İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİEZOELEKTRİK KOMPOZİTLERİN ELEKTROMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan AKSÜT

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

MART 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİEZOELEKTRİK KOMPOZİTLERİN ELEKTROMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan AKSÜT
(503161323)

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

MART 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503161323 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan AKSÜT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "PİEZOELEKTRİK KOMPOZİTLERİN ELEKTROMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erkan Günpınar**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Semih Sezer
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 11 Mart 2020
Savunma Tarihi : 12 Mart 2020

ÖNSÖZ

Tez çalışması sürecinde benden hiçbir yardımı ve desteği esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Celaletdin ERGUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca her koşulda bana yardımcı olmuş aileme, özellikle sevgili anne ve babama da teşekkürü borç bilirim.

Mart 2020

Hasan Aksüt
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Piezoelektrik Uygulama Alanları 2
1.2 Çalışmanın Amacı 4
2. PİEZOELEKTRİKLİK **5**
2.1 Piezoelektrik Özellik 5
2.2 Piezoelektrik Malzemeler 7
2.2.1 Doğal piezoelektrikler 8
2.2.2 Piezoelektrik seramik malzemeler 8
2.2.2.1 Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler 8
2.2.2.2 Piezoelektrik PZT 9
2.2.2.3 Yaygın kullanılan piezoelektrik seramikler ve özellikleri 13
2.2.3 Polimer piezoelektrikler 14
2.3 Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları 15
2.3.1 Aktüatörler 15
2.3.2 Sensörler 15
2.3.3 Transdüserler 16
2.3.4 Üreteçler 16
3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER VE KOMPOZİT BOYA **17**
3.1 Giriş 17
3.2 Piezoelektrik Kompozit Sensörler 17
3.2.1 Kompozit doğrultuları 18
3.2.2 Piezoelektrik boya 18
4. ANALİTİK ÇALIŞMALAR **21**
4.1 Piezoelektrik Yapısal Denklemleri 21
4.1.1 Voigt gösterimi 22
4.2 Piezoelektrik Takviye Problemi 23
4.3 0-3 Piezoelektrik Kompozitler İçin Eshelby Tensörünün Bulunması 23
4.4 Elektromekanik Özelliklerin Tahmininde Mikromekanik Yaklaşımlar 31
4.4.1 Mori-Tanaka yaklaşımı 31
4.4.2 Kendi içinde tutarlı yaklaşım 31
4.4.3 Odegard yaklaşımı 31
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ **33**

5.1 Birim Kafes Yapılar 33
5.1.1 Basit kübik yapı 33
5.1.2 Hacim merkezli kübik yapı 34
5.1.3 Yüzey merkezli kübik yapı 35
5.1.4 Hegzagonal sıkı paket yapı 35
5.2 Sonlu Elemanlar Modeli 36
5.2.1 Sınır koşulları 36
6. SAYISAL MODELLEME 39
6.1 ANSYS Üzerinde Modelleme Aşamaları 39
6.2 Malzeme Girişi İçin Gerekli Kodlar 40
7. MALZEME VE YÖNTEM 41
7.1 Deney Adımları 41
7.1.1 Üretim 41
7.1.2 Kutuplama 41
7.1.3 Ölçüm 41
7.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 42
8. VERİLER VE TARTIŞMA 45
8.1 Analitik Çözümler 45
8.1.1 İki bileşenli çözüm 45
8.1.2 Boşluklu çözüm 45
8.2 Sonlu Eleman Analizi 50
8.3 Deney Düzeneği Modellemesi 50
8.4 Tartışma 54
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 55
KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 61

KISALTMALAR

AIN **:** Alüminyum nitrit

APC **:** American Piezo Ceramics International, Ltd.

BK **:** Basit kübik

HMK **:** Hacim merkezli kübik

HSP **:** Hekzagonal sıkı paket

PVDF **:** $-(C_2H_2F_2)_n-$

PZNT **:** $(1-x)Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3\text{-}xPbTiO_3$

PZT **:** Kurşun zirkonat titanat

YMK **:** Yüzey merkezli kübik

SEMBOLLER

T_c	: Küri sıcaklığı
σ_{ij}	: Gerilme tensörü
ε_{mn}	: Birim şekil değişimi tensörü
E_n	: Elektrik alan vektörü
D_i	: Elektrik yer değiştirme vektörü
C_{ijmn}	: Rijitlik tensörü
e_{nij}	: Piezoelektrik tensör
κ_{in}	: Geçirgenlik tensörü
γ_{ij}	: Kayma birim şekil değişimi
A_r	: Derişim tensörü
S_{MnAb}	: Eshelby tensörü
c_r	: Hacim oranı
I	: Birim matris
K^T	: Bağıl geçirgenlik
k_{ij}	: Elektromekanik çift katsayısı
d_{ij}	: Piezoelektrik yük sabiti
d_{ij}	: Piezoelektrik gerilim sabiti
ν_{ij}	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
s_{ij}	: Uyum tensörü
k^T_{ij}	: Bağıl geçirgenlik tensörü
u	: 1-yönünde birim şekil değişimi
v	: 2-yönünde birim şekil değişimi
w	: 3-yönünde birim şekil değişimi
φ	: Voltaj
Y_{ij}	: Elastiklik modülü
G_{ij}	: Kesme modülü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Piezoelektrik yenilik ve uygulama alanları. 3
Çizelge 2.1 : Sert ve yumuşak piezo seramiklerin özellikleri. 9
Çizelge 2.2 : PZT seramik çeşitlerinin özellikleri. 12
Çizelge 2.3 : Navy Type PZT türleri. 12
Çizelge 2.4 : Diğer PZT seramik çeşitlerinin özellikleri. 12
Çizelge 2.5 : PZT'lerde sıklıkla kullanılan katkı türleri. 13
Çizelge 5.1 : Kompozitin özelliklerini bulmak için uygulanacak sınır koşulları. 37
Çizelge 7.1 : APC 856 malzeme özellikleri. 42
Çizelge 7.2 : Akrilik malzeme özellikleri. 42
Çizelge 7.3 : Piezoelektrik modül değerleri. 44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Doğal piezoelektrik kristaller. 1
Şekil 2.1 : Piezoelektrik bir seramiğin kutuplanması. 6
Şekil 2.2 : Elektrik alanın kutuplamaya ve uzama/kısalma miktarına olan etkisi. 6
Şekil 2.3 : Piezoelektrik davranış; (a) kutuplama yönü, (b) üreteç (basma), (c) üreteç (çekme), (d) motor (çekme), (e) motor (basma). 7
Şekil 2.4 : PZT yapısı. 10
Şekil 2.5 : PVDF β yapısı. 14
Şekil 2.6 : Aktüatör çeşitleri. 15
Şekil 2.7 : Sensör çeşitleri. 16
Şekil 3.1 : Faz konumları. 18
Şekil 4.1 : Eshelby'nin takviye problemi. 23
Şekil 5.1 : Hegzagonal sıkı paket için parametreler. 33
Şekil 5.2 : Basit kübik yapı. 34
Şekil 5.3 : Hacim merkezli kübik yapı. 34
Şekil 5.4 : Yüzey merkezli kübik yapı. 35
Şekil 5.5 : Hegzagonal sıkı paket yapı. 35
Şekil 5.6 : Hegzagonal yapılı kompozitin temsili hacim elemanı. 36
Şekil 6.1 : Piezoelektrik sensör deney düzeğinin modeli. 39
Şekil 7.1 : Deney düzeneği; (a) genel bakış, (b) yer değiştirme uygulayan kol. 42
Şekil 8.1 : Kompozitin elastiklik modüllerinin katkı oranı ile değişimi. 46
Şekil 8.2 : Kompozitin kesme modüllerinin katkı oranı ile değişimi. 46
Şekil 8.3 : Kompozitin piezoelektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi. 47
Şekil 8.4 : Kompozitin dielektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi. 47
Şekil 8.5 : Boşluklu kompozitin elastiklik modüllerinin katkı oranı ile değişimi. 48
Şekil 8.6 : Boşluklu kompozitin kesme modüllerinin katkı oranı ile değişimi. 48
Şekil 8.7 : Boşluklu kompozitin piezoelektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi. 49
Şekil 8.8 : Boşluklu kompozitin dielektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi. 49
Şekil 8.9 : HMK analizi; (a) gerilme, (b) elektrik potansiyel. 50
Şekil 8.10 : YMK analizi; (a) gerilme, (b) elektrik potansiyel. 50
Şekil 8.11 : Model sonucu. 51
Şekil 8.12 : %18 boşluklu model. 51
Şekil 8.13 : Piezo özellikleri indirgenmiş model. 52
Şekil 8.14 : %18 boşluklu piezo özellikleri indirgenmiş model. 52
Şekil 8.15 : 2.5 mm mesh ile model sonucu. 53
Şekil 8.16 : Deneyden alınan sinyal sonuçları. 53

PİEZOELEKTRİK KOMPOZİTLERİN ELEKTROMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

ÖZET

Sürülebilir ya da püskürtülebilir piezoelektrik kompozit boyalar sensör uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu boyaların karakteristik özelliklerinin geliştirilebilmesi için kompozitin elektromekanik özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç duyulur.

Piezoelektriklik ve piezoelektrik malzeme çeşitleri incelenmiştir. Bunlarla yapılabilecek polimer matrisli kompozitlerin doğrultuları ve özellikleri hakkında literatür araştırması yapılmıştır.

Piezoelektrik kompozitlerin yapısal denklemleri verilmiştir, bunlar ayrıca kolaylık amaçlı Voigt gösteriminde de yazılmıştır. Eshelby'nin elastik takviye probleminin piezoeletrik durumda dönüşeceği şekil gösterilmiştir.

Kompozitlerin yapısal piezoelektrik modüllerinin belirlenebilmesi için ihtiyaç duyulan Eshelby tensörleri kapalı formda küresel takviye için elde edilmiştir. Mori-Tanaka, kendi içinde tutarlı yaklaşım ve Odegard yaklaşımıyla mikromekanik modeller sayesinde elektromekanik modüller analitik bir biçimde bulunmuştur.

Bu kompozitlerin seramik ve polimer dışında ayrıca boşluk da bulundurabileceği göz önüne alınarak analitik hesaplamalar her yaklaşımda 3 bileşenli bir kompozit için genişletilip ayrıca uygulanmıştır.

Basit kübik, hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik ve hegzagonal sıkı paket birim kafes yapılarının parametrik tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu temsili hacim elemanları üzerinden sonlu elemanlar modeliyle uygun sınır koşulları yapısal denklemler vasıtasıyla bulunmuştur. Alınan sonuçlar üzerinden hesaplanan hacim ortalamaları kullanılarak kompozitin genel elektromekanik modülü elde edilmiştir.

Bir piezoelektrik kompozit sensör deney düzeneğinin sayısal modellemesi yapılmıştır. Farklı mesh büyüklüklerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu modele malzeme özellikleri olarak analitik Mori-Tanaka yöntemiyle hesaplanan elektromekanik modülün özellikleri girilerek voltaj çıktısı elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemenin özelliklerinin sabit gerilme altında ölçülerek verilmiş değerlerinin sabit birim şekil değişimi altında olacak şekle dönüşümleri yapılmıştır. Bu değerlerden seramik modülü bulunmuştur. Polimer malzemenin özelliklerinden modülü bulunmuştur.

Mikromekanik modellerin analizlerinden elde edilmiş sonuçlar elastiklik modülü, kesme modülü, piezoelektrik katsayılar ve dielektrik katsayılar cinsinden değişen seramik hacim yüzdelerine bağlı olarak grafiklere çizdirilmiştir. YMK birim kafes yapısıyla elde edilen sonlu eleman yönteminden alınan sonuçlar karşılaştırma amacıyla çizilen grafiklere eklenmiştir.

Mikromekanik modellerin grafikleri boşluklu durum için de aynı şekilde çizdirilmiştir.

Deney düzeneği modellemesinin sonuçları ideal, boşluklu, piezo indirgenmiş ve hem piezo indirgenmiş hem boşluklu olmak üzere grafiklere aktarılmıştır. Ayrıca farklı bir mesh boyutunda ideal durum için grafik eklenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC COMPOSITES

SUMMARY

Various types of piezoelectric composite paints are used in sensor applications. To improve the characteristic properties of these kinds of paints, one needs to determine electromechanical properties of the composite.

History of developments of piezoelectric materials were examined. Various usages and innovations involving piezoelectricity were shown.

Piezoelectricity is the relation between the mechanical and electrical reactions of a crystal structure. Various piezoelectric materials exist, such as natural, ferroelectric and synthetic crystals. Generally, synthetic PZT is used in applications.

A comparison made between soft and hard piezo ceramics were given. It consisted of characteristic properties involving piezoelectric constants, permittivity, dielectric constants, dielectric losses, electromechanical coupling factor, electromechanical resistance, mechanical quality factor and polarization.

Four different applications of piezoelectric materials were exemplified. Those were actuators, sensors, transducers and generators.

Connection types of composites were shown. 0-3 piezo ceramic/polymer piezoelectric paints and their history of developments were summarized.

Constitutive equations of piezoelectric composites were defined. Voigt notation is explained and constitutive equations were expressed according to that notation.

Eshelby's inclusion problem was described. Piezoelectric equivalent of Eshelby tensors were obtained for a spherical inclusion.

Micromechanics models were employed to calculate the overall piezoelectic modulus of the composite. Concentration tensor is explained.

Mori-Tanaka method, self-consistent method and a method proposed by Odegard were then used to find the concentration tensor.

Calculations were made for a composite which consists of a piezoelectric ceramic and a polymer. After that concentration tensors were calculated again, this time for a composite with 3 components. The third component was assumed to be air to represent porosity which may be in the structure of the composite.

Representative volume elements were considered to carry out finite element analyses. Four different crystal unit cell structures were utilized as representative volume elements: simple cubic, body-centered cubic, face-centered cubic and hexagonal close packed.

These designs were made using parameters as lengths of the structure. By the way of fixing the diameter of the inclusion, different volume fractions were represented by different amounts of matrix material.

Maximum volume fractions for simple cubic RVE, body-centered cubic RVE, face-centered cubic RVE and hexagonal close packed RVE are 52.3, 68.0, 74.0 and 74.0 percent, respectively.

Appropriate boundary conditions to be applied to the surfaces of the RVE were obtained using constitutive equations.

Volumetric average values of stress, strain, electric displacement and electric field were acquired. Using these values, components of the overall moduli of the composite was found.

An experimental setup involving a sensor which is a piezoelectric composite layer on an aluminium plate was modelled in ANSYS. Element types were chosen to be SOLID5 for aluminium plate and SOLID45 for piezoelectric composite. Analytically calculated piezoelectric material properties obtained from Mori-Tanaka method were input to the model. Two different mesh sizes were considered. A displacement was applied to the end of the plate. Transient analysis was carried out. Output is attained as voltage values.

Manufacturing, polarization and measurement of a piezo paint were explained.

Properties of the piezoelectric ceramic (APC 856) to be used in this study was given as measurements under constant strain. These properties was transformed to the constant stress forms, for example compliance to stiffness. From there, piezoelectric modulus is found.

Piezoelectric modulus of the polymer was found from the elasticity modulus, Poisson's ratio and permittivity of acrylic.

Mori-Tanaka method showed closest agreement with the results of the finite element model for values of the elasticity modulus. Analytical models produced very high results for shear moduli compared to the finite element model.

All three piezoelectric constants were highly different for self-consistent compared to the other models over volume fractions of 20%. Mori-Tanaka method was closer to the finite element model in terms of e_{15} and Odegard was closer in terms of e_{31} and e_{33}.

Mori-Tanaka was closest to finite element model's dielectric constants in lower volume fractions while Odegard was closest in higher volume fractions.

In the case of a porosity of 18 percent, elastic properties were affected by approximately 40 percent for Mori-Tanaka and Odegard methods while piezoelectric properties were affected by around 70 percent. Dielectric properties generally decline by about 50 percent.

Modellings were made for the case of 80% APC 856/20% acrylic (by weight). This corresponds to about 39% volume fraction as is the case for the experiment examined in this study. The composite was polarized in a field of 2.5 kV/mm in the experiment.

As shown in some studies, 15 kV/mm is the saturation value of polarization for a piezo ceramic/polymer composite. If a polarization value of 2.5 kV/mm is applied, piezoelectric activity drops 10 fold approximately. In accordance with that, constants

concerning electromechanical values were adjusted when calculating the modulus of the composite. Also 18% porosity was considered.

These final material values were used in ANSYS model. Voltage output was in close agreement with the results of the experiment.

In order to get better piezoelectric response from the composite paint, higher polarization values and a better manufacturing process were recommended.

1. GİRİŞ

Piezoelektriklik kristal yapısı merkezi olarak asimetrik olan malzemelerin bir özelliğidir. Bu özellikteki malzemeler şekil değiştirildiğinde ya da titreştirildiğinde elektrik sinyali çıktısı verirler. Buna doğrudan etki adı verilir. Elektrik alana maruz bırakıldığında mekanik çıktı vermesi durumuna ise dolaylı etki adı verilir. Bu durum malzemenin uzayıp kısalması olarak gözlemlenir.

İlk olarak 1880 yılında Pierre Curie ve Paul-Jacques Curie kuvars, turmalin, kamış şekeri, sarı yakut ve roşel tuzu gibi görünüşleri Şekil 1.1'de verilmiş olan kristaller üzerinde yaptıkları çalışmalarda bu malzemelerin mekanik bir kuvvete maruz bırakıldıklarında kutuplaşma olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 1.1 : Doğal piezoelektrik kristaller [1-3].

19. yüzyılın sonundan başlamak üzere piezoelektriklik özelliklerin kullanılması yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Genellikle doğal kristallerle yapılan bu çalışmalar haberleşme ve su altı radar teknolojilerini geliştirme üzerinde yoğunlaşmıştı. Bu yenilikler telefon ve radyo gibi cihazlarda da kullanılmıştır. Daha sonra bu malzemelerin bağıl geçirgenliklerinin çok yüksek olduğu ve dielektrik histerezis davranış sergiledikleri keşfedilmiştir. Bu duruma ise ferroelektriklik adı verilmiştir.

1.1 Piezoelektrik Uygulama Alanları

1910 yılında Woldemar Voigt yirmi adet kristalin piezoelektrik etkilerini araştırıp yayınlamıştır ancak Birinci Dünya Savaşı'na dek piezoelektrik malzemelerle kayda değer herhangi bir uygulama gerçekleştirilmemiştir.

Birinci Dünya savaşında ultrasonik bir denizaltı detektörünün geliştirilmesiyle süreç başlamıştır. Bu cihaz Fransa'da Paul Langevin ve çalışma arkadaşları tarafından çelik plakalar arasına yerleştirilmiş ince kuvars kristallerinden oluşan bir transdüser ve hidrofon adı verilen bir detektör kullanılarak üretilmiştir. Cihaz transdüserin gönderdiği sinyallerin yankısını hidrofonun tespit etmesinin aldığı zamana göre derinlik hesabı yapmak için kullanılmıştır [4].

İkinci Dünya Savaşı'na kadarki süreçte piezoelektrik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmış; mikrofon, pikap kartuşu, ivmeölçer gibi uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

İkinci Dünya Savaşı sürecinde baryum titanat ($BaTiO_3$) ABD, Rusya ve Japonya tarafından birbirlerinin haberi olmadan bulunmuştur. Kalsiyum, stronsiyum ve baryum oksitleri üzerinde yapılan çalışmalarda $BaTiO_3$'ün geçirgenlik başta olmak üzere piezoelektrik özelliklerinin çok yüksek olduğu fark edilmiştir. Savaş sonrası Japonya'da yapılan araştırmalarda şu anda yaygın bir şekilde kullanılan kurşun zirkonat titanat (PZT) malzemesi bulunmuştur. Bu malzemenin üstün piezoelektrik özellikleri ise daha sonra ABD'de keşfedilmiştir. Günümüzde piezoelektrik malzemelerde yapılan yenilikler ve kullanım alanları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Piezoelektrik yenilik ve uygulama alanları [5].

Kategori	Yenilik alanı	Malzeme/şekil	Ana uygulaması
Frekans kontrolü ve sinyal işleme	Frekans/zaman standartları	Tek kristalli kuvars plakalar	Hassas frekans ayarı
	Mekanik frekans süzgeçleri	Özel yapım seramik PZT plakaları	Ucuz frekans ayarı ve süzgeçleme
	Yüzey akustik dalga cihazları	$LiNbO_3$, $LiTaO_3$, Tek kristalli kuvars altlıklar	Kablosuz iletişim için pasif sinyal işleme, tanılama vb.
	Yığın akustik dalga cihazları	Sert seramik PZT plakaları, ince AIN ve ZnO filmleri	
Ses ve ultrason	İkaz cihazları	Yumuşak seramik PZT şeritleri	Sesli ikazlar
	Mikrofon ve hoparörler	Yumuşak seramik PZT şeritleri, ince PZT filmleri	Telefon, kan basıncı
	Ultrason görüntüleme	Tek kristalli PZNT ya da yumuşak PZT plakaları	Tıbbi teşhis
	Hidrofonlar	Çeşitli şekillerde sert PZT, yumuşak PZT kompozitleri	Sesle konum bulma için kaynak ve detektör
	Yüksek güçlü transdüserler ve şok dalgası üretimi	Sert seramik PZT diskleri	Talaşlı imalat, ultrasonik temizlik, litotripsi
	Pülverizatörler	Yumuşak seramik PZT diskleri	Yağ pülverizatörleri, nemlendiriciler, spreyler
	Hava ultrasonu	Yumuşak seramik PZT diskleri	Uzaklık ölçümü, İzinsiz giriş uyarısı
Tahrik ediciler ve motorlar	Yazıcılar	Yumuşak seramik PZT çubuk/tüpleri, ince PZT filmleri	Mürekkep püskürtme
	Motorlar ve dönüştürücüler	Sert PZT halka/plakaları, ince PZT filmleri	Küçük motorlar ve dönüştürücüler
	Bimorf tahrik ediciler	Çok katmanlı PZT seramikleri	Pnömatik, mikro pompa, kabartma baskı

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı sensör olarak kullanılmak üzere PZT/akrilik karışımı piezoelektrik bir kompozitten üretilmiş bir boyanın yapısal özelliklerini hem elastik hem de elektrik yönden tahmin edip geliştirebilmek için analitik yaklaşımla çeşitli mikromekanik yöntemleri değerlendirmek, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analitik yaklaşımların doğruluğunu sınamak, sonrasında sensör düzeneğinin sayısal modellemesini yapmak ve bu şekilde tahmin edilmiş yapısal özelliklerle deneysel sonuçların uyumunu karşılaştırmaktır.

2. PİEZOELEKTRİKLİK

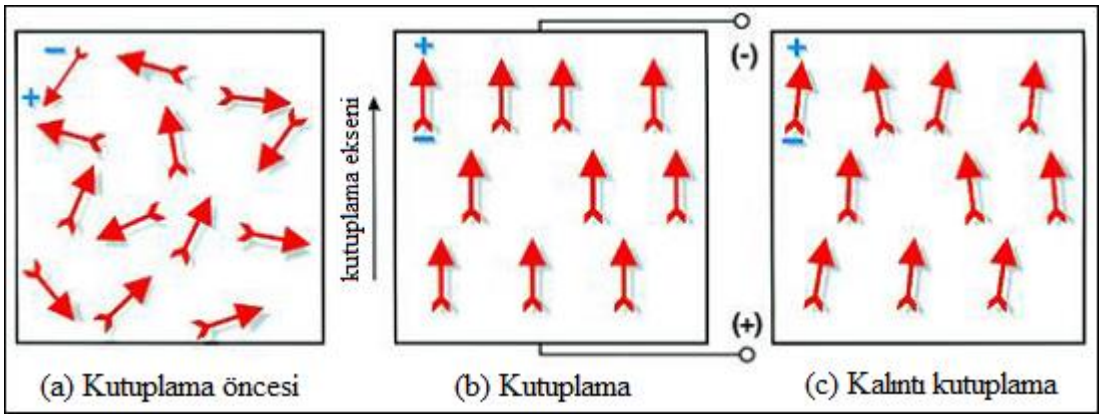
2.1 Piezoelektrik Özellik

Kristal yapısı merkezi olarak asimetrik olan malzemelerin şekil değişimi ile elektrik alan arasındaki bağlantıyı kuran piezoelektriklik, 31 kristal yapının 21'inde görülür. Oksitler, fosfatlar ve sülfatlar bunlara örnek verilebilir. Bu 21 yapının 10'u birim kafes yapısında çift kutupluluk bulundurur ve hem elastik hem de ısıl değişiklikler yüzeylerinde elektrik oluşturur. Bu duruma piroelektriklik adı verilir. Piroelektrik malzemelerin tamamı aynı zamanda piezoelektriktir [6,7].

Katı maddeler eğer bir elektrik alanın içinde değillerse yapılarındaki artı ve eksi yükler sayıca eşittirler. Bu durum denge durumudur. Piezoelektriklik teorisine göre böyle bir dengenin bozulması yapının şekil değiştirmesiyle mümkün olacaktır ve yüzeyler elektrik yüklenecektir. Bu yüklenmenin birincil sebebi kristal simetridir. Piezoelektrik bir malzemede kristal yönelimi ile gerilme etkisi sonucunda ortaya çıkan şekil değişiminin yönü arasındaki açılar elektrik yanıtını doğrudan etkiler. Yani birim şekil değişimlerinin gösterimi tensöreldir ve zıt yönlerde eşittir ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$). Elektrik kutuplanma ile elektrik alanı vektörel olarak gösterilir. Yöne bağımlıdır ve kristal yapı ile değişir, dolayısıyla malzemenin ayırt edici özelliklerindendir. Yani aynı gerilmenin farklı malzemelere uygulanması sonucunda kristal yapıya bağlı olarak farklı kutuplanmalar gözlemlenir [6,7].

Yüksek elektrik alan değerlerinde çok hızlı kutuplaşma kabiliyetine ferroelektrik özellik adı verilir. Bu bazı piezoelektrik malzemelerin bir özelliğidir.

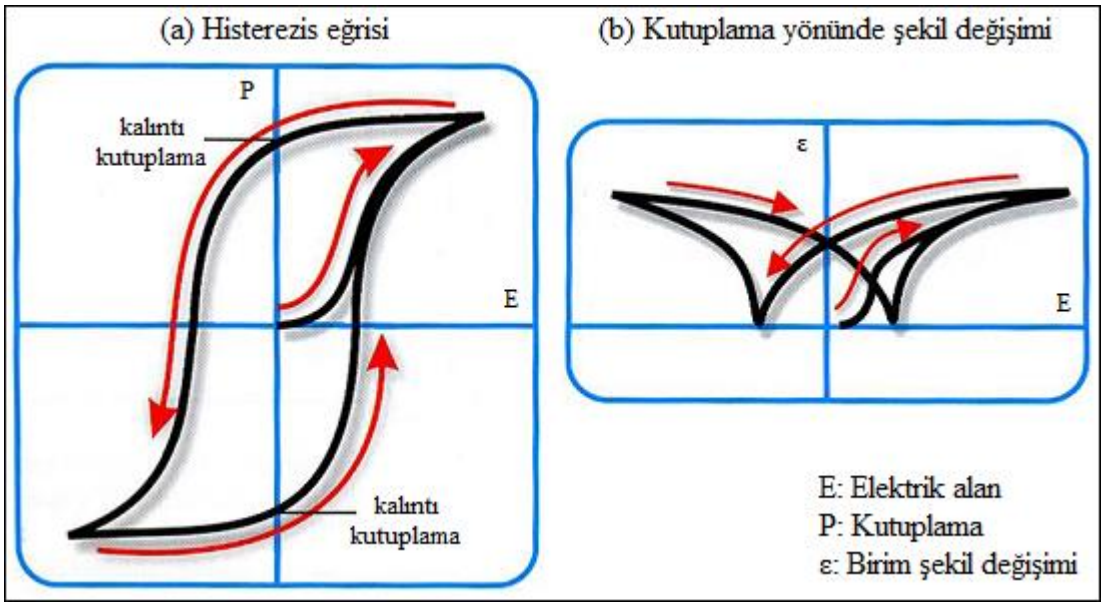
Çift kutupları rastgele bir biçimde dağılmış olan ferroelektrik seramikler (Şekil 2.1a) piezoelektriklik özelliği sergilemez. Bu malzemelere Küri sıcaklığından düşük bir sıcaklıkta ve belirli bir değerin üzerinde elektrik alan uygulanırsa piezoelektrik özelliği sergilemeye başlar.



Şekil 2.1 : Piezoelektrik bir seramiğin kutuplanması [8].

Kutuplama malzemenin yüzeylerine elektrotlar vasıtasıyla doğru akım verilerek elektrik alan oluşturulmasıyla sağlanır. Çift kutuplar bu alanla aynı doğrultuya yönelir (Şekil 2.1b). Kutuplama sırasında bölgeler dizilimlerini değiştirerek anizotropik duruma geçer. Kutuplamadan sonra bazı bölgeler eski haline geri dönebilir ancak çoğu kutuplanan halde kalır. Buna kalıntı kutuplama denir (Şekil 2.1c). Dolayısıyla malzemenin piezoelektriklik göstermesi için izotropik özelliğinin değiştirilerek kutuplanması gerekir. Bu işlemden sonra çoklu kristallerin oluşturduğu yapının genelinde çift kutup momenti oluşur [7-10].

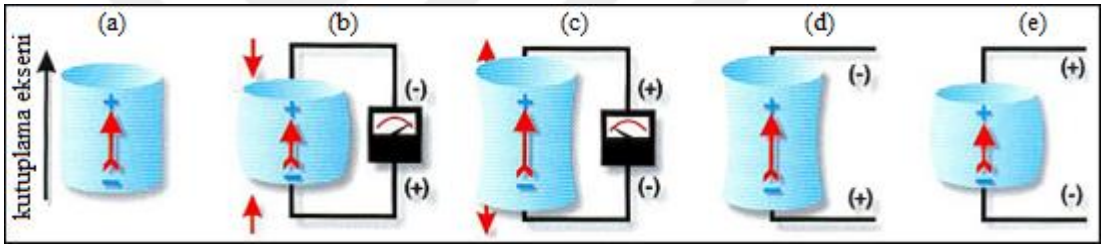
Ferromanyetik malzemeler kutuplandıklarında da histerezis gösterirler. Şekil 2.2a'da elektrik alanın oluşturduğu histerezis etkisi görülürken Şekil 2.2b'de ise elektrik alanın kutuplama yönündeki birim şekil değişimine olan etkisi görülmektedir [8].



Şekil 2.2 : Elektrik alanın kutuplamaya ve uzama/kısalma miktarına olan etkisi [8].

Histerezis bulunurken seramik eleman önce en yüksek kutuplanma değerine kadar elektrik alana maruz bırakılır. Kalıntı kutuplamayı bulabilmek için ise elektrik alan kaldırılır. Sonrasında elektrik alan ters yönde uygulanarak eksi yönde en yüksek kutuplanma değerine ulaşılır. Daha sonra tekrar elektrik alan kaldırılır. Kutuplama yönündeki birim şekil değişimi ise kutuplamaya dik doğrultulardaki birim şekil değişimleri tarafından karşılanır [8-10].

Bir seramik elemana mekanik bir gerilme uygulandığında voltaj üretilerek çift kutup momenti bozulur, kutuplama yönünde basma ya da kutuplamaya dik çekme, kutuplama voltajıyla aynı kutupsallığa sahip bir voltaj ortaya çıkarır (Şekil 2.3b). Kutuplama yönünde çekme ya da kutuplamaya dik basma, kutuplama voltajıyla ters kutupsallığa sahip bir voltaj ortaya çıkarır (Şekil 2.3c). Bu şekilde enerji dönüşümüne imkan veren davranış, üreteç davranışı olarak adlandırılır. Sensörler ve kuru piller gibi kullanım alanları mevcuttur [8,11].



Şekil 2.3 : Piezoelektrik davranış; (a) kutuplama yönü, (b) üreteç (basma), (c) üreteç (çekme), (d) motor (çekme), (e) motor (basma) [8].

Dolaylı etki durumunda kutuplama voltajıyla aynı kutupsallığa sahip bir voltaj verilmesi boy uzamasına (Şekil 2.3d), kutuplama voltajıyla ters kutupsallığa sahip bir voltaj verilmesi boy kısalmasına neden olur (Şekil 2.3e) [8].

Seramiğe alternatif akım uygulandığı takdirde ise voltaj frekansıyla uyumlu bir biçimde şekil değiştirir. Buna motor davranış adı verilir ve çeşitli alanlarda kullanım görür. Gerilme, voltaj ve birim şekil değişimlerinin değerleri malzeme özelliklerine göre değişir [8].

2.2 Piezoelektrik Malzemeler

Sensörlerde kullanılan malzemeler doğal piezoelektrikler, piezoelektrik seramikler, polimer piezoelektrikler ve kompozit piezoelektrikler olarak gruplandırılabilir.

2.2.1 Doğal piezoelektrikler

Doğal piezoelektriklerin şekillendirilme yöntemi en yüksek randımanı alabilmek açısından önemlidir. Kuvars en sık kullanılan doğal piezoelektrik seramiktir. Ancak düşük elektromekanik çift katsayısı enerji dönüşümlerinde kullanılmamasına sebep olur [7].

Turmalin ve lityum sülfat şok ölçümlerinde kullanıldığı gibi ticari hidrofonlarda da kullanılır.

Lityum tantalat ($LiTaO_3$) ve lityum niyobat ($LiNbO_3$), yüksek sıcaklıklarda hassasiyetlerini kaybetmediklerinden yüksek sıcaklık akustik sensörlerinde tercih sebebidir. Bu sıcaklıklarda benzer özellik gösteren bazı diğer kristaller ve $La_2Ti_2O_7$ ve $Sr_2Nb_2O_7$'dir [7].

Doğal kristaller sensörlerde en çok kullanılan kristallerdir. Bunu sebebi çok kararlı yapıda olmalarından dolayı uzun süre kullanılabilmeleridir. Ancak kristal doğrultularını dikkate almak gerekliliği en önemli eksi yönleridir.

2.2.2 Piezoelektrik seramik malzemeler

Seramik piezoelektrikler doğal malzemelere göre üstün mekanik, piezoelektrik, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Ayrıca daha yüksek kararlılık gösterirler. Ortam koşullarına ve neme dayanıklılıkları yüksektir. Özel uygulamalarda kullanılması ucuz ve kolay üretime olanak verir [7].

Bu malzemelerin hazırlanışında metal oksitten oluşan tozlar karıştırılıp ısıtılır. Bu karışıma bir bağlayıcı da karıştırılarak çeşitli şekiller verilebilir. Bu malzemeler daha sonra belli uzunluklarda fırınlanır. Bu sinterlemenin amacı malzemeye kristal bir yapı vermektir. Daha sonra soğumaya bırakılan elemana son şekli verilir.

2.2.2.1 Yumuşak ve sert piezoelektrik seramikler

Piezoelektrik seramiklerin özellikleri ve bileşimleri göz önüne alındığında yumuşak ve sert piezoelektrik seramik şeklinde iki ayrı gruba ayırabiliriz.

Piezoelektrik seramiklere küçük ölçeklerde bağışçı katılırsa kristal yapıda metal boşluklar meydana gelir. Bu sayede malzemenin piezoelektrik karakteristikleri iyileşmektedir. Yumuşak piezo seramikler bağışçı ilavesi ile elde edilmektedirler. En çok öne çıkan özellikleri sıralandığında; elektromekanik çift katsayıları, piezoelektrik

sabitleri, geçirgenlikleri, dielektrik sabitleri ile dielektrik kayıplarının yüksek ve mekanik kalitelerinin düşük olmasıdır. Sert piezo seramiklere nazaran daha yüksek uzama ve daha büyük sinyal bant aralığına sahiptirler. Bununla birlikte histerezislerinin daha büyük olması ile kutuplanmanın bozulması gibi olumsuz etkilere karşı sert piezo seramiklere göre daha duyarlıdırlar. Düşük Küri sıcaklıkları (çoğunlukla 300 °C'nin altında) yüksek elektrik alan ve yüksek frekans uygulamalarında pratik olmamalarına sebep olur. Bu nedenle bu tür piezo seramikler gücün (gerilmenin) fazla olduğu uygulamalardan ziyade sensörler için daha uygundur [8].

Sert piezo seramik eldesi için bileşimde alıcı katkı maddesi kullanılırsa seramiğin kristal yapısında oksijen boşlukları meydana gelir. Küri sıcaklıkları (300 °C'nin üzerinde), elektromekanik çift katsayıları, mekanik kalitesi yüksek iken piezoelektrik yük sabitleri düşüktür. Kolaylıkla kutuplanamazlar. Her ne kadar yumuşak piezo seramiklere göre kararlı yapıya sahip olsalar da onlar kadar uzama özelliklerine sahip değildirler. Bu sebeple büyük mekanik yüklemelerin veya büyük voltajların olduğu uygulamalarda daha kullanışlıdırlar [8].

Yumuşak ve sert piezo seramikler birbirlerinin karakteristiğini taşıyacak şekilde elde edilebilir. Bu sebeple belli bir uygulama için seramik seçerken bu karakteristikleri dikkatli bir biçimde karşılaştırmakta fayda vardır. Sert ve yumuşak piezo seramiklerin özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Sert ve yumuşak piezo seramiklerin özellikleri [8].

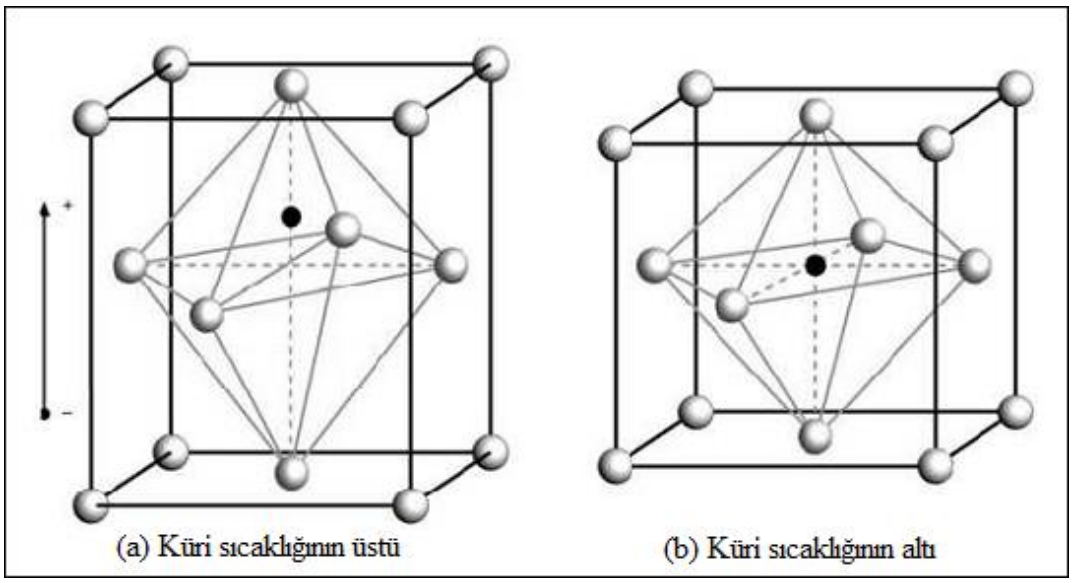
Özellik	Sert seramikler	Yumuşak seramikler
Piezoelektrik sabitler	Küçük	Büyük
Geçirgenlik	Düşük	Yüksek
Dielektrik sabitler	Küçük	Büyük
Dielektrik kayıplar	Düşük	Yüksek
Elektromekanik çift faktörü	Küçük	Büyük
Elektromekanik direnç	Düşük	Çok yüksek
Mekanik kalite faktörü	Yüksek	Düşük
Kutuplanma	Daha zor	Daha kolay

2.2.2.2 Piezoelektrik PZT

PZT Clevite firmasının tescilli bir ürünü olup piezoelektrik seramik sensörlerin temel bileşenini oluşturur. PZT, $Pb(Zr,Ti)O_3$ formülüne sahip olup molar derişiklik

açısından %52-54 $PbZrO_3$ ve %46-48 $PbTiO_3$ aralığında bileşime sahip çözeltilerin genel adıdır. Ferroelektrik bir malzeme olan PZT, perovskit yapıya sahiptir (Şekil 2.4).

PZT'nin kafes köşelerinde kurşun atomları ve yüzey merkezlerinde oksijen atomları bulunur. Bu atomların hepsi yaklaşık olarak 1.4 Å çapına sahiptirler. Kurşun ve oksijen iyonları 4 Å'lük kafes parametresine sahip yüzey merkezli kübik kristal sistem meydana getirir. Oktahedral olarak pozisyon almış olan titanyum ve zirkonyum ise birim kafes merkezinde bulunur [6-8].



Şekil 2.4 : PZT yapısı [9].

Bir PZT, yüksek sıcaklıklardan düşük sıcaklıklara soğutulduğunda kristal yapısı faz dönüşümüne maruz kalır. Bu dönüşüm esnasında 0.1 Å'lük ötelenmeler gerçekleşir. Küri sıcaklığında olan, titanyum açısından zengin PZT bileşikleri m3m kübik yapısından tetragonal 4mm yapısına dönüşür. Tetragonal yapının [001] yönünde meydana gelen kutuplama, 0 °K ve küri sıcaklığı aralığında korunur [6,7].

Yüksek kutuplama sağlayacak piezoelektrik seramikler için, ikinci faz dönüşümünü sağlayacak bileşimler üzerinde seçim yapılmalıdır. Küri sıcaklığında, kübik perovskit yapıya sahip olan PZT paraelektrik halden, rombohedral ve tetragonal temellere sahip morfotropik yapıya dönüşür. PZT'nin morfotropik yapıya sahip olması ile piezoelektrik çift katsayısı çok yüksek olan bir karakteristiği göstermeye başlar [6,7,10].

PZT'deki titanyum ağırlıklı bileşimlerin varlığı, [001] doğrultusunda yüksek miktarda uzama sağlar, bu uzama da tetragonal modifikasyonu oluşturur ve yüksek miktarda ani

kutuplamaya maruz kalabilirler. Bu durumlar tetragonal yapının sahip olduğu toplam 6 tane [001] doğrultuda meydana gelebilir. Zirkonyum açısından yüksek bileşimlerde ise rombohedral ferroelektrik biçim idealdir. Buna göre, çarpılma ve kutuplama durumu 8 adet olan [111] doğrultuda meydana gelebilir. Rombohedral ferroelektrik ve tetragonal fazların her ikisini de barındıran morfotropik bileşimlerle en iyi kutuplama yani en iyi piezoelektrik katsayı elde edilir. Bu tür bileşimler -50 °C'den 200 °C'ye kadarlık bir sıcaklık yelpazesinde 14 tane kutuplama yönüne sahiptir. Böylece piezoelektrik sabitlerin, morfotropik kısımlar ve bunların civarında maksimum değerleri alma nedeni açıklanmaktadır. Ek olarak kutuplama esnasında, rombohedral ve tetragonal fazları arasında dönüşümler gerçekleşebilir [6,7].

Böyle bir simetrisi olan kutuplanmış bir seramik için d_{15}, d_{31}, d_{33} gibi tensör değerleri kullanılır. Bu değerlerin büyüklüklerini değiştiren etkenler vardır. Bu katsayıları azaltan en önemli etkenlerden biri mekanik yüke maruz kalan kristalin yapısında oluşan çarpılmalardır.

Çift kutup momentiyle aynı doğrultuda olacak bir mekanik yükleme 3-eksenindeki ani kutuplamada artışa sebep olur. Bu duruma d_{33} etkisi denir. Çift kutup momentine dik olan mekanik yüklemede ise enlemesine yönde elektrik yükleri oluşur, buna da d_{31} etkisi denir. Kayma gerilmesi etkisindeki çift kutupta yükler kenardaki yüzeylerde birikir ve bu etki de d_{15} etkisidir. Tensör katsayılarının büyütücü faktörleri ise genelde bölge sınırlarının hareketlerini içeren faktörlerdir [6,7].

PZT temelli piezoelektrik malzemeler derişim oranlarıyla değişen özellik gösterirler. Bu PZT türlerinden bazılarının özellikleri Çizelge 2.2'de bulunmaktadır. PZT'ler için farklı firmalar tarafından geliştirilen formüller neticesinde farklı bir isimlendirmeye gidilse de genelde PZT-4 Fe, PZT-5 Nb, PZT-6 Cr ve PZT-7 La katkılı PZT'lere karşılık gelir. US Navy standartlarına göre ise PZT'ler Type 1, Type 2, Type 3 gibi ifade edilmektedirler. US Navy ile ifade edilen PZT özellikleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Bazı diğer piezoelektrik sensör malzemeleri ve bunların özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir [6,7].

Çizelge 2.2 : PZT seramik çeşitlerinin özellikleri [7].

Tür	T_c(°C)	d_{15}(pC/N)	d_{31}(pC/N)	d_{33}(pC/N)	K^T	k_{15}	k_{31}	k_{33}
PZT-2	370	440	-60	152	450	0.70	-0.28	0.63
PZT-4	325	495	-122	285	1300	0.71	-0.33	0.70
PZT-4D	320	-	-135	315	1450	-	-0.34	0.71
PZT-5A	365	585	-171	374	1700	0.69	-0.34	0.71
PZT-5B	330	564	-185	405	2000	0.63	-0.34	0.66
PZT-5H	195	741	-274	593	3400	0.68	-0.39	0.75
PZT-5J	250	670	-220	500	2600	0.63	-0.36	0.69
PZT-5R	350	-	-195	450	1950	-	-0.35	-
PZT-6A	335	-	-80	189	1050	-	-0.23	0.54
PZT-6B	350	130	-27	71	460	0.38	-0.15	0.37
PZT-7A	350	360	-60	153	425	0.68	-0.30	0.67
PZT-7D	325	-	-100	225	1200	-	-0.28	-
PZT-8	300	330	-97	225	1000	0.55	-0.34	0.64

PZT bileşimindeki katkılar piezoelektrik karakteristiklerini önemli ölçüde etkiler. Ba, Sr, Ca, La gibi elementler piezoelektrik özelliklerden olan Küri sıcaklığı, dayanım veya duyarlılık gibi özelliklerin gelişmesini sağlamaktadır. Bu sayede ihtiyaç olunan özelliklere uyacak şekilde bu malzemelerin üretimi imkan dahilinde olmaktadır [7].

Çizelge 2.3 : Navy Type PZT türleri [12].

PZT Türü	Özellikleri
Navy Type I	Kayıp oluşumunun az olmasının istendiği, trandüser, 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 2.4 : Diğer PZT seramik çeşitlerinin özellikleri [7].

Tür	T_c(°C)	d_{15}(pC/N)	d_{31}(pC/N)	d_{33}(pC/N)	K^T	k_{15}	k_{31}	k_{33}
$BaTiO_3$	115	190	-78	260	1700	0.48	0.21	0.5
$PbTiO_3$	470	56	-	68	190	-	-	0.45
$PbNb_2O_6$	570	85	9	-	225	-	0.045	0.38
$KNaNb_2O_6$	420	127	-51	306	495	-0.46	-0.27	0.6
$LiNbO_3$	1150	6	-	-69	25	0.6	-	0.23

Tek valanslı katkıların eklenmesi PZT'lerin Küri sıcaklıklarında düşmeyi sağlar ve oda sıcaklığı şartlarında dielektrik katsayıyı yükseltici yönde etkiler. Ti^{4+} veya Zr^{4+}

iyonlarının yerini alan çok valanslı katkılar PZT'lerin ömürlerini olumlu yönde etkilerler. PZT'lerde çokça kullanılan katkıların listesi Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : PZT'lerde sıklıkla kullanılan katkı türleri [7].

Tür	Katkı
Pb bağışçıları	La^{3+}, Bi^{3+}, Nd^{3+}, Sb^{3+}, Th^{4+}
(Ti-Zr) bağışçıları	Nb^{5+}, Ta^{5+}, Sb^{5+}, W^{6+}
Pb alıcıları	K^{+}, Na^{+}, Rb^{+}
(Tİ-Zr) alıcıları	Fe^{3+},Al^{3+}, Sc^{3+}, In^{3+}, Cr^{3+}, Co^{3+}, Ga^{3+}, Mn^{2+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}
İzovalent katkılar	Sr^{2+}, Ca^{2+}, Ba^{2+} (Pb^{2+} için), Sn^{+4} (Ti^{4+} veya Zr^{4+} için)
Çok valanslı iyonlar	Cr, U

2.2.2.3 Yaygın kullanılan piezoelektrik seramikler ve özellikleri

Piyasada farklı malzemeler kullanılarak imal edilmiş çeşitli piezoelektrik seramikler bulunmaktadır. Yukarıda da anlatıldığı gibi üretildikleri malzemenin cinsine, üretim yöntemine veya bileşenlerinin oranlarına göre oldukça farklı karakteristiklere sahip olabilirler.

Kurşun titanat ve kurşun zirkonat gibi kurşun içeren bir başka bileşik olan magnezyum niyobat ($Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$) bileşiği PZT'ye nazaran PZT'nin sağladığı piezoelektrik karakteristik ve avantajlar açısından biraz daha iyidir [7].

Küri sıcaklığı 120 °C civarında olan baryum titanatta ($BaTiO_3$) bu sıcaklığın altında dielektrik ve piezo özellikler gösteren kararlı bir tetragonal yapı vardır. Bu sıcaklığın üstüne çıkıldığında ise çok düşük dielektrik sabite sahip kararlı kübik yapı vardır. Baryum titanat, zehirli olan kurşun içermediğinden tıbbi uygulamalar için daha uygundur.

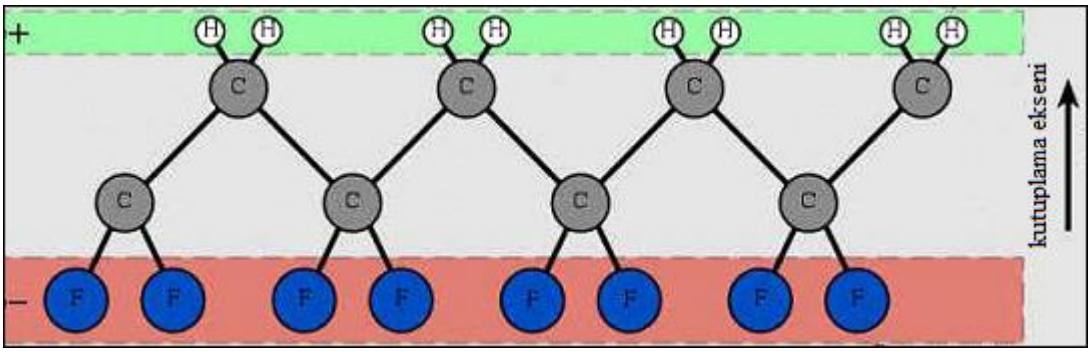
Kurşun titanatlar ($PbTiO_3$), yüksek Küri sıcaklıklarına, büyük anizotropiye ve küçük dielektrik sabitlere sahiptirler. Bu sebeple yüksek frekanslı piezoelektrik dönüştürücü uygulamalarına daha elverişlidir. Yapısında bulunan geniş anizotropi sinterlemeyi zorlaştırır. Bu yüzden kafesteki Pb^{2+}, Ba^{2+}, Cd^{2+}, Sm^{3+}, Gd^{3+}, Y^{3+} gibi katkılar kafes anizotropisinin düzenlenmesi için ilave edilerek malzemenin sinterlenebilirliği, eletromekanik çift gibi karakteristikleri iyileştirilebilir. Stronsiyum, kurşun titanat ve/veya kalsiyum ile karıştırılırsa ortaya çıkan üstün piezo elektrik anizotropisi hidrofon malzemesi olarak kullanılmasını sağlar. PZT'ye nazaran tepki süreleri daha düşüktür [6,7].

Kurşun nikel niobatlar ($Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$) PZT'lerle karşılaştırıldığında görece büyük yer değiştirme değerine (daha büyük d_{33}) ve dielektrik değerine sahiptirler. Küçük ölçekte üretimi yapılan cihazlar için en uygun değerleri sağlarlar. Katkıların ilavesi ile özellikleri değiştirilebilir.

Kurşun çinko niobatlar ($Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$), karmaşık perovskit yapıda olan ferroelektrik seramiklere örnektir. Çok katmanlı seramik kapasitörler, elektromekanik dönüştürücü ve tahrik işlemleri için çok elverişlidir. Kutuplamaya geç cevap vermeleri nedeniyle kutupluluklarını aniden kaybetmezler.

2.2.3 Polimer piezoelektrikler

Polimer piezoelektrik ailesinin büyük bir kısmı florokarbon temellidir. Bu zamana kadar en çok üstüne düşülen piezoelektrik polimer PVDF'dir. En basit florokarbon grubu olan PVDF bileşiminin $-(C_2H_2F_2)_n-$ formülünde tekrar grubu vardır. PVDF, yüksek miktarda kristal yapıdadır ve yapıda bulunması mümkün olan α, β, γ fazları PVDF'nin yapısında %50-70 arasında değişen yüksek kristalliğin sebebidir. Üç farklı faz yapısı fiziksel veya kimyasal işlemler kullanılarak birbirlerine dönüştürülebilirler. β ve γ formlarında bulunan, moleküle dik yöndeki çift kutuplar malzemenin kutuplu yapıya sahip olmasına sebep olur. Bu durumda malzeme piezoelektrik özellik davranışına sahip olur. Diğerlerinden daha baskın piezoelektriklik gösteren β fazının yapısı Şekil 2.5'te gösterilmiştir [13].



Şekil 2.5 : PVDF β yapısı [14].

Polimer tabanlı PVDF'ler ile piezoseramiklerin özelliklerine bakıldığında, mekanik yüklemelere dayanıklı olması, üstün esnek yapısı, görece az akustik impedansa sahip olması ve üretim kolaylığı gibi özellikleri PVDF'leri öne çıkarmaktadır. Buna rağmen zor kutuplanmaları olmaları PVDF'nin en önemli dezavantajıdır. Örneğin PVDF

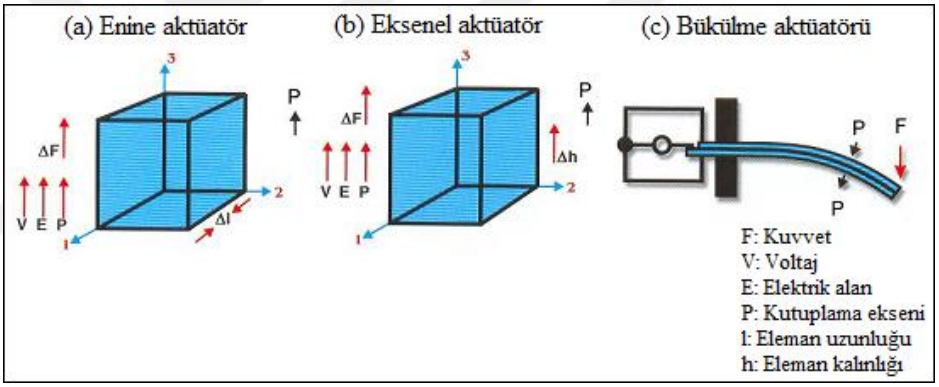
kutuplaması için 120 kV/mm değerlerinde büyük elektrik alanlara ihtiyaç duyulur [13].

2.3 Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları

Piezoelektrik malzemelerin dört ana uygulama yeri vardır. Bunlar uyarıcılar (aktüatörler), sensörler, transdüserler ve üreteçlerdir.

2.3.1 Aktüatörler

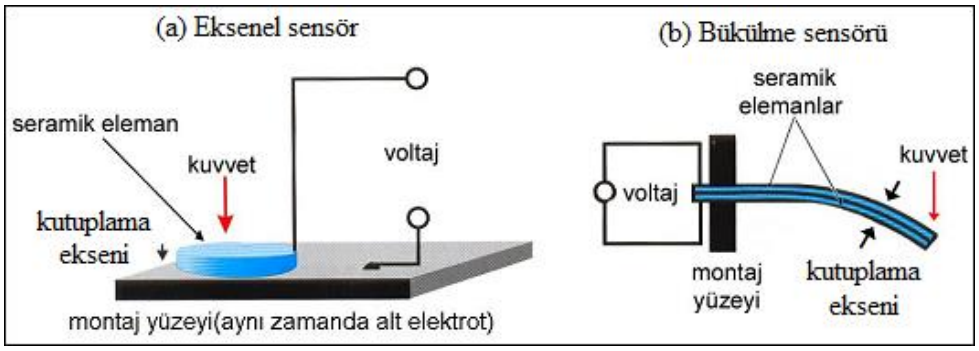
Elektrik sinyallerinin hassas bir biçimde yer değiştirmesini sağlayan aktüatörler enine, eksenel ve bükülme olarak üç gruba ayrılır (Şekil 2.6). Yüksek hassasiyette hareket kabiliyetinin olması kalibrasyon gerektiren çoğu uygulamalarda kullanılmasına imkan tanır. Kontrol mekanizması ile hidrolik vanalar veya küçük güçteki motorlarda kullanılırlar. Elektromanyetik gürültü oluşturmamaları en büyük artısıdır.



Şekil 2.6 : Aktüatör çeşitleri [8].

2.3.2 Sensörler

Sensörler, çeşitli fiziksel parametrelerin elektrik sinyallerine dönüşümünü sağlayan araçlardır. Direkt veya dolaylı yoldan etkiyen fiziksel parametreler sensörler üzerinde elektrik sinyali oluşturur. Sensörün yolladığı sinyaller piezoelektrik eleman tarafından işlenerek görülebilen, duyulabilen veya hissedilebilen yanıtlara çevrilir. Piezoelektrik elemanlara sahip olan sensörler eksenel ve bükülme olarak iki temel gruba ayrılır. Bu tür sensörlerin yapıları Şekil 2.7'de gösterilmiştir [8].



Şekil 2.7 : Sensör çeşitleri [8].

2.3.3 Transdüserler

Bu tür piezoelektrikler gelen elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesini sağlar. Bu mekanik enerji ses olarak ortaya çıkar. Diğer ses üreten cihazlarla karşılaştırıldığında piezoelektrik transdüserler daha küçük ve düzgün, güvenilir, basit olmaları ayrıca yüksek ses için daha düşük enerji gerektirmeleri ile öne çıkmaktadır. Piezoelektriklerin çift yönlü çalışmasından dolayı tersi şekilde ses dalgalarından da elektrik sinyali üretebilir. Bu özelliği ile akış sistemlerinde kullanılır hale gelmiştir. Ultrasonik titreşimler yarattığı için piezoelektrik transdüserlerden kaynak işlemlerinde, sağlık uygulamalarında, gevrek malzemelerin işlenmesinde çokça istifade edilir [8].

2.3.4 Üreteçler

Piezoelektrik malzemeler üreteç olarak da kullanılabilir. Sisteme mekanik yükleme girildiğinde piezoelektrik eleman üzerinde gerilim oluşacaktır. Bu sebeple ateşleme sistemlerinde özellikle tercih edilir. Küçük ve basittirler, böylece aynı işi yapabilen alternatiflerine (yüksek voltaj dönüştürücüleri, kapasitörler vs.) göre avantajlıdırlar.

3. PİEZOELEKTRİK SENSÖRLER VE KOMPOZİT BOYA

3.1 Giriş

Sensörler veri kayıt aygıtlarının fiziksel ortam ile bağlantısını sağlayan cihazlardır. Mekanik ya da kimyasal, fiziksel gibi diğer etkileri algılar, elektrik sinyali olarak veri işleme cihazına gönderirler. Çeşitli kuvvet, uzaklık, ısı gibi girdiler sensörde çıktı yanıtı oluşturur.

Transdüser, alıcı ya da verici sistemlerde piezoelektrik malzemelerden sensör malzemesi olarak faydalanılır. Bir piezoelektrik sensörün elektrik sinyali üretmesi için üzerinde bir basınç bulunmalıdır. Piezoelektrik seramiğin durağan bir yükle yüklüyken çift kutupları nötrlenir ve elektrik yükü boşalır. Bu elemana bir basınç uygulanması durumunda durağanlık bozulur ve tekrar elektrik yüklenir. Basınç kaldırılırsa seramiğin yükü tekrar boşalır [15].

Tek kristalli seramikler çok kristalli seramiklere göre piezoelektrik açıdan daha iyidir. Kesilme doğrultusu ve yönlenme ayarlanabilir. Bu da kontrol açısından uzun ömürlülük sağlar. Çok kristalli seramikler ise basınç ya da uzama sensörlerinde kullanıma, dayanımlarının daha yüksek olması nedeniyle daha uygundurlar. Çok kristalli seramiklerin özelliklerinin geliştirilmesi de son derece kolaydır [7,8].

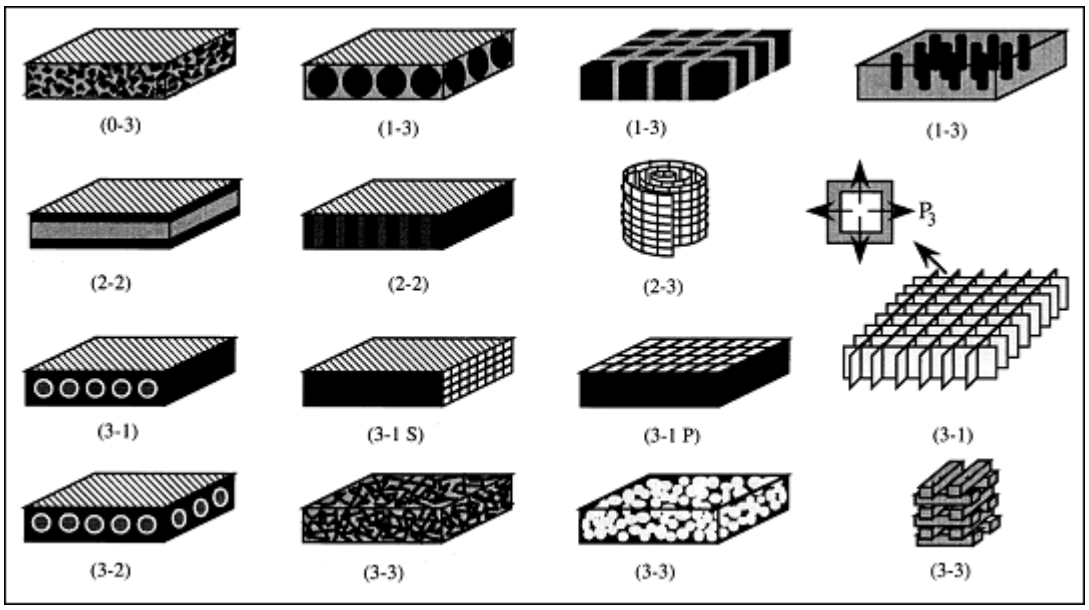
Bu çalışmada kullanılacağı üzere piezoelektrik kompozit sensörler incelenecektir.

3.2 Piezoelektrik Kompozit Sensörler

Sensörlerde piezoelektrik malzeme yerine kompozitlerinin kullanılmasında en büyük etken PZT'nin hidrostatik duyarlılığının yüksek olmamasıdır. Başlıca piezoelektrik kompozit elde etme yöntemi seramiği bir polimer fazla karıştırmaktır. Böylece zayıf özellikler her iki faz için de iyileştirilerek verim artırılmış olur. Piezo seramik/polimer kompozitlerin en büyük kullanım alanı hidrofonlardır [7].

3.2.1 Kompozit doğrultuları

Kompozit malzemelerdeki fazların hangi doğrultularda olduğunu gösteren 10 farklı durum mevcuttur (Şekil 3.1). Bunlardan 0-3, 1-3, 2-2, 2-3, 3-0, 3-1, 3-2, 3-3 bağlantıları piezoelektrik kompozitlerde kullanılmakta ya da üzerinde çalışılmaktadır. Piezoelektrik kompozitlerde ilk sayı piezoelektrik malzemeyi, ikinci sayı ise piezoelektrik olmayan malzemeyi ifade eder [7]. Bu çalışmada 0-3 doğrultularındaki kompozitler üzerine yoğunlaşılacaktır.



Şekil 3.1 : Faz konumları [7].

Enine ve boyuna doğrultuda hidrostatik gerilmenin bir kısmını piezoelektrik kompozite eklenecek elemanın üstlenmesi hedeflenerek üretilecek voltaj değerleri yükseltilir. Polimerle yapılan kompozitlerde de amaç bu durumu sağlamaktır [7].

3.2.2 Piezoelektrik boya

0-3 bağlantısındaki kompozitlerin oluşturulması yuvarlak seramik malzemenin polimer matris içinde dağılması ile gerçekleşir. Kompozite arzu edilen şekil rahatlıkla verilebilirken aynı zamanda piezoelektrik özelliğinden de kayıp yaşanmamış olur. Seramik bileşen piezoelektrik özelliklerini sağlarken polimer bileşen esneklik özelliği sağlar [8,15].

Bu sensörlerin film ya da kaplama gibi farklı yöntemlerle uygulanmasına ilgi artmaktadır. Bu tarz 0-3 kompozit sensörlere piezoelektrik boya adı verilir. Bu tarz uygulamalar üzerine en çok Amerika ve Japonya'da çalışma yapılmaktadır.

Piezoelektrik boya ilk defa Penn State Üniversitesi'nde PZT ve polimer karışımından üretilmiştir [15,16].

1999'da Hale ve Truk püskürtülebilir piezo boya geliştilebileceğini göstermişlerdir. Kompozitin bileşenlerini PZT tozu ve akrilik oluşturmaktadır. Bu kompoziti boya tabancasıyla püskürterek bir sensör yapmışlardır. Sonrasında Hale, White ve Poumeyrol bir köprünün ayağında bu boyayı kullanmışlardır. Daha sonra bu ürünün patentini almak için çalışmaya başlamışlardır [15,16].

Piezo boyaların özellikleri kullanılan seramiğin ve polimerin özellikleriyle, ayrıca hacimsel yüzdeleriyle büyük oranda değişir. O yüzden yüksek piezoelektrik özellik elde edebilmek için piezoelektrik tozun oranının yüksek tutulması gerekir. Bu da küçük çaplı ve homojen dağılımlı bir yapı ile mümkündür. Piezoelektrik seramiklerin dielektrik özellikleri de genelde polimerlerden yüksek olduğu için seramik oranının azalması hem piezoelektrik hem de dielektrik özellerde azalmaya sebep olur [13,15,16].

4. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Piezoelektrik kompozitlerin üretimi ve uygulamaları için yapısal özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşır. Bu kompozitlerin tasarlanabilmesi için yapı-özellik ilişkisini doğru şekilde ortaya koyan modeller kullanılmalıdır. Mikromekanik modellerle her bir bileşenin elektromekanik özelliği üzerinden kütlesel özellikleri bulmaya yönelik çeşitli modeller üzerinde çalışılmıştır. Piezoelektrik kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde ayrıca Eshelby tensörü de büyük bir rol oynar [17,18].

4.1 Piezoelektrik Yapısal Denklemleri

İndis gösterimi kullanılarak verilecek denklemlerde küçük harfle gösterilen indisler $i, j, m, n = 1,2,3$ değerlerini, büyük harfle gösterilen indisler $J, M = 1,2,3,4$ değerlerini almaktadır [19].

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijmn}\varepsilon_{mn} + e_{nij}E_n \\ D_i &= e_{imn}\varepsilon_{mn} - \kappa_{in}E_n \end{aligned} \tag{4.1}$$

Burada σ_{ij} gerilme tensörü, C_{ijmn} rijitlik tensörü, ε_{mn} birim şekil değişimi tensörü, e_{nij} piezoelektrik tensör, E_n elektrik alan vektörü, D_i elektrik yer değiştirme vektörü, κ_{in} geçirgenlik tensörüdür.

Hesaplama elverişliliği nedeniyle elastik ve elektrik değişkenlerin tek bir yapısal denklemde toplandığı matris gösterimi:

$$\Sigma_{iJ} = E_{iJMn}Z_{Mn} \tag{4.2}$$

Burada

$$\Sigma_{iJ} = \begin{cases} \sigma_{ij}, & J = 1,2,3 \\ D_i, & J = 4 \end{cases} \tag{4.3}$$

$$E_{iJMn} = \begin{cases} C_{ijmn}, & J,M = 1,2,3 \\ e_{nij}, & J = 1,2,3;\ \ M = 4 \\ e_{imn}, & J = 4;\ \ M = 1,2,3 \\ -\kappa_{in}, & J,M = 4 \end{cases} \tag{4.4}$$

$$Z_{Mn} = \begin{cases} \varepsilon_{mn}, & M = 1,2,3 \\ E_n, & M = 4 \end{cases} \tag{4.5}$$

4.1.1 Voigt gösterimi

Yukarıdaki matris gösteriminde E_{iJMn} tensör özelliklerini kaybettiği için aşağıda verilen eşlemelerle bir adım daha sadeleştirme yapılarak indis gösterimi basitleştirilebilir [20]. $(iJ) = (Ji)$ ve $(Mn) = (nM)$ için:

$$(11) \rightarrow 1\ \ (22) \rightarrow 2\ \ (33) \rightarrow 3\ \ (23) \rightarrow 4\ \ (31) \rightarrow 5\ \ (12) \rightarrow 6 \tag{4.6}$$

$$(41) \rightarrow 7\ \ \ (42) \rightarrow 8\ \ \ (43) \rightarrow 9 \tag{4.7}$$

Bu gösterimde ilk indis çifti satır numarasını, ikinci indis çifti ise sütun numarasını temsil etmektedir. Denklem (4.6)'daki eşlemeler Voigt elastik sabitlerine tekabül eder. Denklem (4.7) ise bunun elektrik özellikleri de kapsayacak şekilde genelleştirilmiş halidir [21].

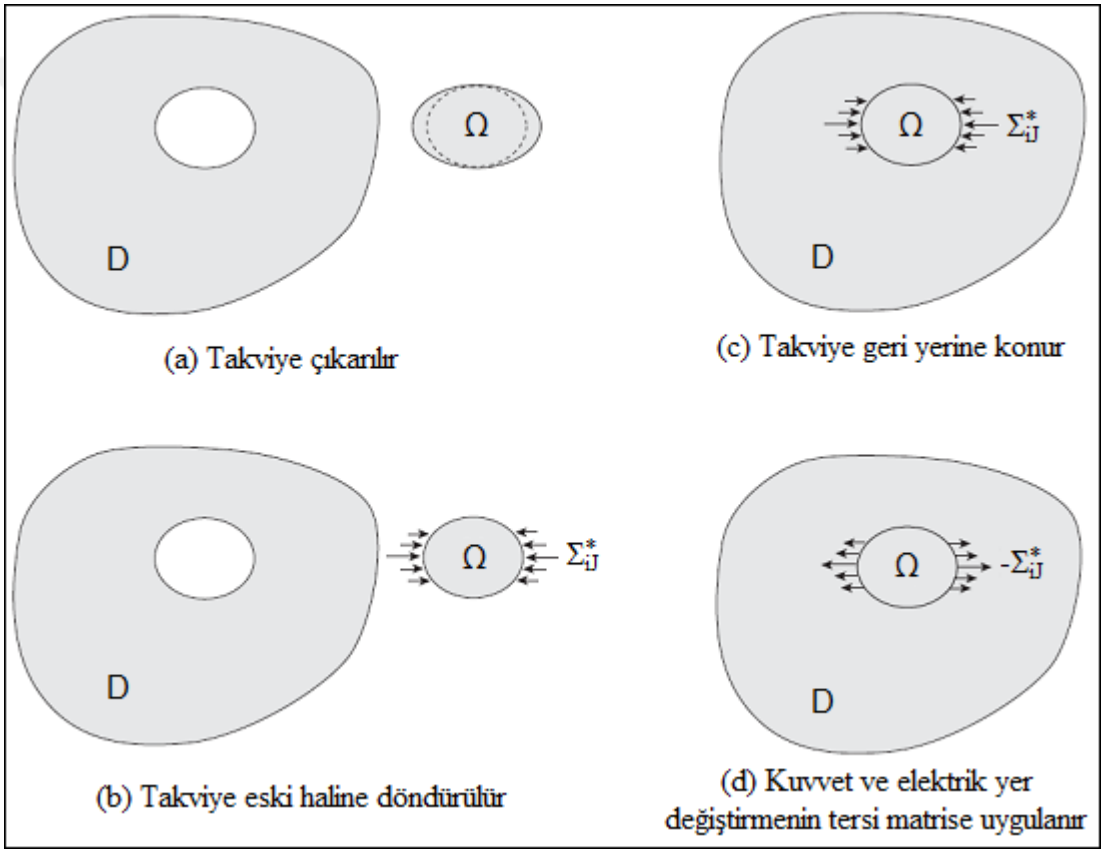
Voigt gösteriminde enine izotropiye sahip bir piezoelektrik malzeme için yapısal denklemler (kutuplama ekseninin 3-ekseni olması durumunda):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & -\kappa_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & -\kappa_1 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\kappa_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Burada enine izotropiden dolayı $C_{66} = \frac{(C_{11} - C_{12})}{2}$ ve $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$

4.2 Piezoelektrik Takviye Problemi

Piezoelektrik bir matristen (D) aynı elektromekanik özelliklere sahip bir takviye malzemesi (Ω) çıkarıldığı varsayılsın. Başlangıçta her iki bölgede de gerilme ve elektrik yer değiştirme bulunmaz. Çıkarma sonrasında takviye serbest bir şekilde birim şekil değişimine ve elektrik alana uğrar (Şekil 4.1a). Artık takviye mekanik ya da elektriksel olarak çıkarıldığı boşluğa giremeyecektir. Daha sonra takviyeye eski haline getirecek bir büyüklükte Σ_{ij}^{*} uygulanır (Şekil 4.1b). Takviye geri yerine yerleştirilir (Şekil 4.1c). Baştaki duruma dönmek için ters yönde Σ_{ij}^{*} matrisin iç yüzeyine uygulanır (Şekil 4.1d) [22].



Şekil 4.1 : Eshelby'nin takviye problemi [23].

4.3 0-3 Piezoelektrik Kompozitler İçin Eshelby Tensörünün Bulunması

Elipsoid şekilli bir takviye için Eshelby tensörü aşağıdaki şekilde elde edilir [24-26].

$$Z_{Mn} = S_{MnAb} Z_{Ab}^{*}, \quad \Omega \text{ bölgesi içinde iken} \tag{4.9}$$

Burada S_{MnAb} piezoelektrik Eshelby tensörünü ifade etmektedir. Bu tensör matris malzemesinin elektromekanik özelliklerine ve takviyenin geometrik şekline bağlıdır

[27]. Küresel şekilli bir takviye için değeri 0 olmayan elemanlarının bulunuşu Voigt gösteriminde aşağıda verilmiştir:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{4\pi}(C_{11}I_{1111} + C_{12}I_{1212} + C_{13}I_{1313} + e_{31}I_{1314})$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{4\pi}(C_{11}I_{1212} + C_{12}I_{1111} + C_{13}I_{1313} + e_{31}I_{1314})$$

$$S_{13} = S_{23} = \frac{1}{4\pi}[C_{13}(I_{1111} + I_{1212}) + C_{33}I_{1313} + e_{33}I_{1314}]$$

$$S_{19} = S_{29} = \frac{1}{4\pi}[e_{31}(I_{1111} + I_{1212}) + e_{33}I_{1313} - \kappa_{33}I_{1314}]$$

$$S_{31} = S_{32} = \frac{1}{4\pi}(C_{11}I_{1313} + C_{12}I_{2323} + C_{13}I_{3333} + e_{31}I_{3334})$$

$$S_{33} = \frac{1}{4\pi}[C_{13}(I_{1313} + I_{2323}) + C_{33}I_{3333} + e_{33}I_{3334}]$$

$$S_{39} = \frac{1}{4\pi}[e_{31}(I_{1313} + I_{2323}) + e_{33}I_{3333} - \kappa_{33}I_{3334}]$$

$$S_{44} = S_{55} = \frac{1}{8\pi}[C_{44}(I_{1133} + I_{3311} + 2I_{1313}) + e_{15}(I_{1134} + I_{1314})] \quad (4.10)$$

$$S_{48} = S_{57} = \frac{1}{8\pi}[e_{15}(I_{1133} + I_{3311} + 2I_{1313}) - \kappa_{11}(I_{1134} + I_{1314})]$$

$$S_{66} = \frac{1}{8\pi}(C_{11} - C_{12})(I_{1122} + I_{1212})$$

$$S_{75} = S_{84} = \frac{1}{4\pi}[C_{44}(I_{1134} + I_{1314}) + e_{15}I_{1144}]$$

$$S_{77} = S_{88} = \frac{1}{4\pi}[e_{15}(I_{1134} + I_{1314}) - \kappa_{11}I_{1144}]$$

$$S_{91} = S_{92} = \frac{1}{4\pi}(C_{11}I_{1314} + C_{12}I_{2324} + C_{13}I_{3334} + e_{31}I_{3344})$$

$$S_{93} = \frac{1}{4\pi}[C_{13}(I_{1314} + I_{2324}) + C_{33}I_{3334} + e_{33}I_{3344}]$$

$$S_{99} = \frac{1}{4\pi}[e_{31}(I_{1314} + I_{2324}) + e_{33}I_{3334} - \kappa_{33}I_{3344}]$$

Burada I_{inMJ} değerleri;

$$I_{1111} = -\frac{\pi}{2}\int_0^1 \frac{m_{1,1}t^8 + m_{2,1}t^6 + m_{3,1}t^4 + m_{4,1}t^2 + m_{5,1}}{n_{1,1}t^8 + n_{2,1}t^6 + n_{3,1}t^4 + n_{4,1}t^2 + n_{5,1}}dt$$

$$I_{1122} = -\frac{\pi}{2}\int_0^1 \frac{m_{1,2}t^8 + m_{2,2}t^6 + m_{3,2}t^4 + m_{4,2}t^2 + m_{5,2}}{n_{1,1}t^8 + n_{2,1}t^6 + n_{3,1}t^4 + n_{4,1}t^2 + n_{5,1}}dt$$

$$I_{3311} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,3}t^8 + m_{2,3}t^6 + m_{3,3}t^4 + m_{4,3}t^2}{n_{1,1}t^8 + n_{2,1}t^6 + n_{3,1}t^4 + n_{4,1}t^2 + n_{5,1}}dt$$

$$I_{1212} = -\frac{\pi}{2}\int_0^1 \frac{m_{1,4}t^8 + m_{2,4}t^6 + m_{3,4}t^4 + m_{4,4}t^2 + m_{5,4}}{n_{1,1}t^8 + n_{2,1}t^6 + n_{3,1}t^4 + n_{4,1}t^2 + n_{5,1}}dt$$

$$I_{1133} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,5}t^6 + m_{2,5}t^4 + m_{3,5}t^2 + m_{4,5}}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{1144} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,6}t^6 + m_{2,6}t^4 + m_{3,6}t^2 + m_{4,6}}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{1134} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,7}t^6 + m_{2,7}t^4 + m_{3,7}t^2 + m_{4,7}}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt \qquad (4.11)$$

$$I_{3333} = -4\pi\int_0^1 \frac{m_{1,8}t^6 + m_{2,8}t^4 + m_{3,8}t^2}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{3344} = -4\pi\int_0^1 \frac{m_{1,9}t^6 + m_{2,9}t^4 + m_{3,9}t^2}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{3334} = -4\pi\int_0^1 \frac{m_{1,10}t^6 + m_{2,1}0t^4 + m_{3,10}t^2}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{1313} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,11}t^6 + m_{2,11}t^4 + m_{3,11}t^2}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

$$I_{1314} = -2\pi\int_0^1 \frac{m_{1,12}t^6 + m_{2,12}t^4 + m_{3,12}t^2}{n_{1,2}t^6 + n_{2,2}t^4 + n_{3,2}t^2 + n_{4,2}}dt$$

m ve n değerleri;

$$m_{1,1} = -A_1 + B_1 - C_1 + D_1$$

$$m_{2,1} = A_1 - 2B_1 + 3C_1 - 4D_1 \qquad (4.12)$$

$$m_{3,1} = B_1 - 3C_1 + 6D_1$$

$$m_{4,1} = C_1 - 4D_1$$

$$m_{5,1} = D_1$$

$$m_{1,2} = -A_2 + B_2 - C_2 + D_2$$

$$m_{2,2} = A_2 - 2B_2 + 3C_2 - 4D_2$$

$$m_{3,2} = B_2 - 3C_2 + 6D_2$$

$$m_{4,2} = C_2 - 4D_2$$

$$m_{5,2} = D_2$$

$$m_{1,3} = A_3 - B_3 + C_3 - D_3$$

$$m_{2,3} = B_3 - 2C_3 + 3D_3$$

$$m_{3,3} = C_3 - 3D_3$$

$$m_{4,3} = D_3 \qquad (4.12)$$

$$m_{1,4} = A_4 - B_4 + C_4 \qquad \text{(devam)}$$

$$m_{2,4} = -2A_4 + 3B_4 - 4C_4$$

$$m_{3,4} = A_4 - 3B_4 + 6C_4$$

$$m_{4,4} = B_4 - 4C_4$$

$$m_{5,4} = C_4$$

$$m_{1,5} = -A_5 + B_5 - C_5$$

$$m_{2,5} = A_5 - 2B_5 + 3C_5$$

$$m_{3,5} = B_5 - 3C_5$$

$$m_{4,5} = C_5$$

$$m_{1,6} = -A_6 + B_6 - C_6$$

$$m_{2,6} = A_6 - 2B_6 + 3C_6$$

$$m_{3,6} = B_6 - 3C_6$$

$$m_{4,6} = C_6$$

$$m_{1,7} = -A_7 + B_7 - C_7$$

$$m_{2,7} = A_7 - 2B_7 + 3C_7$$

$$m_{3,7} = B_7 - 3C_7$$

$$m_{4,7} = C_7$$

$$m_{1,8} = A_8 - B_8 + C_8$$

$$m_{2,8} = B_8 - 2C_8$$

$$m_{3,8} = C_8$$

$$m_{1,9} = A_9 - B_9 + C_9$$

$$m_{2,9} = B_9 - 2C_9$$

$$m_{3,9} = C_9$$

$$m_{1,10} = A_{10} - B_{10} + C_{10} \quad (4.12)$$

$$m_{2,10} = B_{10} - 2C_{10} \quad \text{(devam)}$$

$$m_{3,10} = C_{10}$$

$$m_{1,11} = -A_{11} + B_{11}$$

$$m_{2,11} = A_{11} - 2B_{11}$$

$$m_{3,11} = B_{11}$$

$$m_{1,12} = -A_{12} + B_{12}$$

$$m_{2,12} = A_{12} - 2B_{12}$$

$$m_{3,12} = B_{12}$$

$$n_{1,1} = (e - f)(a - b + c - d)$$

$$n_{2,1} = e(b - 2c + 3d) + f(a - 2b + 3c - 4d)$$

$$n_{3,1} = e(c - 3d) + f(b - 3c + 6d)$$

$$n_{4,1} = ed + f(c - 4d)$$

$$
\begin{aligned}
n_{5,1} &= fd \\
n_{1,2} &= a - b + c - d \\
n_{2,2} &= b - 2c + 3d \\
n_{3,2} &= c - 3d \\
n_{4,2} &= d
\end{aligned}
\tag{4.12}
$$

(devam)

A, B, C, D ve a, b, c, d, e, f değerleri;

$$
\begin{aligned}
A_1 &= -8C_{44}(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\
B_1 &= (-5C_{11} + 3C_{12})(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\
&\quad + 2C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{33}[4C_{44}\kappa_{11} + (e_{15} + e_{31})^2] \\
&\quad - 2C_{44}[3C_{44}\kappa_{33} + 2e_{33}(3e_{15} + e_{31})] \\
C_1 &= (-5C_{11} + 3C_{12})(C_{33}\kappa_{11} + C_{44}\kappa_{33} + 2e_{15}e_{33}) \\
&\quad + 2C_{13}[(C_{13} + C_{44})\kappa_{11} + e_{15}(e_{15} + 2e_{31})] \\
&\quad - 2C_{44}(3C_{44}\kappa_{11} + 3e_{15}^2 + e_{31}^2) \\
D_1 &= (-5C_{11} + 3C_{12})(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2) \\
A_2 &= -8C_{11}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2) \\
B_2 &= (-7C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\
&\quad + 6C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{33}[4C_{44}\kappa_{11} + 3(e_{15} + e_{31})^2] \\
&\quad - 2C_{44}[C_{44}\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + 3e_{31})] \\
C_2 &= (-7C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{11} + C_{44}\kappa_{33} + 2e_{15}e_{33}) \\
&\quad + 6C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{11} + 2e_{15}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{44}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2 + 3e_{31}^2) \\
D_2 &= (-7C_{11} + C_{12})(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2) \\
A_3 &= -4C_{11}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2)
\end{aligned}
\tag{4.13}
$$

$$
\begin{aligned}
B_3 &= (-3C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\
&\quad + 2C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{33}[2C_{44}\kappa_{11} + (e_{15} + e_{31})^2] \\
&\quad - 2C_{44}[C_{44}\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
C_3 &= (-3C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{11} + C_{44}\kappa_{33} + 2e_{15}e_{33}) \\
&\quad + 2C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{11} + 2e_{15}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{44}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2 + e_{31}^2) \\
D_3 &= (-3C_{11} + C_{12})(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2) \\
A_4 &= (C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\
&\quad - 2C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad + 2C_{33}(e_{15} + e_{31})^2 \\
&\quad - 2C_{44}[C_{44}\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\
B_4 &= (C_{11} + C_{12})(C_{33}\kappa_{11} + C_{44}\kappa_{33} + 2\,e_{15}e_{33}) \\
&\quad - 2C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{11} + 2e_{15}(e_{15} + e_{31})] \\
&\quad - 2C_{44}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2 + e_{31}^2) \\
C_4 &= (C_{11} + C_{12})(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2) \\
A_5 &= -C_{44}\kappa_{33} \\
B_5 &= -C_{11}\kappa_{33} - C_{44}\kappa_{11} - (e_{15} + e_{31})^2 \\
C_5 &= -C_{11}\kappa_{11} \\
A_6 &= C_{33}C_{44} \\
B_6 &= C_{11}C_{33} - C_{13}(C_{13} + 2C_{44}) \\
C_6 &= C_{11}C_{44} \\
A_7 &= -C_{44}e_{33} \\
B_7 &= -C_{11}e_{33} + C_{13}(e_{15} + e_{31}) + C_{44}e_{31} \\
C_7 &= -C_{11}e_{15} \\
A_8 &= -C_{44}\kappa_{33} \\
B_8 &= -C_{11}\kappa_{33} - C_{44}\kappa_{11} - (e_{15} + e_{31})^2
\end{aligned}
\tag{4.13}
$$

(devam)

$$C_8 = -C_{11}\kappa_{11}$$

$$A_9 = C_{33}C_{44}$$

$$B_9 = C_{11}C_{33} - C_{13}(C_{13} + 2C_{44})$$

$$C_9 = C_{11}C_{44}$$

$$A_{10} = -C_{44}e_{33}$$

$$B_{10} = -C_{11}e_{33} + C_{13}(e_{15} + e_{31}) + C_{44}e_{31}$$

$$C_{10} = -C_{11}e_{15}$$

$$A_{11} = (C_{13} + C_{44})\kappa_{33} + e_{33}(e_{15} + e_{31})$$

$$B_{11} = (C_{13} + C_{44})\kappa_{11} + e_{15}(e_{15} + e_{31})$$

$$A_{12} = (C_{13} + C_{44})e_{33} - C_{33}(e_{15} + e_{31})$$

$$B_{12} = C_{13}e_{15} - C_{44}e_{31}$$

$$a = C_{44}(C_{33}\kappa_{33} + e_{33}^2)$$

$$\begin{aligned} b = C_{11}(C_{13}\kappa_{33} + e_{33}^2) \\ - C_{13}[(C_{13} + C_{44})\kappa_{33} + 2e_{33}(e_{15} + e_{31})] \\ + C_{33}[C_{44}\kappa_{11} + (e_{15} + e_{31})^2] - 2C_{44}e_{31}e_{33} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c = C_{11}(C_{33}\kappa_{11} + C_{44}\kappa_{33} + 2e_{15}e_{33}) \\ - C_{13}[(C_{13} + 2C_{44})\kappa_{11} + 2e_{15}(e_{15} + e_{31})] \\ + C_{44}e_{31}^2 \end{aligned}$$

$$d = C_{11}(C_{44}\kappa_{11} + e_{15}^2)$$

$$e = 2C_{44}$$

$$f = C_{11} - C_{12}$$

(4.13) (devam)

(4.11)'de görülen I_{inMJ} integrallerinin kapalı formdaki tam analitik çözümleri bunun için sağlanan denklemlerle gerçekleştirilir [24]. Hesaplamalar çok uzun ve karmaşık olduğundan burada verilmeyecektir.

4.4 Elektromekanik Özelliklerin Tahmininde Mikromekanik Yaklaşımlar

Direkt yaklaşımda N adet bileşene sahip bir piezoelektrik kompozitin bileşenleri cinsinden kütlesel özellikleri şu şekilde tahmin edilir [19,28]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \sum_{r=2}^{N} c_r(\mathbf{E}_r - \mathbf{E}_1)\mathbf{A}_r \tag{4.14}$$

Burada kalın harfler 9×9 matrisleri ya da 9×1 vektörleri, c_r bileşenin hacimsel oranını, r indisi bileşen numarasını, $r = 1$ ise matris malzemesini göstermektedir. $\boldsymbol{A}_r$ derişim tensörüdür ve bulunmasında çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir [29,30].

4.4.1 Mori-Tanaka yaklaşımı

Bu yaklaşımda derişim tensörü kompozitin seyreltik olduğu varsayılarak bulunur.

$$\mathbf{A}_r = \mathbf{A}_r^{dil}\left[c_1\mathbf{I} + \sum_{r=2}^{N} c_r\mathbf{A}_r^{dil}\right]^{-1} \tag{4.15}$$

$\boldsymbol{A}_r^{dil}$ seyreltik derişim tensörüdür ve şu şekilde verilir

$$\mathbf{A}_r^{dil} = \left[\mathbf{I} + \mathbf{S}_r{\mathbf{E}_1}^{-1}(\mathbf{E}_r - \mathbf{E}_1)\right]^{-1} \tag{4.16}$$

$\mathbf{I}$ birim tensör, $\mathbf{S}_r$ ise Eshelby tensörüdür. Mori-Tanaka yaklaşımında $\mathbf{S}_r$ bulunurken matrisin malzemesinin elektromekanik özellikleri kullanılır [17].

4.4.2 Kendi içinde tutarlı yaklaşım

Bu yaklaşımda derişim tensörü şu şekildedir [31]:

$$\mathbf{A}_r = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_r\mathbf{E}^{-1}(\mathbf{E}_r - \mathbf{E})]^{-1} \tag{4.17}$$

Burada $\mathbf{E}$ kompozitin değeri bilinmeyen elektromekanik modülüdür, $\mathbf{S}_r$ bulunurken ise $\mathbf{E}$ modülünün özelliklerinin kullanılması gerekmektedir. Bu yaklaşımın çözümünde $\mathbf{E}$ hem (4.14) hem de (4.17)'de bulunduğundan iteratif yöntemler kullanılır.

4.4.3 Odegard yaklaşımı

Burada derişim tensörünün tayini için Mori-Tanaka ile kendi içinde tutarlı yöntemlerin arasında bir yaklaşım kullanılır.

$$\mathbf{A}_r = \left[\mathbf{I} + \mathbf{S}_r \mathbf{E_0}^{-1}(\mathbf{E}_r - \mathbf{E_0})\right]^{-1} \tag{4.18}$$

$\mathbf{E_0}$ modülünün takviyenin hemen etrafını saran matrisin modülü olduğu kabul edilir ve $\mathbf{S}_r$ bu modül kullanarak bulunur.

$$E^0_{iJKl} = E^1_{iJKl} \frac{1 + \sum_{r=2}^{N} \eta^r_{iJKl} c_r}{1 - \sum_{r=2}^{N} \eta^r_{iJKl} c_r} \tag{4.19}$$

ve

$$\eta^r_{iJKl} = \frac{E^r_{iJKl} - E^1_{iJKl}}{E^r_{iJKl} + E^1_{iJKl}} \tag{4.20}$$

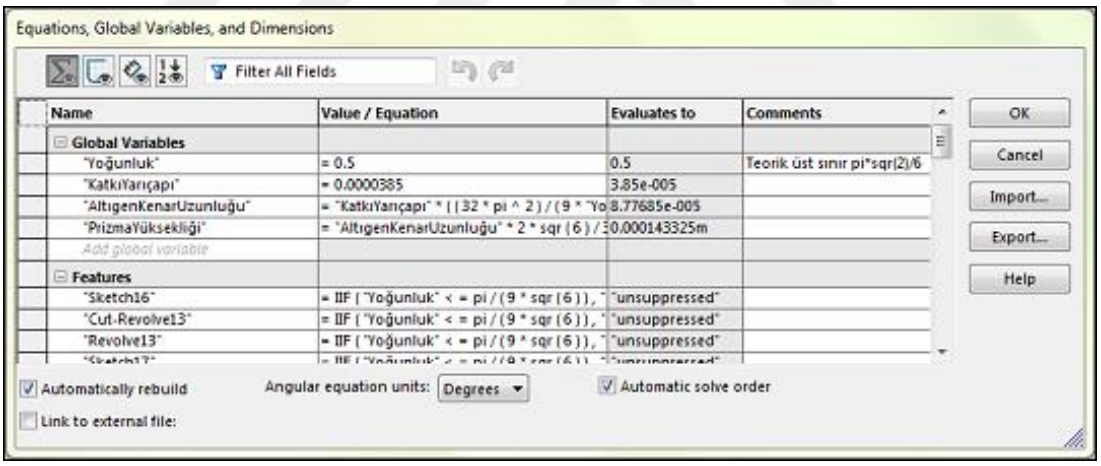
Kullanılan E^0_{iJKl} Halpin-Tsai sınırlarının piezoelektrik malzemeler ve birden fazla bileşen için genişletilmiş halidir.

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Burada piezoelektrik/akrilik bir kompozitin çeşitli birim kafes yapılar kullanılarak modellenmesi ve sonlu elemanlar analiziyle kütlesel özelliklerinin bulunması incelenecektir.

5.1 Birim Kafes Yapılar

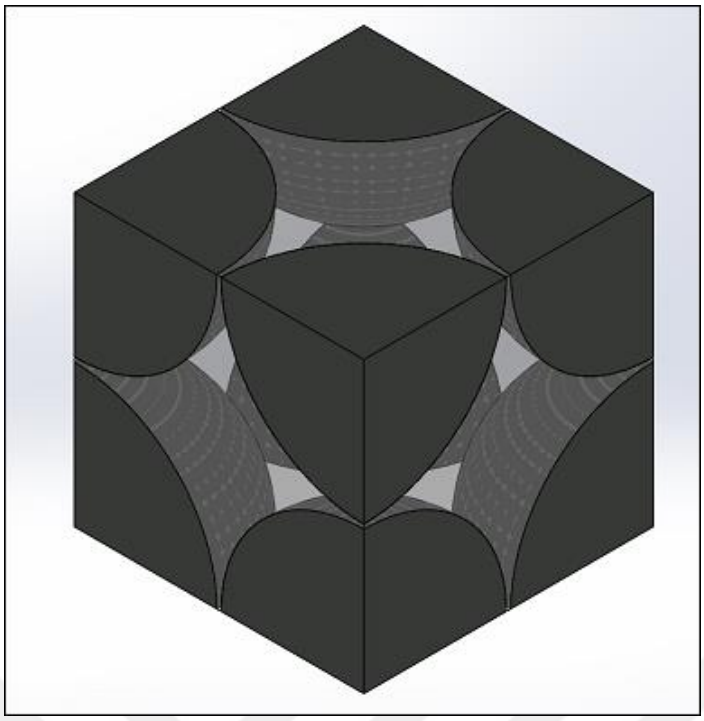
İncelenecek olan her bir birim kafes yapısı ayrı ayrı SOLIDWORKS programında parametrik olarak modellenmiştir (Şekil 5.1). Böylece katkının farklı hacimsel yüzdelerde analizinin kolaylıkla yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Programa girilecek yoğunluk değeri değiştirildiğinde piezoelektrik seramiğin çevresindeki akrilik miktarı kendiliğinden artıp azalmak suretiyle uygun şekle gelir.



Şekil 5.1 : Hegzagonal sıkı paket için parametreler.

5.1.1 Basit kübik yapı

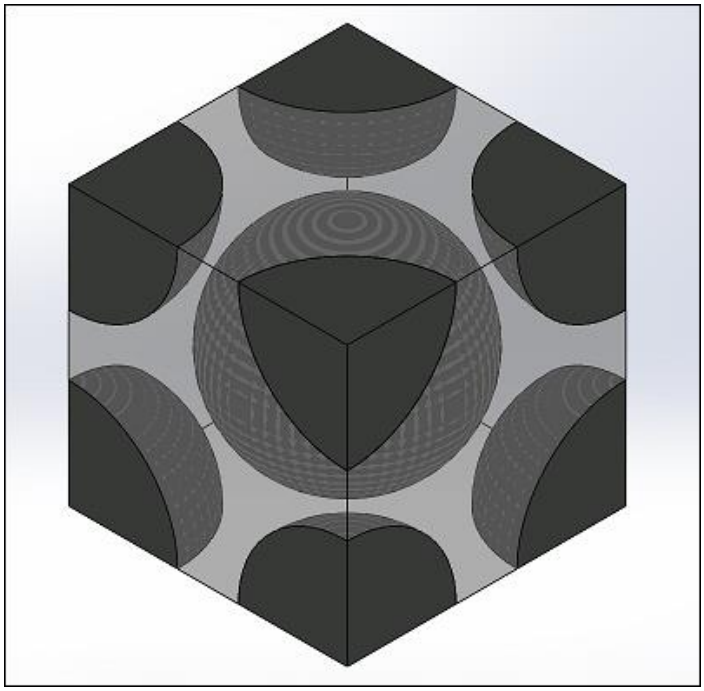
Bu yapıda katkı maddesinin teorik olarak alabileceği maksimum hacimsel oran %52.3'tür ($\pi/6$). %50 yoğunluk için model Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Basit kübik yapı.

5.1.2 Hacim merkezli kübik yapı

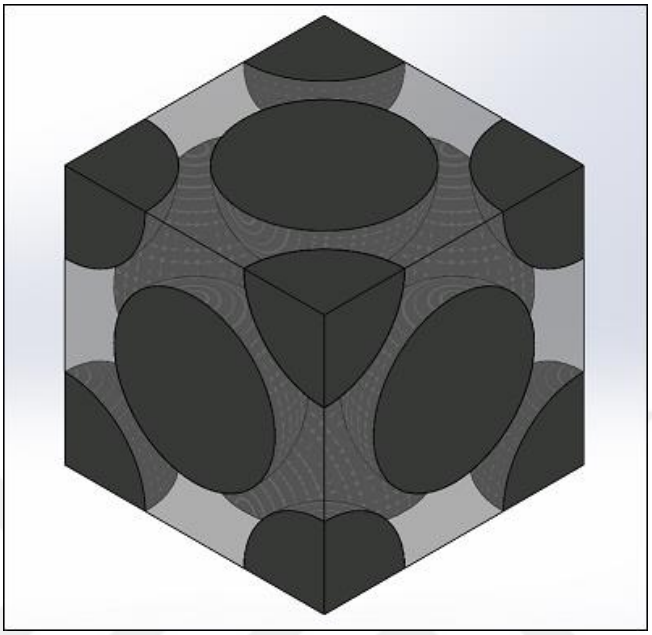
Bu yapıda katkı maddesinin teorik olarak alabileceği maksimum hacimsel oran %68.0'dır ($\pi\sqrt{3}/8$). %50 yoğunluk için model Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3 : Hacim merkezli kübik yapı.

5.1.3 Yüzey merkezli kübik yapı

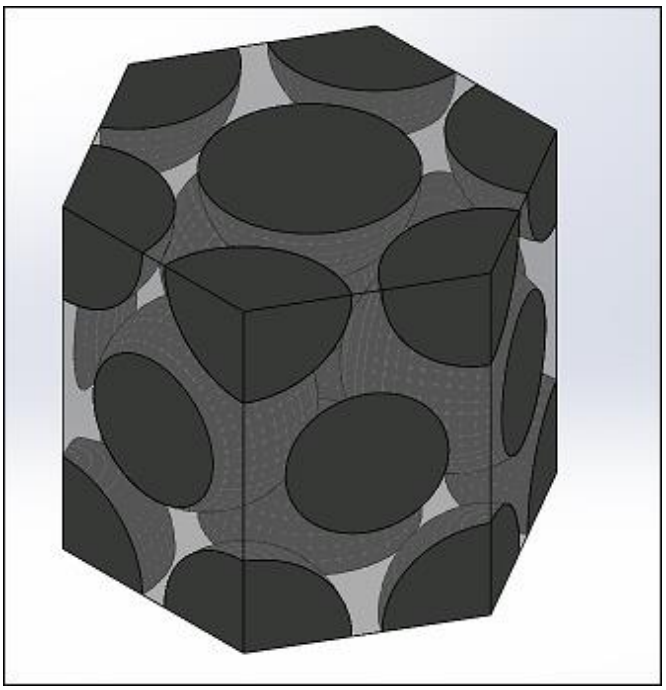
Bu yapıda katkı maddesinin teorik olarak alabileceği maksimum hacimsel oran %74.0'dır ($\pi\sqrt{2}/6$). %50 yoğunluk için model Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4 : Yüzey merkezli kübik yapı.

5.1.4 Hegzagonal sıkı paket yapı

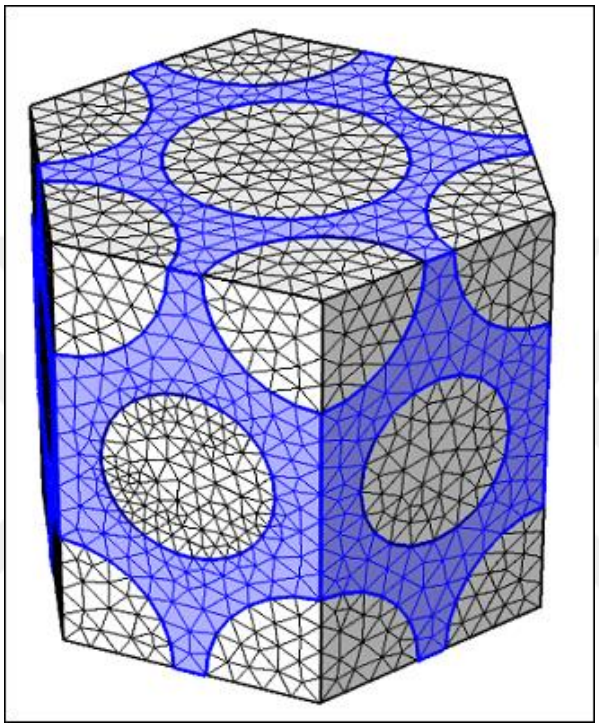
Bu yapıda katkı maddesinin teorik olarak alabileceği maksimum hacimsel oran %74.0'dır ($\pi\sqrt{2}/6$). %50 yoğunluk için model Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5 : Hegzagonal sıkı paket yapı.

5.2 Sonlu Elemanlar Modeli

PZT/akrilik kompozitinin kütlesel özelliklerini bulabilmek için ticari bir yazılımda temsili bir hacim elemanı kullanılmıştır (Şekil 5.6). Böyle bir temsili elemanın vereceği sonuçların doğruluğu yüksek olacaktır [19,32]. Bu modellemeden elde edilecek hacimsel (efektif) ortalamalar bütün kompozitin özellikleri ile parallellik gösterecektir [33].



Şekil 5.6 : Hegzagonal yapılı kompozitin temsili hacim elemanı.

Herhangi bir hacimsel yüzdede piezoelektrik modülün birbirinden farklı 11 elemanını bulabilmek için çeşitli sınır koşulu setleri altında 6 farklı analiz yaptırmak gereklidir. Bu analizler 4 modelin her biri için çeşitli hacimsel yüzdelerde gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 Sınır koşulları

Kompozitin kütlesel elastik, piezoelektrik ve dielektrik katsayılarının bulunabilmesi için çeşitli sınır koşullarına ihtiyaç duyulur. (4.8)'de verilen yapısal denklemler kullanılarak gerekli sınır koşulları elde edilir. Bu koşullar ve hangi özellikleri bulmak için kullanıldıkları kübik model için Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Kompozitin özelliklerini bulmak için uygulanacak sınır koşulları [32].

Özellik	(-1,0,0)	(1,0,0)	(0,-1,0)	(0,1,0)	(0,0,-1)	(0,0,1)
C_{11}, C_{12}	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$u = \varepsilon_0,$ $\varphi = 0$	$v = 0,$ $\varphi = 0$	$v = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$
C_{13}, C_{33}	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$v = 0,$ $\varphi = 0$	$v = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$	$w = \varepsilon_0,$ $\varphi = 0$
C_{44}	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $v = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $v = 2\varepsilon_0,$ $\varphi = 0$
C_{66}	$v = 0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$v = 0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 2\varepsilon_0,$ $w = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$
e_{15}, κ_{11}	$u = 0,$ $\varphi = 0$	$u = 0,$ $\varphi = V_0$	$v = 0$	$v = 0$	$w = 0$	$w = 0$
$e_{31}, e_{33}, \kappa_{33}$	$u = 0$	$u = 0$	$v = 0$	$v = 0$	$w = 0,$ $\varphi = 0$	$w = 0,$ $\varphi = V_0$

Burada (-1,0,0) 1-yönüne dik eksi yöndeki yüzeyi, (1,0,0) 1-yönüne dik artı yöndeki yüzeyi, (0,-1,0) 2-yönüne dik eksi yöndeki yüzeyi, (0,1,0) 2-yönüne dik artı yöndeki yüzeyi, (0,0,-1) 3-yönüne dik eksi yöndeki yüzeyi, (0,0,1) 3-yönüne dik artı yöndeki yüzeyi göstermektedir. Her bir özelliği bulmak için Çizelge 5.1'de o özelliğe denk gelen sınır koşulları kullanılarak gerilme, birim şekil değişimi, elektrik alan ya da elektrik yer değiştirmenin hacimsel ortalaması değerlendirilir. Elde edilen sonuçlarla özellikler hesaplanır. Bu özelliklerin formülleri şu şekilde olur:

$$C_{11} = \frac{\overline{\sigma}_{11}}{\overline{\varepsilon}_{11}}, C_{12} = \frac{\overline{\sigma}_{22}}{\overline{\varepsilon}_{11}}, C_{13} = \frac{\overline{\sigma}_{11}}{\overline{\varepsilon}_{33}}, C_{33} = \frac{\overline{\sigma}_{33}}{\overline{\varepsilon}_{33}}, C_{44} = \frac{\overline{\sigma}_{23}}{2\overline{\varepsilon}_{23}}, C_{66} = \frac{\overline{\sigma}_{12}}{2\overline{\varepsilon}_{12}} \quad (5.1)$$

$$\kappa_{11} = \frac{\overline{D}_1}{\overline{E}_1}, \kappa_{33} = \frac{\overline{D}_3}{\overline{E}_3} \quad (5.2)$$

$$e_{31} = -\frac{\overline{\sigma}_{11}}{\overline{E}_3}, e_{33} = -\frac{\overline{\sigma}_{33}}{\overline{E}_3}, e_{15} = -\frac{\overline{\sigma}_{23}}{\overline{E}_3} \quad (5.3)$$

6. SAYISAL MODELLEME

Bu bölümde daha önce yapılmış olan deneylerin düzeneğinin ANSYS APDL üzerinde modellenmesi anlatılacaktır [34].

6.1 ANSYS Üzerinde Modelleme Aşamaları

i. Analiz çeşidi olarak yapısal ve elektrik seçilir.

ii. Element türleri olarak SOLID45 ve SOLID5 seçilir.

iii. Alüminyum ve piezoelektrik kompozit boyanın malzeme özelliklerinin girişi yapılır. Bunun için gerekli kodlar bir sonraki başlıkta verilecektir.

iv. 0.15x0.03x0.001 boyutlarında alüminyum plakanın geometrisi oluşturulur.

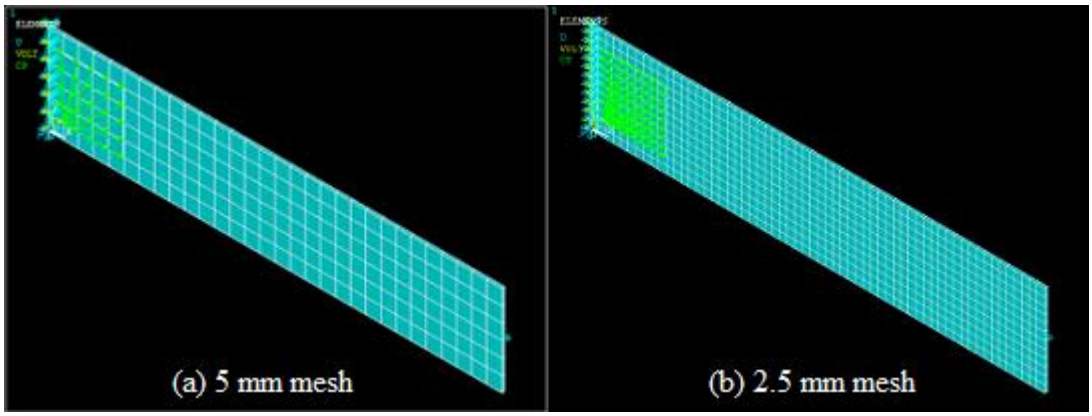
v. 0.02x0.02x0.0003 boyutlarında boyanın geometrisi oluşturulur.

vi. Alüminyum plakanın element tipi SOLID45, boyanın SOLID5 olarak seçilir.

vii. Mesh boyutu girilir ve mesh işlemi gerçekleştirilir.

viii. Boyanın üst ve alt yüzeylerindeki düğümler kendi içlerinde birbirine volt serbestlik derecesinde çiftlenir.

Model bir ucundan ankastre mesnetlenip diğer ucundan yer değiştirme uygulanarak geçici rejim çözümü yapılır. Ortaya çıkan model aşağıda görülebilir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 : Piezoelektrik sensör deney düzeğinin modeli.

6.2 Malzeme Girişi İçin Gerekli Kodlar

Aşağıdaki kodlarda parantezlerin ilgili malzeme özellikleriyle değiştirilmesi ile gerekli kodlar elde edilir.

MP,EX,1,(Alüminyum elastiklik modülü)

MP,DENS,1,(Alüminyum yoğunluk)

MP,NUXY,1,(Alüminyum Poisson oranı)

MP,DENS,2,(Kompozit yoğunluk)

EMUNIT,EPZRO,8.85E-12

MP,PERX,(Kompozit κ_{11})

MP,PERY,2,(Kompozit κ_{11})

MP,PERZ,2,(Kompozit κ_{33})

TB,PIEZ,2

TBDATA,3,(Kompozit e_{31})

TBDATA,6,(Kompozit e_{31})

TBDATA,9,(Kompozit e_{33})

TBDATA,14,(Kompozit e_{15})

TBDATA,16,(Kompozit e_{15})

TB,ANEL,2

TBDATA,1,(Kompozit C_{11},C_{12},C_{13})

TBDATA,7,(Kompozit C_{11},C_{13})

TBDATA,12,(Kompozit C_{33})

TBDATA,16,(Kompozit C_{66})

TBDATA,19,(Kompozit C_{44})

TBDATA,21,(Kompozit C_{44})

7. MALZEME VE YÖNTEM

Burada önceden yapılan deneyin adımları ve bu çalışmada kullanılacak malzeme ve yöntem açıklanacaktır.

7.1 Deney Adımları

Daha önce yapılan deneyde kompozit boya malzemesinin üretimi, kutuplaması ve ölçümü gerçekleştirilmiştir [34].

7.1.1 Üretim

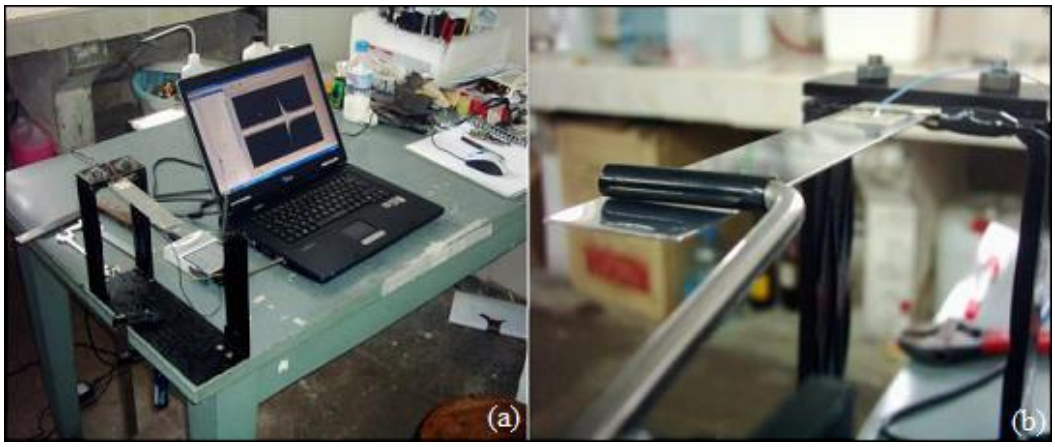
Önce PZT tozu kristalliğini yükseltmek amacıyla sinterlenmiştir. Sonrasında ilkin seramik bir havanda, sonra da mekanik bir öğütücüde öğütülmüştür. Öğütülen PZT 200 mesh elek kullanarak 77 μm çapa elenmiştir. Boya ağırlık yüzdesi %80 PZT, %20 akrilik olacak şekilde (hacmen %38.63 PZT) hassas terazi ve şırınga yardımıyla ölçülüp karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu karışım; 30 mm genişlik, 200 mm uzunluk ve 1 mm kalınlığa sahip alüminyum sacların üzerine 0.3 mm kalınlıkta sürülmüştür.

7.1.2 Kutuplama

Gümüş iletken boya yardımıyla bir yüzey elektrodu üst yüzey için hazırlanıp uygulanmıştır. Yapılan deneylerde numuneler elektrik alana dayanamayarak hasar gördüğü için 750 V'tan (2.5 kV/mm) daha yüksek değerlere çıkılamamıştır. 5-45 dakika arasındaki sürelerde kutuplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

7.1.3 Ölçüm

Kutuplanmış numuneler, Şekil 7.1'de görülebilecek düzenek vasıtasıyla alüminyum plakanın ucuna 3 cm yer değişimi uygulamak suretiyle teste tabi tutulmuştur. Toplanan sinyallerle voltaj değerleri ölçülmüştür.



Şekil 7.1 : Deney düzeneği; (a) genel bakış, (b) yer değiştirme uygulayan kol.

7.2 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Piezoelektrik malzeme olarak PZT (APC 856), matris malzemesi olarak ise akrilik kullanılmıştır. Bu malzemelerin hesaplamalarında kullanılacak özellikler Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : APC 856 malzeme özellikleri [8].

Özellik	Değer
Bağıl geçirgenlik, K^T	4100
Elektromekanik çift katsayısı, k_p	0.65
Elektromekanik çift katsayısı, k_{31}	0.36
Piezoelektrik yük sabiti, d_{15} (10^{-12} C/N)	710
Piezoelektrik yük sabiti, $-d_{31}$ (10^{-12} C/N)	260
Piezoelektrik yük sabiti, d_{33} (10^{-12} C/N)	620
Piezoelektrik gerilim sabiti, g_{33} (10^{-3} Vm/N)	18.5
Elastiklik modülü, Y^E_{11} (10^{10} N/m^2)	5.8
Elastiklik modülü, Y^E_{33} (10^{10} N/m^2)	4.5
Poisson oranı, ν_{xy}	0.39
Poisson oranı, ν_{xz}	0.39
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	7.5

Çizelge 7.2 : Akrilik malzeme özellikleri [35].

Özellik	Değer
Elastiklik modülü, Y (GPa)	3.2
Poisson oranı, ν	0.35
Bağıl geçirgenlik, κ/κ_0	3.25
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	1.18

Dikkat edilmelidir ki bu piezoelektrik değerler sabit gerilme altında yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. Yapısal denklemler bu durumda

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\\ D_1\\ D_2\\ D_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31}\\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31}\\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33}\\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & d_{15} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \kappa_1^T & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \kappa_1^T & 0\\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_3^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\\ E_1\\ E_2\\ E_3\end{bmatrix} \quad (7.1)$$

şeklinde olur [36,37]. Burada

$$s_{11}=\frac{1}{Y_{11}^E}, s_{12}=-\frac{\nu_{xy}}{Y_{11}^E}, s_{13}=-\frac{\nu_{xz}}{Y_{33}^E}, s_{33}=\frac{1}{Y_{33}^E}, s_{66}=\frac{2(1+\nu_{xy})}{Y_{11}^E} \quad (7.2)$$

$$\kappa_1^T=8.85*10^{-12}K^T, \kappa_3^T=\frac{d_{33}}{g_{33}} \quad (7.3)$$

Bu çalışmada kullanılan denklemler sabit birim şekil değişimi altında ölçülmüş malzeme değerlerini gerektirdiğinden **s**, **d** ve $\boldsymbol{\kappa}^T$ matrislerinden dönüşüm yapılarak **C**, **e** ve **κ** matrislerine geçilmesi gerekir.

$$\mathbf{C}=\mathbf{s}^{-1} \quad (7.4)$$

$$\mathbf{e}=\mathbf{d}\mathbf{s}^{-1} \quad (7.5)$$

$$\boldsymbol{\kappa}=\boldsymbol{\kappa}^T-\mathbf{d}\mathbf{s}^{-1}\mathbf{d}^t \quad (7.6)$$

Akriliğin katsayıları ise

$$C_{11}=\frac{Y(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, C_{12}=\frac{Y\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, C_{44}=\frac{Y}{(1+\nu)} \quad (7.7)$$

ile bulunur.

Sonuç olarak elde edilen piezoelektrik özellikler Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3 : Piezoelektrik modül değerleri.

Özellik	APC 856	Akrilik
C_{11} (GPa)	148	5.14
C_{12} (GPa)	106	2.77
C_{13} (GPa)	98.2	2.77
C_{33} (GPa)	121	5.14
C_{44} (GPa)	20.6	2.37
C_{66} (GPa)	20.9	2.37
e_{15} (C/m^2)	14.64	0
e_{31} (C/m^2)	-5.17	0
e_{33} (C/m^2)	23.90	0
κ_1/κ_0	2925.6	3.25
κ_3/κ_0	1808.5	3.25

8. VERİLER VE TARTIŞMA

8.1 Analitik Çözümler

Piezoelektrik bir kompozitin analitik yaklaşımlar vasıtasıyla kütlesel özelliklerinin bulunabilmesi için bütün hesaplamalarda gereken ilk ve en önemli koşul Eshelby tensörünün bulunması olmuştur. 0-3 bağlantılı piezoelektrik kompozit için bu tensörün elemanlarının içerdiği integrallerin kapalı form çözümleri MS Excel'de durum çözümlemesi yapılarak her bir mikromekanik model için başarıyla elde edilmiştir.

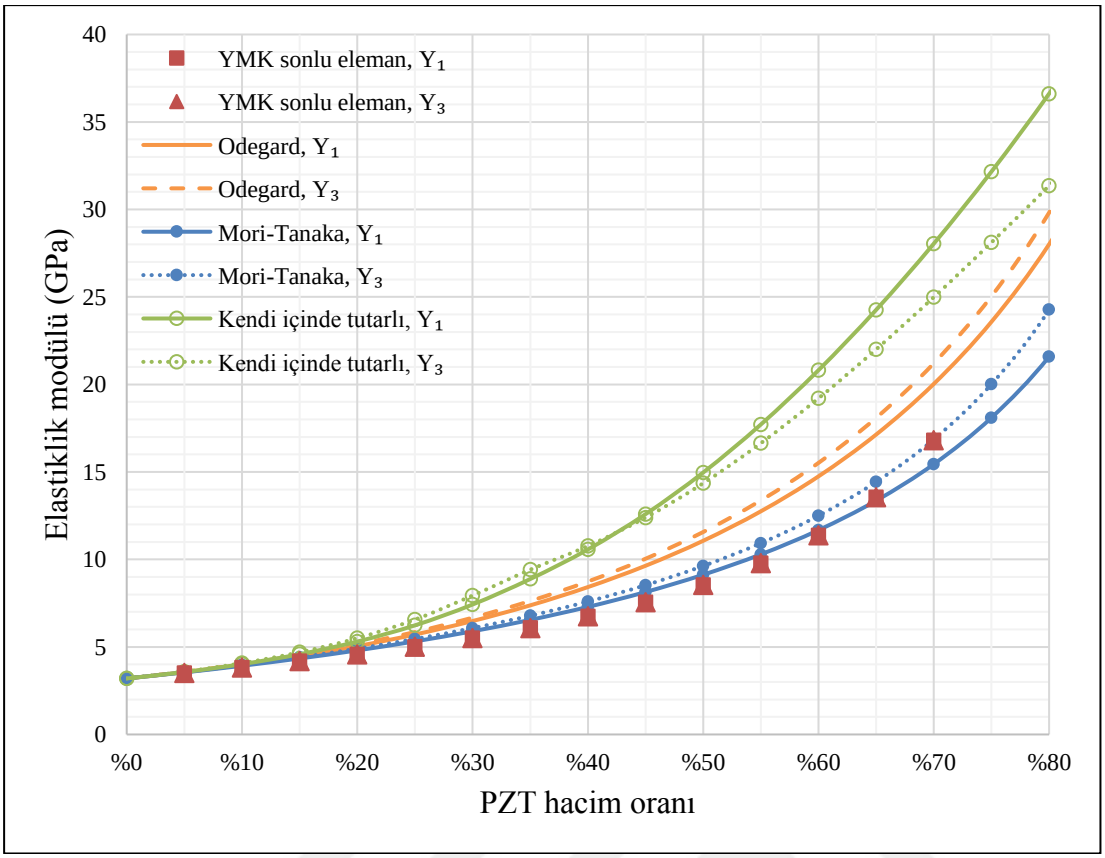
Bulunan Eshelby tensörlerinin yardımıyla Mori-Tanaka ve Odegard yöntemleri için bileşenlerin alabileceği hacimsel yüzdelere bağlı olarak özelliklerinin grafikleri, mikromekanik modeller uygulanarak başarıyla çizdirilmiştir. Ancak kendi içinde tutarlı yöntemin çözümü her farklı kompozit yüzdesi için, Eshelby tensörünün değeri 0 olmayan birbiriyle bağlantılı 25 elemanının iterasyonla bulunmasını gerektirmiştir. Bunun için MS Excel'de iterasyon makrosu yazılarak her farklı yüzde için ayrı ayrı Eshelby tensörleri bulunup bunlarla kendi içinde tutarlı yöntemin de grafiği başarıyla çizdirilmiştir.

8.1.1 İki bileşenli çözüm

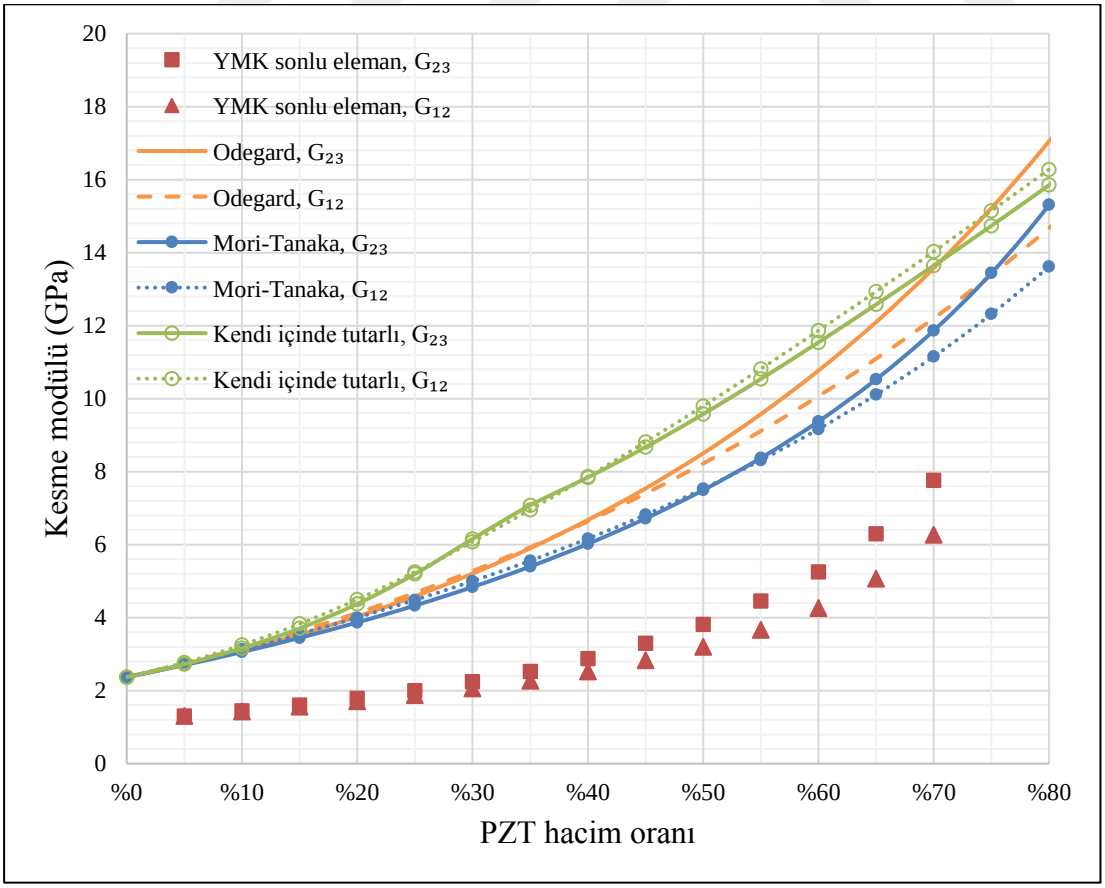
Tüm sonuçların hacimsel yüzdelere göre grafikleri aşağıdaki bölümde anlatılacak olan sonlu elemanlar yönteminden de alınan sonuçla birlikte elastiklik modülleri, kesme modülleri, piezoelektrik katsayılar ve dielektrik katsayılar için sırasıyla Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te verilmiştir.

8.1.2 Boşluklu çözüm

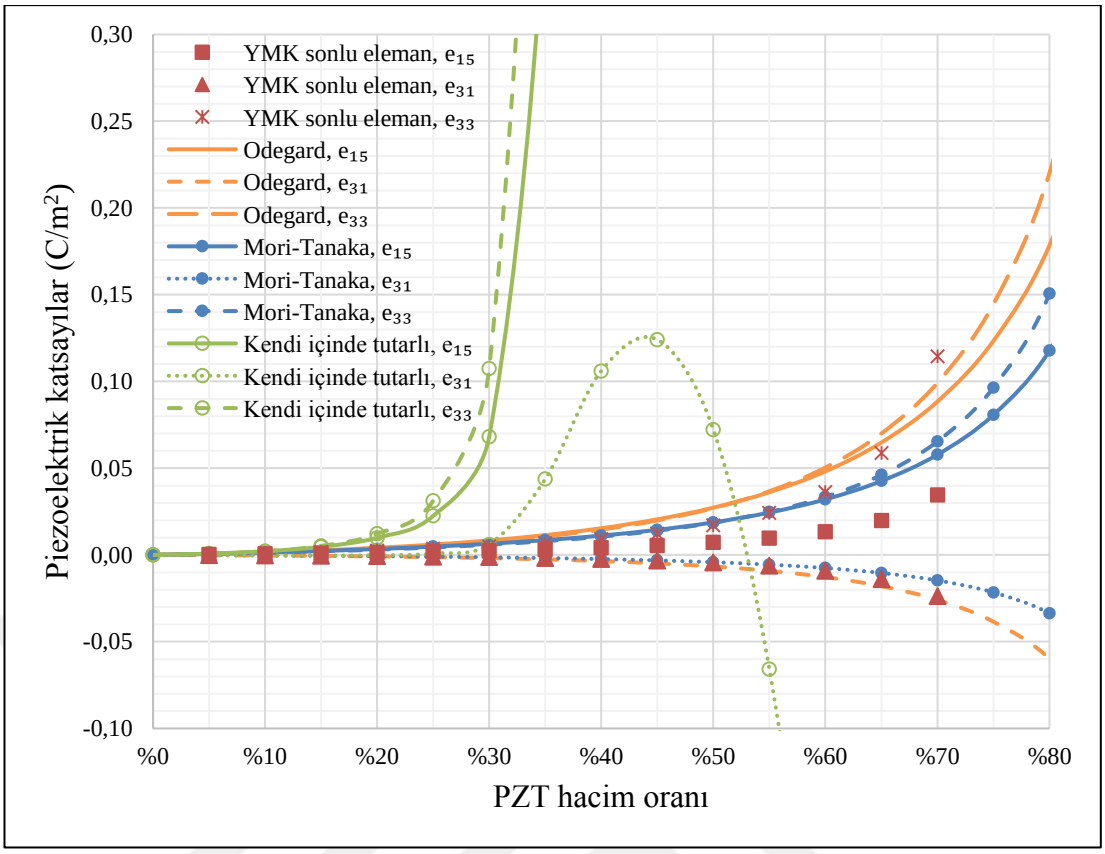
Yapılan çözümlerin tamamı kompozitte boşluklu yapı olma durumu da göz önüne alınarak, yani boşluğu da içeren 3 bileşenli bir kompozit düşünülerek genişletilmiştir. Bu çözümlemelerden de başarıyla sonuç alınmıştır. Bunların sonuçları %18 boşluk durumu örneği için Şekil 8.5, Şekil 8.6, Şekil 8.7 ve Şekil 8.8'de verilmiştir.



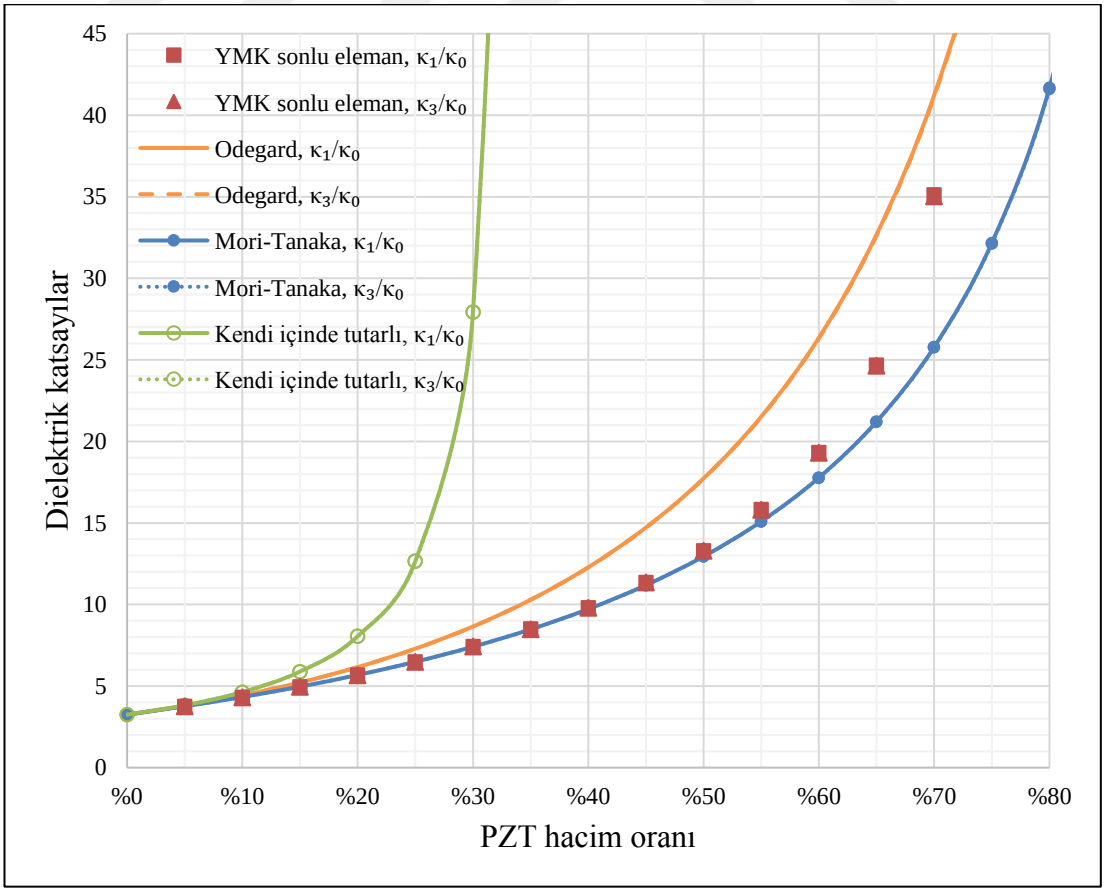
Şekil 8.1 : Kompozitin elastiklik modüllerinin katkı oranı ile değişimi.



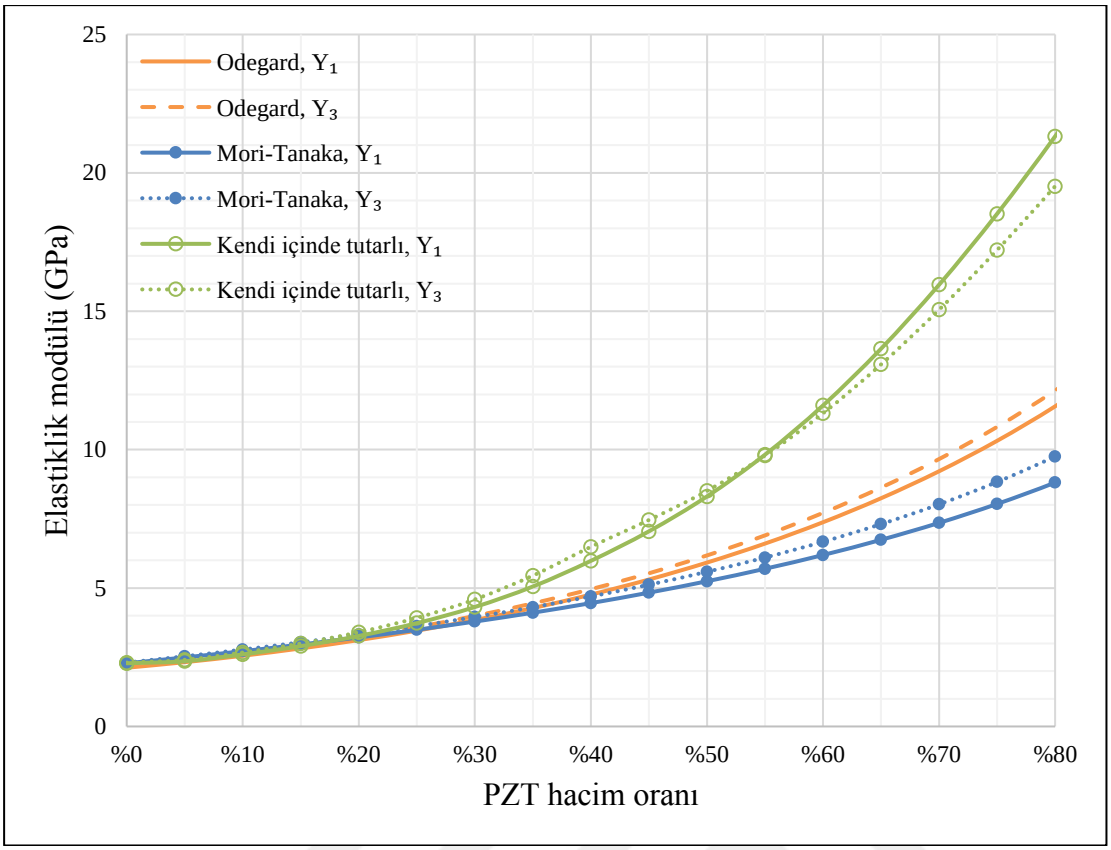
Şekil 8.2 : Kompozitin kesme modüllerinin katkı oranı ile değişimi.



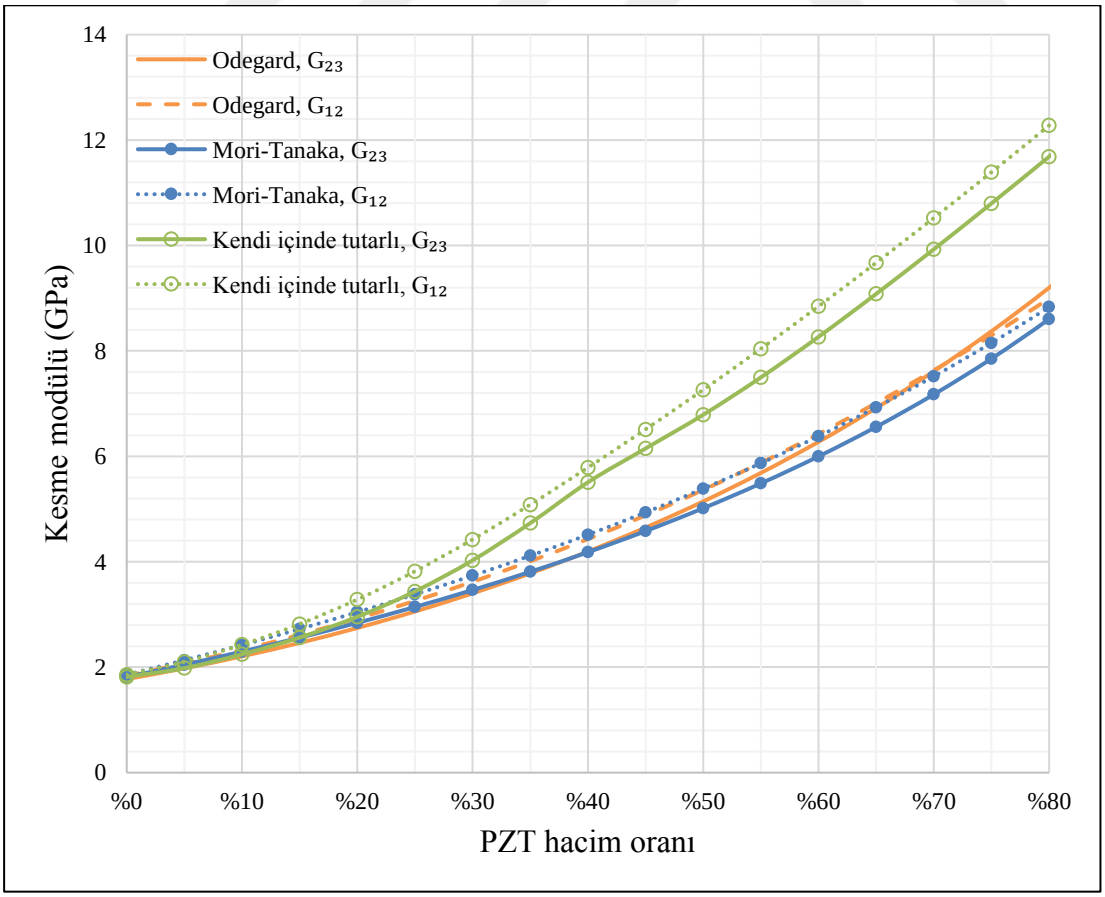
Şekil 8.3 : Kompozitin piezoelektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi.



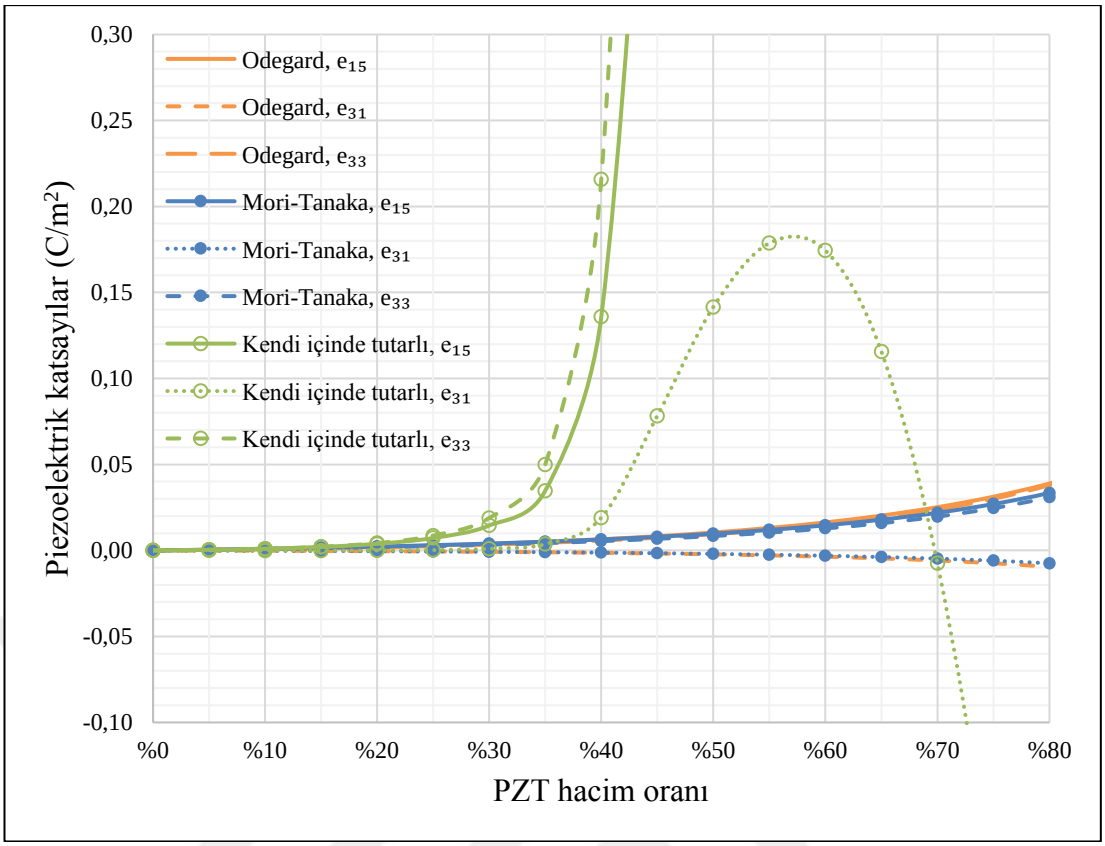
Şekil 8.4 : Kompozitin dielektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi.



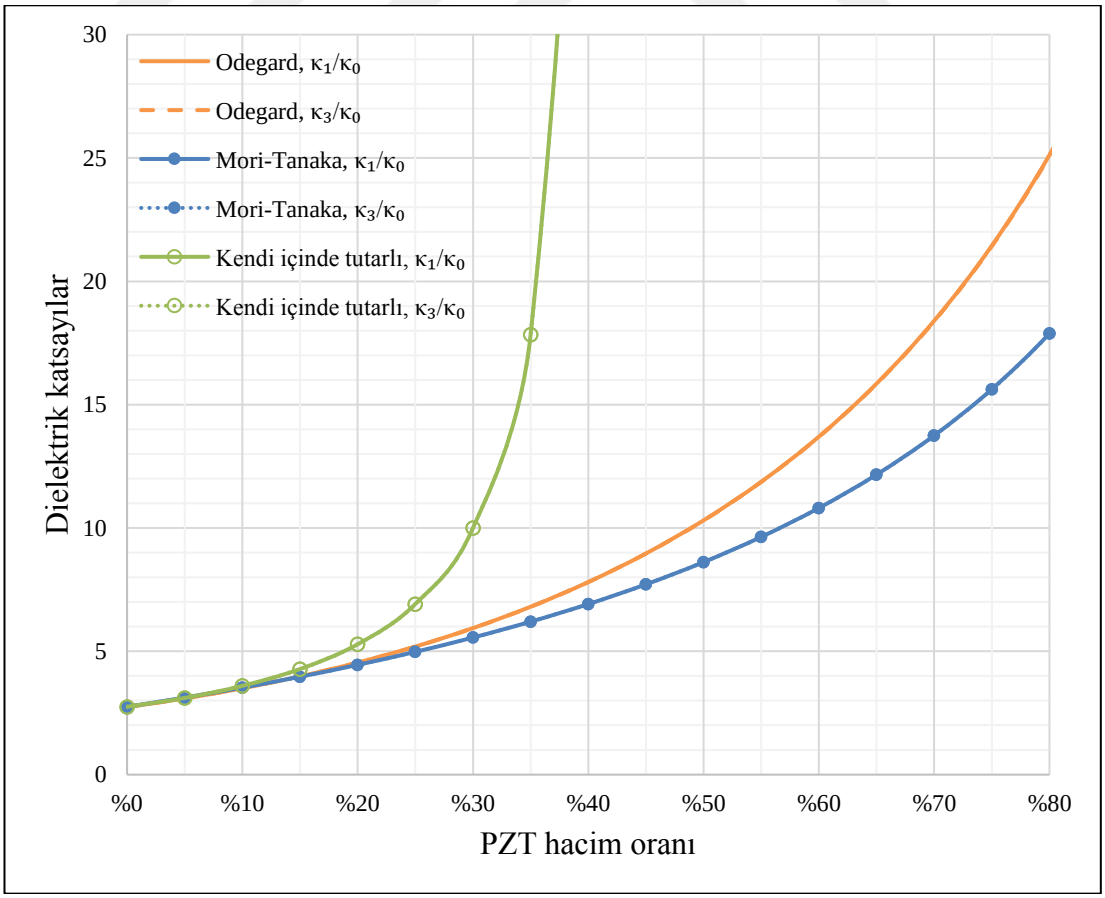
Şekil 8.5 : Boşluklu kompozitin elastiklik modüllerinin katkı oranı ile değişimi.



Şekil 8.6 : Boşluklu kompozitin kesme modüllerinin katkı oranı ile değişimi.



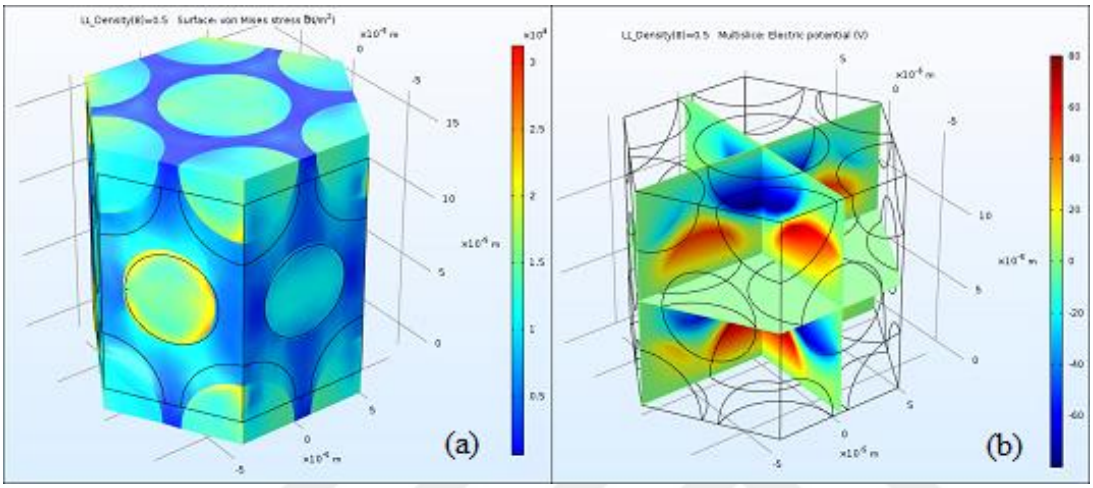
Şekil 8.7 : Boşluklu kompozitin piezoelektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi.



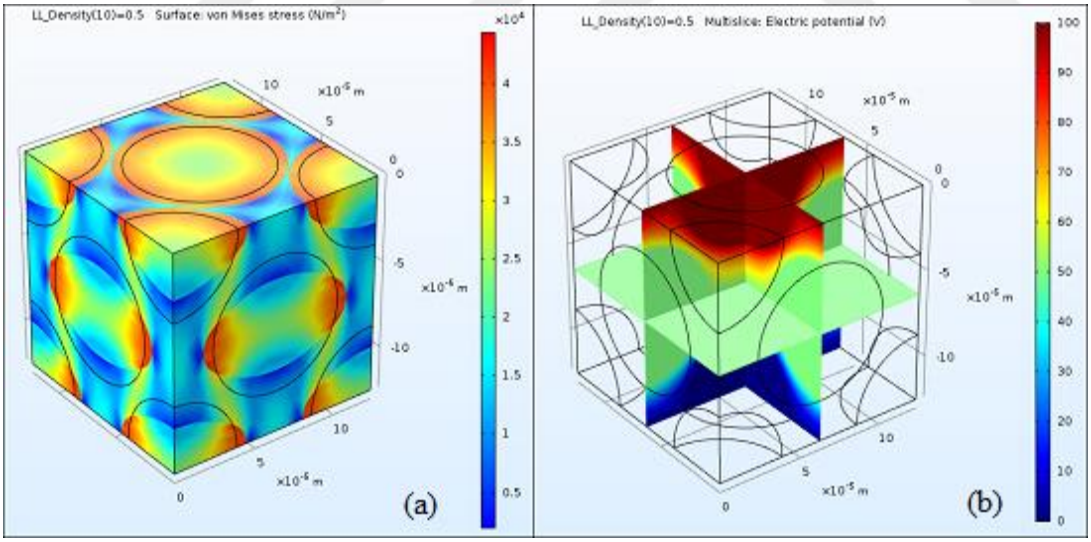
Şekil 8.8 : Boşluklu kompozitin dielektrik katsayılarının katkı oranı ile değişimi.

8.2 Sonlu Eleman Analizi

Beşinci kısımda gösterilmiş olan 4 farklı kafes yapısı için model ve uygun sınır koşulları uygulanmış, sonuçlar başarılı bir biçimde elde edilmiştir. Örnek olarak %50 hacim yüzdesinde Şekil 8.9'da HSP yapının C_{13} ve C_{33} özelliklerini bulmak için yapılan analizin; Şekil 8.10'da ise YMK yapının e_{31}, e_{33} ve κ_{33} özelliklerini bulmak için yapılan analizin görsel sonuçları verilmiştir.



Şekil 8.9 : HMK analizi; (a) gerilme, (b) elektrik potansiyel.

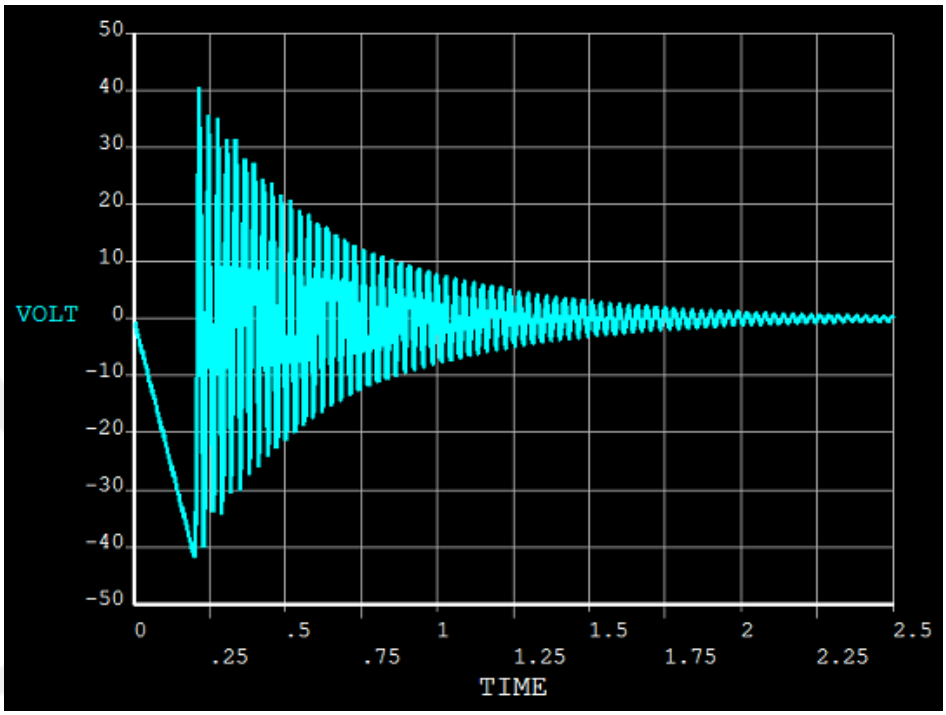


Şekil 8.10 : YMK analizi; (a) gerilme, (b) elektrik potansiyel.

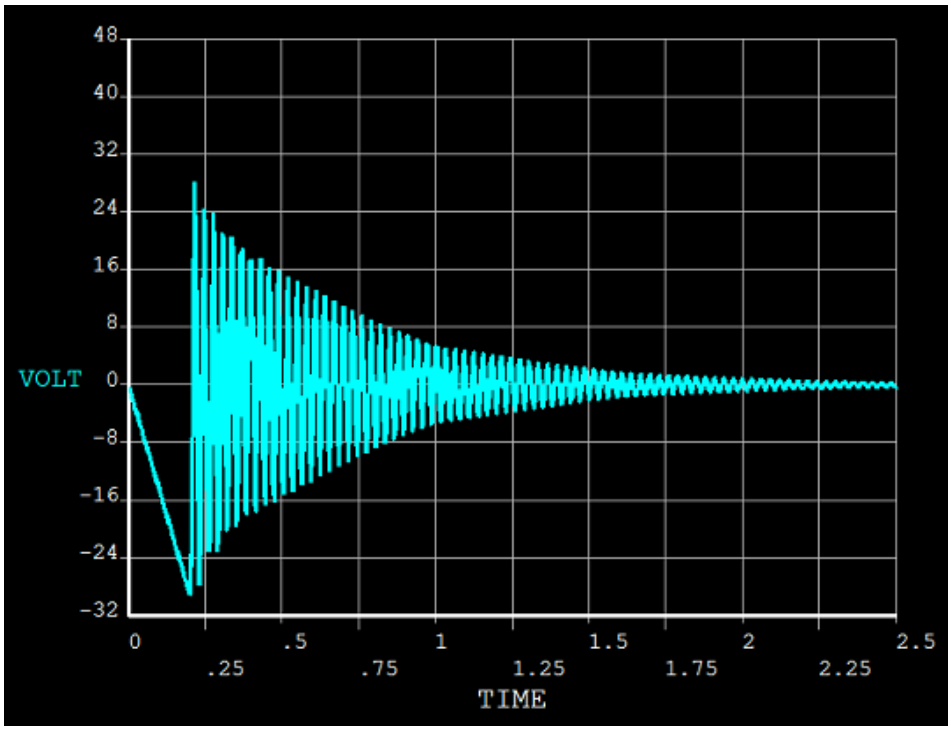
8.3 Deney Düzeneği Modellemesi

Altıncı bölümde anlatıldığı şekilde ANSYS program üzerinde daha önceden yapılan deneyin modellemesi başarıyla tamamlanarak serbest titreşim hareketinden ötürü oluşan voltaj çıktısı alınmıştır. Burada malzeme özellikleri olarak analitik yöntemlerle elde edilmiş olan kompozitin özellikleri kullanılmıştır. Deney yapılırken ideal

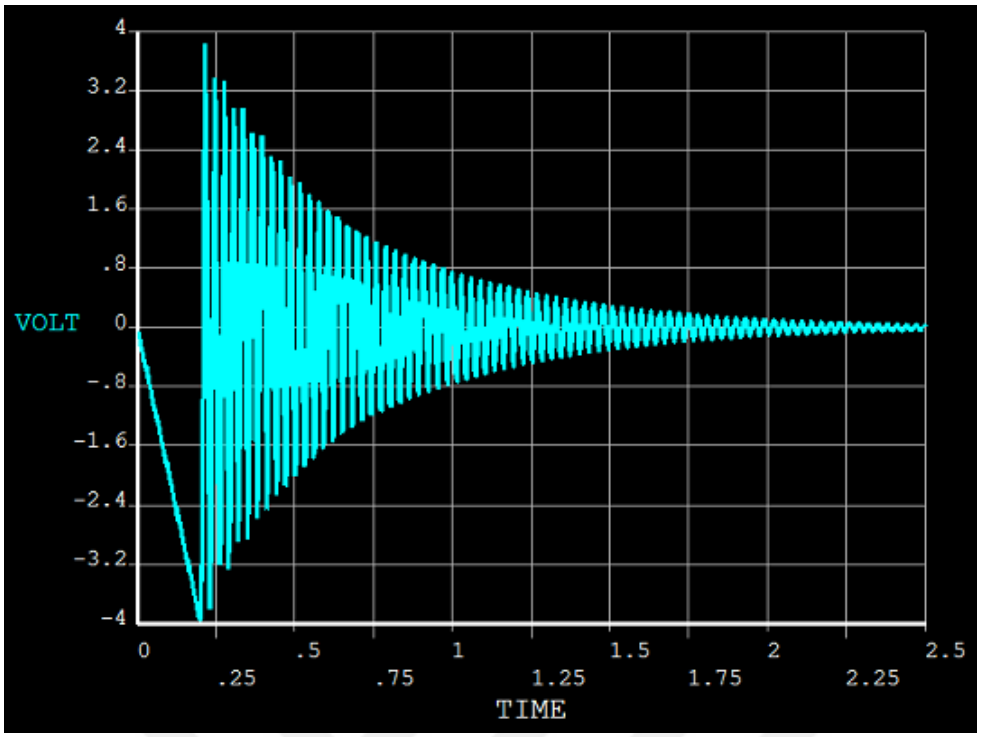
kutuplanma voltajına çıkılamadığı göz önüne alınarak kompozitin içindeki PZT'nin piezo özellikleri 10 kat indirgenip ayrıca bu durum için de model çözülmüştür. Aynı prosedür boşluk bulunma durumu için de yine analitik yöntemden elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 8.11, Şekil 8.12, Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'te gösterilmiştir.



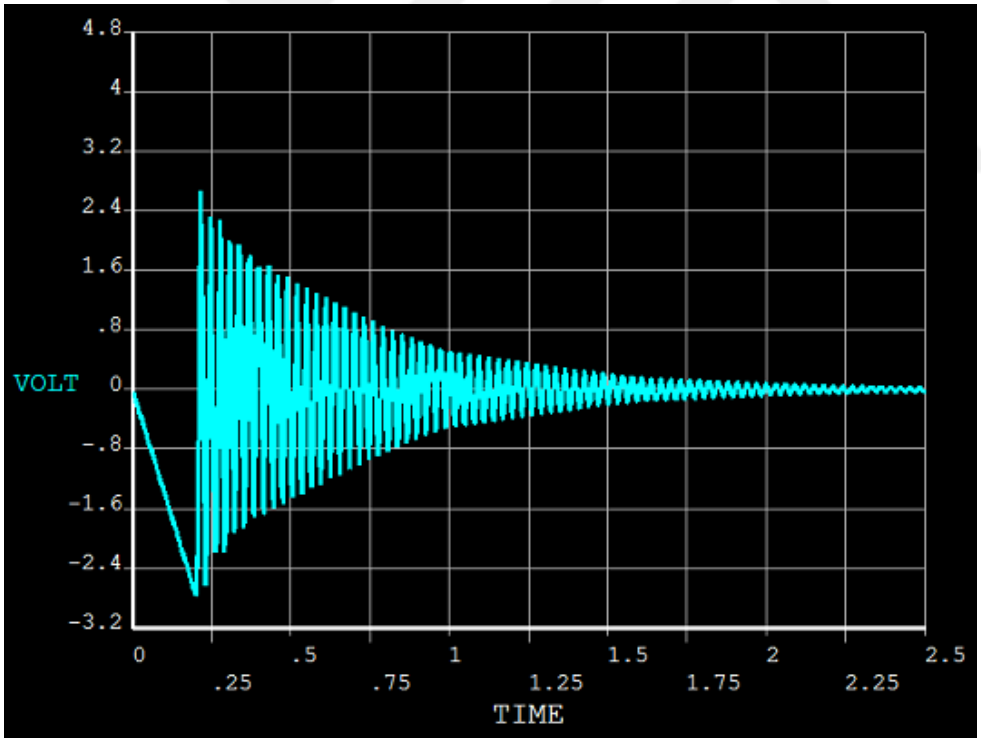
Şekil 8.11 : Model sonucu.



Şekil 8.12 : %18 boşluklu model.

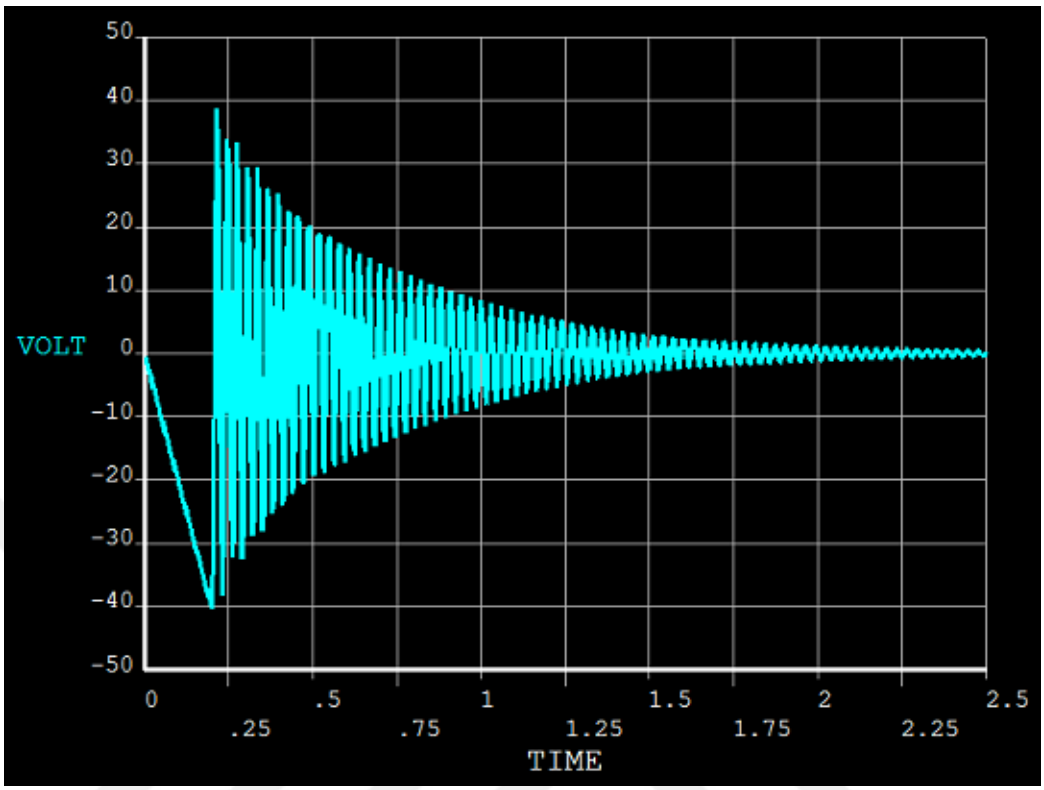


Şekil 8.13 : Piezo özellikleri indirgenmiş model.



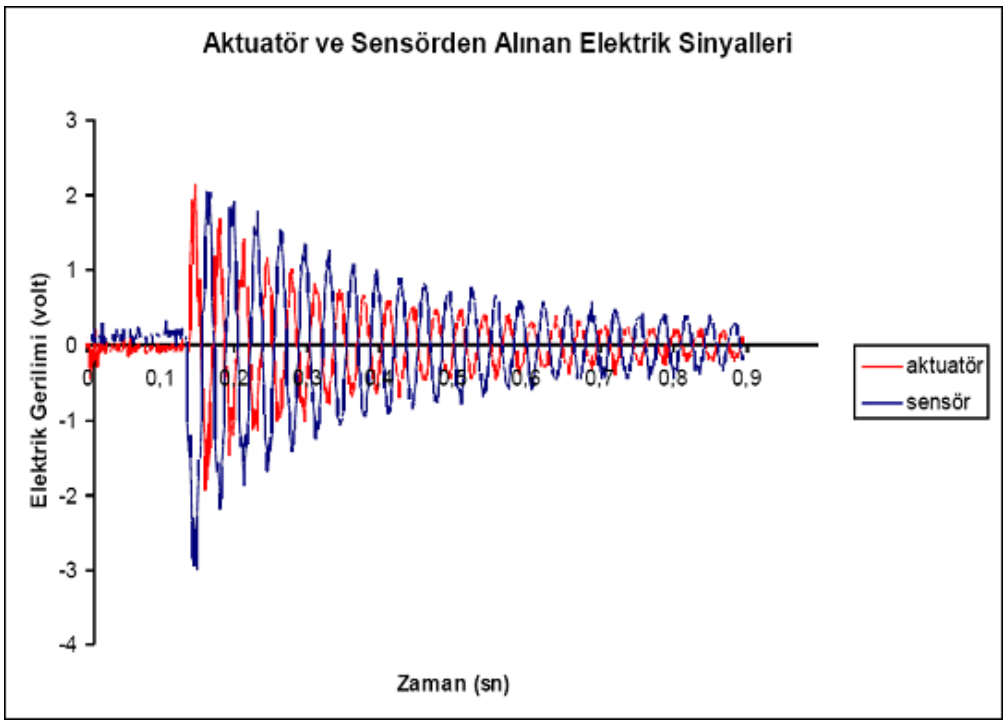
Şekil 8.14 : %18 boşluklu piezo özellikleri indirgenmiş model.

Mesh boyutunun etkisi olup olmadığını anlamak için Şekil 8.11'deki modelin daha küçük mesh ile yapılan analizinin grafiği Şekil 8.15'te verilmiştir.



Şekil 8.15 : 2.5 mm mesh ile model sonucu.

Daha önce yapılmış deneyden elde sinyal sonuçları ise Şekil 8.16'da verilmiştir.



Şekil 8.16 : Deneyden alınan sinyal sonuçları [38].

8.4 Tartışma

Şekil 8.1'de görülmektedir ki hem enine hem de boyuna elastiklik modülü için sonlu elemanlar yöntemiyle en yakın sonuçları Mori-Tanaka yöntemi vermiştir. Kesme modülü için üç yöntem de birbirlerine özellikle düşük ve yüksek yüzdelerde yakın sonuç vermelerine rağmen sonlu eleman modelinden çok daha yüksek görünmektedir.

Piezoelektrik sabitlerin tahmininde e_{15} için en yakın sonucu Mori-Tanaka, e_{31} ve e_{33} için en yakın sonucu Odegard vermiştir. Kendi içinde tutarlı yöntem yaklaşık %20 hacimsel yüzde geçildiğinde çok yüksek değerler vermektedir.

Dielektrik sabitlerde düşük hacim yüzdelerinde Mori-Tanaka sonlu elemanlara çok yakın çıkarken yüksek yüzdelerde Odegard öne geçmektedir. Bunun sebebi Mori-Tanaka'nın yaklaşımı seyreltik varsayımlı iken Odegard'ın katkı maddesinin etrafında bir etkileşim alanı bulunduğunu varsayması, dolayısıyla hacimsel yüzde arttıkça katkı maddelerinin birbirlerine yaklaşacak olmalarını daha iyi temsil edebilmesi olabilir.

Boşluk göz önüne alınarak yapılan çözümlerin sonuçları da davranış olarak boşluksuz durumdakilere benzemektedir, ancak özelliklerde düşüş görülmektedir. %18 boşluk durumu için Mori-Tanaka ve Odegard yöntemlerinde elastik özellikler %40 civarı etkilenirken piezoelektrik özellikler yaklaşık %70 etkilenmektedir. Dielektrik özellikler ise genel olarak %50 civarı düşmektedir.

Daha önce yapılan deneyde en iyi yanıt ağırlıkça %80 PZT karışımından elde edildiğinden dolayı yapılan modellemeler bu duruma göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerde piezoelektrik kompozit boya malzemesinin hasar görmesi sebebi ile piezoelektrik seramiğin gerektirdiği kadar yüksek voltajlarda kutuplamaya ulaşmak mümkün olmamıştır. 2.5 kV/mm değerinin üzerine çıkılamamıştır. Ayrıca malzemeler hazırlanırken yapıda boşluk oluştuğu da düşünülmüştür. Bu faktörler doğrudan çözümler geliştirilmesini kısıtlayıcı engeller olarak karşımıza çıkmıştır. Literatürde yapılan araştırma sonucu benzer piezoelektrik kompozit boyaların kutuplamasında gerekli voltajın yaklaşık 15 kV/mm olduğu görülmüştür [39,40]. Piezoelektrik aktivite miktarında bu voltaj ile 2.5 kV/mm voltajı arasında yaklaşık 10 kat fark olduğu bulunmuştur [40]. Bu nedenle kompozitin içindeki PZT'nin piezoelektrik değerleri d_{15}, d_{31}, d_{33} ve g_{33} onar kat indirgenerek ve ayrıca çeşitli boşluk oranlarında deney düzeneği modeli tekrar çalıştırılmıştır. %18 boşluk olması durumunda deney sonuçlarıyla model sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Piezolektrik kompozitin özelliklerini bulabilmek amacıyla analitik yöntemde kullanılmak üzere Eshelby tensörünün 25 elemanı, 0-3 doğrultudaki kompozitler için başarıyla hesaplandı.

Mikromekanik model için Mori-Tanaka ve Odegard yaklaşımları kullanılarak Eshelby tensörünün de yardımıyla kompozitin kütlesel özelliklerine başarıyla geçildi. Kendi içinde tutarlı yaklaşım için gereken iterasyon planı kuruldu ve başarıyla uygulandı.

Bu modellerin farklı hacim yüzdeleri için ortaya çıkaracağı malzeme özellikleri grafiklere başarıyla aktarıldı.

Tüm mikromekanik modeller ve iterasyon planları boşlukluluk durumunu da içerecek şekilde baştan tekrar kurgulandı ve farklı hacim yüzdeleri için ortaya çıkacak malzeme özellikleri grafiklere başarıyla aktarıldı.

Sonlu elemanlar yönteminde 4 farklı temsili hacim elemanı olarak BK, HMK, YMK ve HSP birim kafes yapıları kullanıldı. Her bir yapıya uygun sınır koşulları uygulanarak her bir farklı hacim yüzdelesi için yapılan altışar farklı analizle kompozitin kütlesel özellikleri başarıyla elde edildi. Elde edilen sonuçlar grafiklere aktarıldı.

Piezokompozit sensör boya deney düzeneğinin matematik modellemesi ANSYS üzerinde başarıyla gerçekleştirildi. Elde edilen serbest titreşim sonucu oluşan voltaj değerleri deneysel verilerle karşılaştırıldı.

Sensör boyanın performansının iyileştirilebilmesi piezoelektrik özelliklerinin iyileşmesinden geçmektedir. Bunun için de çok daha yüksek kutuplama değerlerine çıkılması ve kompozitteki boşluk oranının düşürülmesi gereklidir. Boyanın üretiminin titizlikle yapılması ve farklı boyutlarda PZT tozlarının kullanılmasının denenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Harrison, J. J.** (2009). *Quartz, Tibet* [Fotoğraf]. Erişim: 04.10.2019, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/14/Quartz%2C_Tibet.jpg/1024px-Quartz%2C_Tibet.jpg

[2] **Lavinsky, R. M.** (t.y.). *Topaz* [Fotoğraf]. Erişim: 04.10.2019, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Topaz-k312b.jpg

[3] **Pingstone, A.** (2003). *Bi-coloured Tourmaline crystal* [Fotoğraf]. Erişim: 04.10.2019, https://en.wikipedia.org/wiki/Image:Tourmaline.xtal.750pix.jpg

[4] **Uchino, K.** (2017). *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Duxford: WPWoodhead Publishing.

[5] **Heywang, W., Lubitz, K., Wersing, W.** (2008). *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*. Springer.

[6] **Ergun C., Yılmaz Ş., Özdemir E., Gül Ö., Kalenderli Ö.** (2006). Piezoelektrik Malzemeler ve Uygulama Alanları. *Denizli Uluslararası Malzeme Konferansı.* Pamukkale, Türkiye.

[7] **Tressler, J. F., Alkoy, S., Newnham, R. E.** (1998). Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of Electroceramics, 2,* 257–272.

[8] **APC International, Ltd.** (2002). *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. APC International.

[9] **Ando Junior, O. H., Coelho, M., Malfatti, C. F., Brusamarello, V.** (2014). Proposal of a micro generator piezoelectric for portable devices from the energy harvesting. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ), 1* (12), 656–660.

[10] **Alexander, P. W.** (2006). *Dual electro/piezo property functionally graded piezoceramics.* (Doktora tezi). University of Michigan, Michigan.

[11] **Fundamentals of piezo technology.** (t.y.). Erişim: 19.02.2020, https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/fundamentals/

[12] **Navy type PZT classifications.** (t.y.). Erişim: 10.01.2020, https://sensortechcanada.com/technical-notes/articles/navy-type-pzt/

[13] **Chen, Y.** (1999). Synthesis, characterization and transducer applications of piezoelectric ceramic/polymer composite materials. (Doktora tezi). Pennsylvania State University, Pennsylvania.

[14] **Piezoelectric polymers.** (2013). Erişim: 08.10.2019, http://www.physics.montana.edu/eam/polymers/piezopoly.html

[15] **Hale J. M.** (2004). Piezoelecric Paint: Thick-Film Sensors For Structural Monitoring Of Shock And Vibration. *7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis.* July 19–22, Manchester, UK.

[16] **White J. R., Poumeyrol B. D., Hale J. M., Stephenson R.** (2004). Piezoelectric paint: ceramic-polymer composites for vibration sensors. *Journal Of Materials Science, 39*, 3105–3114.

[17] **Mori, T., Tanaka, K.** (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica, 21* (5), 571–574.

[18] **Mura, T.** (1987). *Micromechanics of Defects in Solids*. Springer.

[19] **Odegard, G. M.** (2004). Constitutive modeling of piezoelectric polymer composites. *Acta Materialia, 52*, 5315–5330.

[20] **Mainprice, D., Bachmann, F., Hielscher, R., Schaeben, H., Lloyd, G. E.** (2015). Calculating anisotropic piezoelectric properties from texture data using the MTEX open source package. *Geological Society, London, Special Publications, 409*, 223–249.

[21] **Dunn, M. L., Taya, M.** (1993). Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites. *International Journal of Solids and Structures, 30* (2), 161–175.

[22] **Dunn, M. L., Taya, M.** (1993). An analysis of piezoelectric composite materials containing ellipsoidal inhomogeneities. *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 443*, 265–287.

[23] **Weinberger, C., Cai, W.** (2004). *Eshelby's Inclusion I* [Ders notları]. Erişim: 11.12.2019, http://micro.stanford.edu/~caiwei/me340b/content/me340b-lecture02-v03.pdf

[24] **Mikata, Y.** (2001). Explicit determination of piezoelectric Eshelby tensors for a spheroidal inclusion. *International Journal of Solids and Structures, 38*, 7045–7063.

[25] **Huang, J. H., Chiu, Y. H., Liu, H. K.** (1998). Magneto-electro-elastic Eshelby tensors for a piezoelectric-piezomagnetic composite reinforced by ellipsoidal inclusions. *Journal of Applied Physics, 83* (10), 5364–5370.

[26] **Ryu, S., Lee, S., Jung, J., Lee, J., Kim, Y.** (2019). Micromechanics-based homogenization of the effective physical properties of composites with an anisotropic matrix and interfacial imperfections. *Frontiers in Materials, 6* (21).

[27] **Bing, J., Daining, F.** (1999). The effective properties of piezoelectric composite materials with transversely isotropic spherical inclusions. *Applied Mathematics and Mechanics, 20*, 388–399.

[28] **Elouafi, J., Azrar, L., Aljinaidi, A. A.** (2015). Closed-form expressions for the effective moduli of heterogeneous piezoelectric materials. *International Journal of Solids and Structures, 52*, 19–32.

[29] **Fakri, N., Azrar, L.** (2010). Thermal and electroelastic behavior of piezocomposites and inhomogeneous piezoelectric materials with voids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21* (2), 161–174.

[30] **Iyer, S., Venkatesh, T. A.** (2014). Electromechanical response of (3–0, 3–1) particulate, fibrous, and porous piezoelectric composites with anisotropic constituents: A model based on the homogenization method. *International Journal of Solids and Structures, 51*, 1221–1234.

[31] **Martínez-Ayuso, G., Friswell, M. I., Adhikari, S., Khodaparast, H. H., Berger, H.** (2017). Homogenization of porous piezoelectric materials. *International Journal of Solids and Structures, 113–114*, 218–229.

[32] **Mishra, N., Krishna, B., Singh, R., Das, K.** (2017). Evaluation of effective elastic, piezoelectric, and dielectric properties of SU8/ZnO nanocomposite for vertically integrated nanogenerators using finite element method. *Journal of Nanomaterials, 2017*, 1–14.

[33] **Kar-Gupta, R., Venkatesh, T. A.** (2008). Electromechanical response of piezoelectric composites: Effects of geometric connectivity and grain size. *Acta Materialia, 56* (15), 3810–3823.

[34] **Günaydın, U.** (2007). *Sensörlerde kullanılabilecek polimer/PZT kompozitlerin geliştirilmesi.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[35] **Url-1** <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=O1303>, erişim tarihi 25.11.2019.

[36] **IEEE** (1966). *Standard Definitions and Method of Measurement for Piezoelectric Vibrators.* Erişim: https://ieeexplore.ieee.org/document/19446

[37] **IEEE** (1966). *Standard on Piezoelectricity*. Erişim: https://ieeexplore.ieee.org/document/26560

[38] **Türker, Ö.** (2009). *PZT/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı kiriş tasarımı ve imalatı.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[39] **James, N. K., van den Ende, D. A., Lafont, U., van der Zwaag, S., Groen, W. A.** (2013). Piezoelectric and mechanical properties of structured PZT–epoxy composites. *Journal of Materials Research, 24* (4), 635–641.

[40] **Egusa, S., Iwasawa, N.** (1993). Poling characteristics of PZT/epoxy piezoelectric paints. *Ferroelectrics, 145*, 45–60.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hasan Aksüt
Doğum Yeri ve Tarihi : Kahramanmaraş, 1993
E-posta : aksuth@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011-2015 İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2017-2020 İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme ve İmalat Programı