

75284

PIEZOELEKTRİK TUTUCUNUN DİZAYN VE ANALİZİ

*kayraklar değiştirilerek
Arş. Gör. Mahmut EKEREL
U.Ş. Kurul

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Semih SEZER

75284

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Ocak 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Şubat 1998

Tez Danışmanı : Y.Doç. Dr. Hikmet KOCABAŞ 19.02.1998 *Hikmet Kocabaş*

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Abdülkerim KAR (Marmara Ün.) 19.02.1998 *Abdülkerim Kar*

Doç.Dr. Sait YÜCENUR

Sait Yücenur

ŞUBAT 1998

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
1998

ÖNSÖZ

Bu çalışmada piezoelektrikten yapılmış bir tutucunun ANSYS programında dizayn ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda bana her konuda yardım ve desteğini esirgemeyen danışmanım Yard. Doç. Dr. Hikmet KOCABAŞ'a, çalışmamızda bize ilk bilgileri sağlayan FIGES firması yetkilisi Makina Mühendisi Osman BEDEL'e ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

OCAK 1998

Semih SEZER



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 PIEZOELEKTRİK HAKKINDA GENEL BİLGİ	3
2.1 Piezoelektrik Etki	3
2.2 Piezoelektrik Film Özellikleri	4
2.3 Piezoelektrik Film Uygulamaları	5
BÖLÜM 3 ANSYS'DE BİRLEŞİK ALAN ANALİZİ	7
3.1 Birleşik Alan Analizinin Tanımlaması	7
3.2 Birleşik Alan Analiz Tipleri	7
3.2.1 Dolaylı Metod	7
3.2.2 Doğrudan Metod	8
3.2.3 Doğrudan ve Dolaylı Metodun Kullanıldığı Yerler	8
3.3 ANSYS'de Doğrudan Birleşik Alan Analizi	8
3.3.1 Piezoelektrik Analizi	10
3.3.1.1 İletkenlik, Piezoelektrik Matris ve Elastik Katsayı Matrisi	11
3.3.1.1.1 İletkenlik	12
3.3.1.1.2 Piezoelektrik Matris	12
3.3.1.1.3 Elastik Katsayı Matrisi	13
3.4 ANSYS'de Üç Boyutlu Birleşik Alan Analizinde Kullanılan SOLID5'in Özellikleri	14
3.4.1 Giriş Bilgileri	15
3.4.2 Çıkış Bilgileri	18
3.4.3 Kabüller ve Sınırlamalar	23
3.5 ANSYS'de Birleştirme Etkileri	24
3.5.1 Giriş	24

3.5.2 Birleştirme	25
BÖLÜM 4 ANSYS'DE PİEZOELEKTRİKLER	28
BÖLÜM 5 ANSYS'DE YÜKLEME	35
5.1 Yük Çeşitleri	35
5.2 Yüklerin Uygulanması	37
5.3 Serbestlik Derecesi Zorlamaları	37
BÖLÜM 6 REFERANS ÇALIŞMALAR	39
6.1 Yarım Daire Şeklinde Polimerik Bir Piezoelektrik Tahrikçinin Dizaynı ve Modellemesi	39
6.1.1 Mikrotahrikçi Dizaynı	39
6.1.2 Mikrotahrikçi İçin Dönme Modeli	40
6.1.3 Deneysel Modelin Geometrik ve Malzeme Özellikleri	44
6.1.4 Deneysel Sonuçların Teorik Sonuçlarla Karşılaştırılması	44
6.2 C-Blok Şeklinde Polimer Piezoelektrik Tahrikçiler İçin Dönme-Voltaj Modeli ve Deneysel Sonuçlar	45
6.2.1 Dönme-Voltaj Teorik Modeli	46
6.2.2 Deneysel Çalışmalar	49
6.2.3 Deneysel Sonuçlarla Teorik Sonuçların Karşılaştırılması	50
BÖLÜM 7 PİEZOELEKTRİK BİR TUTUCUNUN ANSYS'DE TASARLANMASI VE ANALİZİ	52
7.1 Tutucunun Tasarlanması	52
7.2 Tutucu Malzemesinin Seçimi ve Eleman Tipinin Belirlenmesi	54
7.3 Tutucunun Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	55
7.4 Tutucuya Gerekli Mesnetlemenin ve Voltajın Uygulanması	57
7.5 Çözüm	59
BÖLÜM 8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	63
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	68

SEMBOL LİSTESİ

- $\{M\}$ = Yapısal kütle matrisi
 $\{u\}$ = Yer değiştirme vektörü
 $\{C\}$ = Yapısal esneklik matrisi
 $\{K\}$ = Yapısal rijitlik matrisi
 $\{V\}$ = Elektrik potansiyel vektörü
 $\{K^d\}$ = Yalıtkan katsayı matrisi
 $\{F^{nd}\}$ = Düğümlere uygulanan kuvvet vektörü
 $\{F^{th}\}$ = Termal gerilme kuvvet vektörü
 $\{F^{ac}\}$ = İvmelenme etkisine bağlı kuvvet vektörü
 $\{F^{pr}\}$ = Basınç yük vektörü
 $\{L^{nd}\}$ = Düğümlere uygulanan yük vektörü
 $\{T\}$ = Gerilme vektörü
 $\{D\}$ = Elektrik akı yoğunluğu vektörü
 $\{S\}$ = Gerinim (zorlanım) vektörü
 $\{E\}$ = Elektrik alan vektörü
 $[c]$ = Elastiklik matrisi
 $[e]$ = Piezoelektrik matris
 $[\varepsilon]$ = Dielektrik matris
 $[\varepsilon]^s$ = Dielektrik sabit
 $\{u_c\}$ = Eleman alanının X, Y, Z yönlerindeki yerdeğiştirmesi
 V_c = Eleman alanının elektrik potansiyeli
 $[N^u]$ = Yer değiştirme durum fonksiyonlarının matrisi
 $\{N^v\}$ = Elektriksel potansiyel durum fonksiyonunun vektörü

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Piezoelektrik Etki	4
Şekil 3.1	Üç boyutlu birleşik alan katısı SOLID5	14
Şekil 3.2	SOLID5 Eleman Çıkışları	19
Şekil 5.1	Yükler	36
Şekil 6.1.1	Yarım daire profilli mikrotahrikçi dizaynı	40
Şekil 6.1.2	Yarım daire mikrotahrikçinin dönmesi	41
Şekil 6.1.3	y yönünde dönme-voltaj eğrisi	45
Şekil 6.2.1	C-blok dizaynı ve çalışması	47
Şekil 6.2.2	C-blok üzerinde bir kesit için kullanılan terminoloji	47
Şekil 6.2.3	Örnek çalışmaların kesitleri	50
Şekil 6.2.4	Dönme-voltaj, deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması	51
Şekil 7.1	Tutucunun boyutları	52
Şekil 7.2	Tutucunun üç boyutlu görünüşü	53
Şekil 7.3	Tutucunun sonlu eleman modeli	56
Şekil 7.4	Gerekli yüklemelerin uygulanması	58
Şekil 7.5	Tutucu üzerindeki yer değiştirme miktarları	60
Şekil 7.6	Tutucu üzerindeki gerilme dağılımları	61
Şekil 8.1	İki farklı tutucu dizaynı	62

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1	Birleşik Alan Elemanları	9
Tablo 3.2	Doğrudan birleşik alan analizinde kullanılan birleştirme metodları	10
Tablo 3.3	SOLID5 giriş bilgileri	16
Tablo 3.4	SOLID5 eleman çıkış tanımlamaları	19
Tablo 3.5	SOLID5, ETABLE ve ESOL komutları için bölüm ve sıralı sayılar	22
Tablo 3.6	Birleşik alan elemanları	24
Tablo 3.7	Birleşik alan birleştirme metodları	26
Tablo 5.1	Değişik durumlarda kullanılan serbestlik derecesi zorlamaları	37
Tablo 5.2	Serbestlik derecesi zorlamaları için komutlar	38

ÖZET

Sonlu eleman metodu mühendislik problemlerinin birçoğunun nümerik olarak çözümlerinde önemli yer almaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki ve bilgisayarla dizayn sistemlerindeki gelişmeler, karmaşık problemlerin bile kolayca modellenip çözülebilmesini sağlamaktadır. Örnek model üretilmeden önce, bilgisayar üzerinde değişik konfigürasyonların denenerek en uygun modelin dizaynı gerçekleştirilir. Model sonlu eleman kurallarına göre küçük parçalara ayrılarak değişik yükleme durumları uygulanır. Elde edilen denklemler çözülerek gerçek durumdakine yakın sonuçlara ulaşılabilmesi sağlanır.

Birleşik alan analizi bir sonlu eleman analiz yöntemidir. Bu yöntemde iki değişik fiziksel niceliğin etkileşimi incelenmektedir. Örnek olarak bizim de bu çalışmada ele aldığımız piezoelektrik analizde; elektrik alan ile yapısal değişikliğin arasındaki etkileşim ele alınmaktadır. Termal-gerilme analizi, termal-elektrik analizi ve basınç-yapısal analiz gibi birçok örnek de bu analizin içindedir.

Piezoelektrik malzeme birim çift kutupların dizilmesiyle ortaya çıkan bir malzemedir. Bu malzemenin uçlarına bir voltaj uygulandığında uçlardaki yük yoğunluğu değişecektir. Yük yoğunluğundaki bu değişiklik uygulanan voltajın yönünde malzemenin boyutlarında bir değişikliğin ortaya çıkmasına sebep olur.

Piezoelektrik malzemenin bu özelliğinden faydalanarak geliştirdiğimiz tutucuyu analiz etmek için ANSYS analiz programından faydalandık. ANSYS’de piezoelektrik analiz için gerekli bilgiler ayrıntılı olarak tezin bölümlerinde ele alınmıştır.

Sonuç bölümünde ANSYS’de analiz ederek bulduğumuz sonuçlarla, benzer şekilde dizaynlar üzerinde yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve tutucunun kullanılabileceği sahalar belirtilmiştir.

SUMMARY

THE DESIGN AND ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC GRIPPER

The smart structures field has grown rapidly over the last few years. One factor enabling this growth has been the development of small actuators based on smart materials such as piezoelectrics and shape memory alloys. Piezoelectric actuators are currently more widely used for smart structure applications because they are small, have low-power requirements, and respond quickly. However, commonly used piezoelectric actuators produce either high force coupled with small deflections (stacks) or large deflections coupled with low force (bimorphs). For piezoelectric actuation, this leaves a gap in force-deflection capabilities in which many smart structures applications operate.

There exists an ongoing need in the area of robotics and prosthetics for light fast compact actuators. A review of current actuation systems such as electrical, hydraulic, and pneumatic systems that are commonly used for robotic and effectors reveals that these systems are too bulky, too heavy, too slow or too complex for use in lightweight anthropomorphic end effectors and prosthetic devices.

Trimmer, defines a device in the range of 2 cm or smaller to be a microactuator. Many microactuator designs exist based upon shape memory alloy materials, electromagnetic materials, magnetic materials, electrostatic materials and piezoelectric materials. These devices were not applicable to the artificial hand problem because either they could not be combined to form a macroactuator, they were too slow or the additional equipment required to power the microactuator was too bulky or heavy. It became clear that the final microactuator would need to have a geometry that allowed it to be combined and also be capable of a direct electrical to mechanical energy conversion.

Barium titanate and many other ceramic materials exhibit what is called the piezoelectric effect, illustrated schematically in Figure 1. Let us consider a sample of a ferroelectric ceramic material which has a resultant dipole moment due to alignment of many small unit dipoles as indicated in Figure 1-a. In this material there will be an excess of positive charge at one end and negative charge at the other end in the direction of the polarization. Now let us consider the sample when compressive stresses are applied, as shown in Figure 1-b. the compressive stresses reduce the length of the sample between the applied stresses and thus reduce the distance between the unit dipoles, which in turn reduces the overall dipole moment per unit volume of the material. The change in dipole moment of the material changes the charge density at the ends of the sample and thus changes the voltage difference between the ends of the sample if they are insulated from each other.

On the other hand, if an electric field is applied across the ends of the sample, the charge density at each end of the sample will be changed (Fig. 1-c). This change in charge density will cause the sample to change dimensions in the direction of the applied field. In the case of Figure 1-c the sample is slightly elongated due to an increased amount of positive charge attracting the negative poles of the dipoles, and reverse at the other end of the sample. Thus the piezoelectric effect is an electromechanical effect by which mechanical forces on a ferroelectric material can produce an electrical response, electrical forces a mechanical response.

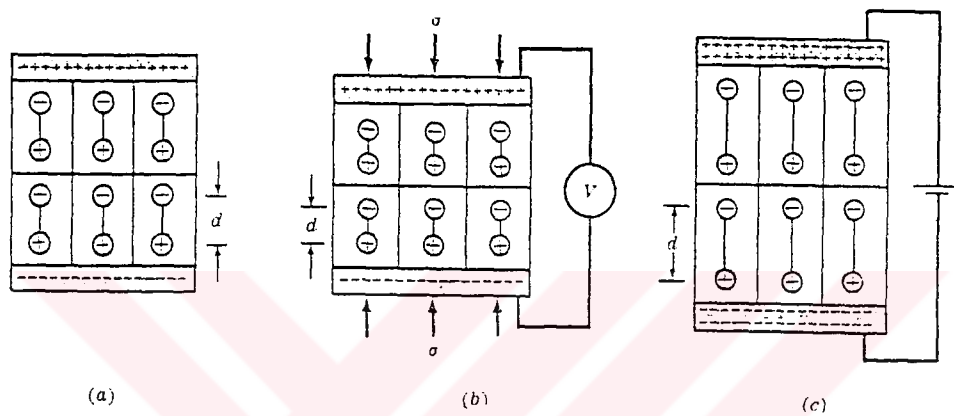


Figure 1 : (a) Schematic illustration of electric dipoles within a piezoelectric material. (b) Compressive stresses on material cause a voltage difference to develop due to change in electric dipoles. (c) Applied voltage across ends of sample causes dimensional change and changes the electric dipole moment.

The finite element method has become a powerful tool for the numerical solution of a wide range of engineering problems. Applications range from deformation and stress analysis of automotive, aircraft, building and bridge structures to field analysis of heat flux, fluid flow, magnetic flux, seepage and other flow problems. With the advances in computer technology and CAD systems, complex problems can be modeled with relative ease. Several alternative configurations can be tried out on a computer before the first prototype is built. All of this suggests that we need to keep pace with these developments by understanding the basic theory, modeling techniques and computational aspects of the finite element method. In this method of analysis, a complex region defining a continuum is discretized into simple geometric shapes called finite elements. The material properties and governing relationship are considered over these elements and expressed in terms of unknown values at element corners. An assembly process, duly considering the loading and constraints, results in a

set of equations. Solution of these equations gives us the approximate behavior of the continuum.

A coupled field analysis is one that takes into account the interaction (coupling) between two or more disciplines of engineering. A piezoelectric analysis, for example, handles the interaction between the structural and electric fields: it solves for the voltage distribution due to applied displacement, or vice versa. Other examples of coupled field analysis are thermal-stress analysis, and electromagnetic analysis.

The coupled field element contains all the necessary degrees of freedom and handles the field coupling by calculating the appropriate element matrices (matrix coupling) or element load vectors (load vector coupling). In linear problems with matrix coupling, coupled field interaction is calculated in one iteration. With load vector coupling, at least two iterations are required to achieve a coupled response. Nonlinear problems are iterative for both matrix and load vector coupling.

There are certain advantages and disadvantages inherent with coupled field formulations:

Advantages:

- Allows for solutions to problems otherwise not possible with usual finite elements.
- Simplifies modeling of coupled field problems by permitting one element type to be used in a single analysis pass.

Disadvantages:

- Increases wavefront (unless a segregated solver is used).
- Inefficient matrix reformulation (if a section of matrix associated with one phenomena is reformed, the entire matrix will be reformed).
- Larger storage requirements.

Piezoelectrics is the coupling of structural and electric fields, which is a natural property of materials such as quartz and ceramics. Applying a voltage to a piezoelectric material creates a displacement, and the reverse is also true: vibrating a piezoelectric material generates a voltage. Possible piezoelectric analysis types (available in the ANSYS/Multiphysics product only) are static, modal, harmonic, and transient.

If a model has at least one element with piezoelectric degrees of freedom (displacement and volt) activated, then all elements where a volt degree of freedom is needed must be one of the piezoelectric types, and they must all have the piezoelectric degrees of freedom activated. If the piezoelectric effect is not desired in these elements, simply define very small piezoelectric material properties for them.

To do a piezoelectric analysis, you need to use one of these element types:

PLANE13	2-D coupled-field quadrilateral solid
SOLID5	coupled-field brick
SOLID98	coupled-field tetrahedron

We used SOLID5 in our analysis. SOLID5 has a three-dimensional magnetic, thermal, piezoelectric, and structural field capability with limited coupling between the fields. The element has eight nodes with up to six degrees of freedom at each node.

The geometry, node locations, and the coordinate system for this element are shown in Figure 2.

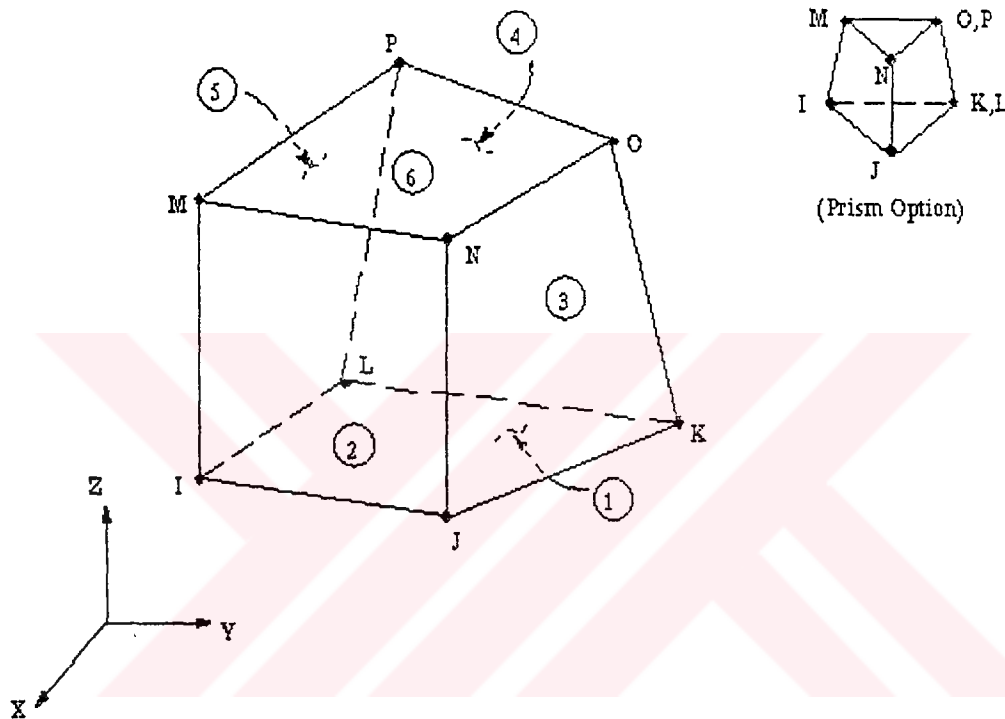


Figure 2 : SOLID5 Coupled Field Solid

The main goal of a finite element analysis is to examine how a structure or component responds to certain loading conditions. Specifying the proper loading conditions is, therefore, a key step in the analysis. You can apply loads on the model in a variety of ways in the ANSYS program. Also, with the help of load step options, you can control how the loads are actually used during solution.

The word loads in ANSYS terminology includes boundary conditions and externally or internally applied forcing functions. Loads are divided into six categories: DOF constraints, forces (concentrated loads), surface loads, body loads, inertia loads and coupled field loads.

You can apply most loads either on the solid model (on keypoints, lines, and areas) or on the finite element model (on nodes and elements). For example, you can specify forces at a keypoint or a node. Similarly, you can specify convections (and other

surface loads) on lines and areas or on nodes and element faces. No matter have you specify the loads, the solver expects all loads to be in terms of the finite element model. Therefore, if you specify loads on the solid model, the program automatically transfers them to the nodes and elements at the beginning of solution.

In this study we devised a gripper by using one property of piezoelectric material, that is the displacement of the material in the direction of applied voltage (Figure 3). We used the ANSYS computer program in the design and analysis of the gripper. In the project and ANSYS's catalog, the necessary information exists in detail for the design process.

In conclusion, we specified the application area of the gripper by comparing the results found by ANSYS and those retrieved from similar studies in literature.

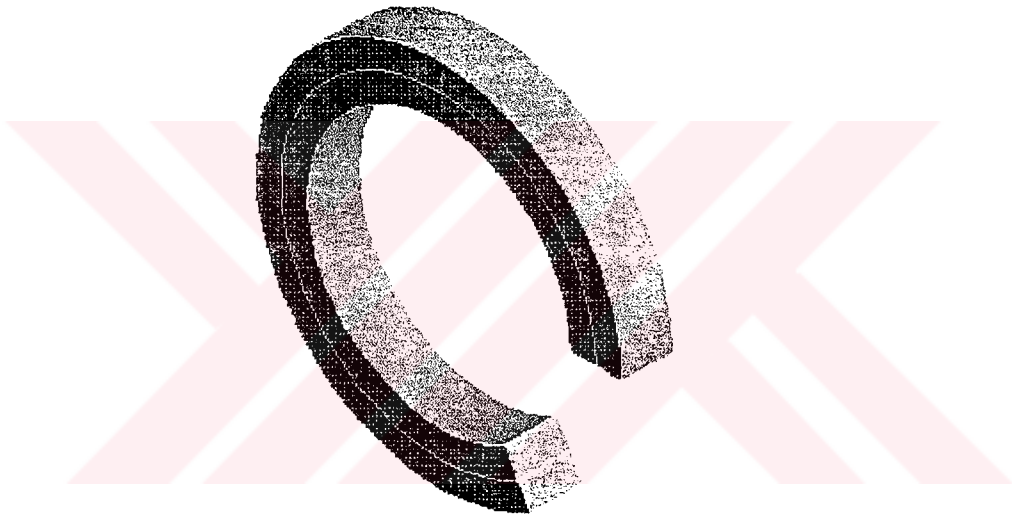


Figure 3

BÖLÜM1

GİRİŞ

Son yıllarda akıllı yapıların kullanım alanları hızla büyüyor. Bu büyümenin sebeplerinden biri, piezoelektrik ve benzeri alaşımlardan yapılan küçük tahrikçilerin gelişmesidir. Piezoelektrik tahrikçiler küçük oldukları için, düşük güç gerektirdikleri için ve uygulanan girişe çabuk cevap verdikleri için, akıllı yapıların uygulamalarında geniş olarak kullanılmaktadır. [1]

Robotik çalışmalarında ve protezlerde de küçük ve hızlı tahrikçilere ihtiyaç vardır. Yapılan incelemelerde, robotik sistemlerde yaygın olarak kullanılan elektriksel, hidrolik ve pnömatik tahrik sistemlerinin; düşük ağırlıklı protez cihazlarının kullanımı için çok kaba, ağır, yavaş ve karmaşık olduğu neticesine varılmıştır.

Trimmer'e göre 2 cm ya da daha küçük boyutta olan cihazlara mikrotahrikçi denir.[2] Mikrotahrikçi dizaynında; alaşımlı malzemeler, elektromanyetik malzemeler, manyetik malzemeler, elektrostatik malzemeler ve piezoelektrik malzemeler kullanılır. Mikrotahrikçiler bir araya getirilerek makrotahrikçiler oluşturulur. Makrotahrikçilerle daha büyük kuvvetler elde edilebilir.

Piezoelektrikten yapılan tahrikçiler incelendiğinde çoğunun çift katmanlı seramik ya da polimerik malzemeden yapıldığı görülür. Seramikler, polimerlerden daha iyi piezoelektrik özelliklere ve daha yüksek elastiklik sabitine sahiptir. Seramiklerin küçük yerdeğiştirmelerine karşı büyük kuvvetler oluşur. Polimerler, seramiklerden daha küçük elastisite modülüne sahip olduğu için değişik şekil almaları daha kolaydır. Polimerlerin daha büyük yerdeğiştirmelerine karşın oluşan kuvvetler daha azdır. [3]

Bizim yaptığımız çalışmada piezoelektrikten yapılmış bir tutucunun ANSYS programında, dizayn ve analizi gerçekleştirilmiştir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için piezoelektriğin özellikleri ve ANSYS programı hakkında gerekli bilgiler ilerideki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



BÖLÜM 2

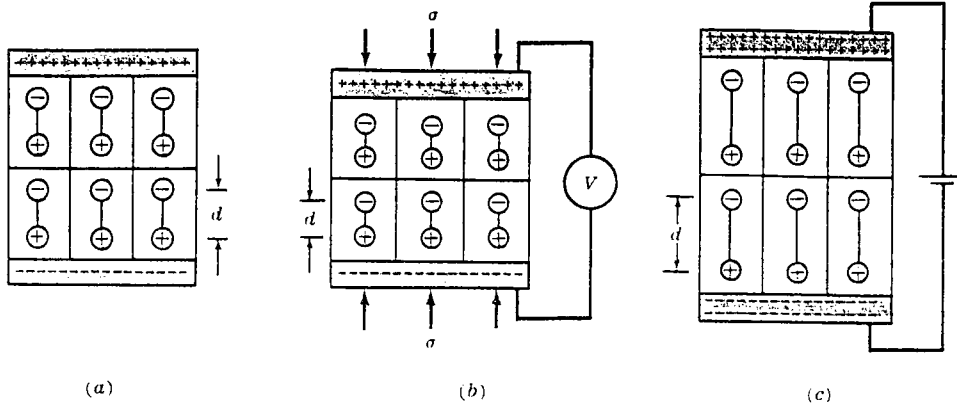
PİEZOELEKTRİK HAKKINDA GENEL BİLGİ

2.1 PİEZOELEKTRİK ETKİ

Baryum titanat, PVdF ve PZT gibi seramiklerin birçoğu Şekil 2.1'de gösterilen piezoelektrik etki özelliğine sahiptir. Ferroelektrik seramik bir malzemeyi gözönünde bulunduralım (Mekanik kuvvetlere elektriksel bir cevap, elektriksel kuvvetlere mekanik bir cevap veren malzeme). Şekil 2.1-a'da görüldüğü gibi birçok birim çift kutubun (dipol) dizilmesiyle ortaya bir çift kutup momenti çıkar. Bu malzemede kutuplama yönünde, bir ucunda pozitif yük diğer ucunda ise negatif yük fazlalığı ortaya çıkacaktır.

Bu halde malzemeye Şekil 2.1-b'de görüldüğü gibi bir basma gerilmesi uygulandığını düşünelim. Bu basma gerilmesi ile malzemenin kalınlığında bir azalma meydana gelir ve birim çift kutuplar arasındaki mesafede azalır. Böylece malzemede birim hacim başına düşen çift kutup momentide azalır. Malzemenin çift kutup momentindeki bu değişiklik uç noktalarındaki yük yoğunluğunu da değiştirir. Neticede eğer uçlar birbirinden ayrılırsa aralarındaki voltaj farkıda değişir.

Diğer taraftan, malzemenin uçlarına bir voltaj uygulanırsa herbir uçtaki yük yoğunluğu değişecektir. Yük yoğunluğundaki bu değişiklik uygulanan voltajın yönünde, malzemenin boyutlarında bir değişikliğe sebep olacaktır. Şekil 2.1-c'de bir uçta pozitif yükler, miktarındaki artıştan dolayı negatif elektronları kendine doğru çeker diğer uçta da bu olayın tersi gerçekleşir böylece malzemede bir miktar uzama meydana gelir.



Şekil 2.1 : (a) Piezoelektrik bir malzemedeki elektrik çift kutupların şematik gösterilişi. (b) Malzeme üzerine uygulanan basma gerilmesi elektrik çift kutuplarının arasındaki mesafeyi azaltır ve ortaya bir voltaj farkı çıkar. (c) Kenarlara uygulanan voltaj yönlenme değişikliğine ve çift kutup momentinde değişikliğe sebep olur.

Netice olarak piezoelektrik etki bir elektromekanik etkidir. Yani mekanik kuvvetlere elektriksel bir cevap, elektriksel kuvvetlere mekanik bir cevap verir.[5]

2.2 PIEZOELEKTRİK FİLM ÖZELLİKLERİ

Piezoelektrik film esnek, hafif ve sert bir plastik filmidir. Değişik kalınlıklarda ve farklı sahalarda kullanılabilir. Aşağıdaki fiziksel özelliklere sahiptir:

- 0-10⁹ Hz. arasında geniş bir frekans aralığına sahiptir.
- Aynı kuvvet girişi için piezoseramikten on kat fazla yüksek çıkış voltajına sahiptir.
- Yüksek dielektrik gerilmesi.
- Yüksek mekanik gerilme (10⁹-10¹⁰ Pascal) .
- Yüksek kararlılığa sahiptir; neme, kimyasal maddelerin çoğuna, oksitlenmeye ve şiddetli ultraviyole ışınlarına dayanıklıdır.
- Ham malzeme ve imalat fiyatı oldukça düşüktür.

Bunlara ek olarak film istenilen değişik şekillerde kolayca imal edilebilir. Kesilip şekillendirilebilir ve ticari yapıştırıcılarla yapıştırılabilir. [6]

2.3 PİEZOELEKTRİK FİLM UYGULAMALARI

I) Askeri-Resmi Kuruluşlar

- Hidrofonlar: Sonar sistemleri, jeofiziksel sistemler
- Patlatma Cihazları: Vurmalı, termal, sismik
- Fiziksel Emniyet Cihazları: Temas yüzeyi kontrol, titreşim, kızılötesi
- Enerji Oluşturma: Okyanus dalgaları, rüzgar gücü
- Balistik: Şok dalga sensörleri, etki monitörleri
- Aktif titreşim sönümlleme

II) Bilgisayarlar

- Klavyeler: Kuvvet sezgi elemanları
- Yazıcılar: Etki izleyicileri ve ink jet pompaları
- X-Y Koordinatlayıcılar: CRT, bilgisayar faresi (mouse)
- Kopyalayıcılar: Anahtarlar, seviye sensörleri, pozisyon sensörleri

III) Endüstriyel

- Enerji Düzenleyiciler: Pasif IR dedektörleri, anahtarlar, sayıcılar
- Robotik: Dokunma sensörleri, robot tamponları
- Basınç Regülatörleri: Endüstriyel güvenlik anahtarları
- Etki/Anahtar: Madeni para sensörleri, cam kırma sensörleri, trafik izleyicileri
- Akış Ölçücüler: Pompalar, rüzgar ölçücü, seviye sensörleri
- Otomotiv: Yakıt enjeksiyon kontrolü, yakıt tank seviyesi, anahtarlar, süspansiyon titreşim kontrolü

IV) Alet Takımları

- Makina Monitörleri: Titreşim, hata düzenleyici
- Adaptif Optikler: Şekil değiştirebilen aynalar
- Oran Bulucular: Puls- Yankı transdüserleri
- Mikropozisyonlayıcılar
- Fiber optik sensörler

V) Tıbbi Cihazlar

- Akış Monitörü: Akış ve seviye ölçücü, damla sayıcı
- Hareket Monitörleri: Engelleyici anahtar
- Ani Tepkili Termometre: Pyroelektrik cevap (sıcaklıkla elektrik üretilmesi)
- Nefes almayı izleyen monitörler
- Kalbin atış hızını ayarlayıcı cihazlar
- Kan basıncı ölçme cihazları

VI) Telekomünikasyon

- Mikrofonlar: Konferans mikrofonları, gürültü yok edici mikrofonlar
- Ton Jeneratörleri: Değişik frekanslar

VII) Tüketiciler İçin

- Müzik Aletleri: Akustik pikaplar, davul ses cihazları
- Spor Ekipmanları: Teniste file teması ve faul çizgisi teması belirleyici, jogging ayakkabıları ve diğerleri
- Anahtarlar: Müzik klavyeleri, yakıt tankı seviye belirleyiciler
- Oyuncaklar
- Akustik konuşma cihazları

BÖLÜM 3

ANSYS'DE BİRLEŞİK ALAN ANALİZİ

3.1 BİRLEŞİK ALAN ANALİZİNİN TANIMLAMASI

Birleşik alan analizi iki veya daha fazla mühendislik tekniğinin ortaklaşa kullanıldığı bir analiz çeşididir. Örneğin bir piezoelektrik analiz elektrik alan ile yapısal değişikliğin arasındaki etkileşimi ele alır. Uygulanan yer değiştirmelerle oluşan voltaj veya uygulanan voltajla oluşan yer değiştirme durumlarını çözer. Bu analize örnek olarak; termal-gerilme analizi, termal elektrik analizi ve elektro manyetik analizi de gösterebiliriz.

Basınç kapları (termal-gerilme analizi), elektrik iletim hatları (elektromanyetik analiz), indüksiyon ısıtma (manyetik-termal analiz), ultrasonik sezgi elemanları (piezoelektrik analiz) gibi uygulamaların analizinde de birleşik alan analiz yöntemi kullanılabilir.

3.2 BİRLEŞİK ALAN ANALİZ TİPLERİ

Doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı metod vardır.

3.2.1 Dolaylı Metod

Dolaylı metod herbiri farklı bir alana ait olan iki ardışık analizi kapsar. İki alan birinci analizden çıkan sonuçlar, ikinci analiz için yük girdisi olacak şekilde uygulanarak birleştirilir. Bunun bir örneği, termal analiz sonucu oluşan düğüm noktası sıcaklıklarının sonraki gerilme analizinde, cisim kuvveti yükleri olarak uygulandığı ardışık termal-gerilme analizidir.

3.2.2 Doğrudan Metod

Doğrudan metod genelde gerekli bütün serbestlik derecelerini içeren birleşik alan eleman tipinin kullanıldığı bir analizi içerir. Birleştirme, eleman matrisleri hesaplanarak ya da gerekli bütün terimleri içeren eleman yük vektörleri hesaplanarak elde edilir. SOLID5, PLANE13 ya da SOLID98 elemanları kullanılarak yapılan piezoelektrik analizi buna bir örnektir.

3.2.3 Doğrudan ve Dolaylı Metodun Kullanıldığı Yerler

Tek-yol birleştirme durumlarında (A alanının çözümünün B alanının çözümüne etkidiği durumlar; tersi için geçerli değil) iki analiz birbirinden bağımsız olarak meydana geldiği için dolaylı metod daha uygundur. Örnek olarak ardışık termal-gerilme analizinde, geçici bir nonlinear termal analiz sonrası lineer bir statik gerilme analizi yapılabilir. Herhangi bir adımdaki düğüm noktası sıcaklıkları ya da termal analizdeki zaman-noktası, daha sonra gerilme analizindeki yükler olarak kullanılabilir.

Doğrudan metod tek analiz içerdiği için, birleştirme etkilerinin karşılıklı olduğu iki-yollu birleştirme durumları için (A alanının çözümü B alanının çözümüne etkir, B alanının çözümü de A'ya etkir ve böyle devam eder) en uygun yöntemdir. Örneğin akım taşıyan, direnci sıcaklığa bağlı bir iletkeni göz önüne alalım (İletkenin sıcaklığı, elektrik akımı ile artar). Sıcaklığın yükselmesi iletkenin direncini ve akımın değerini değiştirir; bu durum da sıcaklığın yayılımını değiştirir.

3.3 ANSYS'DE DOĞRUDAN BİRLEŞİK ALAN ANALİZİ

Bizim yaptığımız analiz, doğrudan birleşik alan analizini içerdiği için bu konuyu daha ayrıntılı inceleyeceğiz.

Doğrudan metodla birleşik alan analizi yapmak için, birleşik alan elemanları kullanılır. Aşağıdaki tabloda birleşik alan kabiliyetine sahip elemanların listesi verilmiştir.

Tablo: 3.1 Birleşik Alan Elemanları

<u>Eleman İsmi</u>	<u>Özellik</u>
SOLID5	Birleşik alan tuğla
PLANE13	Birleşik alan dörtgen
FLUID29	Akustik dörtgen
FLUID30	Akustik tuğla
CONTAC48	İki boyutlu nokta yüzey temas
CONTAC49	Üç boyutlu nokta yüzey temas
PLANE53	İki boyutlu 8 düğümlü manyetik katı
SOLID62	Üç boyutlu manyeto-yapısal
FLUID66	Termal-akış boru
PLANE67	Termal-elektrik dörtgen
LINK68	Termal-elektrik çizgisel
SOLID69	Termal-elektrik tuğla
SOLID97	Üç boyutlu manyetik katı
SOLID98	Birleşik alan 4 üçgen yüzlü
CIRCU124	Genel daire

Birleşik alan elemanı gerekli bütün serbestlik derecelerini içerir ve uygun eleman matrisleriyle (matris birleştirme) ya da eleman yük vektörleriyle (yük vektörü birleştirme) hesaplanarak birleştirilmiş alanı ele alır. Matris birleştirmeli lineer problemlerde, bir tekrarlama da birleşik alan etkileşimi hesaplanır. Yük vektörlü birleştirme ile, birleştirilmiş bir cevaba ulaşabilmek için en azından iki tekrar gereklidir. Nonlineer problemler, matris ve yük vektörleri için tekrarlamalıdır. Tablo 3.2 ANSYS/Multiphysics programında doğrudan metod kullanarak yapılabilecek birleşik alan analizlerinin farklı tipleri gösterilmiştir.

Tablo: 3.2 Doğrudan birleşik alan analizinde kullanılan birleştirme metodları

<u>Analiz Tipi</u>	<u>Birleştirme Metodu</u>
Termal-yapısal	Yük vektörü (birleştirme elemanları kullanılırsa matris)
Manyeto-yapısal	Yük vektörü
Elektro-manyetik	Matris
Elektro-manyetik-termal-yapısal	Yük vektörü
Elektro-manyetik-termal	Yük vektörü
Piezoelektrik	Matris
Termal-basınç	Matris ve Yük vektörü
Hız-termal-basınç	Matris
Basınç-yapısal(akustik)	Matris
Termal-elektrik	Yük vektörü
Manyetik-termal	Yük vektörü
Elektromanyetik-akım	Matris

3.3.1 Piezoelektrik Analizi

Quartz ve seramik gibi piezoelektrik malzemelerin elektrik alan ve yapısal değişikliklerden etkilenmeleri en önemli özellikleridir. Piezoelektrik bir malzemeye voltaj uygulandığında bir yer değiştirme meydana gelir. Bunun tersi olarak malzemeye bir titreşim uygulanırsa bir voltaj ortaya çıkar. Bir basınç sezgi elemanı, piezoelektrik analizin tipik bir uygulamasıdır. Piezoelektrik analizin statik, modal ve harmonik tiplerini yapmak mümkündür (Bu analizler sadece ANSYS / Multiphysics programında yapılabilir).

Piezoelektrik analizi yapabilmemiz için, aşağıdaki elemanlardan birinin kullanılması gereklidir.

PLANE13, KEYOPT(1)= 7	Birleşik alan katı dörtgen
SOLID5, KEYOPT(1)= 0	Birleşik alan tuğla
SOLID98, KEYOPT(1)	Birleşik alan dört üçgen yüzölçümü

KEYOPT koşulları piezoelektrik serbestlik derecesini, yer değiştirme ve volt cinsinden aktif duruma getirir.

Eğer bir model, aktive edilmiş piezoelektrik serbestlik dereceli en azından bir elemana sahipse, volt cinsinden serbestlik derecesinin olduğu bütün elemanların, yukarıda gösterilmiş üç piezoelektrik tipinden birine ve aktive edilmiş piezoelektrik serbestlik derecesine sahip olmaları gereklidir.

Yapılacak analiz statik, modal ya da harmonik olabilir. Bu analizlerle ilgili şu durumları göz önünde bulundurmak gerekir :

- Modal analizde sadece yapısal serbestlik derecesi için seçilen esas serbestlik derecesiyle, indirgenmiş mod çıkarma metoduna izin verilir.
- Statik ya da tam harmonik analizler için Jacobi Conjugate Gradient (Jacobi Birleşmiş Gradyan) (JCG) ya da Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (Cholesky Eksik Birleşmiş Gradyan) çözüm yöntemleri tavsiye edilir.
- İndirgenmiş harmonik analiz için, özelleştirilmiş bir yay sabiti yoktur.

3.3.1.1 İletkenlik, Piezoelektrik Matris ve Elastik Katsayı Matrisi

Piezoelektrik bir model, iletkenlik ya da yalıtkanlık sabiti, piezoelektrik matris ve elastik katsayı matrisi gibi tanımlanmış malzeme özellikleri gerektirmektedir.

3.3.1.1.1 İletkenlik $[\varepsilon]^s$ (Dielektrik Sabiti)

PERX, PERY ve PERZ olarak MP komutuyla özelleştirilmiştir. ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} ve sırasıyla iletkenlik matrisinin $[\varepsilon]^s$ diagonal bileşenleridir (Burada s sabit gerilmede hesaplanmış sabitleri gösterir).

3.3.1.1.2 Piezoelektrik Matris $[e]$

Bu matris üç boyutlu modellerde 6x3, iki boyutlu modellerde 4x2 bir matristir ve elektrik alanla gerilme arasında bir bağlantı kurar.

$[e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} \end{matrix}$ Üç Boyutlu	$[e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \\ e_{31} & e_{32} \\ e_{41} & e_{42} \end{bmatrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \end{matrix} \end{matrix}$ İki Boyutlu
---	--

$[e]$ matrisini belirlemek için TB, PIEZ ve TBDATA komutları kullanılır.

En çok kullanılan piezoelektrik malzemelerde $[e]$ matrisi için kullanılan sıra x, y, z, yz, xz, xy şeklindedir (IRE standartlarına göre). Halbuki ANSYS programında giriş sırası x, y, z, xy, yz, xz şeklindedir. Bu durumda $[e]$ matrisinin ANSYS giriş sırasına göre düzenlenmesi gereklidir. Kesme terimleri, satır elemanları basit olarak aşağıdaki gibi açılabilir :

- IRE sabitleri $[e_{61}, e_{62}, e_{63}]$ ANSYS'e xy satır elemanları olarak girilecek.
- IRE sabitleri $[e_{41}, e_{42}, e_{43}]$ ANSYS'e yz satır elemanları olarak girilecek.
- IRE sabitleri $[e_{51}, e_{52}, e_{53}]$ ANSYS'e xz satır elemanları olarak girilecek.

$$\text{ANSYS } [e] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z \end{matrix} \\ \begin{matrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{matrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} \end{matrix}$$

3.3.1.1.3 Elastik Katsayı Matrisi $[c]$ (veya $[d]$)

Bu matris üç boyutlu modellerde 6x6, iki boyutlu modellerde 4x4 simetrik bir matristir. KEYOPT yerleştirmesine bağlı olarak sertlik katsayıları ya da uygunluk katsayıları olarak adlandırılır.

$$[c], [d] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_{11} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{matrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_{11} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{matrix} & \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \end{matrix} \end{matrix}$$

Üç Boyutlu

İki Boyutlu

TB, ANEL ve TBDATA komutları, katsayı matrislerini belirlemek için kullanılır. $[e]$ matrisi anlatılırken değinildiği gibi $[c]$ ve $[d]$ matrisleri için kullanılan piezoelektrik malzemenin, çoğu farklı bir düzendedir. Bu durumda yine, IRE matrisinin ANSYS giriş sırasına göre düzenlenmesi gereklidir. Kesme terimleri için satır ve sütun elemanları aşağıda gösterilmiştir.

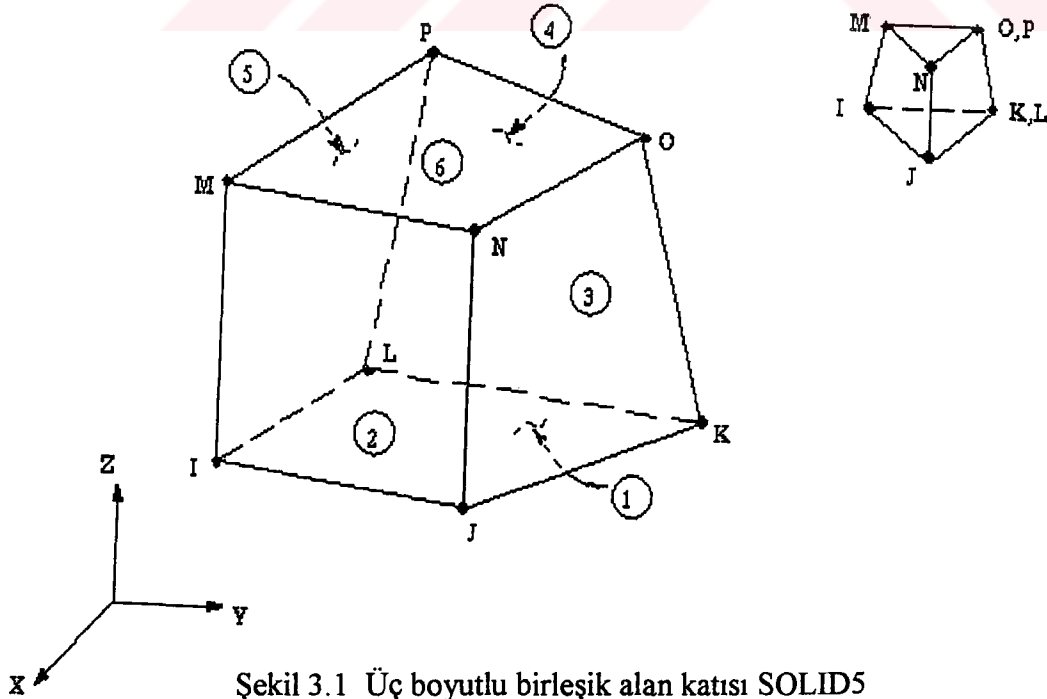
- IRE terimleri $[c_{61}, c_{62}, c_{63}, c_{64}]$ ANSYS'e xy satır elemanları olarak girilecek.

- IRE terimleri $[c_{41} \ c_{42} \ c_{43} \ c_{46} \ c_{44}]$ ANSYS'e yz satır elemanları olarak girilecek.
- IRE terimleri $[c_{51}, \ c_{52}, \ c_{53}, \ c_{56}, \ c_{54}, \ c_{55}]$ ANSYS'e xz satır elemanları olarak girilecek.

$$\text{ANSYS } [c]^E = \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{66} & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{46} & c_{44} & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{56} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix} \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix}$$

Young modülü [MP, EX], Poisson oranı [MP, NUXY] ve kesme modülü [MP, GXY] olarak özelleştirilmiş matris, $[c]$ ve $[d]$ matrisine bir alternatiftir.

3.4 ANSYS'DE ÜÇ BOYUTLU BİRLEŞİK ALAN ANALİZİNDE KULLANILAN SOLID5'İN ÖZELLİKLERİ



Şekil 3.1 Üç boyutlu birleşik alan katısı SOLID5

SOLID5 manyetik, termal, elektrik, piezoelektrik ve yapısal alanlarla ilgili analizlerde kullanılan bir elemandır. Bu eleman, her biri 6 serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktasından oluşmaktadır. Birleşik alan elemanları PLANE13, SOLID62 ve SOLID98'le benzer alan yeteneklerine sahiptir.

3.4.1 Giriş Bilgileri

Bu eleman için geometri, düğüm yerleşimleri ve koordinat sistemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bir eleman malzeme özellikleri ve 8 düğüm noktası ile tanımlanır. Birimlerin tipi (MKS, CGS veya kullanıcının belirlediği) EMUNIT komutuyla belirtilir. Bu komutla MUZERO'nun da değeri belirlenebilir. EMUNIT ilk değerleri MKS birimleri ve $MUZERO = 4\pi \times 10^{-7}$ Henri/metre'dir. MUZERO'ya ek olarak orthotropik izafi geçirgenlik; MURX, MURY ve MURZ malzeme özellikleriyle belirlenmiştir.

MGXX, MGYX ve MGZZ daimi mıknatıs özellik gösteren malzemeler için zorlayıcı kuvvetin vektör bileşenlerini gösterir. Zorlayıcı kuvvetin büyüklüğü bileşenlerin, karelerinin toplamının kareköküne eşittir. Kutuplama yönü MGXX, MGYX ve MGZZ bileşenleri tarafından belirlenir. Daimi mıknatıs kutuplama yönleri eleman koordinat yönleriyle benzerdir. Orthotropik malzeme yönleri de eleman koordinat yönlerine uymaktadır. Nonlineer manyetik, piezoelektrik ve izotropik olmayan elastikiyet özellikleri TB komutuyla girilir. Nonlineer orthotropik manyetik özellikleri, B-H eğrileri ve lineer izafi geçirgenliğin bir kombinasyonu ile belirtilebilir. B-H eğrileri izafi geçirgenliğin değerinin sıfır olarak belirlendiği, eleman koordinat yönlerinin herbirinde kullanılacaktır. Malzeme başına sadece bir B-H eğrisi belirlenebilir.

Düğümsel yüklemelerin değişik kombinasyonları, bu eleman üzerinde uygulanabilir (KEYOPT(1) değerine bağlı olarak). Düğümsel yükler D ve F komutlarıyla tanımlanır. D komutuyla, serbestlik derecesiyle ilgili UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG (değerle ilgili yerdeğiştirme, sıcaklık, voltaj ve skaler manyetik potansiyel) değerleri, F komutuyla, kuvvetle ilgili F_x, HEAT, AMPS, FLUX (değerle ilgili kuvvet, ısı akışı, akım ya da şarj ve manyetik değişim) değerleri tanımlanır.

Şekil yükleri; basınç, ısı iletimi, ısı akışı ve Maxwell kuvvetleri SF ve SFE komutları kullanılarak, Şekil 3.1’de daire içinde gösterilen eleman yüzeyleri üzerinden girilebilir (Pozitif basınç elemanının içine uygulanır). Yüzeylerdeki manyetik kuvvetler, yüzey yük komutları üzerindeki MXWF etiketi kullanılarak hesaplanabilir. Maxwell gerilme tensörünün hesabı bu yüzeylerde manyetik kuvvetler elde etmek için yapılır. Bu kuvvetler, çözümde yapısal yükler olarak uygulanır.

Gövde yükleri; sıcaklık, ısı oluşturma oranı ve manyetik gerçek yer değiştirme elemanların düğümlerinin değeri ya da sadece eleman değerine bağlı olarak BF ve BFE komutlarıyla girilebilir.

Aşağıdaki tabloda SOLID5 ile ilgili özellikler gösterilmiştir.

Tablo 3.3 SOLID5 Giriş Bilgileri

Eleman ismi	SOLID5
Düğüm Noktaları	I, J, K, L, M, N, O, P
Serbestlik Derecesi	KEYOPT(1)=0 ⇒ UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG KEYOPT(1)=1 ⇒ TEMP, VOLT, MAG KEYOPT(1)=2 ⇒ UX, UY, UZ KEYOPT(1)=8 ⇒ TEMP KEYOPT(1)=9 ⇒ VOLT KEYOPT(1)=10 ⇒ MAG
Gerçek Sabitler	Yok

Malzeme Özellikleri

EX, EY, EZ, (PRXY, PRYZ, PRXZ ya da NUXY, NUYZ, NUXZ), ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GYZ, GXZ, DAMP, KXX, KYY, KZZ, C, ENTH, MUZERO, MURX, MURY, MURZ, RSVX, RSVY, RSVZ, MGXX, MGYX, MGZZ, PERX, PERY, PERZ, BH, ANEL ve PIEZ bilgi tabloları.

Yüzey Yükleri

Basınç:

yüzey1 (J-I-L-K), yüzey2 (I-J-N-M), yüzey3 (J-K-O-N), yüzey4 (K-L-P-O), yüzey5 (L-I-M-P), yüzey6 (M-N-O-P)

Isı İletimi:

yüzey1 (J-I-L-K), yüzey2 (I-J-N-M), yüzey3 (J-K-O-N), yüzey4 (K-L-P-O), yüzey5 (L-I-M-P), yüzey6 (M-N-O-P)

Isı Akışı:

yüzey1 (J-I-L-K), yüzey2 (I-J-N-M), yüzey3 (J-K-O-N), yüzey4 (K-L-P-O), yüzey5 (L-I-M-P), yüzey6 (M-N-O-P)

Maxwell Kuvvetleri:

yüzey1 (J-I-L-K), yüzey2 (I-J-N-M), yüzey3 (J-K-O-N), yüzey4 (K-L-P-O), yüzey5 (L-I-M-P), yüzey6 (M-N-O-P)

Gövde Yükleri

Isılar:

T(I), T(J), T(K), T(L), T(M), T(N), T(O), T(P)

Sıcaklık Oluşturma:

HG(I), HG(J), HG(K), HG(L), HG(M), HG(N), HG(O), HG(P)

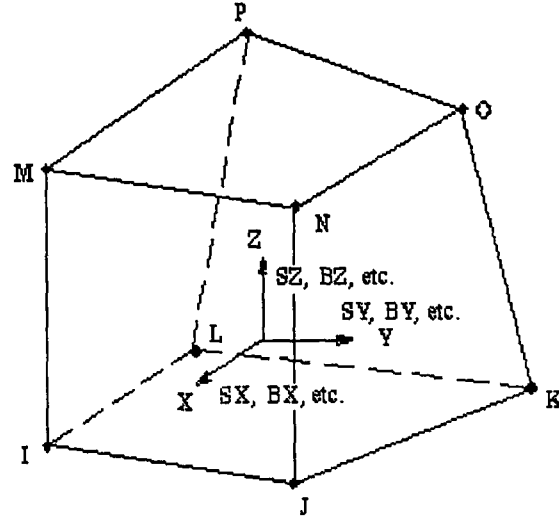
Gövde Yükleri	Manyetik Gerçek Yerdeğiştirme: VD(I), VD(J), VD(K), VD(L), VD(M), VD(N), VD(O), VD(P)
Özel Nitelikler	Alan birleştirme için tekrarlı bir çözüm gerektirir(piezoelektrik olmayan yer değiştirme, sıcaklık, elektrik, manyetik).
KEYOPT(1)	Serbestlik derecesinin seçimi için kullanılır.
KEYOPT(2)	Sadece elastik rijitlik matrisinin MP komutu yerine TB komutuyla girildiği durumlarda kullanılır. 0 giriş: rijitlik ya da "C" matrisini gösterir. 1 giriş: esneklik ya da "D" matrisini gösterir.
KEYOPT(3)	0 ekstra durumlar içerir. 1 ekstra durumlar içermez.
KEYOPT(5)	0 temel eleman çıktısı 2 düğümsel gerilme ya da manyetik alan çıktısı

3.4.2 Çıkış Bilgileri

Çıkış çözümü ile eleman arasında iki türlü ilişki kurulabilir.

- a- Düğümsel serbestlik derecesi sonuçları, düğümsel çözümün hepsini içermektedir.
- b- Tablo 3.4'te eleman çıkışlarıyla alakalı bazı bilgiler gösterilmiştir.

Eleman gerilme yönleri, eleman koordinat sistemine paraleldir. Düğüm noktalarındaki reaksiyon kuvvetleri, ısı akışı, akım ve manyetik akı OUTPR komutuyla basılabilir.



Şekil: 3.2 SOLID5 Eleman Çıkışları

Tablo 3.4 şu şekilde düzenlendi :

İsim kolonunda gösterilenler, bileşen isim metoduyla [ETABLE, ESOL] girilebilen bölümleri göstermektedir. “O” ve “R” kolonları Jobname.OUT (“O”) dosyasındaki ya da sonuçlar dosyasındaki (“R”) bölümlerin kullanılabilirliğini göstermektedir. “•” işareti bölümün her zaman kullanılabilir olduğunu göstermektedir. 1 ve 2 rakamları bölümün şartlı olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Hiçbir işaretin olmaması da bölümün kullanılamaz olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.4 : SOLID5 Eleman Çıkış Tanımlamaları

İsim	Açıklama	O	R
EL	Eleman numarası	•	•
NODES	Eleman düğüm noktaları; I, J, K, L, M, N, O, P	•	•
MAT	Eleman malzeme numarası	•	•
VOLU	Eleman hacmi	•	•
CENT: X, Y, Z	Küresel yerleştirme XC, YC, ZC	•	•
PRES	J, I, L, K düğüm noktalarında P1; I, J, N, M'de P2; J, K, O, N'de P3; K, L, P, O'da P4; L, I, M, P'de P5; M, N, O, P'de P6	•	•
TEMP	Giriş ısıları: T(I), T(J), T(K), T(L), T(M), T(N), T(O), T(P)	•	•

<i>İsim</i>	<i>Açıklama</i>	<i>O</i>	<i>R</i>
HGEN	Sıcaklık oluşturma girişleri: HG(I), HG(J), HG(K), HG(L), HG(M), HG(N), HG(O), HG(P)	•	•
S: INT	Gerilme şiddeti	1	1
S: EQV	Eşit gerilme	1	1
EPEL: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Elastik gerinimler	1	1
EPEL: 1, 2, 3	Asıl elastik gerinimler	1	1
S: X, Y, Z, XY, YZ, XZ	Bileşen gerilmeleri	1	1
S: 1, 2, 3	Asıl gerilmeler	1	1
LOC	Çıkış yerleri (X, Y, Z)	1	1
MUX,MUY,MUZ	Manyetik geçirgenlik	1	1
H: X, Y, Z	Manyetik alan şiddeti bileşenleri	1	1
H: SUM	H'nin vektör büyüklüğü	1	1
B: X, Y, Z	Manyetik akı yoğunluğu bileşenleri	1	1
B: SUM	B'nin vektör büyüklüğü	1	1
FJB	Lorentz manyetik kuvvet bileşenleri (X, Y, Z)	1	
FMX	Maxwell manyetik kuvvet bileşenleri (X, Y, Z)	1	
FVW	Virtüel iş kuvvet bileşenleri (X, Y, Z)	1	1
FMAG: X, Y, Z	Birleştirilmiş kuvvet bileşenleri (FJB ve FMX)		1
EF: X, Y, Z	Elektrik alan bileşenleri (X, Y, Z)	1	1
EF: SUM	EF'nin vektör büyüklüğü	1	1
JS: X, Y, Z	Kaynak akım yoğunluğu bileşenleri	1	1
JSSUM	JS'nin vektör büyüklüğü	1	1
JHEAT:	Birim hacim başına joule sıcaklık oluşturma	1	1
D: X, Y, Z	Elektrik akı yoğunluğu bileşenleri	1	1
D: SUM	D'nin vektör büyüklüğü	1	1
UE, UD, UM	Elastik(UE), Dielektrik(UD) ve birleşik elektromekanik enerjileri(UM)	1	1
TG: X, Y, Z	Termal değişim bileşenleri	1	1

<i>İsim</i>	<i>Açıklama</i>	<i>O</i>	<i>R</i>
TG: SUM	TG'nin vektör bileşenleri	1	1
TF: X, Y, Z	Termal akı bileşenleri	1	1
TF: SUM	TF'nin vektör büyüklüğü	1	1
FACE	Yüzey etiketi	2	2
AREA	Yüzey alanı	2	2
NODES	Yüzey düğüm noktaları	2	
HFILM	Yüzeyin herbir düğüm noktasının film katsayısı	2	
TBULK	Yüzeyin herbir düğüm noktasının hacim sıcaklığı	2	
TAVG	Ortalama yüzey sıcaklığı	2	2
HEAT RATE	Isı iletimiyle yüzey boyunca sıcak akış oranı	2	2
HEAT RATE/AREA	Isı akış oranı/ yüzey alanı boyunca ısı iletimi	2	
HFLUX	Yüzeyin herbir noktasında ısı akışı	2	
HFAVG	Yüzeyin ortalama film katsayısı	2	2
TBAVG	Ortalama yüzey hacim sıcaklığı		2
HFLXAVG	Giriş sıcak akışının sebep olduğu yüzey boyunca ısı akış oranı		2

1. Merkezdeki, eleman çözümü sadece giriş bilgilerine bağlı olarak hesaplanabilir.
2. Düğüm noktalarında gerilme ya da manyetik alan çözümü sadece KEYOPT(5)=2 ise mümkündür. Çözüm sonuçları her düğüm için tekrar edilir ve sadece bir yüzey yükü giriştir.

Tablo 3.5'deki çıkışlar sıralı sayı metoduyla, ETABLE komutu kullanılarak düzenlenebilir. Bu tabloda kullanılan ifadeler aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

İsim: Tablo 3.4'te tanımlanan çıkış miktarı.

Bölüm: ETABLE komutu için önceden belirlenmiş bölüm etiketi.

E: Tek değerli ya da sabit eleman bilgisi için sıralı sayı.

I, J, ..., P: I, J, ..., P düğümlerindeki bilgiler için sıralı sayı.

FC_n: n yüzey elemanının çözüm bölümleri için sıralı sayı.

Tablo 3.5 : SOLID5 ETABLE ve ESOL Komutları İçin Bölüm ve Sıralı Sayılar

<i>İsim</i>	<i>Bölüm</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>
P1	SMISC		2	1	4	3				
P2	SMISC		5	6			8	7		
P3	SMISC			9	10			12	11	
P4	SMISC				13	14			16	15
P5	SMISC		18			17	19			20
P6	SMISC						21	22	23	24
MUX	NMISC	1								
MUY	NMISC	2								
MUZ	NMISC	3								
FVWX	NMISC	4								
FVWY	NMISC	5								
FVWZ	NMISC	6								
FVW SUM	NMISC	7								
UE	NMISC	16								
UD	NMISC	17								
UM	NMISC	18								

		<i>FC1</i>	<i>FC2</i>	<i>FC3</i>	<i>FC4</i>	<i>FC5</i>	<i>FC6</i>
AREA	NMISC	19	25	31	37	43	49
HFAVG	NMISC	20	26	32	38	44	50
TAVG	NMISC	21	27	33	39	45	51
TB AVG	NMISC	22	28	34	40	46	52
HEAT RATE	NMISC	23	29	35	41	47	53
HFLX AVG	NMISC	24	30	36	42	48	54

3.4.3 Kabüller ve Sınırlamalar

Eleman hacmi ya da genişliği sıfır olmamalı. Bu durum genellikle eleman uygun numaralanmadığı zamanlarda meydana gelir. Elemanlar Şekil 3.1’de görüldüğü gibi numaralandırılabilir ya da IJKL ve MNOP düzlemleri yer değiştirebilir. Bir prizma şeklinde eleman eş düğüm numaraları belirleyerek de oluşturulabilir.

Skaler manyetik potansiyel farkı seçeneği, $\mu \rightarrow \infty$ gittiği tek bağlı geçirgen bölgelerle sınırlanır. Sonuç alanda $H \rightarrow 0$ ’a gider. İndirgenmiş skaler ve genel skaler potansiyel seçenekleri bu sınırlamaya tabi değildir.

Elemanın serbest yüzeyinde (diğer elemana bitişik olmayan ve herhangi bir sınır zorlamasına maruz kalmayan) manyetik akı yoğunluğu (B) normal bileşeni sıfır kabul edilir. Isı ve sıcaklık oluşturma oranları, içten hesaplanıyorsa; kullanıcının belirlediği ısı oluşturma oranları hesaba katılır. Termal, elektrik, manyetik ve yapısal terimler tekrarlı bir işlemle birleştirilir.

Bir modelde piezoelektrik serbestlik derecesiyle (volt ve yerdeğiştirme) aktive edilmiş en azından bir eleman varsa, volt serbestlik derecesinin gerektiği bütün elemanlar, piezoelektrik tiplerinden biri olmalıdır ve elemanların hepsi piezoelektrik serbestlik derecesiyle aktive edilmelidir. Eğer bu elemanlarda piezoelektrik etkisi istenmiyor ise piezoelektrikliği az bir malzeme seçilir.

3.5 ANSYS'DE BİRLEŞTİRME ETKİLERİ

3.5.1 Giriş

Birleşik alan analizi, birleştirilen yüzeylerde fiziksel farklı olayların karşılıklı etkileşiminin olduğu problemlerin çözümünde kullanılır. (Örneğin; manyetik alan ile elektrik alan etkileşimi gibi). Bir manyetik alan yapısal kuvvetler üretir. Isıl bir alan akışkan akışına tesir eder, aynı zamanda termal gerilmelerin artmasına sebep olur ve sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini etkiler. Tablo 3.6'daki elemanlar birleşik alan yeteneğine sahiptir.

Tablo 3.6 : Birleşik alan elemanları

SOLID5	Üç boyutlu birleşik alan katısı
PLANE13	İki boyutlu birleşik alan katısı
FLUID29	İki boyutlu akustik akışkan
FLUID30	Üç boyutlu akustik akışkan
PLANE53	İki boyutlu, 8 düğümlü manyetik-elektrik katısı
SOLID62	Üç boyutlu birleşik manyetik-yapısal katı
FLUID66	Birleşik termal-akış borusu
PLANE67	İki boyutlu birleşik termal-elektrik katısı
LINK68	Birleşik termal-elektrik çizgisi
SOLID69	Üç boyutlu termal-elektrik katısı
SOLID97	Üç boyutlu manyetik katı
SOLID98	Dört yüzlü birleşik alan katısı
FLUID141	İki boyutlu akışkan
FLUID142	Üç boyutlu akışkan

Birleşik alan formülasyonunun avantajlarını ve dezavantajlarını şöyle açıklayabiliriz.

Avantajları:

- a) Sonlu eleman yöntemiyle çözülemeyen bazı problemlerin çözümünü mümkün kılar.
- b) Tekil analize geçişte kullanılan bir eleman tipini kabul ederek birleşik alan problemlerinin modellemesini kolaylaştırır.

Dezavantajları:

- a) Dalga sınırını arttırır (ayrıca bir çözücü kullanılmadıkça).
- b) Daha büyük depolama yeri gerektirir.

3.5.2 Birleştirme

Temel olarak sonlu eleman formülasyonu tekniklerinde kullanılan matris denklemlerini geliştirmek için kullanılan iki metod vardır:

- a) Matris birleştirme: Matris denklemi;

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [X_1] \\ [X_2] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Birleştirme etkisi köşegen dışındaki K_{12} ve K_{21} yay rijitlik terimleriyle hesap edilir. Bu metod, çözümde bir tekrardan sonra birleşik bir cevap sağlayabilir.

- b) Yük vektörü birleştirme: Matris denklemi;

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [0] \\ [0] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [X_1] \\ [X_2] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

şeklindedir ve yük terimleri F_1 ve F_2 için birleştirme etkisi hesap edilir. Birleşik cevap elde etmek için en azından iki tekrar gerekmektedir. Bu metodtaki köşegen

matrisler, bir önceki tekrardaki bilinmeyenlerin fonksiyonlarıdır. Örneğin $[K_{22}]$ $\{X_1\}$ 'in bir fonksiyonudur.

Aşağıdaki listede birleşik alan analizindeki, birleştirme metodları gösterilmiştir.

Tablo 3.7 : Birleşik alan birleştirme metodları

Analiz Türü	Birleştirme Metodu
A, Termal-Yapısal	L
B, C Manyeto-Yapısal	L
D, Elektro-Manyetik	M
E, Elektro-Manyetik-Termal-Yapısal	L
F, Elektro-Manyetik-Termal	L
G, Piezoelektrik	M
H, Isı-Basınç	M, L
I, Hız-Isı-Basınç	L
J, Basınç-Yapısal(Akustik)	M
K, Isı-Elektrik	L
L, Manyetik-Termal	L
M = Matris Birleştirme, L = Yük Vektörü Birleştirme	

Çözüm sırası standart sonlu eleman metodundaki gibidir. Birleştirme bütün bilinenler ve bilinmeyenler (örneğin serbestlik derecesi) değiştiği zaman yapılır.[7]

Bizim yaptığımız çalışma piezoelektrik analizi içerdiğinden, bu analiz için matris denklemleri ve terminolojisi aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^2] \\ [K^2] & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ L \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

$\{F\}$ ve $\{L\}$ matrisleride aşağıdaki gibi açılabilir.

$$\{F\} = \{F^{nd}\} + \{F^{th}\} + \{F^{ac}\} + \{F^{pr}\}$$

$$\{L\} = \{L^{nd}\}$$

Matris denkleminde kullanılan terminoloji ise şöyledir:

$\{M\}$ = Yapısal kütle matrisi

$\{u\}$ = Yer değiştirme vektörü

$\{C\}$ = Yapısal esneklik matrisi

$\{K\}$ = Yapısal rijitlik matrisi

$\{V\}$ = Elektrik potansiyel vektörü

$\{K^d\}$ = Yalıtkan katsayı matrisi

$\{F^{nd}\}$ = Düğümlere uygulanan kuvvet vektörü

$\{F^{th}\}$ = Termal gerilme kuvvet vektörü

$\{F^{ac}\}$ = İvmelenme etkisine bağlı kuvvet vektörü

$\{F^{pr}\}$ = Basınç yük vektörü

$\{L^{nd}\}$ = Düğümlere uygulanan yük vektörü

BÖLÜM 4

ANSYS'DE PIEZOELEKTRİKLER

Piezoelektrik analizinde aşağıdaki elemanlar kullanılır.

SOLID5 - Birleşik alan katı elemanı

PLANE13 – İki boyutlu birleşik alan katı elemanı

SOLID98 – Dört yüzlü birleşik alan katı elemanı

Birleşik piezoelektrik etkili, sonlu eleman denklemlerini geliştirmek için değişik prensipler kullanılır.

Elektromekanik esaslı lineer malzemeler için denklemler;

$$\{T\} = [c]\{S\} - [e]\{E\} \quad (4.1)$$

$$\{D\} = [e]^T \{S\} + [\varepsilon]\{E\} \quad (4.2)$$

ya da bunlara eş olarak;

$$\begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & [e] \\ [e]^T & -[\varepsilon] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{S\} \\ -\{E\} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$\{T\}$ = Gerilme vektörü ($\{\sigma\}$ 'nin yerine)

$\{D\}$ = Elektrik akı yoğunluğu vektörü

$\{S\}$ = Gerinim vektörü ($\{\epsilon\}$ 'nin yerine)

$\{E\}$ = Elektrik alan vektörü

$[c]$ = Elastiklik matrisi (sabit elektrik alandaki değeri hesaplanır, $[D]$ 'nin yerine)

$[e]$ = Piezoelektrik matris

$[\epsilon]$ = Dielektrik matris (sabit mekanik gerilmedeki değeri hesaplanır)

(4.1) ve (4.2) denklemleri birleştirme terimlerini ihtiva eden piezoelektrik matris $[e]$ hariç, yapısal ve elektrik alanlar için esas denklemlerdir.

Elastiklik matrisi $[c]$, normalde $[D]$ matrisidir ve MP komutuyla girilir. Aynı zamanda anizotropik simetrik matris olarak $[c]$ ya da tersi alınarak $[c]^{-1}$ şeklinde de TBDATA komutları TB, ANEL ile girilebilir.

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ \text{simetrik} & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$[e]$ piezoelektrik matrisi (TBDATA komutları TB, PIEZ kullanılarak girilir)
elektrik alan vektörü $\{E\}$ ile X, Y, Z düzeninde, gerilme vektörü $\{T\}$ ile X, Y, Z, XY, YZ, XZ düzeninde ilişkilidir ve matris formunda aşağıdaki gibi yazılır;

$$[e] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Dielektrik matris $[\varepsilon]$ giriş büyüklükleri PERX, PERY ve PERZ, MP komutlarıyla girilir ve matris formunda aşağıdaki gibi yazılır;

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Sonlu eleman analizi düğümsel çözüm değişkenleri ve yaklaşık çözüm sonucu veren bir eleman üzerindeki, eleman şekil fonksiyonları tarafından yapılır.

$$\{u_e\} = [N^u]^T \{u\} \quad (4.7)$$

$$V_e = [N^v]^T \{V\} \quad (4.8)$$

Burada;

$\{u_e\}$ = Eleman alanının X, Y, Z yönlerindeki yerdeğiştirmesi

V_e = Eleman alanının elektrik potansiyeli

$[N^u]$ = Yer değiştirme durum fonksiyonlarının matrisi

$\{N^v\}$ = Elektriksel potansiyel durum fonksiyonunun vektörü

$\{u\}$ = Düğümsel yerdeğiştirmenin vektörü

$\{V\}$ = Dügümsel elektriksel potansiyelin vektörü

Bu ifadeleri açarsak;

$$[N^u]^T = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\{N^v\}^T = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_n] \quad (4.10)$$

N_i = i düğümü için durum fonksiyonu

$$\{u\} = [UX_1 \quad UY_2 \quad UZ_3 \quad \dots \quad UX_n \quad UY_n \quad UZ_n]^T \quad (4.11)$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

n = Eleman düğümlerinin sayısı

Gerinim $\{S\}$ ve elektrik alan $\{E\}$ yerdeğiştirmeler ve potansiyellerle sırasıyla aşağıdaki gibi ilgilidir;

$$\{S\} = [B_u] \{u\} \quad (4.13)$$

$$\{E\} = - [B_v] \{V\} \quad (4.14)$$

$$[B_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N^u]^T \quad (4.15)$$

$$[B_v] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \{N^v\}^T \quad (4.16)$$

Değişken durum uygulamaları ve sonlu eleman analizinden sonra birleştirilmiş sonlu eleman matris denklemi bir eleman modeli için çıkarılırsa;

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^2] \\ [K^2]^T & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ L \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Değişkenlerin üzerindeki nokta; zamana göre türevlerini göstermektedir. Aşağıdaki denklemler ile denklem (4.17)'deki alt matrisler için açıklama getirilmiştir.

Yapısal Kütle :

$$[M] = \int_{vol} \rho [N^u]^T [N^u] d(vol) \quad (4.18)$$

ρ = Kütle yoğunluğu (MP komutuyla girilir)

Yapısal Sertlik :

$$[K] = \int_{vol} [B_u]^T [c] [B_u] d(vol) \quad (4.19)$$

Dielektrik İletkenliği :

$$[K^d] = - \int_{vol} [B_v]^T [\varepsilon] [B_v] d(vol) \quad (4.20)$$

Piezoelektrik Birleştirme Matrisi :

$$[K^z] = \int_{vol} [B_u]^T [e] [B_v] d(vol) \quad (4.21)$$

Elektriksel Yük Vektörü :

$\{L\} = \{L^{nd}\}$ = Uygulanan düğümsel yük vektörü

Enerji katsayıları her piezoelektrik eleman için aşağıdaki gibi hesaplanır.

Elastik Enerji :

$$U_E = \frac{1}{2} \{u\}^T [K] \{u\} \quad (4.22)$$

Dielektrik Enerji :

$$U_D = \frac{1}{2} \{V\}^T [K^d] \{V\} \quad (4.23)$$

Elektromekanik Birleşik Enerji :

$$U_M = \frac{1}{4} (\{u\}^T [K^z] \{V\} + \{V\}^T [K^z]^T \{u\}) \quad (4.24)$$

Yukarıdaki enerji katsayıları U_E , U_D ve U_M sırasıyla bilgi dosyaları olarak saklanır. [7]

BÖLÜM 5

ANSYS'DE YÜKLEME

Sonlu eleman analizinde esas amaç, bir yapı ya da elemanın belirli bir yükleme durumunda nasıl davranış gösterdiğini açıklamaktır. Belirtilmiş uygun yükleme durumları, analizde bir anahtar basamaktır. ANSYS programında modele yüklemeler değişik yollarla uygulanabilir. Yük adımı seçenekleri yardımıyla, yüklerin çözüm sırasında nasıl kullanıldığı kontrol edilebilir.

5.1 YÜK ÇEŞİTLERİ

ANSYS terminolojisindeki yük terimi, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi iç ya da dıştan uygulanan kuvvet fonksiyonlarını içerir. Farklı durumlardaki yükleme örnekleri şunlardır:

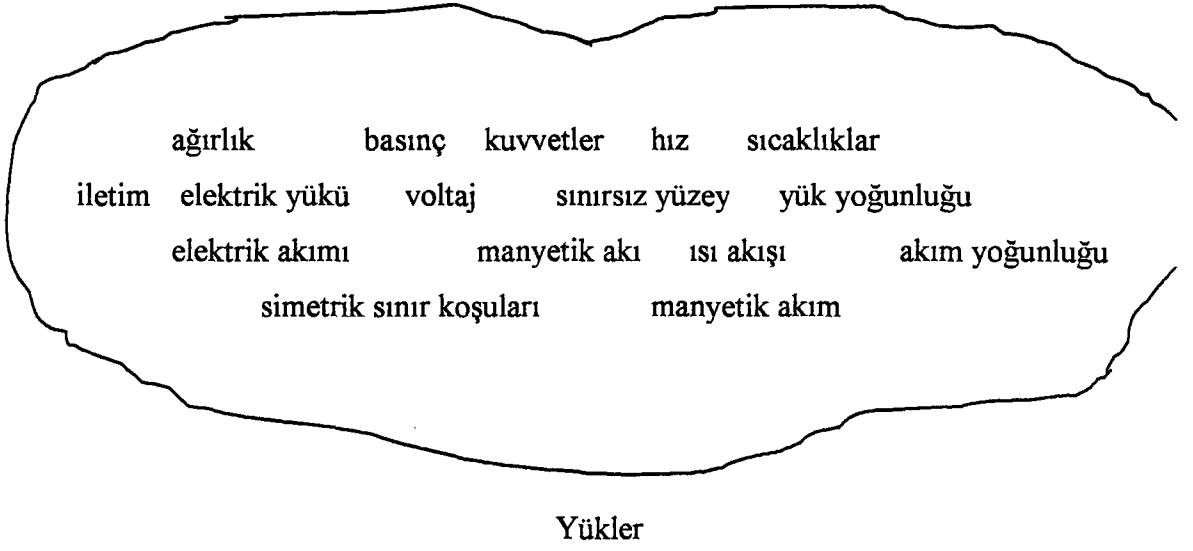
Yapısal : Yer değiştirmeler, kuvvetler, basınçlar, sıcaklıklar (termal gerilme için), ağırlık.

Termal : Sıcaklıklar, ısı akışı oranları, ısı iletim, iç sıcaklık oluşumu, sınırsız yüzey.

Manyetik : Manyetik potansiyeller, manyetik akı, manyetik akım parçaları, kaynak akım yoğunluğu, sınırsız yüzey.

Elektrik : Elektrik potansiyeller (voltaj), elektrik akımı, elektrik yükleri, yük yoğunluğu, sınırsız yüzey.

Akışkan : Hızlar, basınçlar.



Şekil 5.1 : Yükler, yüklemenin diğer durumlarında olduğu gibi sınır koşullarını içerir

Yükler altı kısma ayrılabilir : Serbestlik derecesi zorlaması, kuvvetler(bir noktaya toplanmış yükler), yüzey yükleri, gövde yükleri, hareketsiz yükler, birleşik alan yükleri.

- Serbestlik derecesi zorlaması; serbestlik derecesi bilinen bir değere yerleştirilir. Zorlamalara örnek olarak; yapısal analizdeki simetrik sınır durumları ve yerdeğiştirmeler, ısı analizdeki sıcaklıklar verilebilir.
- Kuvvet; modeldeki bir düğüm noktasına uygulanan toplanmış yüküdür. Buna örnek olarak yapısal analizde kuvvetler ve momentler, termal analizde ısı taşınım ve ısı akışları verilebilir.
- Yüzey yükü; bir yüzey üzerine uygulanan yayılı yüküdür. Örnek olarak yapısal analizde basınçlar, termal analizde ısı taşınım ve ısı akışları verilebilir.
- Gövde yükü; hacimsel ya da alan yüküdür. Yapısal analizde sıcaklıklar, termal analizde sıcaklık oluşturma oranları ve manyetik alan analizinde akım yoğunlukları örnek olarak verilebilir.

- Atalet yükleri; kütle, yerçekimi ivmesi, açısal hız ve açısal ivmedir. Genelde yapısal analizde kullanılır.
- Birleşik alan yükleri; yukarıda geçen yüklemelerden birinin özel durumudur. Bir analizden elde edilen sonuçlar, diğer analizde yük olarak kullanılır. Örneğin manyetik alan analizinde hesaplanan manyetik kuvvetler, yapısal analizde kuvvet yükü olarak uygulanabilir.

5.2 YÜKLERİN UYGULANMASI

Yükler, katı model üzerinde anahtar noktalardan, çizgilerden ve alanlardan ya da sonlu eleman modeli üzerinde düğüm noktalarından ve elemanlardan uygulanabilir. Örneğin kuvvetler bir anahtar noktada ya da bir düğüm noktasında belirtilebilir. Benzer olarak ısı taşınım gibi yüzey yükleride, çizgi ve alanlar üzerinden ya da eleman yüzleri ve düğüm noktaları üzerinden belirtilebilir. Yüklerin nasıl belirtileceği önemli değildir; çözücü bütün yükleri sonlu eleman modeli şartlarında kabul eder. Bu yüzden, yükler eğer katı model üzerinden belirtilmiş ise, program otomatik olarak çözümün başlangıcında yükleri düğüm noktalarına ve elemanlara taşır.

5.3 SERBESTLİK DERECEŚİ ZORLAMALARI

Tablo 5.1’de değişik durumlarda, ANSYS’deki etiketlerle ne tür serbestlik derecelerinin oluştuğu görülmektedir.

Tablo 5.1 : Değişik durumlarda kullanılan serbestlik derecesi zorlamaları

Durum	Serbestlik Derecesi	ANSYS Etiketi
Yapısal	Taşımalar	UX, UY, UZ
	Dönmeler	ROTX, ROTY, ROTZ
Termal	Isı	TERM
Manyetik	Vektör Potansiyelleri	AX, AY, AZ

	Dönmeler	ROTX, ROTY, ROTZ
Termal	Isı	TERM
Manyetik	Vektör Potansiyelleri Skaler Potansiyel	AX, AY, AZ MAG
Elektrik	Voltaj	VOLT

Tablo 5.2’de ise uygulamak, listelemek ve serbestlik derecesi zorlamalarını silmek için gerekli komutlar verilmiştir. Zorlamalar düğüm noktalarından, anahtar noktalardan, çizgilerden ve alanlardan uygulanabilir.

Tablo 5.2: Serbestlik derecesi zorlamaları için komutlar

Yer	Ana Komutlar	Ek Komutlar
Düğüm noktaları	D, DLIST, DDELE	DSYM, DSCALE, DCUM
Anahtar noktalar	DK, DKLIST, DKDELE	-
Çizgiler	DL, DLLIST, DLDELE	-
Alanlar	DA, DALIST, DADELE	-
Aktarım	SBCTRAN	DTRAN

Bu komutlara doğrudan program üzerindeki pencerelerden ise aşağıdaki şekilde ulaşılabilir: [7]

Main Menu>Preprocessor>Loads>Apply>Load Type>On Nodes
Utility Menu>List>Loads>DOF Constraints>On Keypoints
Main Menu>Solution> Apply>Load Type>On Lines

BÖLÜM 6

REFERANS ÇALIŞMALAR

Yaptığımız çalışmada bize temel olan iki çalışma bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

6.1 YARIM DAİRE ŞEKLİNDE POLİMERİK BİR PIEZOELEKTRİK MİKROTAHRİKÇİNİN DİZAYNI VE MODELLEMESİ

Diann E. Brei ve James Blechschmidt tarafından yapılan bu çalışmada, piezoelektrik polymer polyvinlidene fluoride (PVdF) kullanılarak yapılan yapay bir el için, gerekli tahrikçinin dizaynı üzerine çalışmalar yapıldı. Mikrotahrikçiler bir araya getirilerek bir makrotahrikçi elde edildi ve bu makrotahrikçinin yapay eldeki bir tendon olarak kullanılması planlandı.[4]

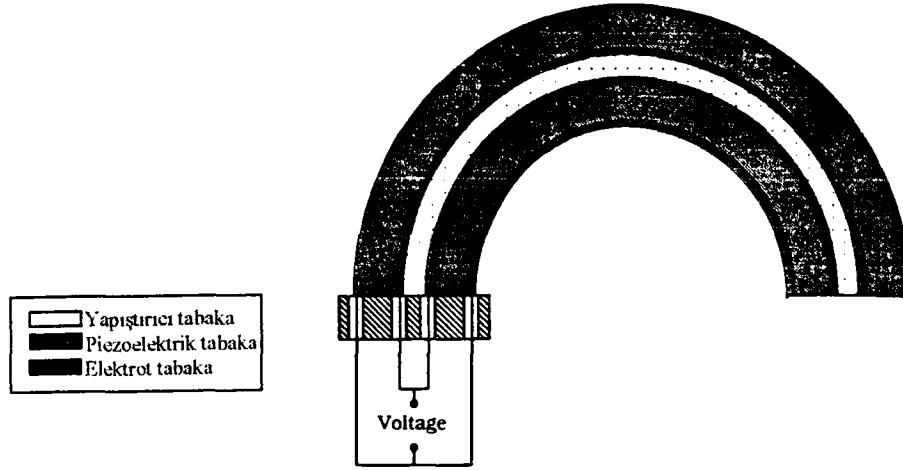
6.1.1 Mikrotahrikçi Dizaynı

Bu çalışmada Şekil 6.1.1’de görülen dizayn geliştirildi. Yarım daire şeklindeki çift katmanlı mikrotahrikçiye elektrik voltaj paralel olarak uygulanıyor. İki piezoelektrik katman birbirine yapıştırılmıştır.

Çalışmada cihazın yarım daire şeklinde seçilme sebebi; bu şekilde piezoelektrik malzemenin sapma yönlerinin standart durumdakinden farklı olmasıdır. 1 eksen dairesel yönde, 2 eksen kirişin genişliği yönünde ve 3 eksen radyal yönde seçilmiştir.

Piezoelektrik katmanlar, voltaj radyal yönde uygulanarak tahrik edilir. Katmanlar zıt kutuplara sahiptir. Pozitif voltajla tahrik edilen katman 1 ve 2 yönlerinde uzar 3

yönünde kısalır, diğer katmanın hareketi tam zıttır. İki katman birbirine yapıştırılmış olduğu için çubuk bükülür.



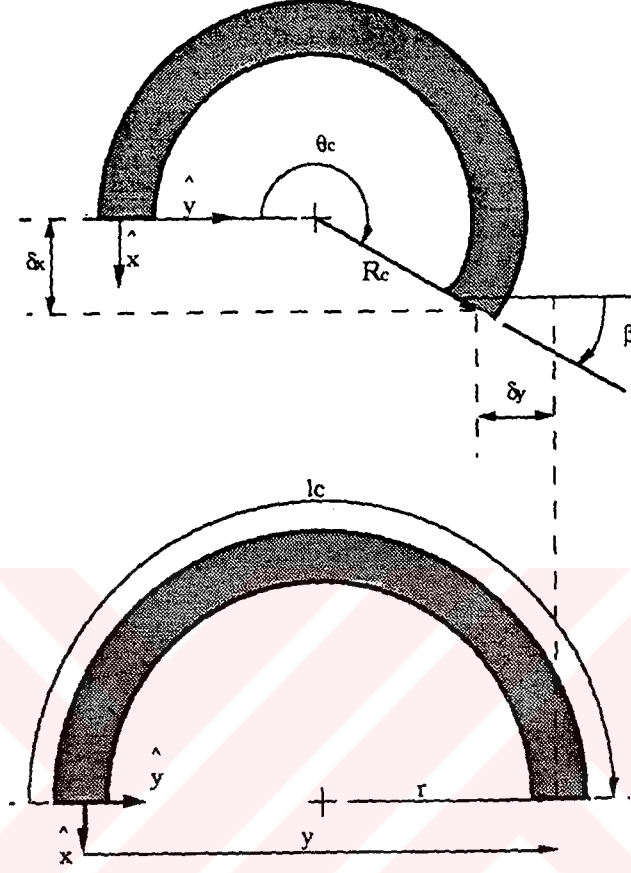
Şekil 6.1.1 : Yarım daire profilli mikrotahrikçi dizaynı

6.1.2 Mikrotahrikçi İçin Dönme Modeli

Dönme-voltaj ilişkisini çıkarmak için Marcus'un planladığı yol takip edildi [8]. Bir elektrik alan çift katmanlı bir elemana uygulandığında, dıştan bir döndürme momenti uygulanmış gibi çubukta bir dönme meydana gelir. Bu durum bükülme yarıçapında ve kirişin uç pozisyonunda bir değişikliğe sebep olur.

Bu analizde şu kabuller yapıldı: Çubuğun kalınlığı ve genişliği, bükülme yarıçapıyla karşılaştırıldığında çok küçük seçildi, böylece ince çubuk analizi mümkün oldu. Tarafsız eksen ile merkez eksen arasındaki fark ihmal edilebilir olduğundan, sadece merkez eksen kullanıldı. Elektrik alanın sadece 3 eksen boyunca uygulandığı düşünüldü. 2 ve 3 eksenleri oluşan kuvvet ve çubuğun ucundaki dönme az olduğu için ihmal edildi. Çünkü bu eksenler üzerindeki piezoelektrik gerilme sabiti ve kalınlık oldukça küçüktür. Çubuğun ucundaki dönmenin sadece 1 eksen üzerindeki farklı katmanların oluşturduğu gerilmeden meydana geldiği düşünülebilir.

Çubuk modeli Şekil 6.1.2’de görüldüğü gibi analiz edildi. Merkez üzerine konulmuş dik açılı bir koordinat sistemi kullanıldı. Çubuktaki her bir katman ince ve benzer kalınlıkta olduğu için herbiri analizde göz önünde bulunduruldu.



Şekil 6.1.2: Yarım daire mikrotahrikçinin dönmesi

Yarım daire biçiminde çift katmanlı kirişin analizi, giriş voltajının davranışı hariç çift katmanlı düz bir kirişin analiziyle hemen hemen aynıdır. Çift katmanlı standart düz bir çubukta kullanılacak denklemin yarım daire için eşleniğini çıkarabiliriz. Toda’ya göre [9], düz bir çubuğu yarım daire haline döndürecek maksimum voltaj V_m ;

$$V_m = \frac{t_p h G_{üst}}{3 d_{31} G_{alt} r} \quad (6.1.1)$$

$G_{üst}$ ile G_{alt} malzeme özelliklerine ve dizayn büyüklüklerine bağlı sabitlerdir ve;

$$G_{alt} = Y_b \alpha^3 + Y_p((1-b)^3 - (a+b)^3) + Y_e(1 - (1-b)^3 + (a+b)^3 - \alpha^3) \quad (6.1.2)$$

$$G_{alt} = Y_b \alpha^2 + Y_p((1-b)^2 - (a+b)^2) + Y_e(1 - (1-b)^2 + (a+b)^2 - \alpha^2) \quad (6.1.3)$$

Eğer bu maksimum voltaj V_m bir V_i voltaj seviyesiyle azaltılırsa, pozisyon ilk durumdaki V_e giriş voltaj seviyesinin sebep olduğu pozisyona döner ve;

$$V_c = V_m - V_i \quad (6.1.4)$$

ile hesaplanır.

Yarım daire şeklinde bir çubuğa V_i giriş voltajı uygulandığında oluşan yer değişimi, V_e giriş voltajı uygulandığı zaman oluşan yer değişimiyle aynıdır. Böylece yarım daire şeklinde bir çubuğun analizi düz çubuk teorisi kullanılarak yapılabilir ve V_e , giriş voltajının yerine kullanılabilir. Her ne kadar, gerçek giriş voltajı ve çubuğun ilk uç pozisyonu aynı olmasa da sonuçtaki uç pozisyonu aynıdır.

Marcus, dönmenin denklemini, bükülme yarıçapını çözerek çıkartmıştır. Ayrıca çift katmanlı dizaynın, katmanlarının herbirinin bükülme yarıçapına doğrudan etkidiği için göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir. Düz çubuk voltajı V_e , bükülmenin yarıçapının bulunmasında kullanılır.

$$R_c = \frac{t_p h G_{alt}}{3d_{31}(V_m - V_i)G_{alt}} \quad (6.1.5)$$

Bükülmenin yarıçapının bilinmesiyle, çubuğun uç noktasının dönmesi bulunabilir. Çubuk rijit olarak mesnetlendiği için mesnetteki dönme açısı sıfırdır. Çubuğun orjinal uzunluğu;

$$l_c = \pi r \quad (6.1.6)$$

Bükülmenin yeni yarıçapı;

$$R_c \theta_c = l_c \quad (6.1.7)$$

Buradan θ_c bulunabilir. Yeni uç konumu;

$$y' = R_c - R_c \cos \theta_c \quad (6.1.8)$$

$$x' = R_c \sin \theta_c \quad (6.1.9)$$

denklemleriyle bulunabilir. Çubuğun serbest ucunun dönmesi;

$$\delta_y = y' - y = R_c - R_c \cos \theta_c - 2r \quad (6.1.10)$$

$$\delta_x = x' - x = R_c \sin \theta_c \quad (6.1.11)$$

ve ucun dönme açısı şekil 6.1.3'te gösterildiği gibi;

$$\beta = \theta_c - \pi \quad (6.1.12)$$

Bu değişken kuvvet analizinde gereklidir. x ve y yönündeki dönmeler giriş voltajına bağlıdır.

Yapay el uygulamaları için yatay uzunluk boyunca olan uzamaların büyütülmesi önemlidir. Piezoelektrik malzemenin yüzey uzunluğu daha büyük olursa daha büyük dönme elde edilebilir. Yatay uzunluktaki en büyük uzama yarım daire dizaynda, en az uzama ise düz destekli çubuk dizaynda elde edilir. Genel tahrikçi uygulamaları için yarım daire şeklinde bir çubuğun dairesel uzunluğu ile düz destekli çubuğun uzunluğunu aynı olarak karşılaştırmak uygundur.

6.1.3 Deneysel Modelin Geometrik ve Malzeme Özellikleri

Elektrot kalınlığı: 11 μ

Piezoelektrik katmanın kalınlığı: 28 μ

Yapıştırıcı Kalınlığı: 5 μ

İç çap: 1,25 cm

Genişlik: 1,9 cm

Elektrotun Young modülü: 7,58.10⁹ N/m²

Piezoelektrik katmanın Young modülü: 2. 10⁹ N/m²

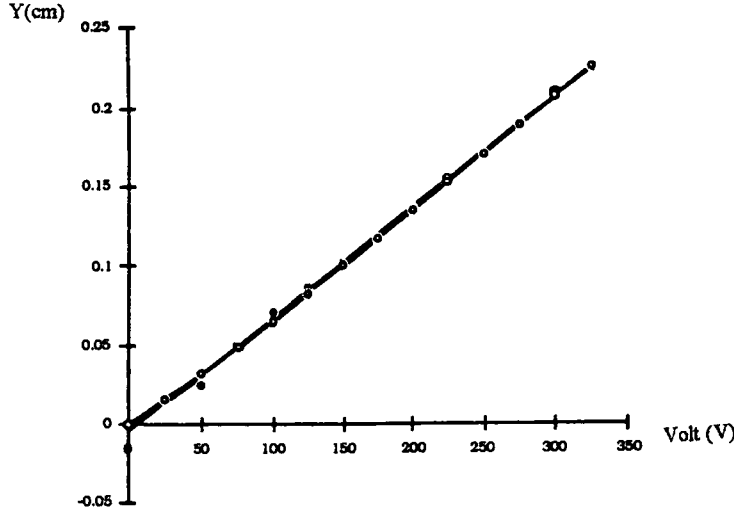
Yapıştırıcı katmanın Young modülü: 2,06. 10⁹ N/m²

Piezoelektrik gerinim sabiti: 23.10⁻¹² m/V

6.1.4 Deneysel Sonuçların Teorik Sonuçlarla Karşılaştırılması

Dizayn edilen piezoelektrik modele 0-325 V arasında bir voltaj kademeli olarak uygulandı ve uygulanan voltaja karşılık gelen uç noktanın dönmesi tespit edilerek bir

eğri elde edildi. Elde edilen eğriyle, teorik olarak hesap edilen dönme-voltaj eğrisi Şekil 6.1.3'te görüldüğü gibi beraber çizildi. Sonuçta deneysel sonuçlarla, teorik sonuçların oldukça birbirine yakın olduğu görüldü.



Şekil 6.1.3 : y yönünde dönme-voltaj eğrisi

6.2 C-BLOK ŞEKLİNDE POLİMER PİEZOELEKTRİK TAHRİKÇİLER İÇİN DÖNME-VOLTAJ MODELİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

Michigan Üniversitesi'nden Andrew J. Moskalik ve Diann Brei'in yaptığı bu çalışmada C-bloklar şeklinde dizayn edilmiş bir tahrikçinin analizi yapılmıştır. C-bloklar, eşlenik düz çubuklara göre 2.6 kez daha büyük kuvvet oluşturur. Bu kuvvetteki artışa karşın, dönme miktarında bir azalma meydana gelir. Geliştirilen model üzerindeki araştırmalar için PVdF polimerden imal edilmiş, çift katmanlı tahrikçiler kullanıldı. Daha sağlam yapılar elde edebilmek için çok katmanlı modellerde geliştirildi. Şekil 6.2.1-a'da görülen çok katmanlı C-blok, değişik sayıda aktif ve aktif olmayan katmanlar içermektedir. Aktif katmanlar kutuplanmıştır ve elektrik bağlantılıdır. Tahrikçiye bir voltaj uygulandığında, piezoelektrik gerinim, bir bükülme momenti oluşturur. Bu moment tahrikçinin Şekil 6.2.1-b'de görüldüğü gibi esnemesine sebep olur. Bu tahrikçilerden gerekli kuvveti elde edebilmek için dönme miktarı bilinmelidir.[3]

6.2.1 Dönme-Voltaj Teorik Modeli

Genel bir tahrikçi için teorik dönme-voltaj modeli Hamilton prensibi kullanılarak çıkarıldı. Bu model, Qatu [10] tarafından çıkarılan ve piezoelektrik olmayan ince tabakalı dönmüş çubuklar için çıkarılan modele benzemektedir. Şekil 6.2.2’de görülen terminoloji kullanıldı. Model sonuçlarını basit tutmak için C-blok olabildiğince ince kabul edildi. Dönmüş çubuğun sabit bir tarafsız eksen takımına göre yarıçapı R_n ve dairesel uzunluğu πR_n ’dir. Hamilton prensibini kullanmak için C-bloktaki iç gerilme ve zorlanım ifadeleri yerine piezoelektrik esaslı ilişki geliştirildi. Bu gerilme ve gerinim terimleriyle, C-bloktaki gerinim enerjisi; her farklı elemandaki gerinim gerilmeyle çarpılarak ve C-blok hacmi boyunca integre edilerek bulundu. Gerinim enerjisinin dönüşümü, Hamilton prensibinde denge denklemlerini çıkarmak ve sınır şartlarıyla ilişkilendirmek için kullanıldı. Diferansiyel denklemlerin sonuçları aşağıdaki gibidir.

$$\left(\frac{1}{\chi}+1\right)u_{,\theta\theta}+\frac{1}{\chi}w_{,\theta}-w_{,\theta\theta\theta}=0 \quad (6.2.1)$$

$$u_{,\theta\theta\theta}-\frac{1}{\chi}u_{,\theta}-\frac{1}{\chi}w-w_{,\theta\theta\theta}=\frac{N^P R_n^3}{D}$$

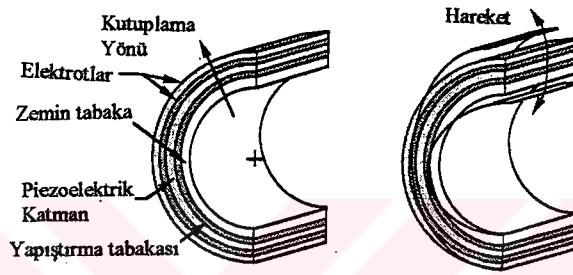
u ve w dairesel ve radyal yerdeğiştirmeleri, θ açısal koordinata ait farkı gösterir. C-bloğun inceliğinin ölçüsü boyutsuz sertlik oranı χ tarafsız eksen ve karma sertlikler ile ;

$$\chi = D / (A R_n^2) \quad (6.2.2)$$

olarak tanımlanır. Burada A ve D uzamaya ve eğilmeye ait sertliklerdir ve,

$$A = \sum_{i=1}^q Y_i b_i (z_i - z_{i-1}) \quad \text{ve} \quad D = \sum_{i=1}^q \frac{1}{3} Y_i b_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) \quad (6.2.3)$$

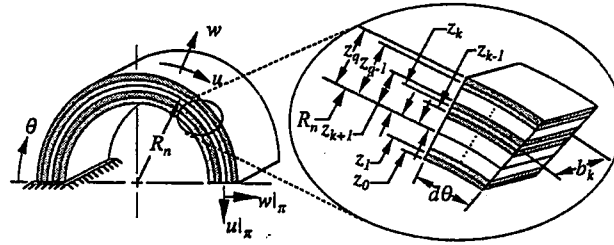
olarak tanımlanırlar. Burada Y_i ; i'nci katmanın Young modülü, b_i ; i'nci katmanın genişliği ve z_i ; tarafsız eksenin i'nci katmanının dış kenarına olan mesafedir.



Şekil 6.2.1 : C-blok dizaynı ve çalışması

a) C-blok; katmanlı piezoelektrik tahrikçinin bir araya getirilip bükülmesiyle elde edilir.

b) Piezoelektrik gerilim bir iç moment oluşturur, bu da C bloğun esnemesine sebep olur.



Şekil 6.2.2 : C-blok üzerinde bir kesit için kullanılan terminoloji

R_n : Tarafsız eksen için yarıçap; z : Tarafsız eksene olan uzaklık; b : Genişlik

u, w : Dairesel ve radyal yerdeğiştirme; θ : Açısal koordinat

Denklem (6.2.1)'deki piezoelektrik normal kuvvet N^p ve iç piezoelektrik momenti M^p ,

kesit alanı boyunca, piezoelektrik gerilme integre edilerek çıkarılabilir ve,

$$N^P = \sum_{i=1}^q Y_i b_i (z_i - z_{i-1}) (d_{31} E_3)_i \quad (6.2.4)$$

$$M^P = \sum_{i=1}^q \frac{1}{2} Y_i b_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) (d_{31} E_3)_i$$

olarak tanımlanır. Burada d_{31} piezoelektrik sabitidir, E_3 ise uygulanan elektrik alanıdır. Piezoelektrik olmayan katmanların piezoelektrik sabiti sıfır kabul edildi.

C-blok için, sınır koşulları göz önünde bulundurularak Hamilton prensibi aşağıdaki gibi oluşturuldu:

$$\begin{aligned} \left[(D / R_n^2) (-w_{,\theta\theta} + u_{,\theta}) + M^P \right]_{\pi} &= 0 \\ \left[(D / R_n^3) (-w_{,\theta\theta\theta} + u_{,\theta\theta}) \right]_{\pi} &= 0 \\ \left\{ [D / (\chi R_n^3)] (u_{,\theta} + w) + N^P \right\}_{\pi} &= 0 \end{aligned} \quad (6.2.5)$$

serbest uçta $\theta = \pi$ ve,

$$w|_0 = 0, \quad w_{,\theta}|_0 = 0, \quad u|_0 = 0 \quad (6.2.6)$$

mesnetli uçta $\theta = 0$.

(6.2.1) denge denklemi ve sınır koşullarıyla birleştirilmiş (6.2.5) ve (6.2.6) denklemleri C-bloğun dönmesi için en son dönme-voltaj modelini belirlemek için çözüldü :

$$w = \left(\frac{N^P R_n^3 \chi}{D} - \frac{M^P R_n^3}{D} \right) (1 - \cos \theta) \quad (6.2.7)$$

Bu model iki kabul yapılarak daha da basitleştirilebilir. Birincisi, hareket amaçlı kullanılan uçtaki dönme noktasıdır. Bu yüzden (6.2.7) denklemi uç noktada hesaplanır ve $\theta = \pi$ alınır. İkincisi, C-blok ince olduğu için boyutsuz sertlik oranı χ oldukça küçüktür. C-blok bir döndürücü olarak dizayn edildiğinde moment terimi M^P , simetrik yapıdan dolayı ihmal edilmez. Normal kuvvet terimi $N^P R_n \chi$ moment teriminden daha küçüktür. Bu yüzden denklem (6.2.7)'deki bu terim ihmal edilebilir. Bu işlemlerden sonra radyal dönme $w|_\pi$ ve voltaj V arasındaki statik ilişki;

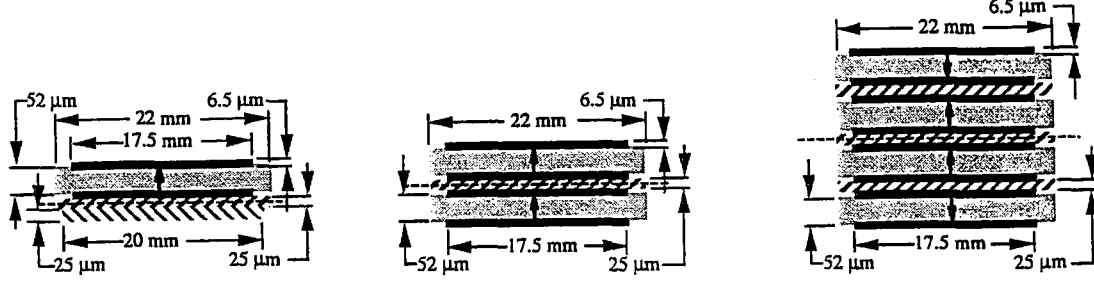
$$w|_\pi = \frac{2M^P R_n^2}{D} = - \frac{3R_n^2 \sum_{i=1}^q b_i Y_i (d_{31} V)_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) / (z_i - z_{i-1})}{\sum_{i=1}^q b_i Y_i (z_i^3 - z_{i-1}^3)} \quad (6.2.8)$$

olur. Piezoelektrik moment M^P ve karma eğilme sertliği D denklem (6.2.3) ve (6.2.4) kullanılarak daha da genişletilebilir.

6.2.2 Deneysel Çalışmalar

Denklem (6.2.8)'de dönme-voltaj modeli verilen örneklerin gerçekleştirilmesi için üç farklı deneysel çalışma yürütüldü; tek katmanlı (bir aktif piezoelektrik katman ve zemin katman içeren), çift katmanlı (iki aktif katman içeren), çok katmanlı (dört aktif katman içeren). Bu çalışmada kullanılan örnek modellerin kesitleri Şekil 6.2.3'te görülmektedir. Şekil 6.2.3-a'da görülen tek katmanlı durumda tarafsız eksene göre bir simetri olmadığı için piezoelektrik bir normal kuvvet oluşur (N^P). Şekil 6.2.3-b'deki çift katmanlı durumda bir simetri olduğu için standart durumlardaki gibi hesaplanabilir.

Tarafsız eksenin her bir tarafında bir aktif katmandan daha fazla katmanlı bir sistem yapmak için en uygun durum dört katmanlı durumdur.



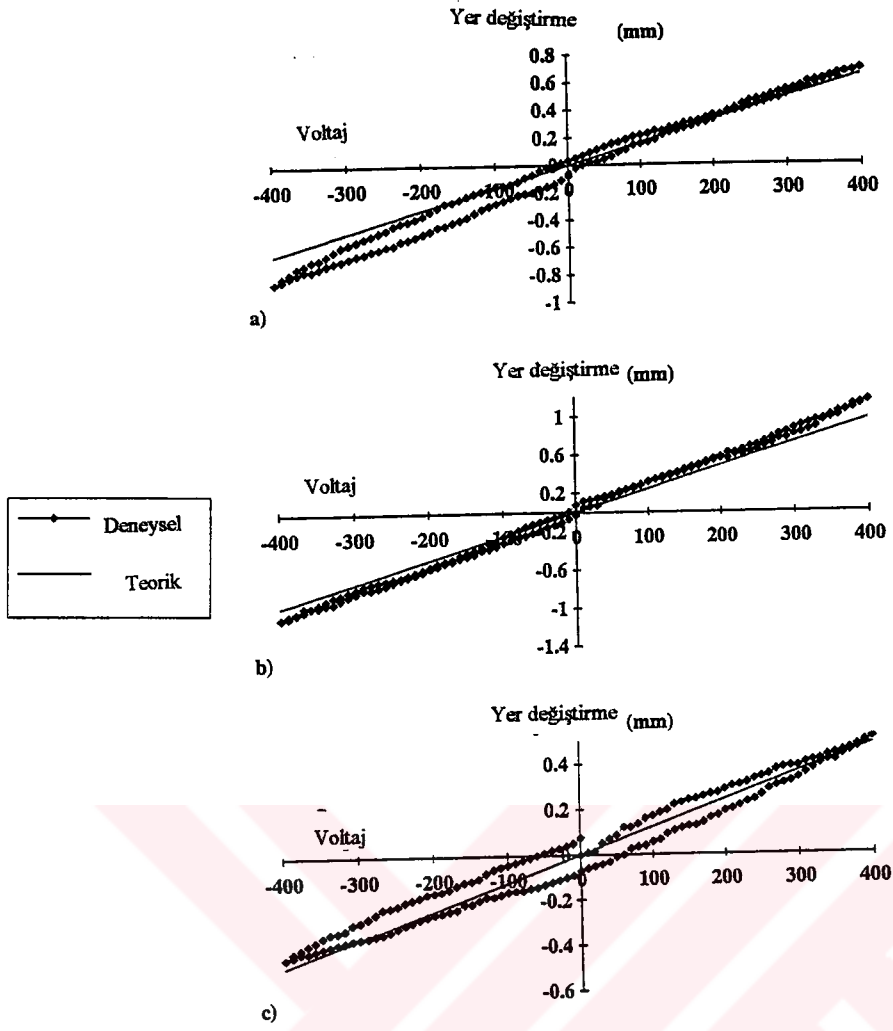
a) Tek katmanlı, $R_n = 14,3$ b) Çift katmanlı, $R_n = 13,6$ c) Dört katmanlı, $R_n = 14,9$
Şekil 6.2.3 Örnek çalışmaların kesitleri

Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri şöyledir:

-  Piezoelektrik katmanın Young modülü : 2900 MPa
-  Elektrot katmanın Young modülü : 700 MPa
-  Zemin katmanın Young modülü : 6500 MPa
-  Yapıştırıcı tabakanın Young modülü : 1900 MPa

6.2.3 Deneysel Sonuçlarla Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

Hamilton prensibi kullanılarak çıkarılan teorik sonuçlarla, deneysel ölçümlerle bulunan sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.2.4'te yapılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere sonuçlar birbirine oldukça yakındır. En fazla dönme çift katmanlı dizaynda elde edilmiştir.

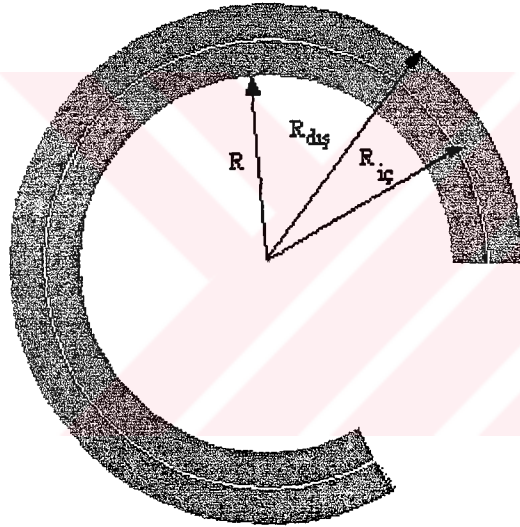


şekil 6.2.4 : Dönme-voltaj, deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

BÖLÜM 7

PIEZOELEKTRİK BİR TUTUCUNUN ANSYS'DE TASARLANMASI VE ANALİZİ

7.1 TUTUCUNUN TASARLANMASI



$R = 12\text{mm}$
 $R_{\text{ış}} = 15\text{mm}$
 $R_{\text{ıç}} = 18\text{mm}$
 $z = 6\text{mm}$ (derinlik)

Şekil 7.1 : Tutucunun boyutları

Tutucunun boyutları Şekil 7.1’de görüldüğü gibi tasarlandı. Tutucunun tasarlanması için aşağıdaki ANSYS etiketlerinden faydalanıldı :

Main Menu>Preprocessor>Modeling Create>Volumes Cylinder>By Dimensions

Bu işlem sonucu çıkan pencereden de aşağıdaki değerler girildi:

RAD1 = 0.015 RAD3 = 0.018

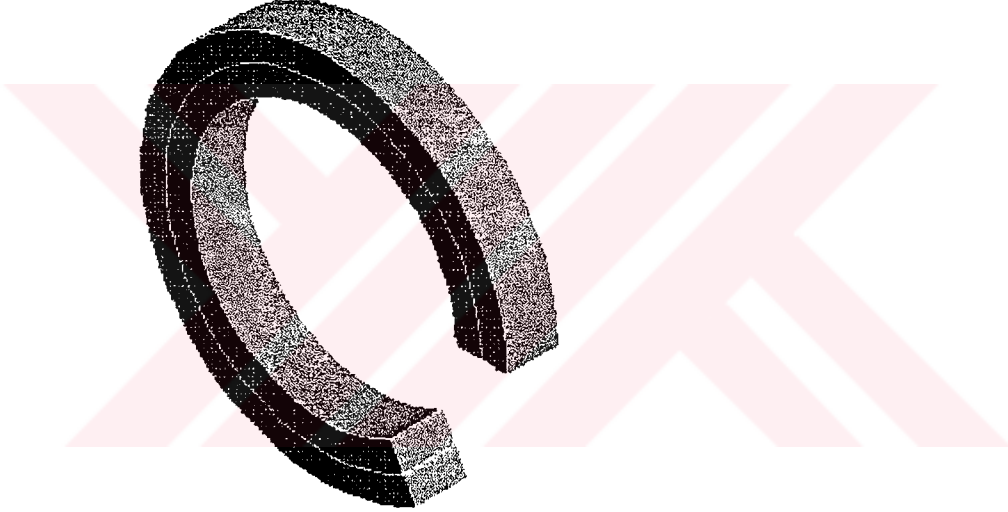
RAD2 = 0.018 RAD4 = 0.021

Z = 0.006

THETA1 = 0

THETA2 = 300

Bu ölçüler girildikten sonra Şekil 7.2’de görülen model elde edildi.



Şekil 7.2 : Tutucunun üç boyutlu görünüşü

Model elde edildikten sonra, iki parça ;

Main Menu>Preprocessor>Modeling Operate>Glue Volumes

işleminde sonra sırayla işaretlenerek yapıştırma işlemi gerçekleştirilir.

7.2 TUTUCUNUN MALZEMESİNİN SEÇİMİ VE ELEMAN TİPİNİN BELİRLENMESİ

Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde; ANSYS'in kendi kütüphanesinde bulunan piezoelektrik özelliklere sahip malzemeler seçildi. Bu işlem şu sırayla gerçekleştirildi:

Main Menu>Preprocessor>Material Properties>Constant Isotropic

Karşımıza çıkan pencereden;

Specify material number: 1 seçildikten sonra;

File>Read Input from>Ansys53>Matlib

İşlemden sonra çıkan penceredeki malzemelerden;

Ti_B-120VCA.SI_MPL

seçildi. Aynı işlemler tekrarlanıp *Specify material number:* 2 seçildikten sonra malzeme olarak;

Cu_pure.SI_MPL

seçildi.

Eleman tipinin belirlenmesinde ise aşağıdaki sıra takip edildi :

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add

İşlemden sonra çıkan pencereden;

Coupled Field , Scalar Brick 5

elemanı seçildi.

7.3 TUTUCUNUN SONLU ELEMAN MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Tutucuyu analiz edebilmemiz için sonlu eleman modelinin çıkarılması gerekiyordu. İlk önce hangi parçanın hangi özellikleri alması gerektiği aşağıdaki işlemle gerçekleştirildi:

Main Menu>Preprocessor>Meshing Attributes>Picked Volumes

Karşımıza çıkan pencereden;

Element type number ve *Material number* 1 seçilerek; modelde iç tarafta yer alan yarım daire seçildi. Böylece bu eleman 1 numaralı malzeme özelliklerine sahip olmuş oldu. Aynı işlemler tekrarlanarak ve *Material number* 2 seçilerek dıştaki yarım daireli parçaya da 2 numaralı malzeme özellikleri verildi.

Daha sonra modelin ağ örgüsünün boyutları aşağıdaki şekilde belirlendi :

Main Menu>Preprocessor>Meshing Shape&Size>Global Size

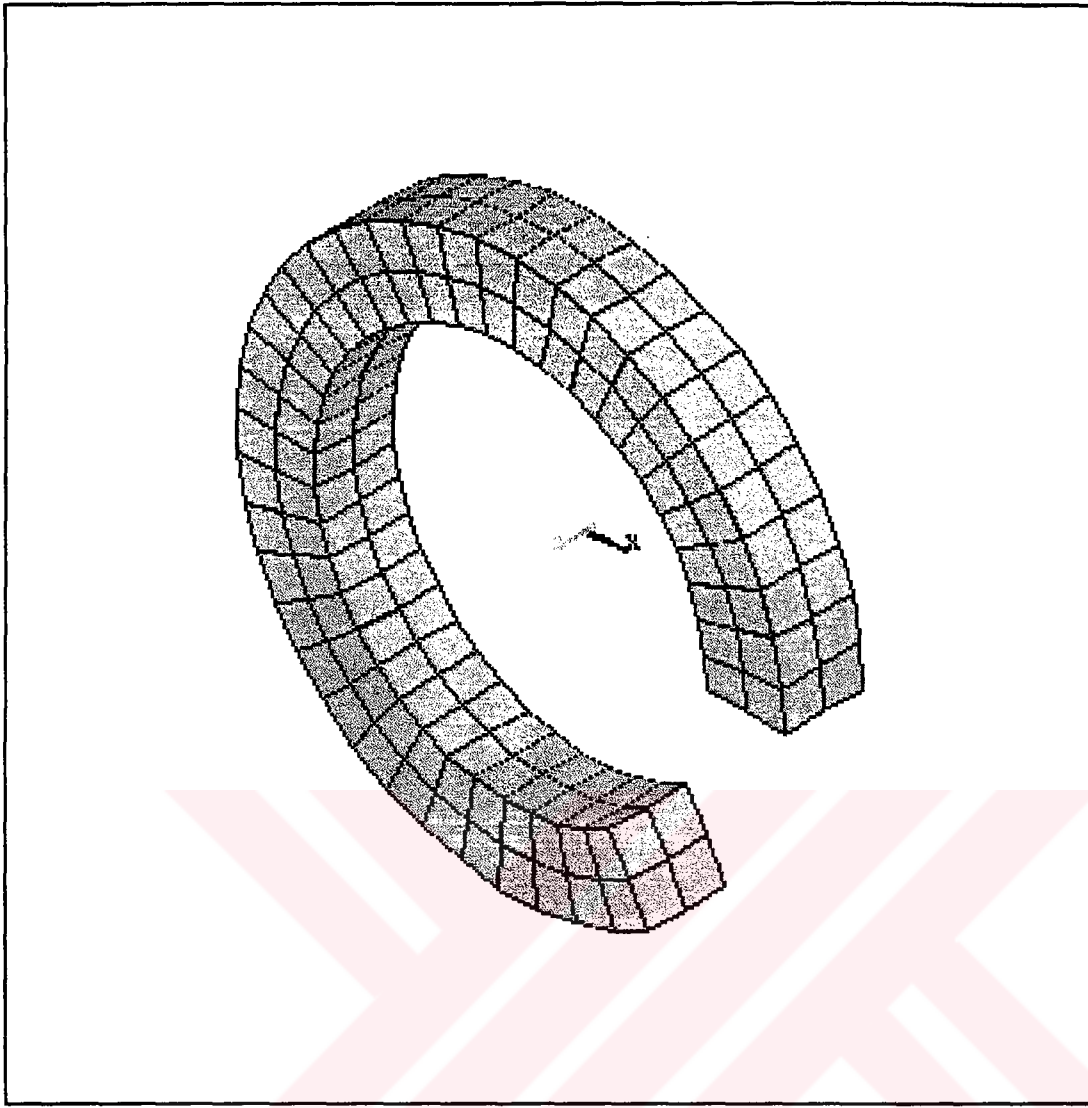
Karşımıza çıkan pencereden ;

Element edge length = 0.003

seçildi. Son olarakta modelin ağ örme işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirildi;

Main Menu>Preprocessor>Meshing Mesh>Volumes Free

İşlemden sonra ekrandan mouse ile iki parçada seçilerek ağ örme işlemi gerçekleştirildi. Bu noktadan sonra artık sonlu eleman modelimizi elde etmiş olduk. Sonlu eleman modeli, Şekil 7.3’de görülmektedir.



ANSYS 5.3
NOV 25 1996
15:32:00
ELEMENTS
TYPE NUM

XV -1
YV -1
ZV -1
DIST-.029627
EF -.003
Z-BUFFER

Şekil 7.3 : Tutucunun sonlu eleman modeli

7.4 TUTUCUYA GEREKLİ MESNETLEMENİN VE VOLTAJIN UYGULANMASI

Tutucunun analiz için sabitlenmesi gerektiğinden, model orta bölgesinden uygun bir şekilde mesnetlendi, bu işlem şu sırayla gerçekleştirildi :

Main Menu>Solution>Loads Apply>Structural Displacement

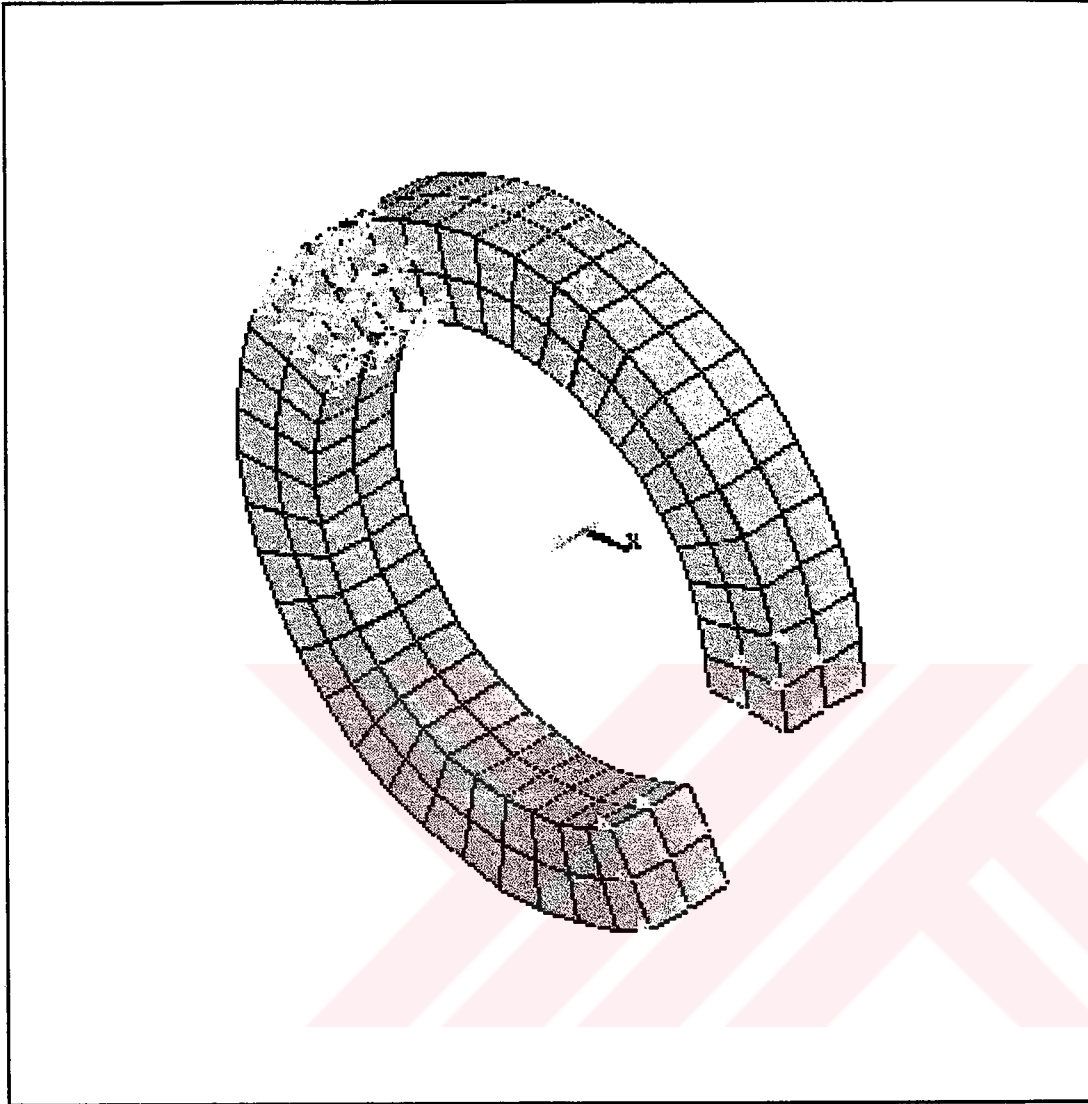
İşleminden sonra uygun şekilde, mesnetlenmek istenen düğüm noktaları seçildi.

Bu işlemten sonra tutucunun uçlarına farklı kutupta voltaj uygulandı. Voltajın değeri yaptığımız denemeler sonucu en uygun olarak 80 V olarak belirlendi. Voltaj uygulama işlemi de aşağıdaki sırada gerçekleştirildi :

Main Menu>Solution>Loads Apply>Electric Potential

Sırayla tutucunun iki ucundaki düğüm noktaları seçildi ve birine 80 V diğerine -80 V uygulandı.

Mesnetlenmiş ve voltaj uygulanmış model Şekil 7.4'te görülmektedir



ADINA 5.3
NOV 25 1996
15:33:57
ELEMENTS
TYPE NUM

XV -1
YV -1
ZV -1
DIST-.029627
ZF -.003
Z-BUFFER

Şekil 7.4 : Gerekli yüklemelerin uygulanması

7.5 ÇÖZÜM

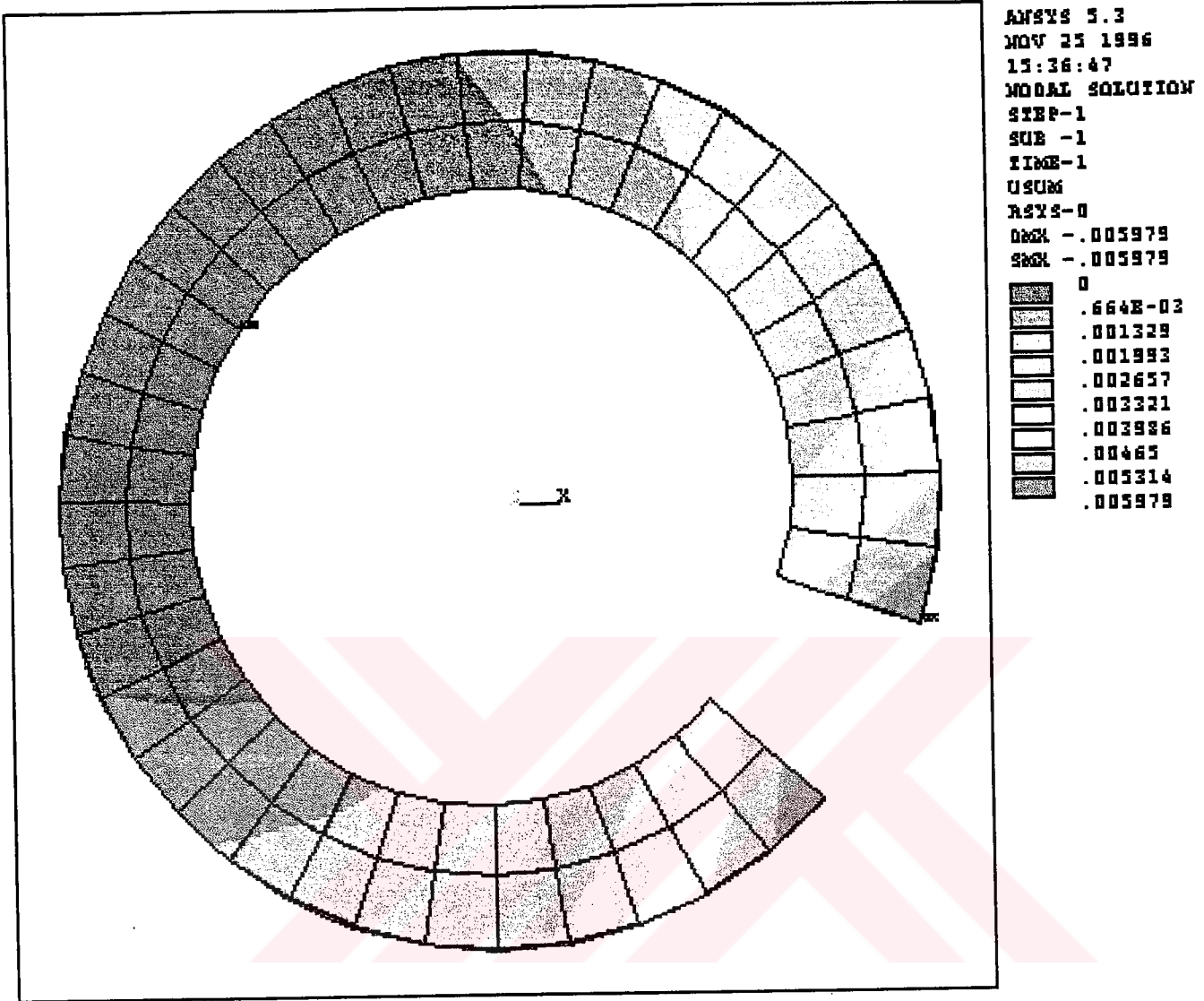
Sonlu eleman modeli çıkarılıp, gerekli mesnetlemelerin ve yüklemelerin yapıldığı tutucu modeli artık çözüme hazır hale gelmiştir. Çözüm işlemi aşağıdaki sırayla gerçekleştirilir :

Main Menu>Solution>Solve Current LS

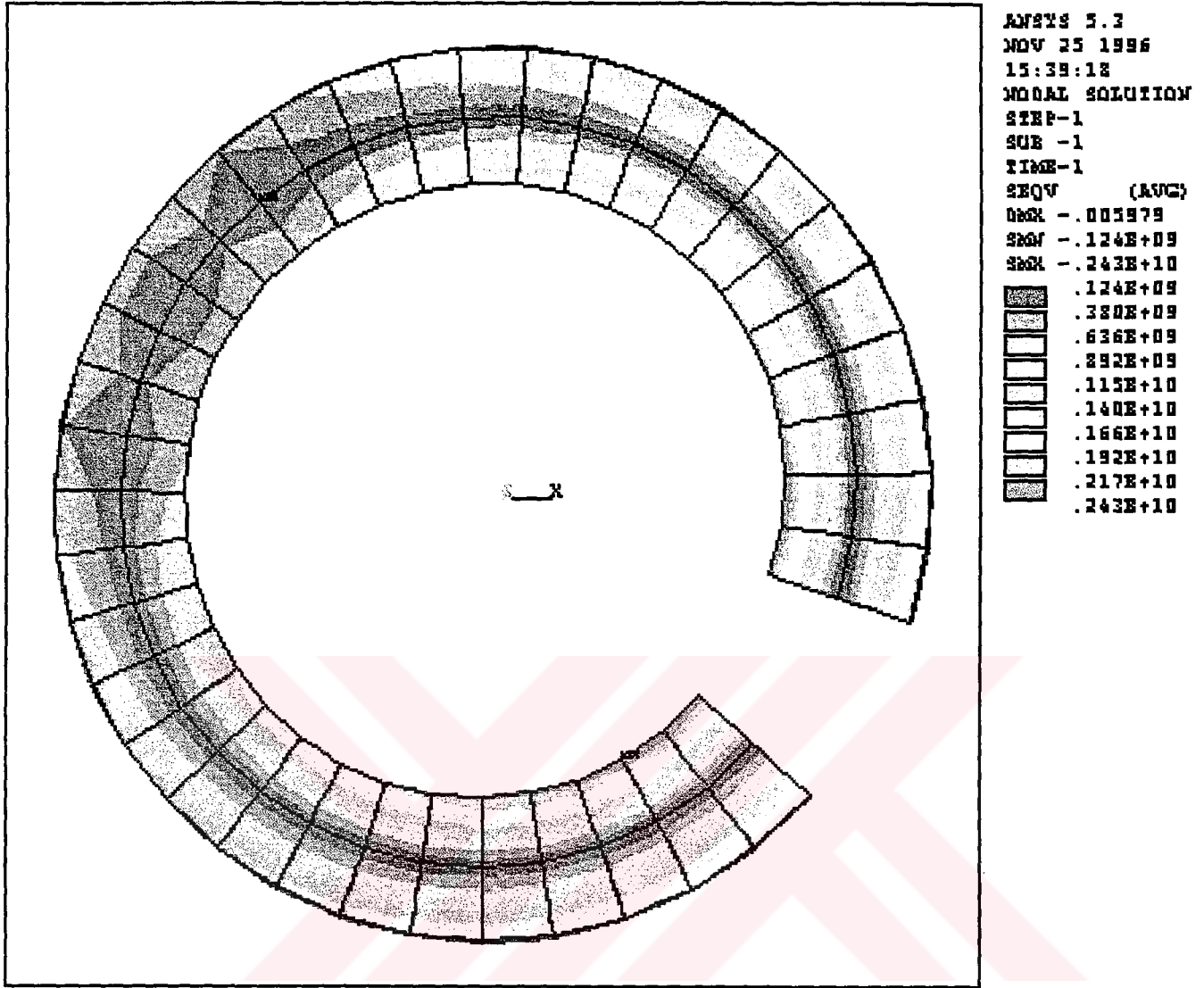
Bilgisayar analizi tamamladıktan sonra, sonuçları görebilmek için ise;

Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>>Nodal Solution

işlemi gerçekleştirilir. Karşımıza çıkan pencereden *DOF Solution_Translation_USUM* seçilerek şekil değiştirmiş durumdaki yer değiştirme miktarları görülebilir (Şekil 7.5). Eğer *DOF Solution_Stress_von Mises* seçilirse şekil değiştirmiş durumdaki model üzerinde gerilme dağılımı görülebilir (Şekil 7.6).



Şekil 7.5 : Tutucu üzerindeki yer değiştirme miktarları



Şekil 7.6 : Tutucu üzerindeki gerilme dağılımları

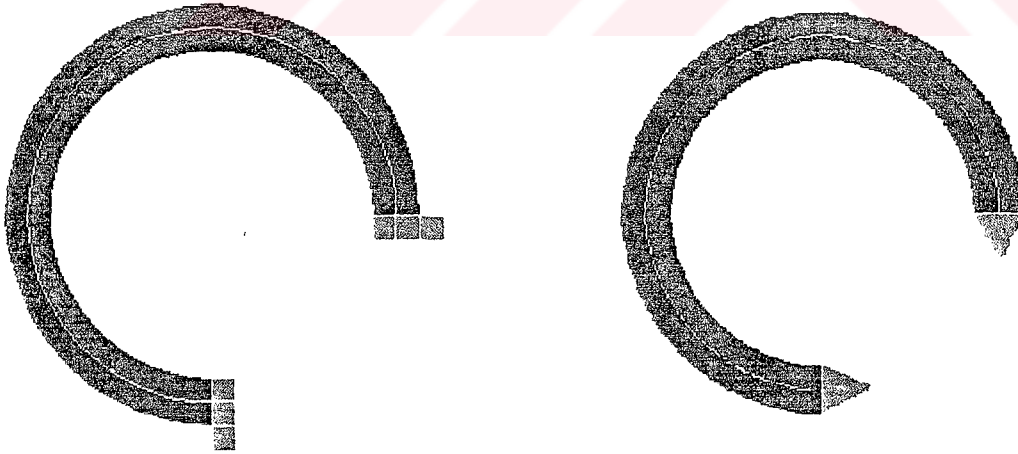
BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tutucu üzerinde, gerçekleştirilen voltaj-dönme ve dönme-gerilme analizlerinden elde edilen sonuçların referans olarak alınan iki çalışmadaki sonuçlara benzer olduğu görülmüştür.

Geliştirilen bu tutucu, küçük boyutlarda imal edilerek, özellikle tıpta mikrocerrahi alanında; ameliyat sırasında damar ya da sinir uçlarını tutmada, damar tıkanıklığını açmada ya da elektronik parçalarının üretimi, mekanik saat parçalarının montajı gibi hassasiyet gerektiren işlerde kullanılabilir.

Tutucunun farklı yerlerde kullanılabilmesi için tutma uçlarına farklı malzemelerden değişik tutma uçları eklenebilir. İki farklı dizayn Şekil 8.1’de görülmektedir.



Şekil 8.1 : İki farklı tutucu dizaynı

KAYNAKLAR

- [1] W.S.N. TRIMMER, Microrobots and Micromechanical Systems, Sensors and Actuators Journal, pp.267-287, Vol 19,(1989).
- [2] TIROPATHI R. CHANRUPATLA, ASHOK D. BELENGUDU, (1991) Introduction to Finite Element In Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [3] ANDREW J. MOSKALIK, DIANN BREI, Deflection Voltage Model and Experimental Results for Polymeric Piezoelectric C-Blok Actuators, AIAA Journal, pp. 1556-1558, Vol 35, Iss 9, (1997).
- [4] DIANN BREI, JAMES BLECHSCHMIDT, Design and Static Modeling of a Semicircular Polymeric Piezoelectric Microactuator, IEEE Journal, pp. 105-115, Vol1, No 3, (1992).
- [5] WILLIAM F. SMITH, (1990), Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill Book Company, Newyork.
- [6] KYNAR PIEZOFILM CATOLOGS, KYNAR Piezo Film Department Pennwalt Corporation.
- [7] ANSYS Programı Yardım Dosyaları
- [8] M. A. MARCUS, Performance Characteristics of Piezoelectric Polymer Flexure Mode Devices, Ferroelectrics, pp. 203-220, Vol 57, (1984).
- [9] M. TODA, S. OSAKA, and, E. O. JOHNSON, A New Electromotional Device, RCA Eng., pp. 24-27, Vol 25-1, (1979).
- [10] QATU, M. S., Theories and Analysis of Thin and Moderately Thick Laminated Composite Curved Beams, International Journal of Solids and Sturctures, pp. 2743-2756, Vol 30, (1993).

ANALİZİN LOG.FILE ÇIKTISI

```

/COM,ANSYS RELEASE 5.3  UP071096      13:37:54  11/01/1996
/input,start,ans      ,d:\ANSYS53\docu\,,,,,,,,,,,,,1
!*
/PREP7
!*
ET,1,SOLID5
!*
MAT,1,
/INPUT,TI_B-120VCA,SI_MPL,D:\ansys53\MATLIB\, 1
! /INPUT,D:\ansys53\MATLIB\TI_B-120VCA.SI_MPL
/COM,Typical material properties for DEMO purposes only
/COM,ANSYS REVISION 5.3  UP042296 TEST  16:47:49  04/23/1996
/NOP
/COM,Internal UNITS set at file creation time = SI  (MKS)
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, EX ,_MATL , 1, 1.020000000E+11,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, NUXY,_MATL , 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, ALPX,_MATL , 1, 9.360000000E-06,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, DENS,_MATL , 1, 4850.00000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, KXX ,_MATL , 1, 7.44000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1, C ,_MATL , 1, 544.000000 ,
/GO
!*
UIMP,1,EX, , ,102000000000,
UIMP,1,DENS, , ,4850,
UIMP,1,ALPX, , ,9.36e-006,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , ,0.3,
UIMP,1,PRXY, , , ,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , ,7.44,
UIMP,1,C, , ,544,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , , ,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,

```

```

!*
MAT,2,
/INPUT,Cu_pure,SI_MPL,D:\ansys53\MATLIB\, 1
! /INPUT,D:\ansys53\MATLIB\Cu_pure.SI_MPL
/COM,Typical material properties for DEMO purposes only
/COM,ANSYS REVISION 5.3 UP042296 TEST 15:33:54 04/23/1996
/NOP
/COM,Internal UNITS set at file creation time = SI (MKS)
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,EX,_MATL, 1, 1.170000000E+11,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,NUXY,_MATL, 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,ALPX,_MATL, 1, 1.660000000E-05,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,DENS,_MATL, 1, 8900.00000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,KXX,_MATL, 1, 393.000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,C,_MATL, 1, 385.200000 ,
/GO
MPLIST,ALL,,EVL
/INPUT,Cu_pure,SI_MPL,D:\ansys53\MATLIB\, 1
! /INPUT,D:\ansys53\MATLIB\Cu_pure.SI_MPL
/COM,Typical material properties for DEMO purposes only
/COM,ANSYS REVISION 5.3 UP042296 TEST 15:33:54 04/23/1996
/NOP
/COM,Internal UNITS set at file creation time = SI (MKS)
TBDEL,ALL,_MATL
MPDEL,ALL,_MATL
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,EX,_MATL, 1, 1.170000000E+11,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,NUXY,_MATL, 1, 0.300000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,ALPX,_MATL, 1, 1.660000000E-05,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,DENS,_MATL, 1, 8900.00000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,KXX,_MATL, 1, 393.000000 ,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.000000000E+00,
MPDATA,R5.0, 1,C,_MATL, 1, 385.200000 ,
/GO
!*
UIMP,2,EX,,117000000000,
UIMP,2,DENS,,8900,
UIMP,2,ALPX,,1.66e-005,
UIMP,2,REFT,,,,
UIMP,2,NUXY,,0.3,
UIMP,2,PRXY,,,,
UIMP,2,GXY,,,,
UIMP,2,MU,,,,
UIMP,2,DAMP,,,,
UIMP,2,KXX,,393,
UIMP,2,C,,385.2,
UIMP,2,ENTH,,,,
UIMP,2,HF,,,,
UIMP,2,EMIS,,,,
UIMP,2,QRATE,,,,

```

```

UIMP,2,MURX, , , ,
UIMP,2,MGXX, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,
!*
UIMP,1,MURX,,,0.5,
UIMP,1,RSVX,,,0.2e-2,
UIMP,2,MURX,,,0.55,
UIMP,2,RSVX,,,0.25e-2,
CYLIND,0.015,0.018,0.006,,0,300,
CYLIND,0.018,0.021,0.006,,0,300,
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
VGLUE,P51X
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 1
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT,1,1,1,0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 3
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT,2,1,1,0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
ESIZE,0.003,0,
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
/SOLU
FINISH
/SOLU
FLST,2,18,1,ORDE,18
FITEM,2,21
FITEM,2,-22

```

FITEM,2,58
FITEM,2,-59
FITEM,2,96
FITEM,2,-97
FITEM,2,134
FITEM,2,-135
FITEM,2,172
FITEM,2,-173
FITEM,2,210
FITEM,2,-211
FITEM,2,248
FITEM,2,-249
FITEM,2,286
FITEM,2,-287
FITEM,2,324
FITEM,2,-325
D,P51X, , , , ,ALL
FLST,2,9,1,ORDE,9
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,77
FITEM,2,116
FITEM,2,154
FITEM,2,192
FITEM,2,229
FITEM,2,267
FITEM,2,306
D,P51X,VOLT,80,
FLST,2,9,1,ORDE,9
FITEM,2,3
FITEM,2,40
FITEM,2,78
FITEM,2,115
FITEM,2,153
FITEM,2,191
FITEM,2,230
FITEM,2,268
FITEM,2,305
D,P51X,VOLT,-80,
/STAT,SOLU
SOLVE
v

ALL INFORMATION CONTAINED
HEREIN IS UNCLASSIFIED
DATE 11/14/2001 BY 1043

ÖZGEÇMİŞ

Semih Sezer, 1972 yılında Eskişehir’de doğdu. 1990 yılında Eskişehir Yunusemre Teknik Lisesi’nden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü Makina Fakültesi Makina Mühendisliği bölümüne girdi. 1995 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu.

1996 yılında İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Teorisi ve Kontrol Programında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Y.T.Ü Makina Fakültesi Makina Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İngilizce bilmektedir.



İ.T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi