaller)

Doğal piezoelektrik malzemelerden, en verimli piezoelektrik davranışı elde etmek için mevcut kristalleri belirli kristalografik doğrultuları göz önüne alarak kesmek ve şekillendirmek gerekmektedir (Tressler ve diğ. 1998).

Birçok doğal piezoseramik arasından en çok kullanılanı, kuvarstır. Kuvars kristali günümüzde az da olsa hızlandırıcılarda kullanılmaktadır. Fakat kuvarsın elektromekanik çift katsayısının düşük olması, kuvarsın elektromekanik enerji dönüşümünün esas olduğu uygulamalarda tercih edilmemesine neden olmaktadır (Tressler ve diğ. 1998).

Yüksek voltaj sabitlerinden (g_h) dolayı lityum sülfat ve turmalin ticari hidrofonlarda hala kullanılan iki kristal piezoelektrik malzemedir. Bu kristaller şok ve hava akımı ölçümleri için de kullanılmışlardır (Tressler ve diğ. 1998).

Lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3), 400°C 'ye kadar yüksek hassasiyetlerine korumalarından dolayı yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde tercih edilmektedir. Lityum niyobat ve lityum tantalat dışında yüksek sıcaklıklarda kararlı oldukları için tercih edilen diğer kristaller; $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ve $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ kristalleridir (Tressler ve diğ. 1998).

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

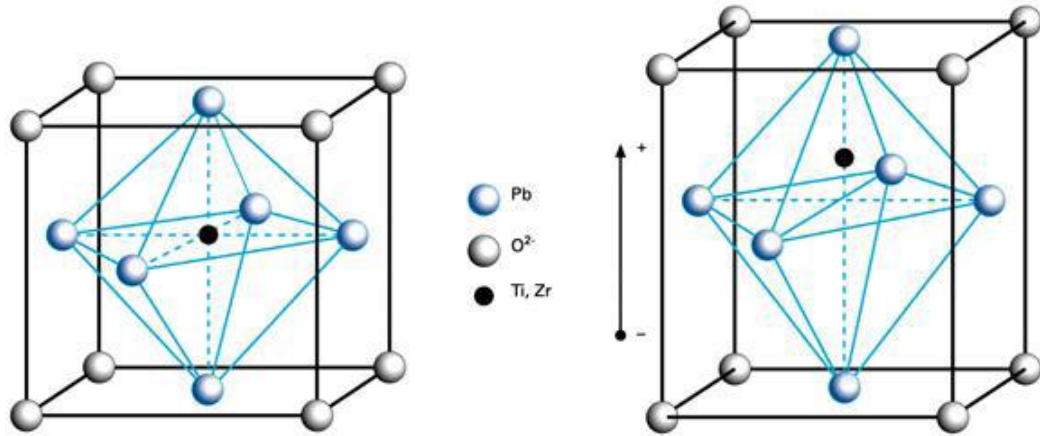
Çizelge 2.1 : Bazı Piezoelektrik Kristallerin Oda Sıcaklığındaki Özellikleri
(Tressler ve diğ. 1998)

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

2.3.2 Piezoelektrik seramik malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, doğal piezoelektrik malzemelere göre fiziksel, kimyasal, mekanik ve piezoelektrik özellikleri açısından daha kullanışlı oldukları gibi, kimyasal olarak da daha kararlıdır. Ayrıca neme ve atmosferik koşullara karşı da daha dayanıklıdır. Özel uygulamalara kolaylıkla adapte edilebilirler, karmaşık geometri veya büyük hacim gerektiren uygulamalar için kolay ve ucuz üretim olanağı sağlarlar. (Tressler ve diğ. 1998).

Geleneksel bir piezoelektrik seramik, genelde perovskit kristal yapısına sahiptir. Şekil 2.5’de olduğu gibi provskit kristalleri, genellikle geniş bir kafese dizilmiş kurşun veya baryum ve oksijen iyonları gibi divalent metal iyonları arasında, küçük titanyum veya zirkonyum gibi tetravalent metal iyonları içerirler. Kristallerde, tetragonel veya rombohedral simetriyi oluşturan şartlar altında her bir kristal dipol momente sahiptir (Şekil 2.5) (APC International, 2006).



Şekil 2.5 : Provsit kristalinin şematik görüntüsü (Physik Instrumente, 2011).

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

Seramik bileşimine donör dopant yerine akseptör dopant katılması halinde ise kristal yapıda oksijen (katyon) boşlukları oluşur. Bu tür bileşimlerle de sert piezo seramikler elde edilir. Sert piezo seramiklerin özellikleri genellikle yumuşak seramiklerin özelliklerine zıttır. Sert seramikler, 300°C'nin üstünde 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 piezoelektrik seramiklerin karşılaştırılması (APC International, 2006).

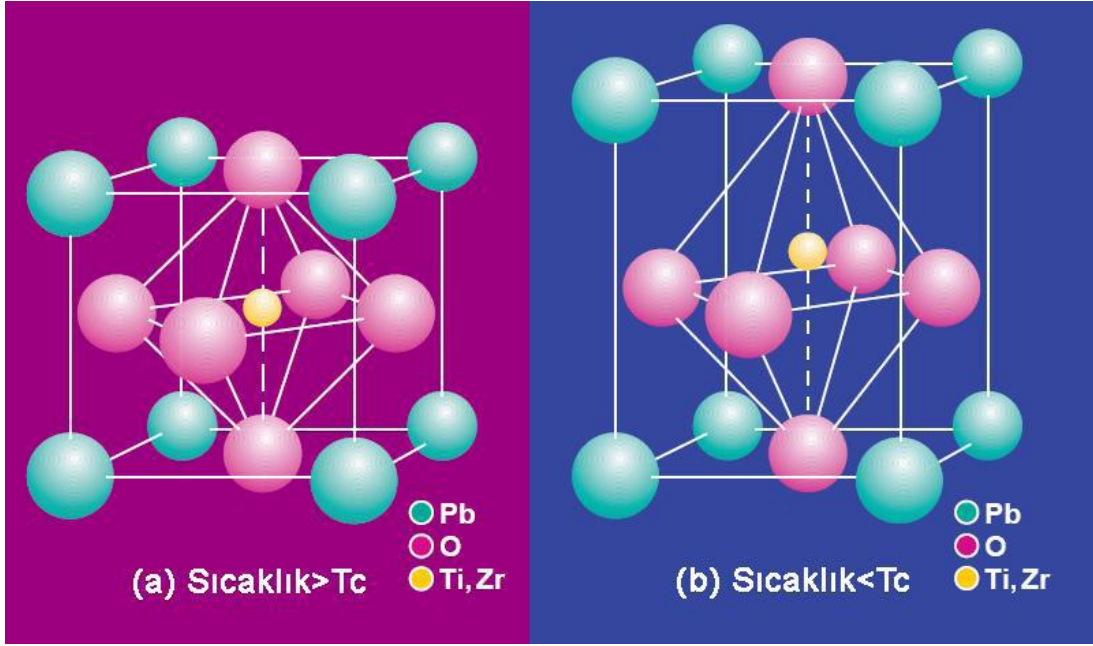
Özellikler	Yumuşak Seramikler	Sert Seramikler
Piezoelektrik Sabitler	Büyük	Küçük
Permitive	Yüksek	Düşük
Dielektrik Sabitler	Büyük	Küçük
Dielektrik Kayıplar	Yüksek	Düşük
Elektromekanik Çift Faktörü	Büyük	Küçük
Elektrik Direnç	Çok Yüksek	Düşük
Mekanik Kalite Faktörü	Düşük	Yüksek
Polarizasyon/Depolarizasyon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

2.3.2.2 Piezoelektrik PZT

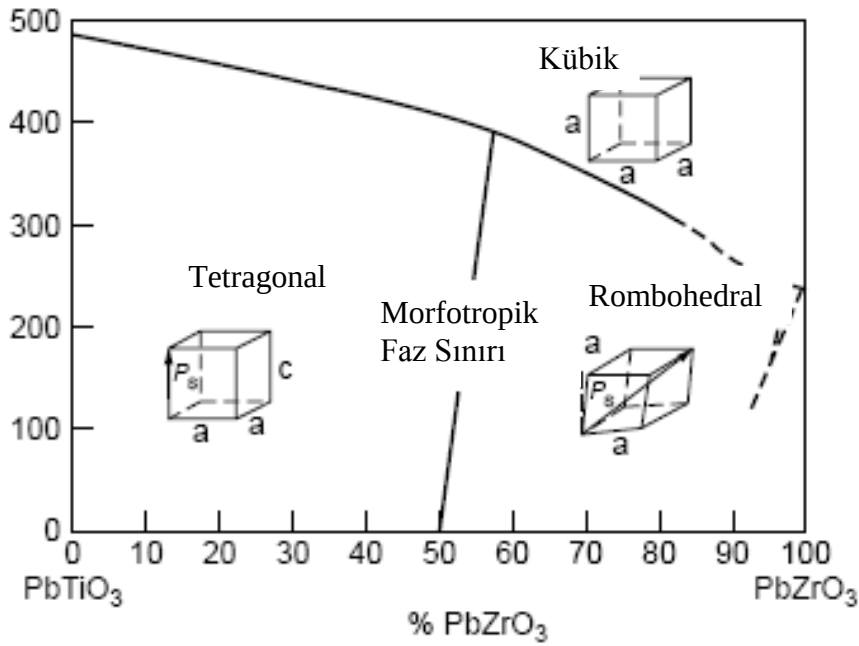
Piezoelektrik seramik sensörlerin çoğu PZT esaslıdır. PZT, $Pb(Zr,Ti)O_3$ (kurşunzirkonat- titanat) piezoelektrik seramik Clevite firmasının tescilli ürünüdür. Bu ürün %52-54 mol $PbZrO_3$ (kurşun zirkonat) ve %46-48 mol $PbTiO_3$ (kurşun titanat)’ün oluşturdukları katı çözeltilerin genel adı haline gelmiştir. PZT, provskit yapıda olan ferroelektrik bir malzemedir (Tressler ve diğ. 1998).

Sert PZT curie sıcaklığı $300^{\circ}C$ ’nin üzerindedir ve oda sıcaklığında kolay polarize olamaz. Yumuşak PZT’ nin ise curie sıcaklığı $200^{\circ}C$ ’ nin altındadır ve oda sıcaklığında kuvvetli elektrik alan altında polarize olabilirler (Srinivasan, 2001).

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 $1.4\text{\AA}$ ’luk bir çapa sahiplerdir. Bu iki iyon kafes parametresi $4\text{\AA}$ olan yüzey merkezli kübik bir kristal sistem oluştururlar. Oktahedral olarak konumlanmış olan titanyum ve zirkonyum atomları ise birim kafesin merkezinde yer alırlar (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006; APC International, 2006).



Şekil 2.6 : PZT Yapısı, (a) Sıcaklık > T_c , (b) Sıcaklık < T_c (Piezo Kinetics Inc., 2011)

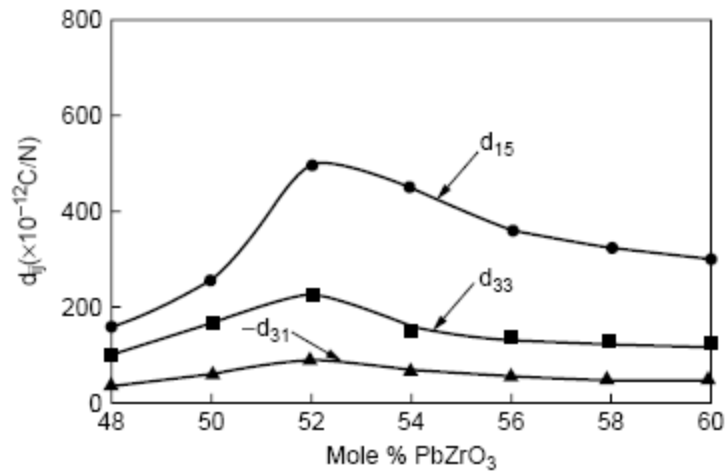


Şekil 2.7 : PZT sisteminin faz diyagramı (Schwartz, 2002)

Yüksek sıcaklıktaki bir PZT soğutulduğunda, PZT'nin kristal yapısı bir faz dönüşümünün etkisi altına girer. Bu faz dönüşümü sırasında yaklaşık olarak $0.1\text{\AA}$ 'luk atomik ötelenmeler meydana gelir. Titanyumca zengin PZT bileşimlerinde, küri sıcaklığında kübik $m3m$ yapıdan $4mm$ tetragonal yapıya dönüşüm gerçekleşir. Bu sayede tetragonal yapıda $[001]$ doğrultusunda oluşan polarizasyon, küri sıcaklığı ile 0°K arasında kendini korur. Bahsi geçen bu yapısal dönüşümler Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Ergun ve diğ. 2006).

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

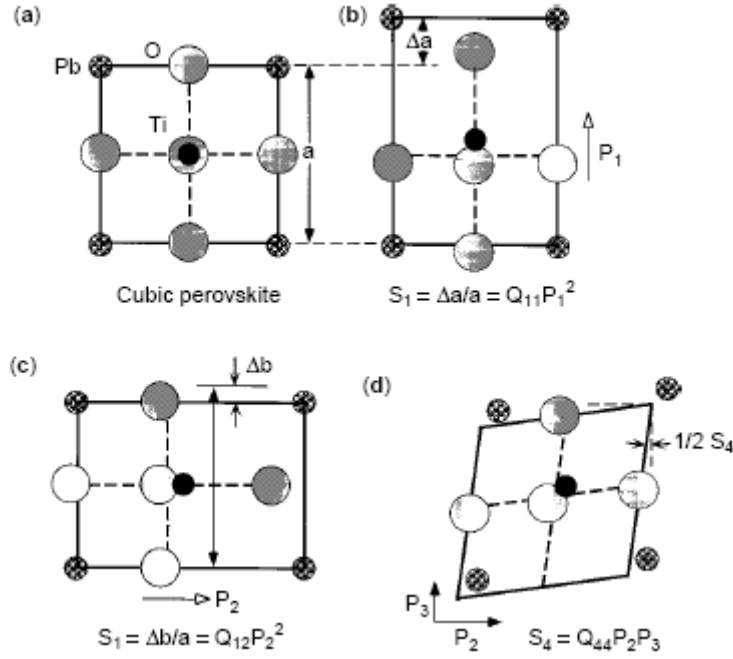
Farklı bileşimlerdeki PZT' lerin piezoelektrik özellikleri de farklılık gösterecektir. Şekil 2.8' de piezoelektrik yük sabitlerinin d_{31} , d_{33} , d_{15} gibi farklı bileşenlere göre değişimi görülmektedir (Schwartz, 2002).



Şekil 2.8 : Farklı bileşimlerdeki PZT' lerdeki piezoelektrik yük sabiti değişimi (Schwartz, 2002)

Bu katsayıları arttırıcı ve azaltıcı etkiye sahip olan faktörler mevcuttur. Azaltıcı etkilerin başında Şekil 2.9'da da gösterildiği gibi mekanik gerilme altında kristal yapıda oluşan çarpılmalar gelmektedir (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

Dipol momente paralel bir mekanik gerilme (Şekil 2.9b) altında x_3 doğrultusundaki ani s) bir artış gerçekleşir. Bu artış d_{33} etkisi olarak adlandırılır. Dipol momente dik bir mekanik gerilme (Şekil 2.9c) uygulanması sonucunda ise enine doğrularda elektrik yükleri oluşur ve bu durum da d_{31} etkisi adlandırılır. Dipol, kayma gerilmesine (Şekil 2.9d) maruz kaldığında ise yükler kenar yüzeylerde toplanır ve etki d_{15} etkisi olarak adlandırılır. Tensör katsayılarını arttırıcı etkiler ise genellikle bölge duvarlarının hareketlerini içeren büyük etkilerdir (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).



Şekil 2.9: Mekanik gerilme sonucu yapıda meydana gelen çarpılmalar, (a) Gerilmesiz Durum, (b-d) Gerilme Sonucunda Meydana Gelen Çarpılma (Schwartz, 2002)

PZT esaslı piezoelektrik malzemeler birleşim oranlarına göre farklı özellikler göstermektedir. Bazı PZT türlerinin piezoelektrik özellikleri Çizelge 2.3 'de verilmiştir. Her ne kadar bazı PZT üreticileri, geliştirdikleri formüller sonucu patentlerini aldıkları PZT'ler için değişik bir adlandırmaya gitseler de genellikle; PZT-4 Fe, PZT-5 Nb, PZT-6 Cr ve PZT-7 La katkılı PZT'leri ifade eder. Sıklıkla karşılaşılan bir başka PZT ifade etme şekli ise PZT'lerin Type1, Type 2, Type 3 gibi US Navy standartlarına göre olanıdır. US Navy ile gruplandırılan PZT'lerin özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir. Çizelge 2.3'ye ek olarak diğer önemli piezoelektrik sensör malzemeleri ve özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

Çizelge 2.3 : PZT seramiklerinin özellikleri (Tressler ve diğ. 1998)

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

PZT bileşimine katılacak katkıların piezoelektrik özellikler üzerinde önemli bir etkisi vardır. PZT'ye katılan Ba, Sr, Ca, La vs. gibi elementler ile Küri sıcaklığı, duyarlılıkları ve dayanımları gibi piezoelektrik özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlamakta, böylece arzu edilen tasarım gereksinimlerine uygun olan geniş bir yelpazede özelliklere sahip ürünlerin üretimi mümkün olmaktadır (Tressler ve diğ. 1998).

Çizelge 2.4 : PZT türleri ve özellikleri (Piezo Kinetics Inc., 2011)

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

Çizelge 2.5: Bazı piezoelektrik seramiklerin özellikleri (Tressler ve diğ. 1998)

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 ₃	115	1700	190	-78	260	0.50	0.21	0.48
PbTiO ₃	470	190	56	-	68	0.45	-	-
PbNb ₂ O ₆	570	225	85	9	-	0.38	>0.045	-
KNaNb ₂ O ₆	420	495	127	-51	306	0.60	-0.27	-0.46
Ba _{0.4} Pb _{0.6} Nb ₂ O ₆	260	1500	~220	-90	-	~0.55	~0.22	-
LiNbO ₃	1150	25	6	-	-69	0.23	-	0.60
Na _{0.5} Bi _{0.5} Ti ₂ O ₅	320	300	~70	~15	-	~0.40	~0.10	-

2.3.2.3 Yaygın kullanılan piezoelektrik seramikler ve özellikleri

Şu an piyasada farklı malzemelerden üretilmiş çok çeşitli piezoelektrik seramiklere ulaşmak mümkündür. Bunlar üretildiği malzemelerin cinsine, üretim yöntemlerine ve birleşim oranlarına bağlı çok değişik piezoelektrik özellik taşıyabilmektedirler. Kurşun zirkonat ve kurşun titanatın dışında kurşun içeren diğer bir bileşik de kurşun magnezyum niyobattır (Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃). Bu piezoelektrik seramik PZT'nin sağladığı avantajlar ve ayrıca piezoelektrik özellikler bakımından PZT'den az da olsa üstündür (Tressler ve diğ. 1998).

Baryum titanatın (BT) (BaTiO₃) Küri sıcaklığı yaklaşık 120°C dir. Küri sıcaklığının altında tetragonal yapı kararlıdır ve bu yapı dielektrik ve piezo özellikler gösterir. Küri sıcaklığının üzerinde ise kübik yapı kararlıdır ve bu yapı çok düşük dielektrik sabitine sahiptir. Baryum titanat, yüksek toksit etkiye sahip olan kurşunu içermediği için tıbbi uygulamalar dahil olmak üzere çevreye daha uyumlu kabul edilmektedir. (Tressler ve diğ. 1998; Ergun ve diğ. 2006).

PT, kurşun titanat, (PbTiO_3) piezo seramikler yüksek bir Küri sıcaklığına (490°C), düşük dielektrik sabitine (~ 200) ve b   k 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 katı kılar yapılarak kafes anizotropisi ayarlanabilir. Bu şekilde sinterlenebilirlik, elektromekanik çift gibi piezo özellikleri geliştirilebilir. Saf PT (kurşun titanat), kalsiyum ve/veya stronsiyum ile karı tırıldı ında üstün piezoelektrik anizotropisinden dolayı hidrof n malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılır. PZT ile kar ıla tırıldı ında tepki süresi daha kısadır (Tressler ve di . 1998; Ergun ve di . 2006).

Kurşun nikel niobatlar, ($\text{Pb}(\text{NiNb})\text{O}^{3-}$), PZT'lerden daha b   k deplasman değerlerine, yani daha yüksek d_{33} 'e, ve dielektrik sabitlerine sahip olabilmektedirler. Böylece daha küçük ölçekte cihaz üretimi için optimum değerler sa layabilmektedirler.  zelliklerinin dopantlar yardımıyla modifikasyonu mümkündür (Tressler ve di . 1998; Ergun ve di . 2006).

PZN, kurşun çinko niobatlar, ($\text{Pb}(\text{Zn}_{1=3}\text{Nb}_{2=3})\text{O}^{3-}$) kurşun esaslı kompleks perovskit yapıya sahip ferroelektrik seramik malzemedir. Çok tabakalı seramik kapasitör, tahrikçi ve elektromekanik dönüştürücü uygulamaları için çok uygun malzemelerdir. Diğer normal ferroelektrik malzemelere göre polarizasyona çok yavaş cevap verirler ve bu durum polarizasyonlarının ani olarak kaybetmemelerini sa lar (Tressler ve di . 1998).

2.3.3 Polimer piezoelektrikler

Piezoelektrik polimerlerin b   k çoğunluğu florakarbon esaslı polimerlerden oluşur. Genelde florakarbondan oluşan piezoelektrik polimerler arasında PVDF, üzerinde en çok çalışma yürütülen piezoelektrik polimerdir. PVDF' nin elektriksel özelliklerine ilgi 1969 yılında diğer polimerlerden üstün piezoelektrik özelliklerinin görülmesiyle ba lamı tır. (Chen, 1999; Schwartz, 2002).

Çizelge 2.6 : PVDF' nin piezoelektrik özelliklerinin seramiklerle karşılaştırılması (APC International, 2006)

	ϵ	d (pc/N)	k (%)
PVDF	12	$d_{31}= 20$ $d_{33}= -30$	11
BaTiO ₃	600-1200	-30- -60	21
PZT	<1000-4000	~ 200 - > 600	30-75

PVDF' nin piezoelektrik özelliklerinin seramiklerle karşılaştırılması çizelge 2.6' da verilmiştir. Piezoseramiklerle kıyaslandığında PVDF'lerin iyi mekanik dayanım, düşük akustik impedans, imalat kolaylığı ve mükemmel esneklik gibi avantajları olarak görülmektedir. En büyük dezavantajları ise polarizasyonlarının zor olmasıdır. PVDF'yi polarize etmek için 1.2MV/cm gibi çok yüksek elektrik alanları oluşturmak gerekmektedir (APC International, 2006; Chen, 1999).

2.3.4 Kompozit piezoelektrikler

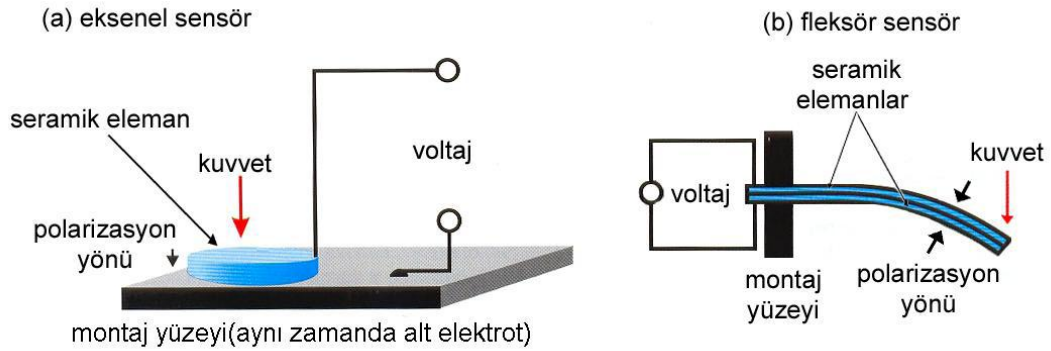
Piezoelektrik kompozitlerin sensörler imalinde kullanılmasının temel sebebi; kutuplanmış PZT'nin düşük hidrostatik duyarlılığıdır. Kompozit sensörlerle bu performansın artırılması hedeflenir. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilirler. Kompozitler her bileşenin en zayıf noktasını iyileştirerek, her bileşenden en iyi şekilde faydalanmamızı sağlar. Bu duruma en iyi örnek ise kompozit hidrofonlardır. Kompozit hidrofonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer iki fazdan oluşur. Piezoelektrik kompozitlerde başarılı bir polarizasyon ve buna bağlı olarak iyi piezoelektrik özellikler sağlamak için parçacıklar ile matrisin arabağı kuvvetli olmalıdır. Ayrıca kuvvetli bir bağ oluştururken, piezoelektrik seramik tozları homojen bir şekilde matriste dağıtmak, kompozitin çok daha verimli bir piezoperformans sergilemesine yardımcı olmaktadır. Yüksek ısı direnç katsayısına sahip polimer kullanmak, kompozitin yüksek sıcaklıklar altında kutuplanabilmesini olanaklı hale getirmektedir (Tressler ve diğ. 1998).

2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanıldığı Yerler/Uygulama Alanları

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

2.4.1 Sensörler

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

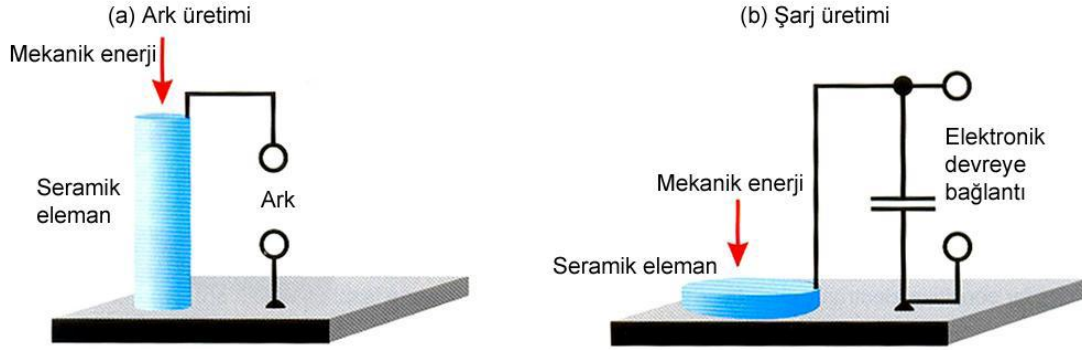


Şekil 2.10 : Piezoelektrik sensör çeşitleri, (a) Eksenel sensör, (b) Fleksör sensör (APC International, 2006).

Piezoelektrik eleman kullanılarak yapılan sensörlerin eksenel ve fleksör olmak üzere iki temel çeşidi mevcuttur. Bu sensörlerin basitçe yapıları Şekil 2.10 verilmiştir (APC International, 2006).

2.4.2 Üreteçler

Üreteç olarak dizayn edilen piezoelektrik malzemeler, gerilim (voltaj) üretirler. Bu özelliklerinden ötürü herhangi bir elektrot aralığında ark oluşturabildiklerinden (Şekil 2.11a) yakıt ateşleyicilerinde, gaz sobaları, kombi gibi cihazlarda, kaynak ekipmanlarında ve daha birçok cihazda piezo çakmak (ateşleme aparatı) olarak kullanılırlar.

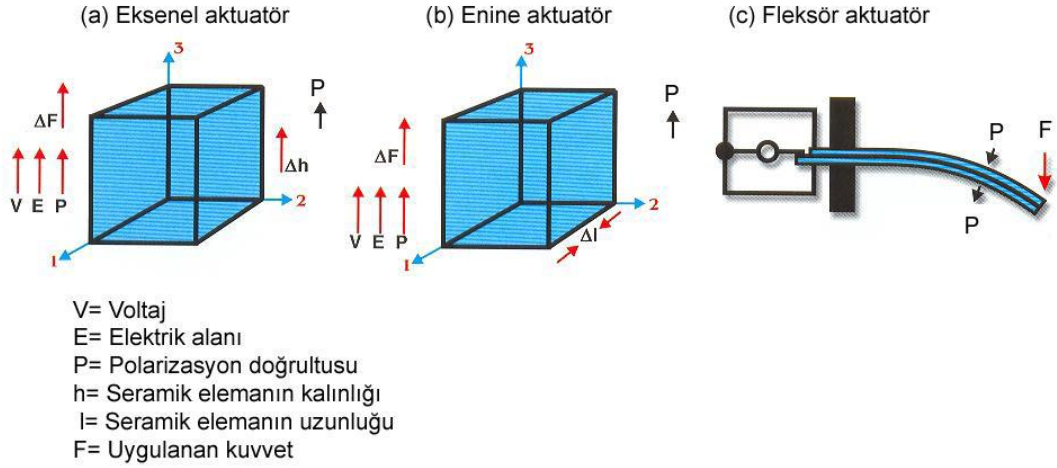


Şekil 2.11: Piezoelektrik eleman kullanılarak oluşturulan elektrik enerjisi, (a) Ark üretimi, (b) Şarj üretimi (APC International, 2006).

Piezoelektrik ateşleme sistemleri, küçük ve basittirler. Bu özellikleri bazı durumlarda, kalıcı mıknatıslar veya yüksek voltaj dönüştürücüleri ve kapasitörler gibi, alternatif sistemlere göre avantaj sağlar. Ayrıca piezoelektrik bir elmandan elde edilen elektrik enerjisini depolama imkanı da mevcuttur. Çok katlı kapasitörleri oluşturmada kullanılan teknikler çok katlı piezoelektrik üreteçlerinin yapımında da kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen üreteçler (Şekil 2.11b) elektronik devreleri beslemede kullanılan kuru pilleri oluşturmak için kullanılmaya çok elverişlidirler (APC International, 2006).

2.4.3 Aktuatörler (Öteleyiciler)

Tetikleyici veya tahrikçi olarak adlandırılabilen aktuatörler, elektrik sinyalini yüksek çözünürlükte (hassas) ötelenmeye (yer değişimine) çevirirler. Öteleyiciler, temel olarak aksel, enine ve fleksör öteleyiciler olarak gruplandırılırlar (Şekil 2.12). Aktuatörlerin gösterdiği yüksek hassasiyetteki hareketten makinalarda kullanılan takımların hassas şekilde kalibrasyonundan, çeşitli sistemlerde kullanılan optik lens veya aynaların kalibrasyonuna kadar birçok yüksek duyarlılık gerektiren uygulamada yararlanılır. Ayrıca piezoelektrik aktuatörler, uygulamasına göre hidrolik valfleri, küçük hacimdeki motorları veya özel amaçlı motorları kontrol etmede de kullanılabilirler. Aktuatörler, bir çeşit piezoelektrik motorlardır ve en büyük avantajları elektromanyetik gürültü oluşturmamalarıdır. Ayrıca eğer aktuatörün gerçekleştirdiği ötelenme engellenirse, aktuatör kullanılabilir bir kuvvet üretmiş olur (APC International, 2006).



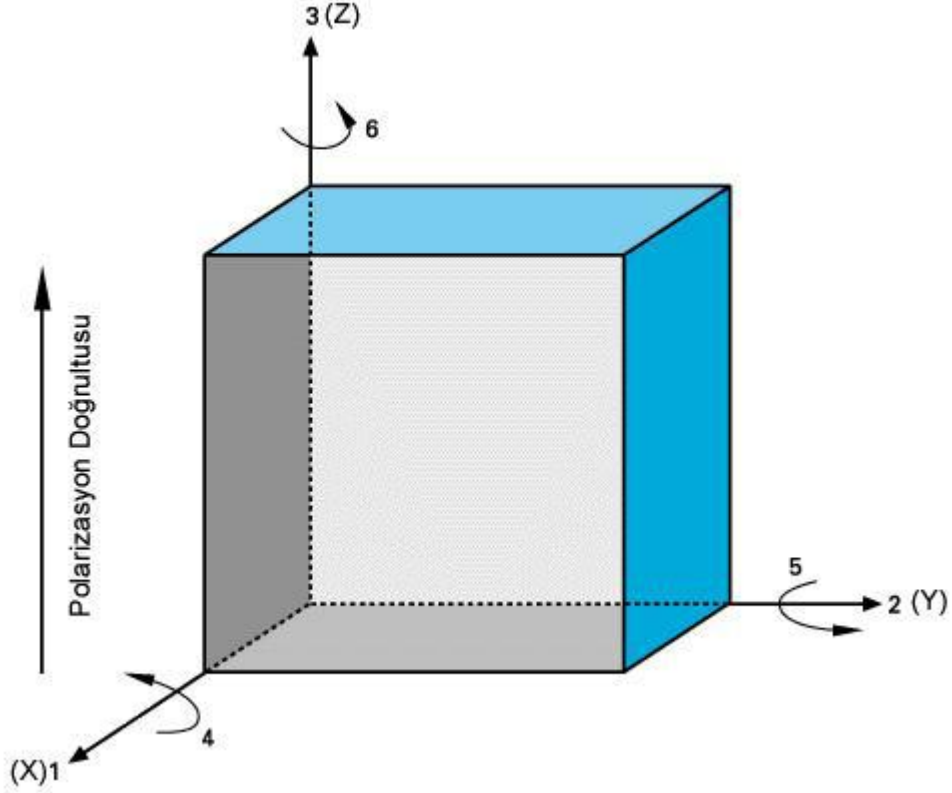
Şekil 2.12: Temel aktuatör çeşitleri (a-c) (APC International, 2006).

2.4.4 Transdüserler (Dönüştürücüler)

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 ayrı piezoelektrik transdüser kullanan cihazlar da mevcuttur. Ayrıca piezoelektrik transdüserlerden temizlemede, sıvıların atomizasyonunda, seramik veya diğer gevrek malzemelerin işlenmesinde, plastik malzemelerin kaynak işlemlerinde, medikal uygulamalarda vb. ultrasonik titreşimler oluşturduğu için yararlanılır (APC International, 2006).

2.5 Piezoelektrik Sabitler

Piezoelektrik bir seramik, anizotropik olduğundan, fiziksel sabitler uygulanan mekanik veya elektrik kuvvetin doğrultularına bağlıdır. Bundan dolayı her sabit ilgili iki niceliğin doğrultularını belirtmek için genellikle iki alt indise sahiptir. Pozitif polarizasyon doğrultusu, X-Y-Z koordinat sisteminin çoğunlukla Z doğrultusu ile belirtilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 : Piezoelektrik malzemeler için koordinat sistemi (Physik Instrumente, 2011)

X-Y-Z doğrultuları sırasıyla 1, 2, 3 alt indisleriyle temsil edilir ve bu doğrultuların herhangi birinden gerçekleşen kayma sırasıyla 4, 5, 6 alt indisleriyle verilir. Verilen bu indisleme sistemi her bir piezoelektrik sabiti için geçerlidir. En sık kullanılan piezoelektrik sabitlerinin detaylı açıklaması aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

2.5.1 Piezoelektrik yük sabiti

Piezoelektrik yük sabiti, d , uygulanan birim mekanik gerilme (T) sonucu oluşan polarizasyon veya uygulanan birim elektrik alan sonucu piezoelektrik malzemedeki mekanik gerilme (S) olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik yük sabitinin ilk alt indisi elektrik alan, E , sıfır olduğunda malzemedeki mevcut olan polarizasyonu ya da uygulanan elektrik alanının yönünü işaret eder. Piezoelektrik yük sabitinin ikinci alt indisi ise uygulanan gerilmenin doğrultusunu veya meydana gelen birim şekil değişimini belirtir. Piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik alan sonucu oluşan gerilme, elektrik alanıyla ve piezoelektrik yük sabitiyle ilişkili olduğundan, piezoelektrik yük sabiti aktüatör gibi gerilmeye bağlı uygulamalar için malzemenin

uygunluğunu sınavan önemli bir sabittir. d'nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlardan bazıları Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Piezoelektrik yük sabiti indislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

d	Açıklaması
d_{33}	3* yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan polarizasyon veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik alan sonucu 3 yönünde oluşan 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
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Piezoelektrik yük sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4'de verilmiştir (APC International, 2006)

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

$$d_{31} = k_{31}\sqrt{(s_{11}^E \epsilon_{33}^T)} \quad (2.2)$$

$$d_{33} = k_{33}\sqrt{(s_{33}^E \epsilon_{33}^T)} \quad (2.3)$$

$$d_{15} = k_{15}\sqrt{(s_{55}^E \epsilon_{11}^T)} \quad (2.4)$$

2.5.2 Piezoelektrik voltaj sabiti

Piezoelektrik voltaj sabiti, g, uygulanan birim mekanik gerilme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan elektrik alan veya uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu piezoelektrik malzeme tarafından oluşturulan mekanik gerinimdir. Piezoelektrik voltaj sabitinin ilk alt indisi, malzeme içinde oluşturulan elektrik alanının doğrultusunu veya elektrik ötelenme doğrultusunu belirtir. İkinci alt indis ise, uygulanan gerilmenin veya oluşan genlemenin doğrultusunu belirtir. Piezoelektrik bir malzemenin uygulanan bir fiziksel gerilmeye tepki olarak oluşturduğu elektrik alanının gücü uygulanan gerilme ve piezoelektrik voltaj sabitinden etkilendiğinden, sensör uygulamaları için kullanılan malzemenin doğru

olup olmadığının belirlenmesinde piezoelektrik voltaj sabitinin rolü büyüktür, g'nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlardan bazıları Çizelge 2.8'de verilmiştir (APC International, 2006).

Çizelge 2.8: Piezoelektrik voltaj sabiti indislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

g	Açıklaması
g_{33}	3* yönünde uygulanan birim gerilme sonucu 3 doğrultusunda oluşan elektrik alanı veya 3 yönünde uygulanan birim elektrik ötelenme sonucu 3 yönünde oluşan gerinim 3 yönünde uygulanan birim gerilme.
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.
*seramik elemanın polarize edildiği doğrultu ile aynı **seramik elemanın polarize edildiği doğrultuya dik	

Piezoelektrik voltaj sabitine ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.5, 2.6, 2.7 ve 2.8'de verilmiştir (APC International, 2006).

$$g = d/\epsilon^T \quad (2.5)$$

$$g_{31} = d_{31}/\epsilon_{33}^T \quad (2.6)$$

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

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

2.5.3 Dielektrik sabiti

Bir piezoelektrik malzeme için dielektrik sabiti veya manyetik geçirgenlik, ϵ , birim elektrik alan başına dielektrik ötelenmedir. ϵ^T , sabit gerilme altındaki dielektrik sabiti ve ϵ^S , sabit genleme altındaki dielektrik sabitidir. ϵ 'nin ilk alt indisi dielektrik ötelenme doğrultusunu, ikinci alt indisi ise elektrik alanının doğrultusunu temsil eder. ϵ 'nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.9'da verilmiştir. Relatif dielektrik sabiti K, ise ϵ 'nin (seramik malzemeden yapılmış bir elemanın depolayabileceği yük miktarının) ϵ_0 'a (vakumda depolanana, $8,85 \times 10^{-12}$ farad/metre) oranlanmasıyla bulunur (Eşitlik 2.9) (APC International, 2006).

$$K^T = \epsilon^T/\epsilon_0 \quad (2.9)$$

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

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

Çizelge 2.9 : Dielektrik sabiti indislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

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

2.5.4 Elektromekanik çift faktörü (Katsayısı)

Elektromekanik çift faktörü, k , bir piezoelektrik malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ne kadar verimli çevirdiğinin bir ölçüsüdür. Elektromekanik çift faktörünün ilk alt indisi elektrotların uzandığı doğrultuyu, ikinci alt indis ise uygulanan veya oluşturulan mekanik enerjinin doğrultusunu işaret eder. k 'nın aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.10'da verilmiştir. Çizelge 2.10'dan da anlaşılacağı gibi seramik elemanın boyut ve şekillerine göre elektromekanik çift faktörü özel ifadeler alabilir. Örneğin ince disk şeklindeki piezoelektrik eleman için düzlemsel elektromekanik çift faktörü, k_p , radyal çift faktörünü belirtir. Aynı şekilde yüzey boyutları kalınlığına göre büyük olan disk veya levha şeklindeki malzemelerin kalınlık elektromekanik çift faktörü, k_t 'de (k_{33} 'ün özel bir ifadesi) bu özel ifadelere örnek olarak verilebilir. k_t , k_{33} gibi 3 doğrultusundaki elektrik alanı ve gene aynı doğrultudaki mekanik titreşimler arasındaki çift faktörünü belirtir. Piezoelektrik seramik üreticilerinin kataloglarında yer alan elektromekanik çift faktörü değerleri teorik olarak elde edilen maksimum k değerleridir (APC International, 2006).

Tipik bir piezoelektrik seramik, bileşimine ve uygulanan kuvvetlerin doğrultulana bağlı olarak düşük girdi frekansında herhangi bir formda gönderilen enerjinin ancak %30-75'ini diğer enerji formuna dönüştürebilmektedir. Arzu edilen bir enerji dönüşümü için genellikle elektromekanik çift faktörü değerlerinin yüksek olması istenir. Fakat elektromekanik çift faktörü, ne dielektrik kayıplardan ne mekanik kayıplardan ne de dönüştürülmemiş enerjinin geri kazanımından sorumlu tutulmamalıdır. Enerjinin ne kadar etkin dönüştürüldüğü piezoelektrik eleman tarafından dönüştürülmüş, kullanılabilen enerjinin (depolanan), eleman tarafından

alınan toplam enerjiye (giren enerjiye) oranıyla belirlenir. Uygun tasarlanmış bir sistemde kullanılan piezoelektrik seramiklerin verimliliği bu yöntemle ölçüldüğünde, verimlilik %90'ı aşmaktadır (APC International, 2006).

Çizelge 2.10: Elektromekanik çift katsayısı indislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

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

Seramik bir elemanın elektromekanik çift faktörüne ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14'de verilmiştir. Bu eşitlikler statik veya düşük frekanslar için geçerlidir (APC International, 2006).

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

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = d_{31}^2 (s_{11}^E \epsilon_{33}^T) \quad (2.12)$$

Seramik disk için:

$$k_p^2 = 2d_{31}^2 ((s_{11}^E + s_{12}^E) \epsilon_{33}^T) \quad (2.13)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 (s_{55}^E \epsilon_{11}^T) \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14'de piezoelektrik seramik elemanlar için verilen elektromekanik çift katsayıları yüksek frekanslar için Eşitlik 2.15, 2.16, ve 2.17'de verilen şekle dönüşür (APC International, 2006).

Seramik levha için:

$$k_{31}^2 = \frac{(\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n-f_m)/f_m)]}{1 + (\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n-f_m)/f_m)]} \quad (2.15)$$

Seramik disk için:

$$k_p \approx \sqrt{[(2.51 (f_n - f_m)/f_n) - ((f_n - f_m)/f_n)^2]} \quad (2.16)$$

Seramik çubuk için:

$$k_{33}^2 = (\pi/2) (f_n/f_m) \tan[(\pi/2) ((f_n - f_m)/f_n)] \quad (2.17)$$

Herhangi bir şekildeki piezoelektrik eleman için ise elektromekanik çift katsayısı Eşitlik 2.18’de verilmiştir.

$$k_{eff}^2 = (f_n^2 - f_m^2)/f_n^2 \quad (2.18)$$

2.5.5 Elastik uygunluk

Elastik Uygunluk (compliance), s , bir piezoelektrik malzemeye 11 ve 33 doğrultularında uygulanan birim gerilme sonucunda oluşan gerilimdir. Aynı zamanda elastiklik modülünün tersidir (genleme/gerilim). S^D , sabit elektrik ötelenme altındaki elastik uygunluk, S^E ise sabit elektrik alan altındaki elastik uygunluktur. S^D ve S^E ’nin ilk alt indisleri gerilme doğrultusunu, ikinci alt indisleri gerilmenin doğrultusunu belirtir. S ’nin aldığı alt indislere göre ifade ettiği durumlar Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2.11: Elastik uygunluk indislerinin ifadeleri (APC International, 2006)

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

Piezoelektrik seramik bir elemanda elastik uygunluğa ilişkin bağıntılar Eşitlik 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 ve 2.23’de verilmiştir.

$$s = 1/v^2 \quad (2.19)$$

$$s_{33}^D = 1/Y \quad (2.20)$$

$$s_{33}^E = 1/Y_{33}^E \quad (2.21)$$

$$s_{11}^D = 1/Y_{11}^D \quad (2.22)$$

$$s_{11}^E = 1/Y_{11}^E \quad (2.23)$$

2.5.6 Elastiklik modülü

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

3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER VE AKTUATÖRLER

3.1 Giriş

Sensörler; fiziksel ortamlarla, elektronik olarak çalışan ve data kayıt eden sistemlerin birbirleriyle uyum içersinde çalışabilmesi için veri akışını sağlayan elemanlardır. Bir sensör belirli bir fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkiyi algılayarak, bu etkiyi bir elektrik sinyaline dönüştürür ve sinyali bir bilgi işlem sistemine gönderir. Genellikle sensörler yardımıyla kontrol edilen sistemlerde sensörün algıladığı girdiye bir çıktı ile cevap verilir. Bu duruma; sıcaklık, mesafe, kuvvet, ivme ölçümleri vb. örnek olarak verilebilir. Nesnelerin yerinin belirlenmesi, mesafe, akış, hız ölçümü vb. uygulamalar için işitilebilir ses sinyalleri (dalgaları) veya ultrasonik (sesüstü) sinyaller üreten ve algılayan dönüştürücü (transdüserler) sistemlerde de sensör elemanlardan yararlanılır. Bu uygulamaların birçoğunda ise sensör malzemesi olarak piezoelektrik seramik eleman veya elemanlardan yararlanılır. Alıcı verici uygulamalarında ise, hem gönderilecek sinyalin iletilmesinde, hem de yansıyan sinyalin toplanmasında tek bir piezoelektrik seramik eleman kullanılacağı gibi bu işlemler için iki piezoelektrik seramik eleman da kullanılabilir (APC International, 2006).

Tipik bir piezoelektrik sensör, yapısından dolayı, üzerine kuvvet veya basınç uygulanması veya uygulanan bu kuvvet veya basıncın değişmesi durumunda elektrik sinyali üretecektir. Statik yük altında seramik elemandaki serbest yük taşıyıcıları, dipollerin yüklerini nötr duruma getirecek şekilde dipollere göç ederler ve elemanın elektrik yükünü (şarjını) etkin bir şekilde boşaltırlar. Sensör olarak kullanılan seramik elemanın üzerine uygulanacak bir gerilme statik durumu bozarak elektriksel yükü yeniden oluşturacaktır. Seramik eleman üzerindeki gerilmenin ortadan kalkması halinde ise malzeme doğası gereği üzerinde oluşan elektrik yükünü boşaltma eğilimine yeniden girecektir (Hale, 2004).

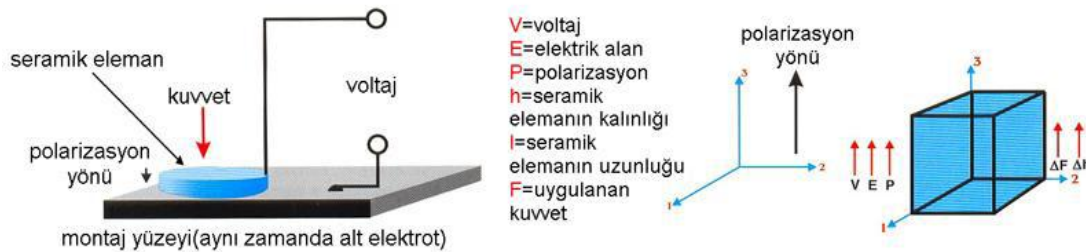
Uzun süreli kontrol uygulamaları için tasarlanan sensörlerde de kullanılan tek kristalli, yönlendirilmiş ve belirli doğrultularda kesilmiş piezoelektrik seramikler, çok kristalli piezoelektrik seramiklere göre üstündürler. Çünkü tek kristalli seramiklerin piezoelektrik özellikleri, çok kristalli seramiklere göre daha çok karardır. Diğer taraftan çok kristalli seramiklerin, kuvvet ve uzama sensörlerinde kullanılması daha avantajlıdır, çünkü çok kristalli seramikler daha yüksek mekanik dayanım ve sıcaklık, basınç, rutubet gibi zor çevre şartlarına karşı daha fazla direnç sağlamaktadır. Sensör olarak kullanılacak çok kristalli piezoelektrik seramiklerin özellikleri, oldukça kolay bir şekilde geliştirilebilir ve bu malzemeler neredeyse sınırsız şekil ve boyutta imal edilebilir (APC International, 2006; Tressler ve diğ. 1998).

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

3.2 Sensör Çeşitleri

3.2.1 Eksenel sensör elemanları

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



Şekil 3.1 : Eksenel piezoelektrik seramik sensör elemanı (APC International, 2006)

Seramik bir piezoelektrik sensöre uygulanan kuvvet ile oluşturulan yük (şarj) Q , Eşitlik 3.1’de verilmiştir. Yük, elemanın seramik elemanın boyutlarına bağlı değildir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011; Piezo Kinetics Inc., 2011).

$$Q = C_0 V \quad (3.1)$$

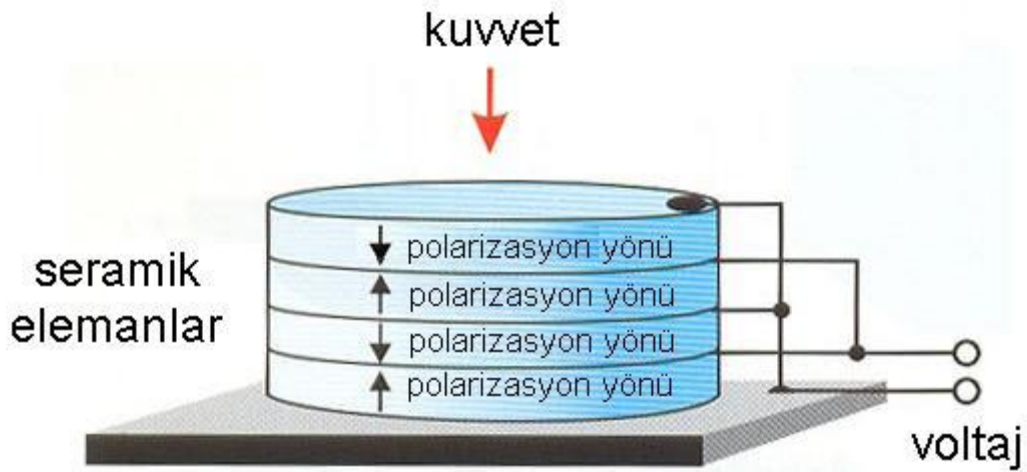
Eksenel bir sensör için Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2’deki ifadeye dönüşür.

$$Q = -d_{33} F \quad (3.2)$$

Eğer birden fazla seramik eleman üst üste dizilir ve paralel bağlanırsa, kuvvet her bir elemana eş zamanlı olarak etki eder (Şekil 3.2). Bu durumda Q , Eşitlik 3.3’de verildiği gibi ifade edilecektir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011; Piezo Kinetics Inc., 2011).

$$Q = -(d_{33} F) n^* \quad (3.3)$$

n^* = seramik eleman sayısı



Şekil 3.2 : Çok elemanlı eksenel sensör (APC International, 2006).

Yükün tersine, piezoelektrik sensöre uygulanan kuvvet sonucu oluşan voltaj V , seramik elemanın boyutlarından etkilenir. Voltaj, seramik elemanın yüksekliği ile doğru, kesit alanı ile ters orantılıdır. Bir veya birden fazla paralel bağlanmış seramik eleman içeren bir sensörün ürettiği voltaj, Eşitlik 3.4 yardımıyla ile hesaplanabilir (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011; Piezo Kinetics Inc., 2011).

$$V = -(g_{33} h T) \quad (3.4)$$

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

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

Sismik kütle tarafından piezoelektrik elemana uygulanan kuvvet Eşitlik 3.5 ile verilmiştir. Seramik eleman üzerindeki gerilme, elemanın yüzey alanı, ivme ve sismik kütle tarafından belirlenir (Eşitlik 3.6) (APC International, 2006; Morgan Electro Ceramics, 2011; Piezo Kinetics Inc., 2011).

$$F = Ma \quad (3.5)$$

$$T = -(M/A)a \quad (3.6)$$



Şekil 3.3 : Sismik kütleli eksenel akselerasyon sensörü (APC International, 2006)

3.2.2 Fleksör sensör elemanları

En genel şekliyle fleksör bir sensör yapmak için bir tane kalınlık doğrultusunda polarize edilmiş şerit halindeki piezoelektrik seramik yeterlidir. Fleksör bir sensör iki tane kalınlık doğrultusunda polarize edilmiş piezoelektrik seramik de içerebilir. Bu şekilde iki şerit piezoelektrik eleman barındıran fleksörlere bilaminer sensör elemanı denir (APC International, 2006).

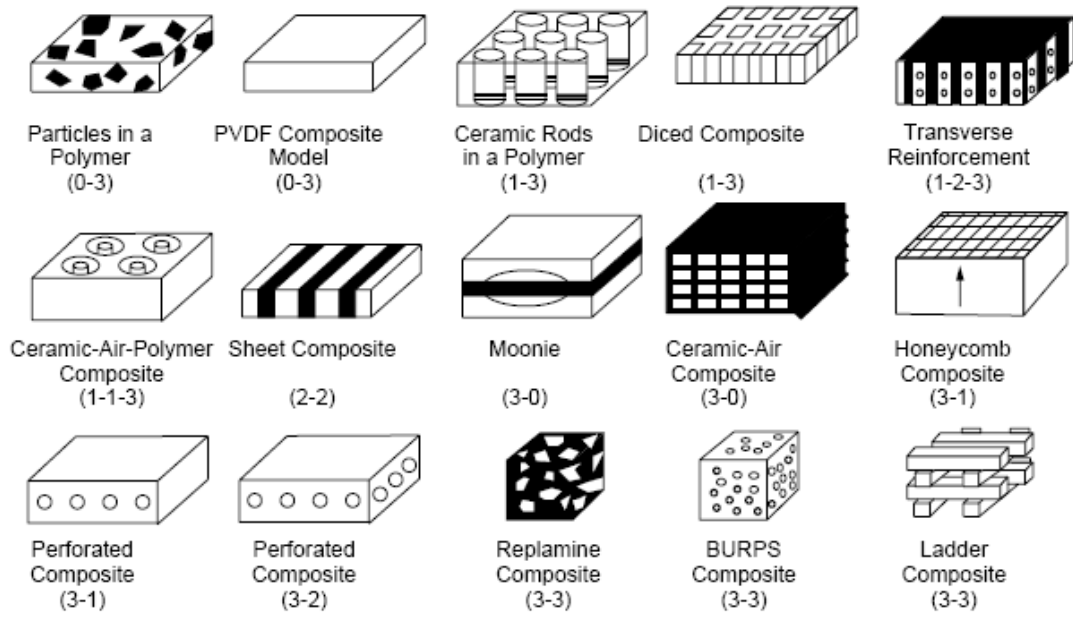
Birçok uygulamada, iki katlı sensör elemanı bir ucu uygulanan fiziksel kuvvetlerin ölçülebilmesi için serberst, diğer ucu ise elemanın sabitlenebilmesi için bir giriş üzerine monte edilmiştir. Bir fleksör sensör, eksenel sensörde olduğu gibi, polarizasyon doğrultusunda tatbik edilen bir kuvveti algılayabilir, fakat etkiyen kuvvet seramik eleman veya elemanların polarizasyon eksenine dik olan düzlem doğrultusunda eğilmesine neden olur. Bu sebeple fleksör sensörler d_{31} sensörleri veya 31-Mod sensörleri olarak adlandırılırlar (APC International, 2006).

3.3 Piezoelektrik kompozit sensörler

Piezoelektrik kompozitlerin sensörler imalinde kullanılmasının temel sebebi; kutuplanmış PZT'nin düşük hidrostatik duyarlılığıdır. Kompozit sensörlerle bu performansın artırılması hedeflenir. Piezoelektrik kompozitler, temel olarak seramiğin polimer esaslı bir fazla karıştırılmasıyla elde edilirler. Kompozitler her bileşenin en zayıf noktasını iyileştirerek, her bileşenden en iyi şekilde faydalanmamızı sağlar. Bu duruma en iyi örnek ise kompozit hidrofonlardır. Kompozit hidrofonların çoğu, biri piezoseramik, diğeri polimer, iki fazdan oluşur (Tressler ve diğ. 1998).

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

durumunu, ikinci rakam ise pasif fazın bağlanma durumunu temsil etmektedir (Tressler ve diğ. 1998).



Şekil 3.4 : Kompozit piezoelektrik malzemelerde fazların birbirlerine göre konumu (Schwartz, 2002)

3.3.1 0-3 Piezoelektrik seramik-polimer kompozit sensörler

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

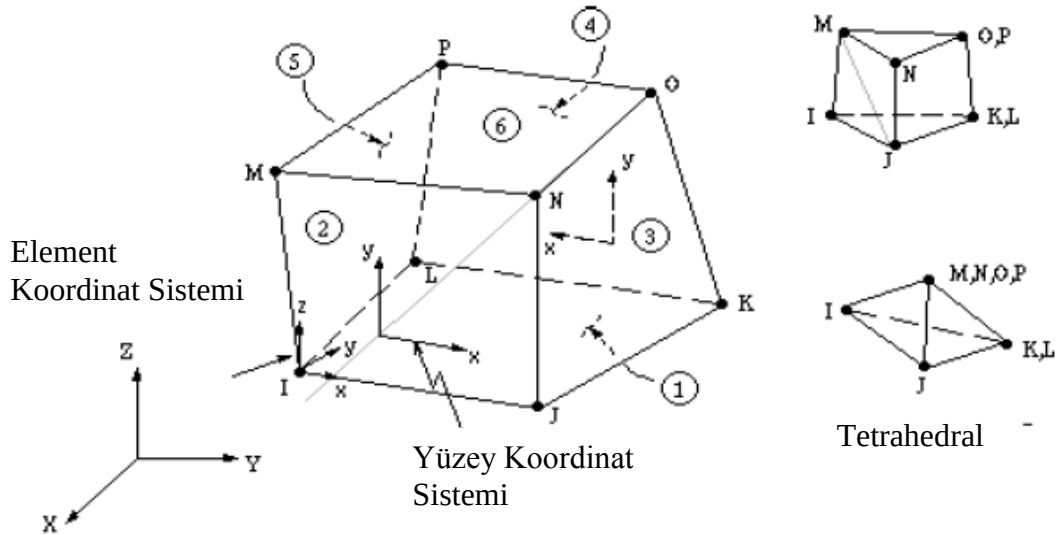
4. ANSYS İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde alüminyum çubuk ve üzerine yerleştirilen piezoelektrik malzemenin sonlu elemanlar analizi ANSYS program ile modellenmesi incelenecektir. Alüminyum çubuk SOLİD45, piezoelektrik malzeme ise SOLİD5 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 Solid 45

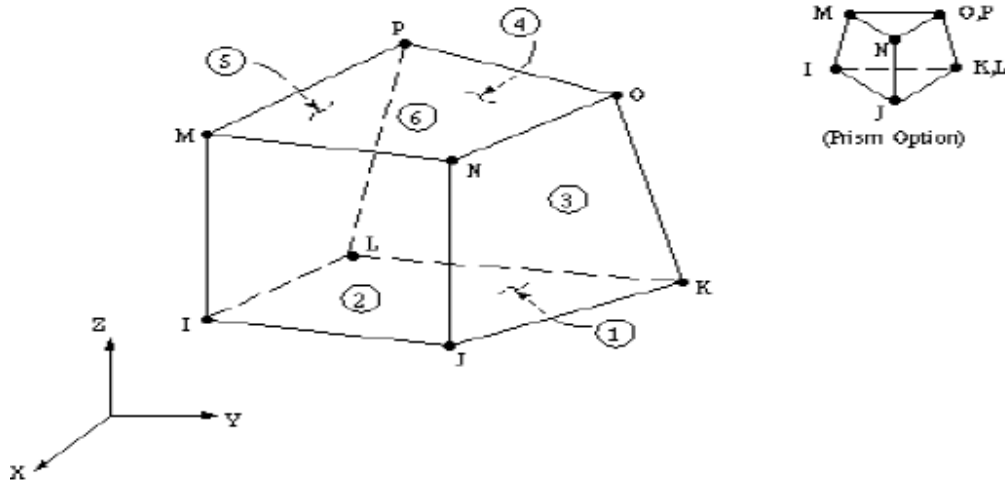
Şekil 4.1’de görülen SOLID45, katı yapıların 3-boyutlu modellenmesinde kullanılır. Eleman, her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi (x, y, z yönlerinde yer değiştirme) olmak üzere toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Eleman, plastiklik, sünme, genişleme, gerilme katılaşması, büyük sehim ve büyük şekil değiştirme yeteneklerine sahiptir (ANSYS- Help).



Şekil 4.1: ANSYS programındaki Solid45 elemanı

4.1.2 Solid 5

SOLID5, 3 boyutlu manyetik, termal, elektrik, piezoelektrik ve alanlar arasında sınırlı eşleşmeli yapısal alan kapasitesine sahiptir. Eleman, her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi olmak üzere toplam 8 düğüm noktasına sahiptir. Şekil 4.2’de, bu eleman için geometri, düğüm noktası yerleşimleri ve koordinat sistemi gösterilmiştir. Eleman, 8 düğüm noktası ve malzeme özellikleriyle tanımlanır (ANSYS- Help).



Şekil 4.2: ANSYS programındaki Solid5 elemanı

4.2 Piezoelektrik Malzeme Dönüşüm Değerleri

4.2.1 Temel bilgiler

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

T = mekanik gerilim

S = mekanik genleme

D = elektrik yer 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 ögeli x, y, z, yz, xz, xy)

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

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

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

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

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

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

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

Diğer taraftan, ANSYS verilere aşağıdaki şekilde ihtiyaç duyar:

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

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

Burada;

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

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

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

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

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

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

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

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

Denklem 4.1 ve 4.2 şeklinde verilen üreticinin verisini, denklem 4.3 ve 4.4 şeklinde ANSYS notasyonuna çevirmek için, denklem 4.1'in genleme 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 genleme bağladığı için, denklem 4.7 denklem 4.2 içine koyulabilir:

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

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

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

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.

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

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

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

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 (Imaoka, 1999).

4.2.2 Rijitlik/uyum matrisi

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

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

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

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

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

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

TBDATA, 7,se11,se13 ! ikinci satır girilir

TBDATA,12,se33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,16,se66 ! dördüncü satır girilir

TBDATA,19,se44 ! beşinci satır girilir

TBDATA,21,se44 ! altıncı satır girilir

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

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

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

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

TBDATA, 7,ce11,ce13 ! ikinci satır girilir

TBDATA,12,ce33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,16,ce66 ! dördüncü satır girilir

TBDATA,19,ce44 ! beşinci satır girilir

TBDATA,21,ce44 ! altıncı satır girilir

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

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

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

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

$$EX = 1/S_{11}^E = EY \quad (4.14)$$

$$EX = 1/S_{33}^E \quad (4.15)$$

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

$$GXY = 1/S_{66}^E = GXZ \quad (4.17)$$

$$NUXY = S_{12}^E / S_{11}^E \quad (4.18)$$

$$NUYZ = S_{13}^E / S_{33}^E = NUXZ \quad (4.19)$$

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.

4.2.3 İletkenlik matrisi

Sabit genlemede değerlendirilen iletkenlik matrisi ANSYS’e girilir. Genellikle, üreticinin verisi sabit gerilmede değerlendirilmiştir. Bu nedenle bir dönüşüm gerekir. Denklem 4.12’de belirtildiği gibi, sabit genleme dayalı dielektrik sabitleri aşağıdaki ilişkiyle hesaplanabilir:

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \quad (4.20)$$

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

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

$$K_{11}^S = \epsilon_{11}^S / \epsilon_0 \quad (4.21)$$

ANSYS’te, kullanıcı iletkenlik değerini ϵ_{33}^T şeklinde kesin değer olarak veya K_{33}^T şeklinde bağıl değer olarak girebilirse de, bağıl değer önerilen seçimdir.

Polarizasyonun 3-ekseninde (z-ekseni) olduğunu varsayarsak, bu, MP komutlarıyla aşağıdaki şekilde girilebilir:

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

MP,PERX,1,reprs11 ! Malzeme numarası #1

MP,PERY,1,reprs11

MP,PERZ,1,reprs33

Yukarıdaki “reps11” şeklindeki yazıları, bağlı iletkenlik matrisinden uygun nümerik değerlerle değiştirmek gereklidir (Imaoka, 1999).

4.2.4 Yoğunluk girişi

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

MP,DENS,1,dens !Malzeme numarası #1

Yukarıdaki “dens” yazısını uygun yoğunluk değeriyle değiştirmek gereklidir (Imaoka, 1999).

4.2.5 Piezoelektrik sabit matrisi

Genellikle üreticinin verisi, mekanik genlemeyi elektrik alanla ilişkilendiren $[d]$ 'ye sahiptir. Bununla birlikte ANSYS, mekanik gerilmeyi elektrik alanla ilişkilendiren $[e]$ 'ye ihtiyaç duyar. Bu nedenle dönüşüm gereklidir. Denklem 4.13, $[e]$ ile $[d]$ arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde kurmuştur:

$$[e] = [s^E]^{-1}[d] = [d]^t [s^E]^{-1} \quad (4.22)$$

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

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

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

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

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

Bu veriyi girmek için aşağıdaki komutlar kullanılabilir:

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

TBDATA, 3,e31 ! birinci satır girilir

TBDATA, 6,e31 ! ikinci satır girilir

TBDATA, 9,e33 ! üçüncü satır girilir

TBDATA,14,e15 ! beşinci satır girilir

TBDATA,16,e15 ! altıncı satır girilir

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

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu yüksek lisans tezi çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, sensör ve aktüatör uygulamalarında kullanılabilecek, piezoelektrik ve dielektrik özelliklerine sahip seramik/polimer kompozit malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bunun için seramik olarak APC firmasından temin edilen, özellikleri çizelge 5.1’ de verilen PZT, polimer olarak ise Polyscience firmasından temin edilen epoksi reçine kullanılmıştır. Geliştirilen bu malzemelerin piezoelektrik özellikleri, sinyal performansı testleri ile özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

5.1 Ön Çalışmalar

Sensör ve aktüatör uygulamalarında kullanılabilecek kompozit malzemelerin geliştirilmesinde öncelikle literatürden gerekli taramalar yapılarak kullanılabilecek seramik ve polimer cinsi belirlenmiştir. Epoksilerin oda sıcaklığında çok hızlı kürlenmesi, vizkositelerinin istenen düşük seviyelerde olmaması nedeniyle yurt içinden alımı gerçekleştirilen epoksi reçinelerden verim alınamamıştır. Nihayetinde Polyscience firmasından istenilen özelliklere sahip epoksi tedarik edilebilmiştir. Polimer olarak bu firmadan temin edilen Spurrs epoksi reçine kuvvetli biçimde yapışma, mükemmel kimyasal direnç ve elektriksel yalıtım, düşük vizkosite gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir.

5.2 PZT Tozunun Hazırlanması

APC 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.

PZT tozlarının sinterleme işlemi Şekil 5.1’de de verildiği üzere Proterm yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. PZT tozları, 1250°C’de 120 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığına oda sıcaklığından 120 dakika süre içinde çıkılmıştır. Sinterlemeden sonra oda sıcaklığına ise kontrollü bir şekilde 120

dakikada inilmiştir. PZT tozları fırına yerleştirilmeden Şekil 5.2’ de de görüldüğü üzere önce alümina fırın kapları içerisine toz olarak doldurulduktan sonra başka bir fırın kabı ile üzerleri kapatılmıştır.

Çizelge 5.1 : APC 856 PZT Piezoelektrik seramiğinin özellikleri
(APC International, 2006)

APC 856	
Relatif Dielektrik Sabiti (K^T)	4100
Dielektrik Kayıp Faktörü (%) [*]	2,7
Küri Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ^{**}	150
Yoğunluğu (g/cm^3)	7,5
Mekanik Kalite Faktörü	72
Elektromekanik Çift Katsayısı (%)	
k_p	0,65
k_{33}	0,73
k_{31}	0,36
k_{15}	0,65
Piezoelektrik Yük Sabiti (10^{-12} C/N ya da 10^{-12} m/V)	
d_{33}	620
$-d_{31}$	260
d_{15}	710
Piezoelektrik Voltaj Sabiti (10^{-3} Vm/N ya da 10^{-3} m ² /C)	
g_{33}	18,5
$-g_{31}$	8,1
g_{15}	25
Young Modülü (10^{10} N/m ²)	
Y_{11}^E	5,8
Y_{33}^E	4,5
Frekans Sabitleri (Hzm ya da m/s)	
N_L	---
N_T	1980
N_p	---
*1kHz’de	
**Maksimum Çalışma Sıcaklığı = Küri sıcaklığı/2	

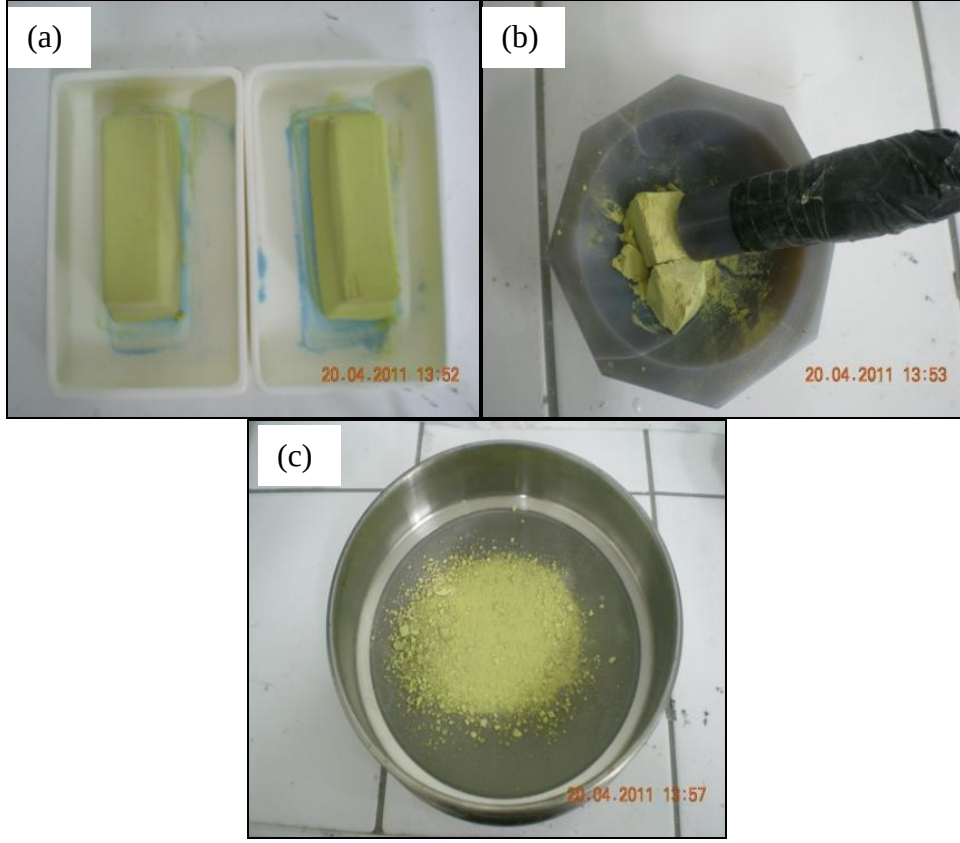


Şekil 5.1 : PZT tozlarının sinterlenmesi



Şekil 5.2 : Seramik kaplar içerisinde fırına yerleştirilen PZT tozları

Fırından çıkan seramik tozları havan kullanılarak öğütölüp ufalanmıştır. Öğütmeden çıkan sinterlenmiş tozlar $75\mu\text{m}$ (200mesh) elek kullanılarak elenmişlerdir ve $75\mu\text{m}$ 'dan daha büyük, yeteri kadar öğütölmemiş tozlar tekrardan bir öğütme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu döngü, en az oranda fireye ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Elenen tozlar nemden uzak, temiz ve ağzı kapaklı cam kavanoz içine konularak oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. PZT tozunun hazırlanması ile ilgili adımlar Şekil 5.3'de verilmiştir.



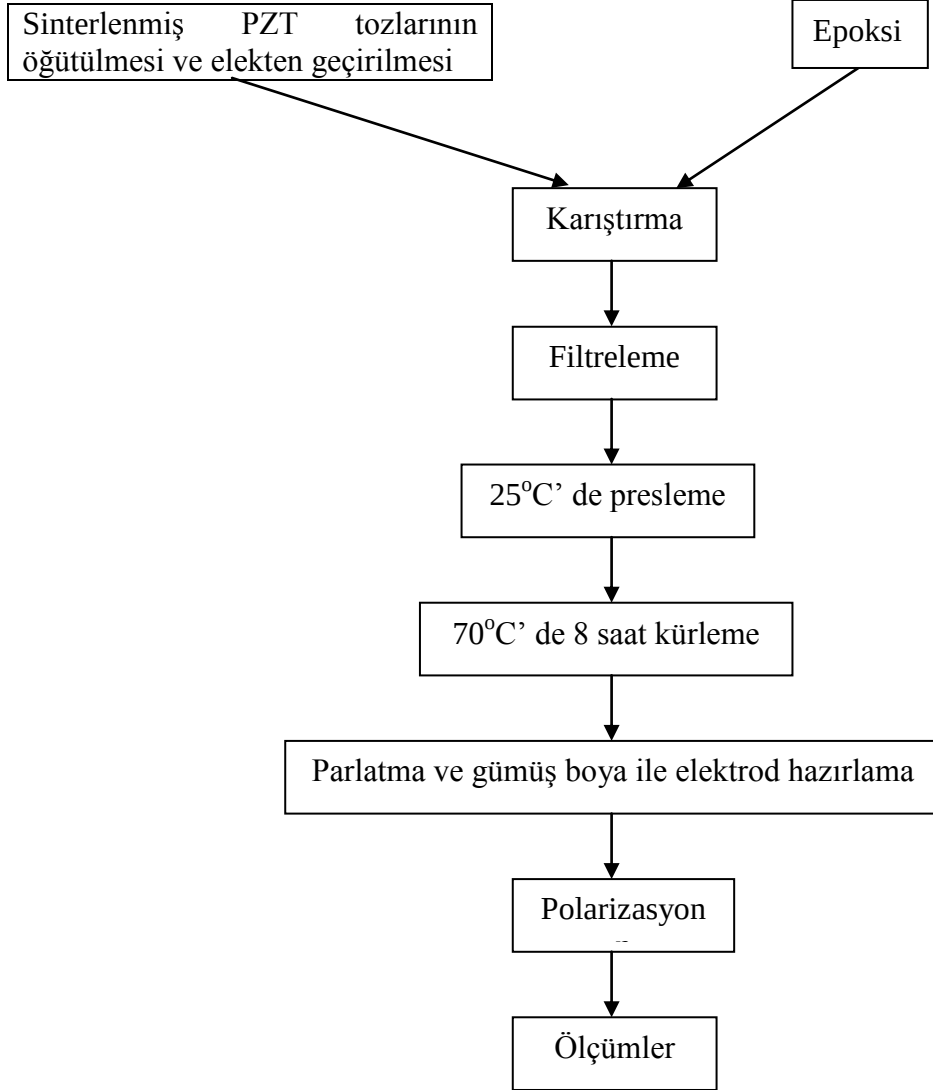
Şekil 5.3 : PZT tozunun hazırlanması: (a) Sinterlemeden çıkan tozlar (b) Tozların havanda dövülmesi (c) Tozların elekten geçirilmesi

5.3 Numunelerin Hazırlanması

Şekil 5.4' de numunelerin hazırlanma kademeleri ve deneylerin genel olarak ilerleme basamakları görülmektedir. Ön hazırlık aşamasında sinterlenip, istenilen boyutlarda öğütülen PZT tozundan 5 gram tartılmıştır. Bu tartım işleminde ve diğer hassas tartım işlemlerinde 0,001 gram hassasiyete sahip Precisa XB 220 A model hassas terazi kullanılmıştır. Bu tozlar 200 ml' lik beherin içerisinde bulunan çizelge 4.2' de karışım oranları verilen 20 gramlık Spurrs epoksinin içerisine yavaşça ilave edilmiştir. Epoksinin tartım işlemleri darası alınmış şırınga yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Beher içerisindeki karışım 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi için santrifüj makinesi ve pervane mikser denenmiş olup daha sonra en uygun karıştırma işlemi için manyetik tablaya sahip karıştırıcı da karar kılınmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra beher içerisinde bulunan karışım yavaşça şekil 5.5' de görülen vakum kaynağına bağlı filtreleme aparatına alınarak fazla epoksi giderilmiş ve filtre kağıdının üzerinde epoksi yedirilmiş PZT tozları elde

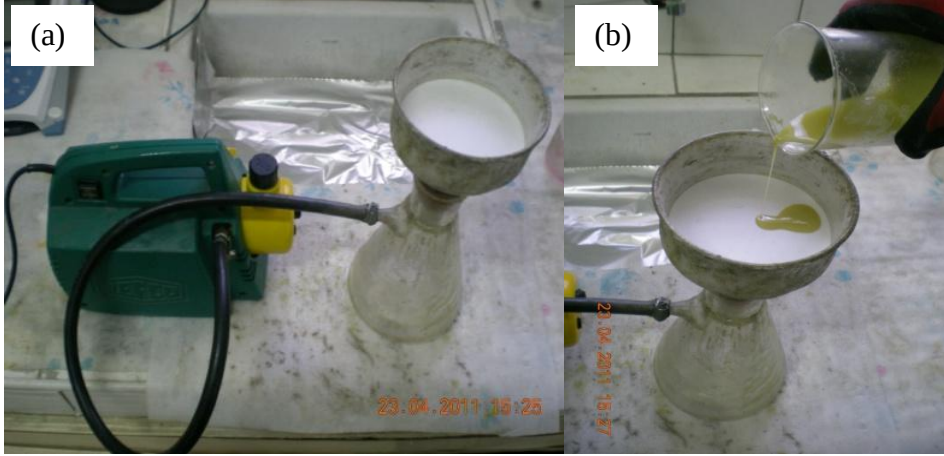
edilmiştir. Filtreleme işlemi 20 dakika boyunca uygulanmıştır. Daha sonra filtre üzerindeki karışım kazınarak bir kap içerisine alınmıştır.

Şekil 5.4 : Numunelerin hazırlanması ve deney basamakları



Çizelge 5.2 : Spurrs epoksi reçine karışım oranları

Bileşen	Ağırlık (gr.)
Vinyl cyclohexene dioxide	5
Diglycidyl ether of polypropylene glycol	2
Noneyl succinic anhydride	13
Dimethy amino ethanol	0,2



Şekil 5.5 : Filtreleme sistemi: (a) Genel görüntü (b) PZT/epoksi karışımının ilave edilmesi

Filtreleme işleminden sonra filtre kağıdı üzerinde kalan kısım kazınarak alınmıştır. Burada iki farklı çeşit numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Birincisi d_{33} katsayısını belirleyebilmek için üretilen dairesel numunelerdir. Tozların bir bölümü takım çeliğinden imal edilmiş 12 mm çapa sahip olan kalıpta preslenerek hap haline getirilmiştir. Elde edilen tozlardan, her bir pres uygulaması için kaç gram karışım kullanılacağını belirlemek için çeşitli denemeler yapılmıştır. Optimum ağırlığın 1,25 gram olduğuna karar verilmiştir. Bu ağırlık kullanılarak yapılan üretimden elde edilen numunenin kalınlığı 1,8 mm civarındadır. Daha sonra numuneler zımparalanarak 1 mm kalınlığa indirileceği için bu ağırlıktan daha fazla kullanılması israfa neden olurken, daha az ağırlıklarda pres altında kimi zaman istenilen yapışma sağlanamamış ve fireler meydana gelmiştir. İkinci çeşit numune olarak ise sinyal performansı testlerinde kullanılmak üzere takım çeliğinden imal edilmiş 30x30 mm boşluğa sahip kare kesitli kalıptan üretilen numunelerdir. Bu numunelerin üretimi için ise 7 gram toz kullanılmıştır. Kalıptan çıkartılan numune kurlenmediğinden dolayı çok yumuşaktır. Bunun için numuneyi kalıptan çıkartırken çok dikkatli olmak gerekmektedir.

Üretilen bu haplar ve kare kesitli numuneler 70°C’ de 8 saat boyunca bekletilerek kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kürleme işleminden sonra oda sıcaklığına soğutulan numunelerden kare kesitli olanlar Şekil 5.6 görülen Metkon Micracut 150 Precision Cutter cihazı ile istenilen boyutlarda kesilmiştir. Daha sonra haplar ve kare kesitli numuneler Şekil 5.7’ de görülen Metkon Forcipol 2V Grinder-Polisher marka cihaz ile 1 mm kalınlığa zımparalanmış ve parlatılmıştır.



Şekil 5.6 : K rleme sonrası numune kesimi



Şekil 5.7 : K rleme sonra zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapılması

Zımparala işlemi için 1000 numaralı zımpara kağıdı kullanılarak numunelerin 1 mm kalınlığa kadar incelmesi sağlanmış ve daha sonra numuneler parlatılmı tır. Yüzeylerin birbirlerine paralel olması, düzgün olması ve temiz olması daha sonraki kademeler için oldukça önemlidir.

Parlatılan numuneler daha sonra alkol iyice temizlenip 60 C'lik fırında 20 dakika boyunca kurutulmuştur.

5.4 Yüzey Elektrodunun Hazırlanması

Numunelerin daha iyi polarize olabilmesi için FAME firmasından temin edilen gümüş boya ile yüzey elektrodu oluşturulmuştur. Yüzey elektrotunun numunenin kenarlarına çok yakın yapılması durumunda polarizasyon sırasında kaçak akımların oluşmasıyla elektrik alanı kolayca bozulabilir olduğu fark edilmiştir. Bu durumun oluşmasına kenara yakın boyanın sızarak alt elektrot ile üst elektrot arasında iletkenliği sağlaması veya elektrotlar arasında akım atlaması neden olmaktadır. Alt elektrot ile üst elektrot arasında iletkenliğin sağlanması halinde numune üzerindeki elektrik alanın bozulmasının yanında, numuneler de kolayca hasara uğrayabilmektedir.



Şekil 5.8 : Maskeleme bantları ile numunenin hazırlanması

Şekil 5.8’ de görüldüğü gibi kenarlardan orantılı bir biçimde iç kısma doğru maskeleme bantları ile yüzey kapatılmıştır. Daha sonra Şekil 5.9’ da görüldüğü gibi ince uçlu fırça yardımıyla bantların iç kısmında kalan bölgeye gümüş iletken boya uygulanmıştır. 10 dakika kadar bekleyip iletkenlik kontrol edilmiştir. Daha sonra maskeleme ve gümüş boya sürülmesi işlemi numunenin diğer yüzü için tekrar edilmiştir.



Şekil 5.9 : Gümüş boyanın uygulanması

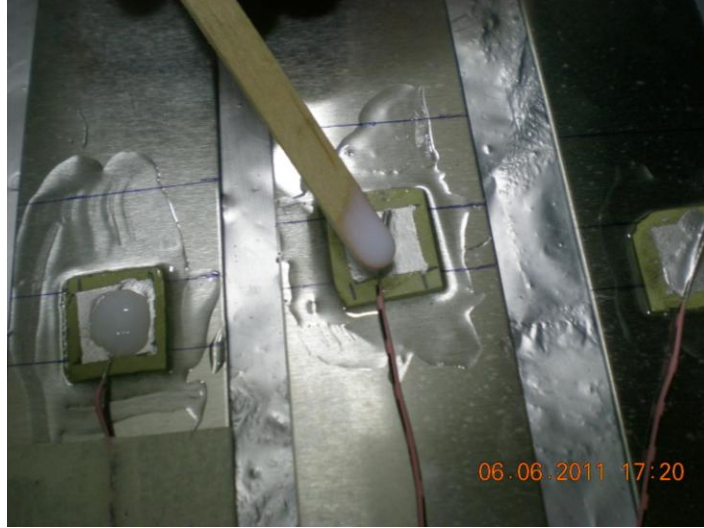
Sinyal performansı testleri için farklı kalınlıklarda alüminyum kullanılmıştır. Nihayetinde Al6061-T6 cinsi alüminyum ve 200 mm boy, 30 mm en ve 1 mm kalınlık ideal ölçüler olarak belirlenmiştir. Şekil 5.10’ da görüldüğü gibi numunenin yerleştirileceği kısım, alüminyum çubuğun test düzeneğinde duracağı kısım kalem ile işaretlenmiştir. 200 mm’ lik uzunluğun 45 mm’ si test düzeneğinin iç kısmında kalmaktadır. Yüzey elektrodu ile deney düzeneğine sabitlenen kısım arasında da 15 mm lik kısım vardır.



Şekil 5.10 : Alüminyum çubukların hazırlanması

Numunenin yerleştirileceği kısım temizlerken epoksi yapıştırıcı bu bölgeye uygulanmıştır. Daha sonra numune yerleştirilerek iyice bastırılarak numune ile alüminyum çubuk arasında boşluk bırakılmamaya özen gösterilmiştir. Kötü bir yapıştırma ve numune ile çubuk arasındaki boşluk sinyal performansı testlerinde

istenilen sonuçların elde edilememesine neden olabilmektedir. El ile yapılan sıkıştırılma işleminden sonra numunenin üzerinde ağırlık konularak 1 saat beklenmiştir. Daha sonra iletken kablo numune üzerine yerleştirilerek bir damla gümüş boya damlatılmıştır. Daha önceden olduğu gibi gümüş boya damlatılırken kenarlara akmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 5.11 : Vernik damlatılması

Bir süre gümüş boyanın kurumması beklenir ve üzerine şekil 5.11 de görüldüğü gibi bir damla vernik damlatılır. Aynı şekil de kablonun alüminyum çubuğa değmekte olan bir bölümüne de vernik damlatılır ve kablonun kopmayacak şekil sağlam olması sağlanır. Vernik damlatma işleminden sonra 12 saat boyunca, hazırlanan numuneler bekletilir. Kablonun hareketsiz bir biçimde durması sinyal performansı testlerinin güvenilirliği için önemlidir. Bunun için kabloların sağlamlığı sağlanmalıdır.

4.5 Polarizasyon

Polarizasyon işlemi, şekil 5.12 görülen GoodWill 815 yüksek voltaj üretici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon sırasında yüksek voltajlarla çalışıldığından güvenlik çok önemlidir. Buna yönelik olarak öncelikle cihaz topraklanmıştır ve şekil 5.13’ de görüldüğü gibi pleksiglastan bir polarizasyon odası kullanılmıştır. Artı kutup hazırlanan yüzeyde eksi kutup alt kısımda alüminyum sacda olacak şekilde polarizasyon sağlanmıştır.



Şekil 5.12 : GoodWill 815 yüksek voltaj üretici ile polarizasyon uygulaması



Şekil 5.13 : Pleksiglastan üretilen polarizasyon odası

Polarizasyon işleminde 1 mm kalınlıktaki numuneler için 1000 V, 2000 V ve 2500 V polarizasyon voltajları olarak belirlenmiştir. Her ne kadar 2500 V üzerine kimi zaman çıkılabilmiş olsa da çok fazla numune kaybı yaşandığı için bu değer üst sınır olarak belirlenmiştir. Şekil 5.14' de sinyal performansı testinde kullanılacak bir numunenin polarizasyonu görülmektedir. 300 saniyelik polarizasyon süresinde uygulanan her voltaj değeri için piezo etki görülebilmektedir. Daha sonra polarizasyon 600 saniyelik artışlarda 3300 saniye kadar devam ettirilmiştir.



Şekil 5.14 : Polarizasyon işlemi

5.6 d_{33} Ölçümü

d_{33} ölçümü için daha önceden yüzeyi gümüş boya ile hazırlanıp farklı voltajlarda ve sürelerde polarize edilen dairesel numuneler kullanılmıştır.

d_{33} ölçümleri, şekil 5.15' daki gibi APC'nin YE2730A Wide-Range d_{33} Tester cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, cihazın çeneleri arasına 250×10^{-3} N kuvvetle sıkıştırılmış numunelerin 1kHz'de titreştirilmeleriyle alınmıştır.



Şekil 5.15 : d_{33} ölçümünün gerçekleştirildiği düzenek

5.7 Sinyal Performansı Testleri

Polarize edilen numunelerin sinyal performansı testlerini gerçekleştirmek için kurulan düzenek şekil 5.16’da verilmiştir. Bu testte titreşimi sağlayan kuvvet ve numunenin alt yüzeye bağlanma noktası sabit tutularak farklı polarizasyon voltaj ve süreleri için testler gerçekleştirilmiştir.



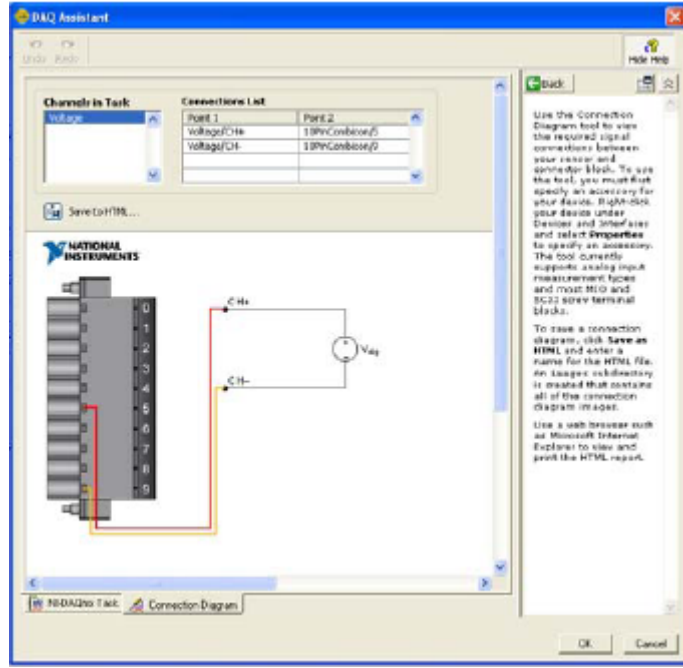
Şekil 5.16: Sinyal performansı testi için kurulan düzenek

Şekil 5.16’ da gösterilen düzeneden gelen sinyaller National Instrument’e ait USB 9221 DAQ cihazı, Measurement & Automation ve Signal Express yazımları yardımıyla toplanıp işlenmiştir.

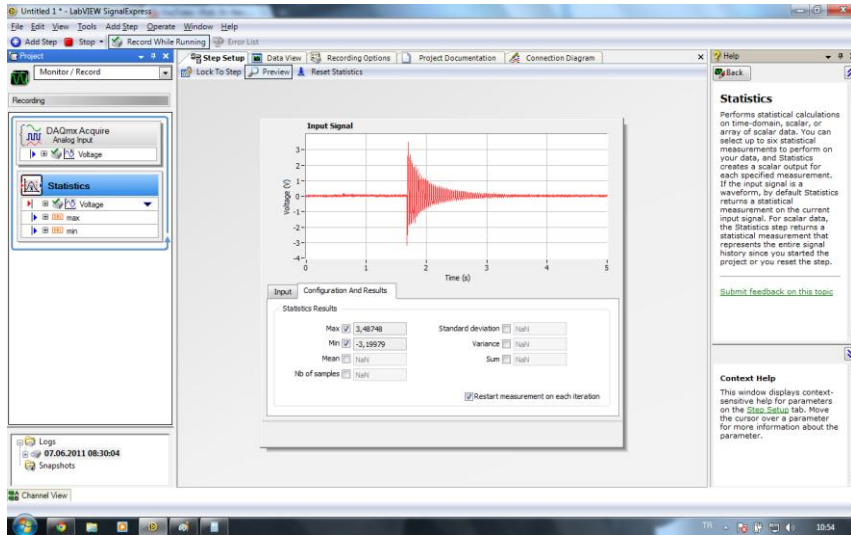


Şekil 5.17: DAQ cihazının düzeneğe bağlanması

Şekil 5.17’ de görüldüğü gibi düzeneğin üst elektrod kablosu DAQ cihazının 8 terminalinden herhangi birisine, alt elektrod olarak kullanılan alüminyum sac ise DAQ cihazının Com portuna bağlanmıştır. Şekil 5.18’de DAQ cihazı bağlantı şeması, şekil 5.19’ da ise Signal Express programının ara yüzü görülmektedir. Bu şekilde, uygulanan mekanik kuvvet sonucu oluşan titreşimle titreşen numunenin ürettiği elektrik sinyali ölçülmüştür.



Şekil 5.18: DAQ cihazı bağlantı şeması



Şekil 5.19: Signal Express programı ara yüzü

Signal Express programında testlerin gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki işlem basamakları uygulanır;

1. Üst menüdeki Add Step kısmına girilir.
2. Add Step menüsünün altında sırayla; Acquire Signals, DAQmx Acquire, Analog input, Voltage seçilir.
3. Üst menüdeki Data Wiew ekranında sağ tıklanır ve Add Signal ile bağlantı yapılan port işaretlenir.
4. Add Step' in yanında bulunan Run düğmesi ile program çalışır hale gelir.
5. Program durdurulmak istendiğinde Run kısmında belirmiş olan Stop düğmesine basılır.
6. Signal Express programı ile elde edilen grafiği Excel ile çizdirmek için Export to komutu kullanılır.

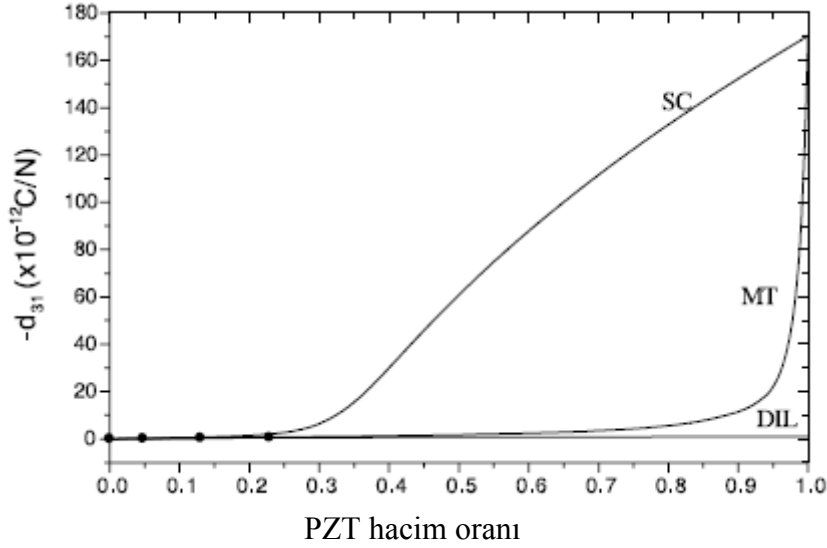
6. ANSYS İLE MODELLEME

6.1 ANSYS ile Model Koşulları

ANSYS ile serbest titreşim analizi yapabilmek için; Alüminyum çubuk “Solid” yapısının altındaki Solid45, piezoelektrik malzeme “Coupled field” ise Solid5 elemanı olarak seçilmiştir. Uygun koordinat sistemi verilerek piezoelektrik malzeme alüminyum çubuğa yerleştirilir. Bu iki malzeme “Merging Items” komutu ile birbirine yapıştırılmış olup analiz “Transient” olarak yapılmıştır. “DOF” komutu kullanılarak alüminyum çubuğun bir ucu sabitlenmektedir. Deneyel olarak gerçekleştirilen çalışmalarla benzer olması açısından, alüminyum çubuğun serbest ucundan 0,030 m bir yer değişimi uygulanmış ve daha sonra bırakılmıştır. 2,5 saniyelik bir period için bu titreşim serbest titreşim analizi incelenmiştir. Sönümleme katsayısı olarak da daha önceki çalışmalardan yola çıkılarak “mass matrix multiplier” ve “stiffness matrix multiplier” olarak her ikisi için de 0,0001 değeri kullanılmıştır.

6.2 Kompozit Malzemenin Piezoelektrik Özelliklerinin Belirlenmesi

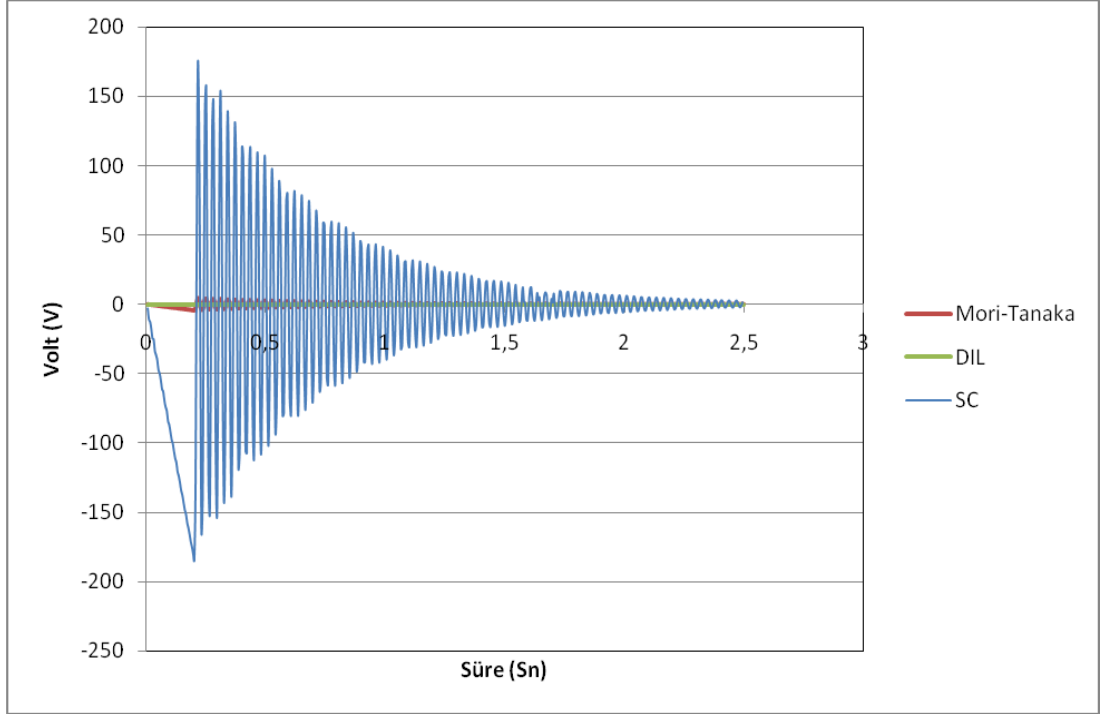
Daha önceden de belirtildiği üzere kompozit malzemenin piezoelektrik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar vardır. Burada malzemenin özelliklerini belirlerken önceki çalışmalardan elde edilen bir grafik kullanılacak ve değerler ona göre oranlanarak malzeme özellikleri yaklaşık olarak belirlenecektir. Şekil 6.1’deki grafik 2002 yılında N. Fakri, L. Azrar ve L. El Bakkali tarafından yayımlanan “Electroelastic behavior modeling of piezoelectric composite materials containing spatially oriented reinforcements” isimli makaleden alınmıştır.



Şekil 6.1: $-d_{31}$ -Hacim oranı ilişkisi (Fakri, 2002)

Burada yatay eksen PZT' nin hacim oranını, dikey eksen ise $-d_{31}$ katsayısını belirtmektedir. SC; self-consistent, MT; Mori-Tanaka, DIL; dilute yaklaşımlarını ifade etmiştir. Deneysel olarak 0,6 olarak hesaplanan PZT hacim oranından dikey olarak çıkılarak her üç yaklaşım için de eğriyi kestiği yerden $-d_{31}$ değerleri belirlenmiştir. %100 PZT' nin $-d_{31}$ değeri bilinmektedir. Bu grafikten elde edilen değer ile oranlararak, kompozit malzemenin piezoelektrik özellikleri de o şekilde belirlenmiştir.

Bu üç yaklaşım ile de elde edilen sonuçlar Şekil 6.2' de verilmiştir. Buna göre SC yaklaşımı ile elde edilen pik değeri 170 volt, MT ile elde edilen pik değeri 4 volt, DIL ile elde edilen pik değeri 0,2 volt civarında gerçekleşmiştir. Her üç yaklaşımda da serbest titreşim hareketi gerçekleştirilmiş olup, deneysel sonuçlar ile benzerlik göstermesi açısından 2,5 saniyelik period halinde bu işlem ölçülmüştür (Fakri, 2002).

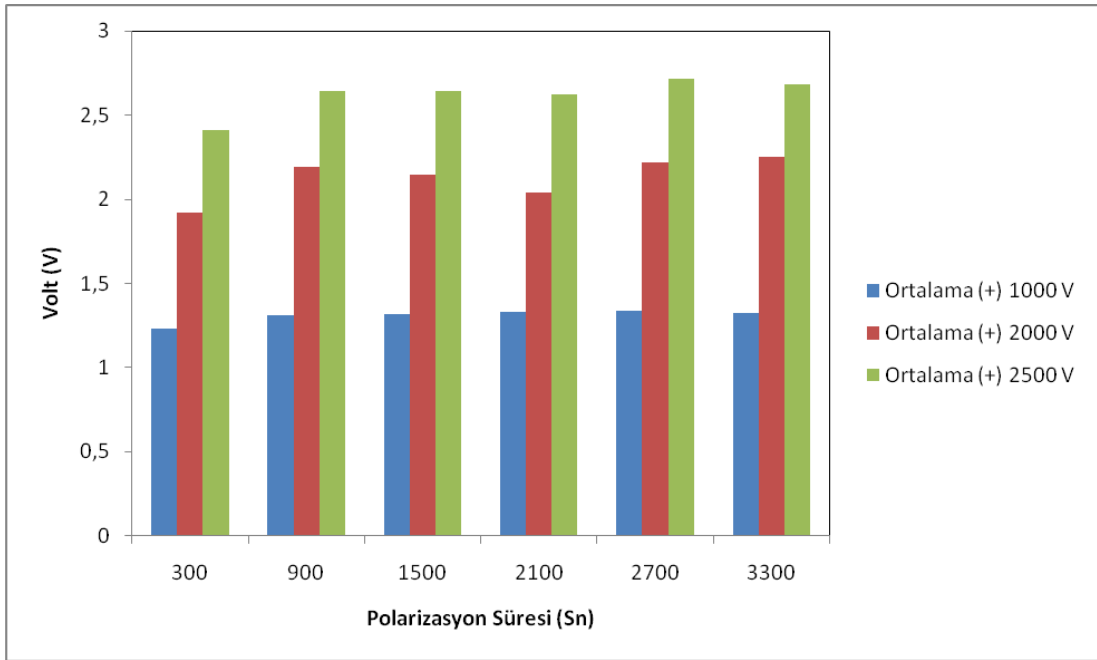


Şekil 6.2: ANSYS ile elde edilen sonuçlar

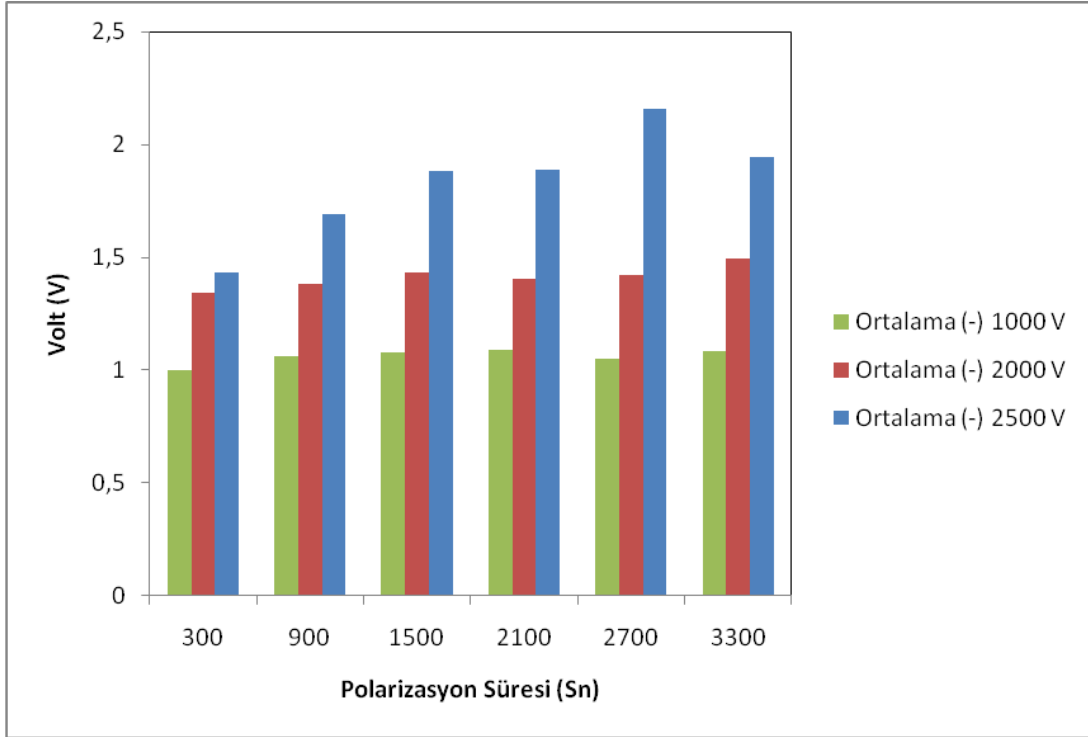
ANSYS ile modellemenin ayrıntılı anlatımı Ek A.1’de verilmiştir. ANSYS ile elde edilen sonuçlar ile sinyal performansı testi sonucu elde edilen veriler daha sonraki bölümde karşılaştırılmalı olarak incelenecektir.

7. SONUÇLAR

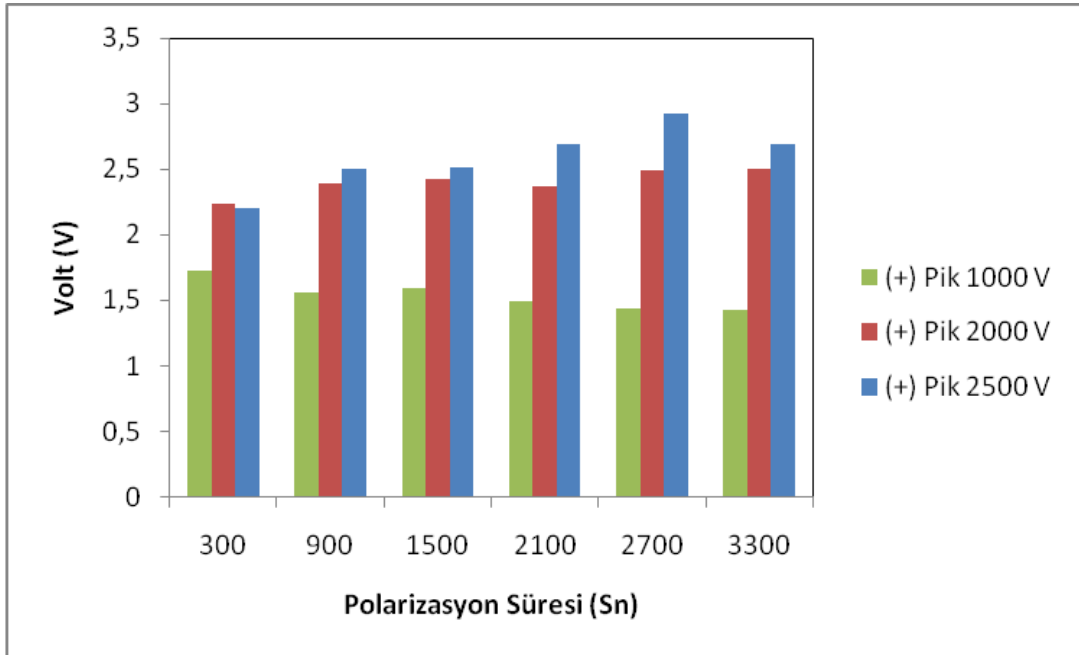
Üretilen numuneler 1000V, 2000V ve 2500V' luk polarizasyon kademelerinde polarize edilmiştir. Her bir polarizasyon voltajı için 3'er adet numune hazırlanmıştır. İlk polarizasyon süresi 300 sn olarak belirlenmiştir. Bu süre için üç polarizasyon voltajı için de piezoelektrik özellik kazandırılmıştır. Daha sonra eklemeli olarak 600 sn aralıklar ile polarizasyon süresi arttırılmıştır. 300-900-1500-2100-2700-3300 saniye süreler için her bir polarizasyondan sonra sinyal performansı testi gerçekleştirilmiştir. Her polarizasyon voltaj, süre ve numunesi için 10'ar adet ölçüm gerçekleştirilmiş olup, Şekil 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4 'ün çizilebilmesi için toplam 540 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir.



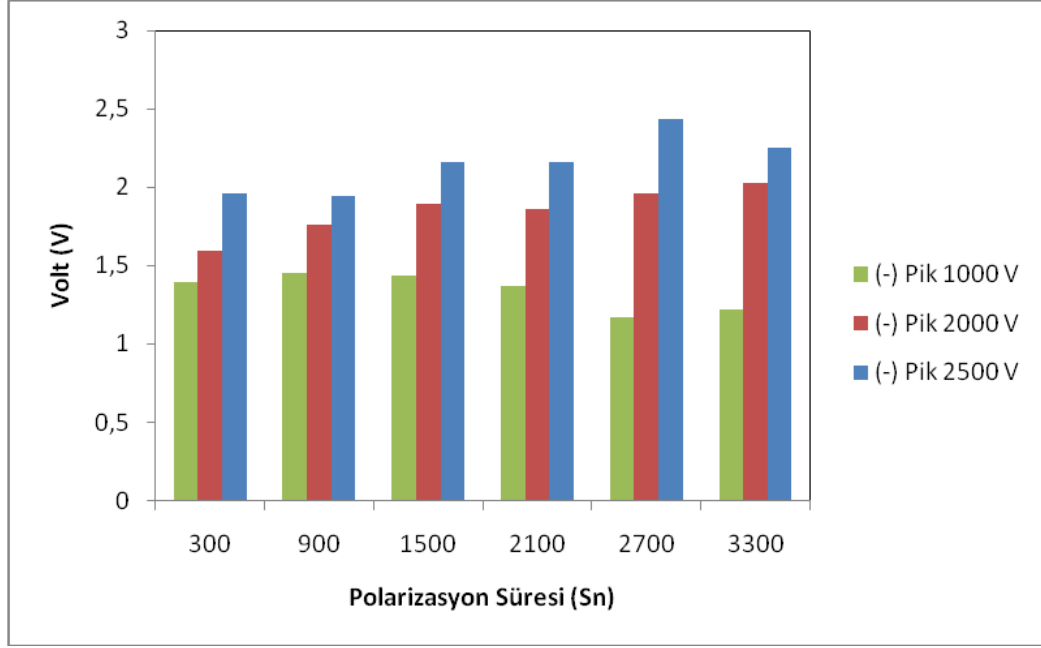
Şekil 7.1: (+) ortalamanın değişimi



Şekil 7.2: (-) ortalamasının değişimi



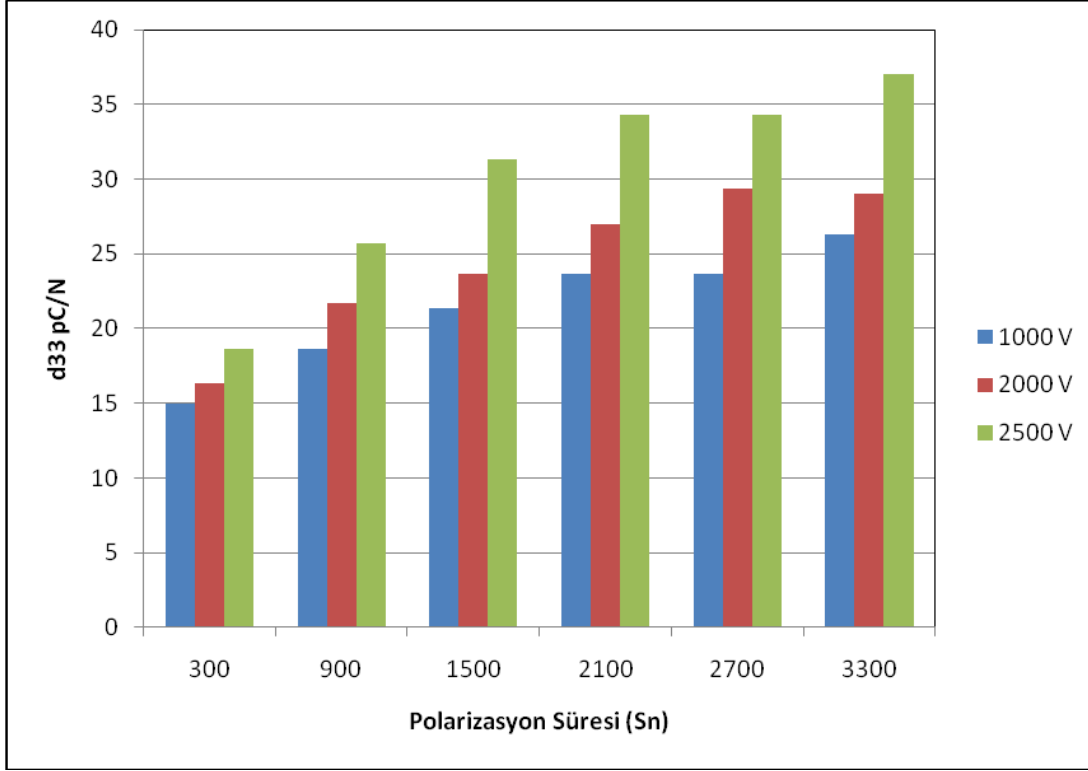
Şekil 7.3: (+) piklerin değişimi



Şekil 7.4: (-) piklerin değişimi

Literatürde buna benzer çalışmalarda piezoelektrik kompozit malzeme üzerine uygulanan voltaj değerleri kV/cm veya kV/mm değerleri ile ifade edilmektedir. Yapılan çalışmalarda 5kV/mm voltaj değeri çıkılabilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda numunelerimizi polarize ederken en çok 2.5kV/mm'ye çıkılabilmektedir. Üretilen kompozit malzeme içerisindeki boşluklar çekilen voltaj değerinin düşmesine neden olabilmektedir.

Artan polarizasyon voltajı ile sinyal performansı sonucu elde edilen ortalama ve pikler artmaktadır. Bu numunenin daha iyi kutuplandığında alınacak piezoelektrik özelliğin daha iyi olacağını göstermektedir. Bununla beraber zaman içerisinde elde edilen ortalama ve pikler doyuma ulaşmıştır. Yani polarizasyon süresinin daha fazla artırılması piezoelektrik performansı bir noktadan sonra arttırmamaktadır.



Şekil 7.5: d_{33} ölçüm sonuçları

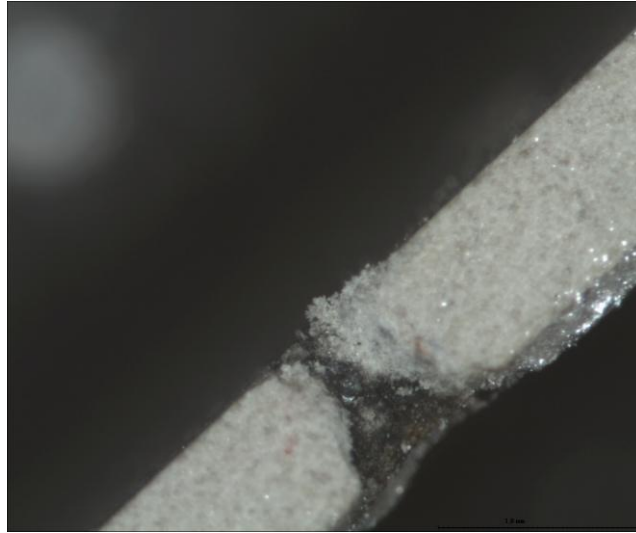
d_{33} Ölçüm sonuçları Şekil 7.5’de verilmiştir. Bu grafiğin oluşturulması için de her bir polarizasyon voltajı için 3’er adet numune hazırlanmıştır ve eklemeli polarizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarından da anlaşılabileceği üzere numunelerde polarizasyon süresi sabitken voltajın artmasıyla sabitlerin artması, sinyal performans testleriyle elde edilen sonuçlarla örtüşmekte ve neden daha yüksek polarizasyon voltajlarıyla daha yüksek elektrik sinyal çıktıları alındığını açıklamaktadır.

Şekil 7.6’ da elektrik alana dayanamayıp yanan bir numune görülmektedir. Numuneler tercihi olarak genelde yüzey elektrodunun kenarlarına yakın bir bölgede yanmaktadırlar.

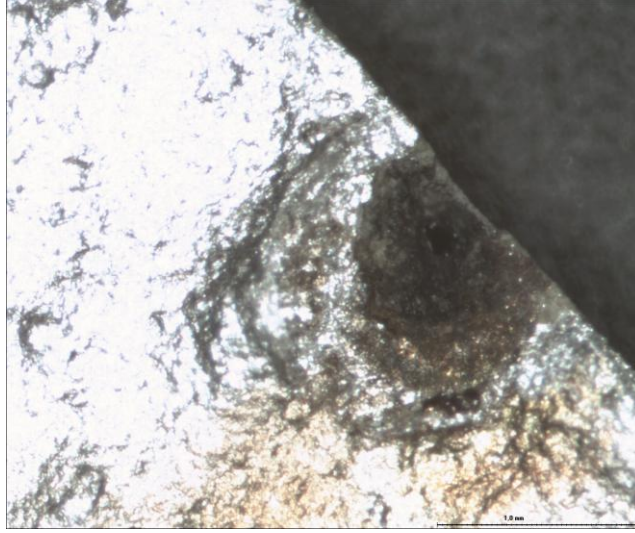


Şekil 7.6: Hasara uğrayan numune

Şekil 7.7 ve 7.8’de hasara uğrayan bir numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü görülmektedir. Numunenin hasara yakın kenarı zımparalanarak yanan bölgeden kesit görüntüsü alınmaya çalışılmıştır. Hasar, malzeme içerisindeki boşluklardan yol bulan elektrik akımının kısa devre yapması sonucu meydana gelmektedir.



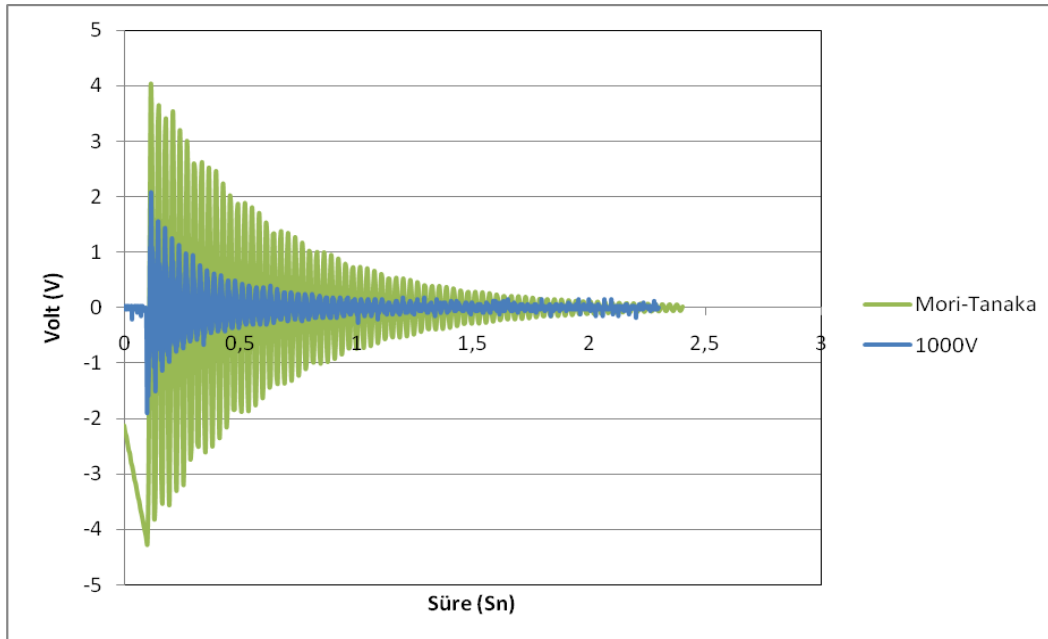
Şekil 7.7: Hasara uğrayan numunenin optik mikroskop altındaki kesit görüntüsü



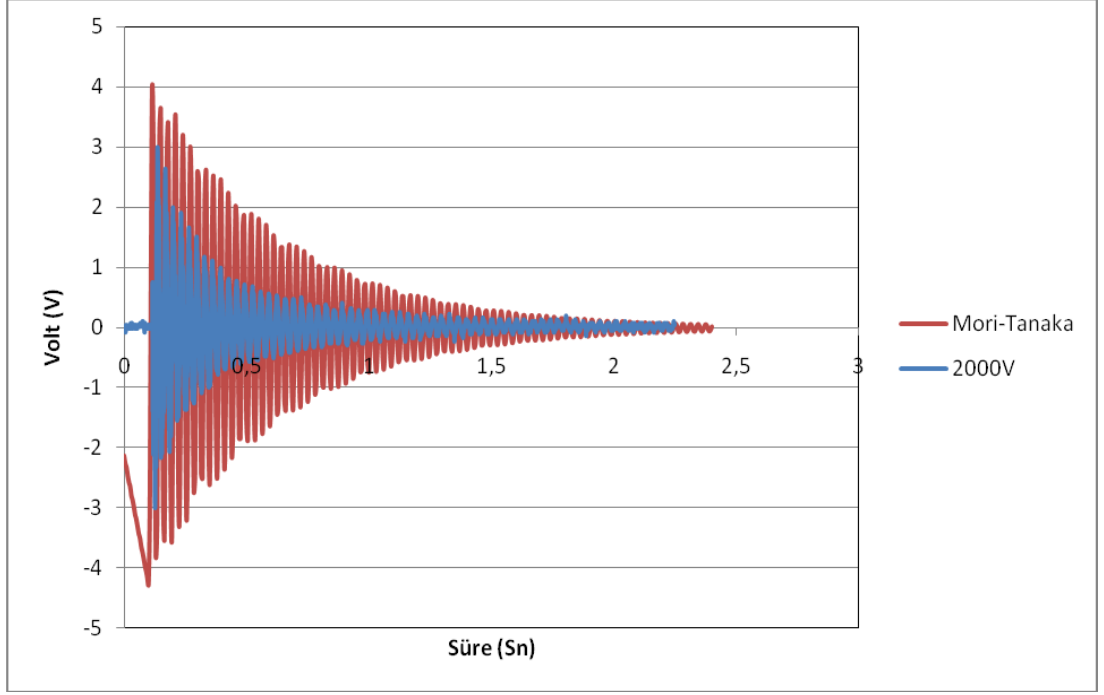
Şekil 7.8: Hasara uğrayan numunenin optik mikroskop üstten görüntüsü

Literatürdeki kimi makalelerde seramik ve polimer fazının yanı sıra grafit ilavesi ile boşluk miktarının azaltılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. Osama J. Aldrahiem, A. Baz ve Turki S. Al-Saud tarafından 2007 yılında yayımlanan “Hybrid Composite with Shunted Piezoelectric Particles for Vibration Damping” isimli makaleden yola çıkılarak 4 farklı kompozisyonda 0,3-0,5-1-2,5 gram grafit tozu PZT ile epoksinin karıştırılması esnasında ilave edilip, kalan deney prosedürü uygulanmıştır. Ancak bu 4 farklı durum için de numunelerin polarize edilebilmesi mümkün olmamıştır.

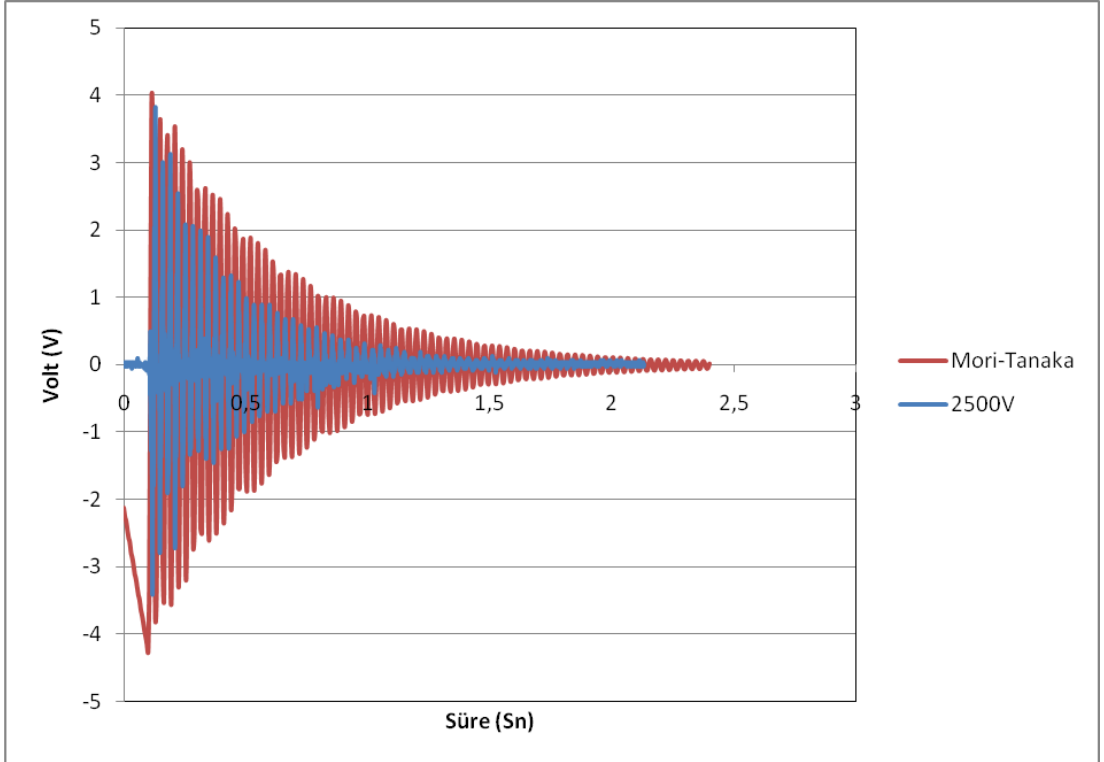
Yapılan deneysel çalışmalar ile ANSYS ile yapılan modellemelerin karşılaştırılması Şekil 7.9, 7.10 ve 7.11’ de verilmiştir.



Şekil 7.9: Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (1000V)



Şekil 7.10: Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (2000V)



Şekil 7.11: Deneysel çalışmalar ile ANSYS karşılaştırılması (2500V)

Kompozit malzemenin piezoelektrik özellikleri belirlemede kullanılan Mori-Tanaka yaklaşımı deneysel sonuçlara en yakın değerleri vermektedir. Polarizasyon voltajı arttıkça ANSYS ile elde edilen grafiğe daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. Deney

şartlarının %100 ideal olmamasından dolayı ANSYS ile deneysel olarak elde edilen pikler arasında yer yer orantısızlıklar mevcuttur.

8. DEĞERLENDİME VE ÖNERİLER

1. Bu çalışma sonucu, hedeflenen PZT/Epoksi piezoelektrik kompozit malzeme geliştirilmiştir.
2. Numune ile alt yüzeyin yeterince yapışmaması, Alüminyum çubuğun eğilmesi sırasında numunenin açık uca bakan kısmını çubukla beraber hareket etmemesi, Mori-Tanaka ile birebir yaklaşım yapılamamasından dolayı ANSYS ile deney sonuçları arasında farklılıklar meydana gelmiştir.
3. Numunelerin %100 PZT içermiyor olması ve içerisindeki boşluklar kısa devreye ya da piezoelektrik özelliklerin düşebilmesine sebebiyet vermektedir. Hasara uğrayan numune miktarını azaltmak ve daha yüksek polarizasyon voltajı değerlerine çıkabilmek için vakum altında presleme uygulanabilir.
4. Üretilen numuneler sabit yük altında preslenmiştir. Yükün artırılmasının malzeme içerisindeki boşluklarla ilişkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aldraihem, O.J., Baz, A., Al-Saud, T.S.,** 2007: Hybrid Composites with Shunted Piezoelectric Particles for Vibration Damping, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 14:413-426.
- Alexander, P. W.,** 2006. Dual electro/piezo property functionallay graded piezoceramics, *PhD Thesis*, Mechanical Engineering in the University Of Michigan, Michigan.
- ANSYS –** 1999. Help documentation, Boston.
- APC International Ltd. Product Manual,** 2006. Piezoelectric Ceramic: Principles And Applications, Pennsylvania, USA.
- Bottom, V.E.,** 1981. A History of the quartz crystal industry in the USA, *Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium*, Philadelphia,USA, May 27-29.
- Chen, Y.,** 1999. Synthesis, characterization and transduser applications of piezoelectric ceramic/polymer composite materials, *PhD Thesis*, The Pennsylvania State University The Graduate School Intercollege Graduate Program in Materials, Pennsylvania.
- Ergun, C., Yılmaz, Ş., Özdemir, E., Gül, Ö., Kalenderli, Ö.,** 2006. Piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları, *Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı*, Pamukkale, Türkiye, Nisan 19-21.
- Fakri, U., Azrar, L., El Bakkali, L.,** 2002: Electroelastic Behaviour Modeling of Piezoelectric Composite Materials Containing Spatially Oriented Reinforcement, *International Journal of Solids and Structures*, 40: 361-384.
- Günaydın, U.,** 2007. Sensörlerde kullanılabilecek polimer/PZT kompozitlerin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Hale, J. M.,** 2004. Piezoelectric paint: thick-film sensors for structural monitoring of shock and vibration, *7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, July 19-22, Manchester, United Kingdom.
- Imaoka, S.,** 1999. “Ansys Tip of the Week: Conversion of Piezoelectric Material Data”, CSI ANSYS Tips, California.
- Leo D.J.,** 2007. Engineering Analysis of Smart Material Systems, Wiley, New York.
- Onaran, K.,** 2003. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Schwartz, M.,** 2002. Encyclopedia of Smart Materials, Wiley, New York.
- Srinivasan, A.V., Mcfarland D.M.,** 2001. Smart Structures, Analysis and Design, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tressler, J. F., Alkoy, S., Newham, R. E.,** 1998. Piezoelectric sensors and sensor materials, *Journal of Electroceramics*, 2:4, 277-272.

Türker, Ö., 2009. PZT/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı giriş tasarımı ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Url-1 <[http:// www.morganelectroceramics.com](http://www.morganelectroceramics.com) >, alındığı tarih 20.02.2011.

Url-2 <[http:// www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com) >, alındığı tarih 22.02.2011.

Url-3 <[http:// www.piezo-kinetics.com](http://www.piezo-kinetics.com) >, alındığı tarih 23.02.2011.

Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Yılmaz, A.O., Celep, O., Vieil, M., 2004. Piezoelektrik teknoloji ve piezoelektrik malzeme olarak turmalin, 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 13-14 Mayıs, İzmir.

EKLER

EK A.1 : ANSYS programı ile modelleme kademeleri

EK A.1

ANSYS programı ile modelleme kademeleri

- 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 “Preprocessor – Modelling – Create – Volumes – Block – By Dimensions” seçilerek çubugun boyutları metre cinsinden girilir (0,15x0,03x0,001m.) ve bir hacim oluşturulur. Piezoelektrik malzemeyi modellemek için aynı yol izlenir ve boyutlar metre cinsinden girilerek hacim oluşturulur (0,010x0,010x0,001m.) Çubuğu programa alüminyum malzeme olarak tanıtabilmek için ise “Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – Picked Volumes” seçilerek alüminyum çubuk seçilir ve “Element type number” olarak SOLID45, “Material number” olarak alüminyum için girilen malzeme özelliklerinin numarası (1) seçilir. Aynı işlem piezoelektrik malzeme için de yapılır ve SOLID5 ve malzeme özelliği numarası olarak (2) seçilir.
- 5.“Preprocessor – Meshing – Size Controls – ManualSize – Global – Size” kısmına mesh elemanının boyutu metre cinsinden girilir.
- 6.Yapılan ayarları hacim şeklinde tanınan çubuga aktarıp onu alüminyum malzemeye dönüştürmek için ise, son olarak “Preprocessor – Meshing – Mesh – Volumes – Mapped – 4 to 6 sided” seçilerek açılan pencerede “Pick All” ile çubuk ve piezoelektrik malzeme mesh edilir.
- 7.Bundan sonra yapılması gereken alüminyum çubuğun üzerine piezoelektrik malzemeyi yapıştırmaktır. Bunu yapabilmek için, “Numbering Ctrl-Merge Items” seçilerek çıkan ekranda “ok” tuşuna basarak iki farklı malzeme birbirine yapıştırılmış olur.

8.Sistemi modellemek için son yapılması gereken işlem olarak, “Preprocessor-Coupling / Ceqn – Couple DOFs” seçilerek, piezoelektrik malzemenin üst ve alt alanındaki nodlar, her alan değişik bir “Set reference number” alacak şekilde “VOLT” serbestlik derecesinde birleştirilir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mustafa ONAY

Doğum Yeri ve Tarihi: Kırıkkale - 1986

Lisans - Üniversite: Metalurji ve Malzeme Müh. - Yıldız Teknik Üniversitesi