

## AKILLI YAPILARIN SONLU ELEMANLAR TEKNİĞİ KULLANILARAK MODELLENMESİ

**Tarkan Çalışkan**

Havacılık Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

**Yavuz Yaman**

Havacılık Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

**Volkan Nalbantoğlu**

Mühendislik Direktörlüğü, SGSTM, ASELSAN A.Ş., Akyurt, 06011, Ankara

### ÖZ

Bu çalışmada ANSYS yazılımının kullanıldığı sonlu elemanlar metodunun akıllı yapıların modellenmesindeki etkinliği gösterilmektedir. Çalışmada bir akıllı kiriş modellenmiştir. Çalışmada piezoelektrik uyarıcıların akıllı yapının statik cevabı üzerindeki etkileri incelenmiş, piezoelektrik yamaların yapı üzerindeki yerleşimi ile uygulanması mümkün olan en yüksek voltaj değerleri de belirlenmiştir. Ayrıca yamaların kiriş üzerindeki yerleşiminin akıllı yapının doğal frekansları üzerindeki etkileri saptanmıştır.

### ABSTRACT

This study gives the effectiveness of finite element method in the modeling of smart structures. The study uses ANSYS package program and models a smart beam. The study investigates the effects of piezoelectric patches on the static response of the smart structure, finds the optimum piezoelectric patch locations and the maximum possible applied voltage values. Furthermore effects of the patches on the resonance frequencies of the smart structure are also determined.

### 1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemelerdeki son gelişmeler birçok araştırmacıyı akıllı yapılar uygulamaları üzerinde çalışmaya yönlendirmektedir. Akıllı yapılar dışarıdan uygulanan bir tahriği algılayabilen ve buna aktif denetim mekanizmaları yardımıyla müdahale edebilen yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu yapılar, pasif yapı yüzeyine yaygın olarak yapıştırılan yada içine gömülen birçok aktif parça ve işlemci ağlarından oluşmaktadır. Bu yapılarda, algılayıcı ve uyarıcılar yapının aktif parçalarını oluşturmaktadırlar.

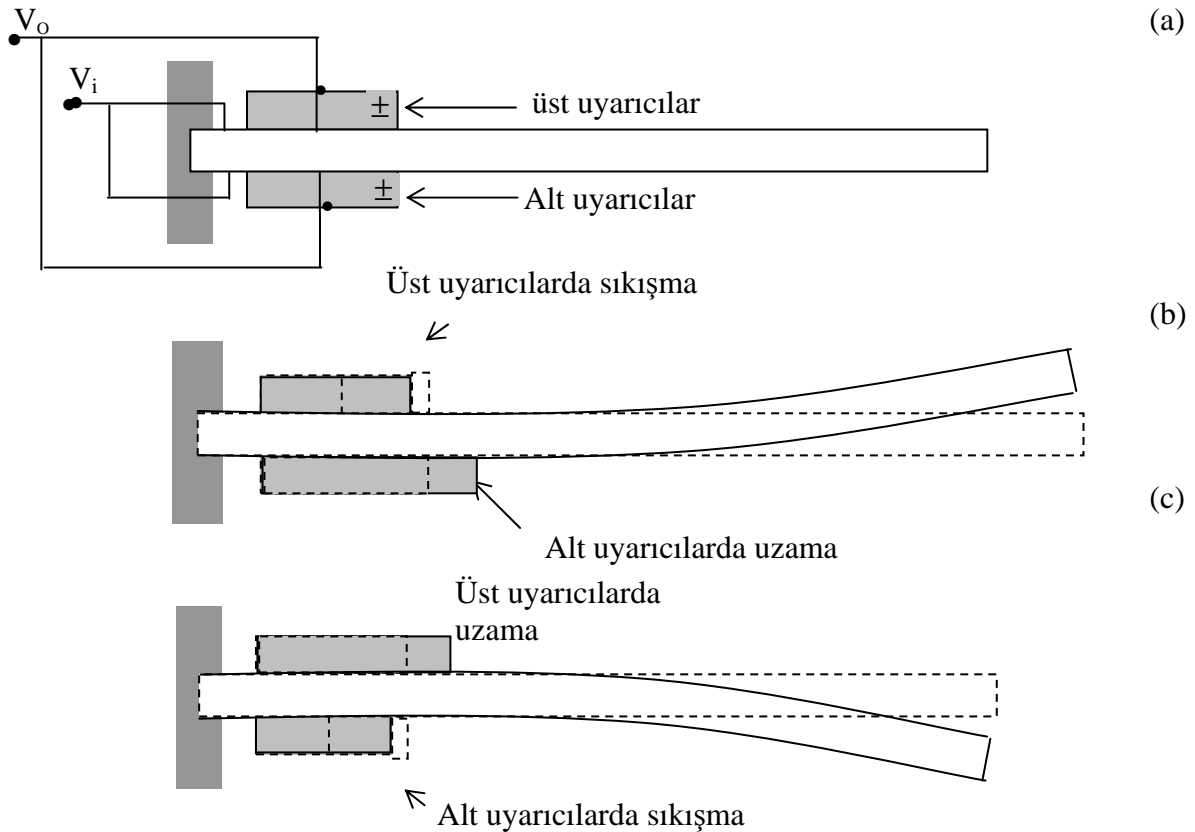
Piezoelektrik elemanlar voltaj uygulandığında boyutlarının değişmesiyle yapıştırıldıkları yapıda zorlama oluşturmaktadırlar (direkt piezoelektrik etki). Bu tip elemanlar, uzama uygulandığında da gerilim üretmektedirler (ters piezoelektrik etki). Piezoelektrik dönüştürücülerin akıllı teknolojiler alanındaki en etkin kullanımı, bu dönüştürücülerin yapının alt ve üst yüzeyine aynı noktada yerleşik algılayıcı (sensor) ve uyarıcı (actuator) olarak uygulanmasıdır (collocated placement). Piezoelektrik etkilerin keşfi 19. Yüzyıla dayanmaktadır. Piezoelektrik malzemeler genellikle seramik ve anisotropik kristal (quartz, barium titanate, lead zirconate titanate) formlarında bulunmaktadır. Bu malzemeler uzama,

ivme ve basınç ölçerlerde yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Piezoelektrik kristaller arasında en yaygın kullanım payını halen birçok algılayıcı ve uyarıcıda kullanılan PZT (Lead-Zirconate-Titanate) almaktadır.

Piezoelektrik uyarıcıların ince kiriş ve plakların şekillerinin değiştirilmesindeki etkinliği literatürde gösterilmiştir [1,2]. Bu tip yapılarda şekil kontrolü [3,4] ve titreşim frekanslarından dolayı oluşan enerjinin sönümlenmesinde piezoelektrik algılayıcı ve uyarıcıların uygunluğu deneysel ve teorik olarak kanıtlanmıştır [5]. Son zamanlarda yapılan diğer bir çalışmada ise yüzeye yapıştırılan piezoelektrik uyarıcılar uzay mekiği için tasarlanan robot manipulatör kolunda düşük frekanslarda oluşan titreşim frekanslarının sönümlenmesinde kullanılmıştır [6]. Bir diğer uygulamada da aynı noktada yerleşik piezoelektrik algılayıcı ve uyarıcıların bufet zorlamasına maruz kalan kanat yapılarının aeroelastik etkilerinin giderilmesindeki etkinliği deneysel olarak gösterilmiştir [7].

## 2. TEORİK MODELLEME

Kirişin alt ve üst yüzeylerine aynı bölgede yapıştırılan ve üzerlerine farklı polaritede voltaj uygulanan PZT lerin kullanıldığı (bimorph configuration) akıllı bir kirişin polarizasyonu ve farklı voltaj yüklemeleri altındaki olası cevapları Şekil 1 de gösterilmiştir. Bu durumda piezoelektrik uyarıcılar, yüzey elektrotlarına uygulanan elektrik yüklemesine ( $V_i$ ,  $V_o$ ) ve kirişin polarizasyonuna göre uzayarak veya sıkışarak akıllı kiriş üzerinde bükülme momenti yaratmaktadır.



Şekil 1. Bimorf Konfigurasyonlu Akıllı Kirişin Piezoelektriksel Uyarımı

a. Yüzey elektrotlarının polarizasyonu

b.  $V_i > V_o$  Üst uyarıcıların sıkışma alt uyarıcıların uzama durumu

c.  $V_i < V_o$  Üst uyarıcıların uzama alt uyarıcıların sıkışma durumu

Bu tip elektromekanik etkileşim problemlerinin modellenmesinde sınır koşulları, ilk koşullar ve zorlama şartları ile birlikte kullanılan uzama-yerdeğiştirme ve hareket denklemlerine ek olarak piezoelektrik etkileşim denklemlerinin de çözüme katılması gerekmektedir. Bu nedenle piezoelektrik malzeme modellenmesinde kullanılacak denklemler (1) den (3) e kadar özetlenmiştir.

Piezoelektrik uyarıcılara etki eden elektrik alanının scalar bir potansiyel fonksiyon olan  $\Psi$  den türetilbildiği varsayıldığında, elektrik alan ve scalar potansiyel fonksiyon  $\Psi$  arasındaki ilişki denklemler (1) de verildiği gibidir [8, 9,10].

$$\xi = \frac{\partial}{\partial x_1}(\epsilon_{11} \frac{\partial \psi}{\partial x_1}) + (\epsilon_{22} \frac{\partial \psi}{\partial x_2}) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\epsilon_{33} \frac{\partial \psi}{\partial x_3}) \quad (1)$$

Burada  $\xi$  uygulanan elektrik alanı,  $\epsilon$  dielektrik sabitini simgelemektedir. Bu denklemler çalışmada kullanılan uyarıcılar için özelleştirildiğinde çözümlenmesi gereken gerilme-uzama denklemleri aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{55} & 0 & 0 \\ & & & & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{52} & 0 \\ e_{61} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{16} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{25} & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Denklemler (1), (2) ve (3) te  $\sigma$  gerilme vektörünü,  $\epsilon$  birim uzama vektörünü,  $C_{ij}$  yapı elastik modül değerlerini,  $\psi$  scalar elektrik potansiyel fonksiyonunu,  $D$  elektrik yerdeğiştirme vektörünü,  $\epsilon_{ij}$  dielektrik sabitlerini,  $e_{ij}$  piezoelektrik modül değerlerini göstermektedir.

## 2.1. Sonlu Elemanlar Modellemesi

Akıllı yapı uygulamalarının özellikle son on yıl içerisinde yaygınlık kazanması ile şirketler yazılımlarını thermal-yapısal-elektriksel etkileşim problemlerinin analizlerini de yapabilecek şekilde düzenlemişlerdir ( ANSYS).

Akıllı yapıların analizinde karşılaşılan termal-yapısal-elektriksel etkileşim problemlerinin analizinde ANSYS sonlu elemanlar yazılım paketinin etkinliği bilinmektedir[5-6].

### 2.1.1 Statik Analiz

Çalışmanın bu bölümünde akıllı kirişin, voltaj kullanılarak statik uyarılması sonucu yapıda oluşan piezoelektrik nitelikteki kuvvetlere cevabı araştırılmış ve piezoelektrik uyarıcıların alüminyum kiriş üzerindeki yerleşimi ile uyarıcı boyutlarının sonuca etkileri incelenmiştir.

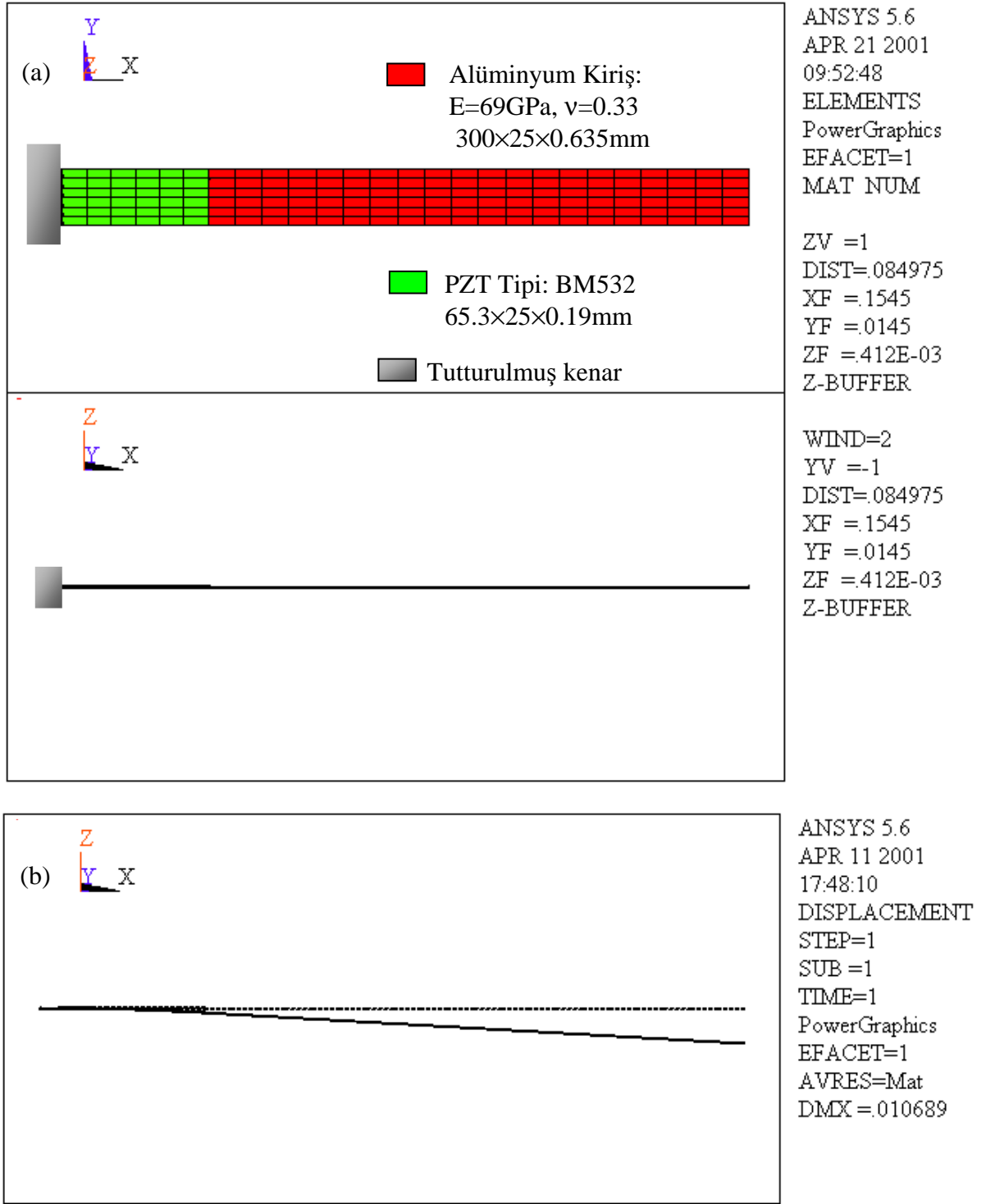
Teorik modelleme ve hesaplamalarda ANSYS(v.5.6) sonlu elemanlar paketi kullanılmıştır. Üç boyutlu termal-yapısal-elektriksel etkileşim analizi esnasında piezoelektrik malzeme modellenmesinde kullanılabilen tek eleman SOLID5 adı verilen prizmatik elemandır. Bu eleman tipi her düğüm noktasında üç adet yerdeğiştirme hareket serbestliğine sahiptir. Bu eleman tipi ile uyumlu olduğu belirlenen isotropik yapısal eleman tipi ise yine bir prizmatik eleman olan SOLID45 tir. Modelleme esnasında piezoelektrik yamaların yapıya sıkıca yapıştırıldığı varsayılmıştır. Çalışmada, farklı uyarıcı yerleşim yeri ve uyarıcı boyutlarının değerlendirilmesi amacıyla, tasarım özelliği bulunan bir parametrik modelleme yapılmıştır. Çalışmada akıllı kiriş olarak modellenen yapı, bir ucu tutturulmuş öteki ucu serbest alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan piezoelektrik (PZT) yamalardan oluşturulmuştur. Çalışmanın ilk aşaması modelleme tekniğinin doğrulanmasıdır. Bu amaçla kaynak [11] de verilen model göz önüne alınmıştır. Bu model bir ucu tutturulmuş bir alüminyum kiriş ve tutturulan kenara yakın olacak şekilde tek yüzeye yapışık bir PZT yamadan oluşmaktadır. Bu akıllı kirişe ait boyutlar Şekil 2a'da gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yardımıyla modellenen akıllı kirişin 400V'luk voltaja olan teorik cevabı Şekil 2b'de verilmiştir. Teorik analiz sonucu elde edilen 10.689 mm'lik uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesinin deneysel ölçüm sonucu olan 10 mm'ye oldukça yakın olması modellemenin doğruluğunu göstermektedir.

Yapıda kullanılan piezoelektrik uyarıcıların yapı üzerindeki etkisini arttırmak için özdeş yapıda ve ters polarizasyondaki piezoelektrik yamalar alüminyum kirişin alt ve üst yüzeylerine simetrik olarak yerleştirilmelidir (bimorph configuration) [5]. Bu şekilde modellenen akıllı kiriş ve kirişin 300V'luk voltaj sonucu oluşan piezoelektrik zorlamaya olan cevabı Şekil 3'te gösterilmiştir.

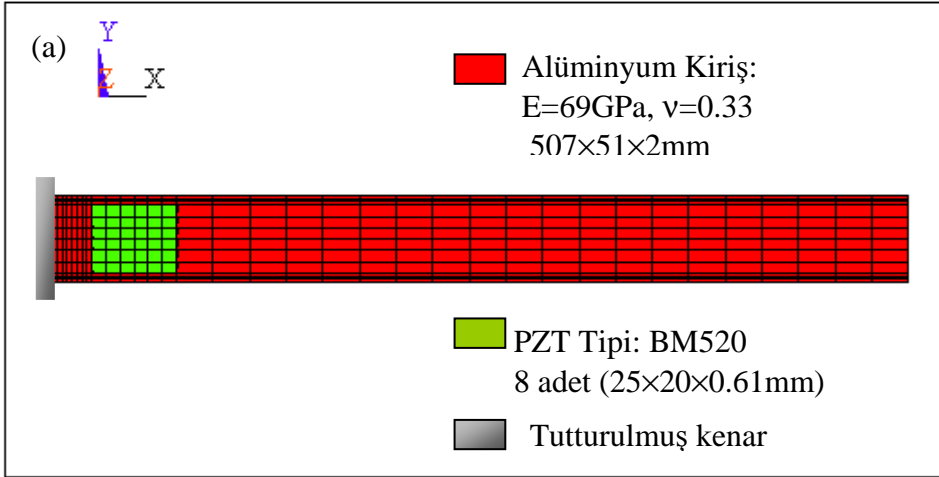
Uyarıcıların kiriş üzerindeki yerleşiminin etkileri Şekil 4'te verilmiştir. 507x51x2mm boyutlarındaki alüminyum kirişin  $x=0$  kenarı boyunca tuturulduğu ve 50x40x0.61mm boyutundaki uyarıcıların bimorf konfigürasyonunda kirişin üzerine yapıştırıldığı varsayılmıştır. Uyarıcılar tutturulan kenara yaklaştıkça, kirişin serbest uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesinin arttığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni tutturulmuş uca yaklaştıkça gerinimlerin ve uzamaların artmasıdır. Akıllı yapılarda kullanılan uyarıcıların ebatları, özellikle kalınlığı, üretici firma tarafından belirlenmektedir ancak birkaç yamayı birbiriyle seri olarak bağlamak suretiyle etkin uzunluk artırılabilir. Bimorf konfigürasyonunda modellenen akıllı kirişlerde kullanılan uyarıcıların boyutlarının akıllı kirişin cevabı üzerindeki etkileri Şekil 5.a'da gösterilmiştir. Burada uyarıcı uzunluğundaki artmanın serbest uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesini arttırdığı görülmekte ve uyarıcı uzunluğu arttıkça uyarıcı etkinliğinin de arttığı anlaşılmaktadır. Akıllı yapının cevabını arttıran bir faktör de uyarım voltajındaki artmadır. Modellerde serbest uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesi ile uygulanan voltaj arasında bir doğrusal bağıntı olduğu saptanmış ve bu durum Şekil 5.b'de gösterilmiştir.

Piezoelektrik uyarıcıların yüksek gerilme altında yapıp, uyarıcı özelliklerini kaybettikleri bilinen bir özelliktir. Çalışmada kullanılan BM520 tipindeki PZT uyarıcılar için maksimum Von-Mises gerilme miktarı üretici firma (Sensortech Limited, Collingwood,Canada) tarafından 63MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmada bu değer aşılmamıştır. Piezoelektrik uyarı voltajındaki değişimin, bimorf konfigürasyonlu akıllı kirişte bulunan uyarıcılarda oluşturduğu Von-Mises gerilmeleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada uyarıcıların dış yüzey elektrodlarına uygulanan uyarı voltajı ( $V_0$ ) ile oluşan Von-Mises gerilmeleri arasında doğrusal

bir bağıntı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada uyarıcıların iç elektrotlarının topraklandığı düşünülmüştür( $V_i=0$ ).

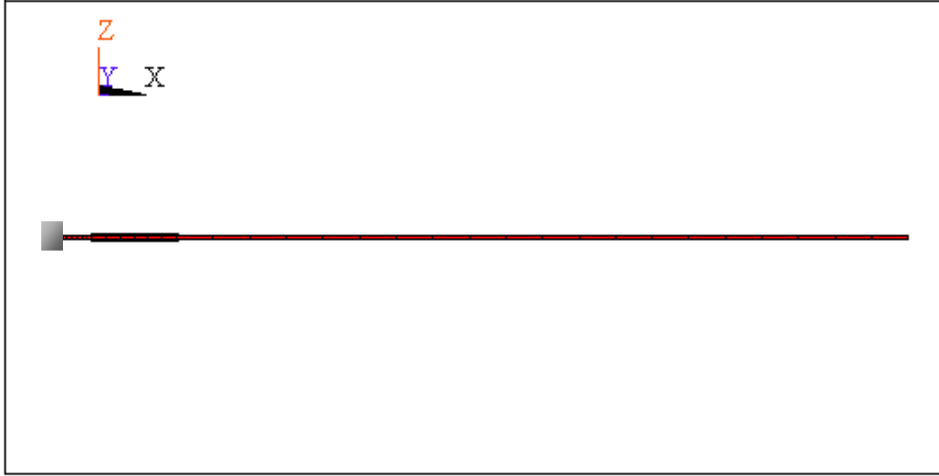


Şekil 2. Modeli Doğrulamak Amacıyla Kullanılan Akıllı Kiriş  
a. Geometri ve sonlu elemanlar modelinin üstten ve yandan görünüşü  
b. Akıllı kirişin piezoelektrik uyarıma cevabı ( $V_i=0$ ,  $V_o=400$  Volt)

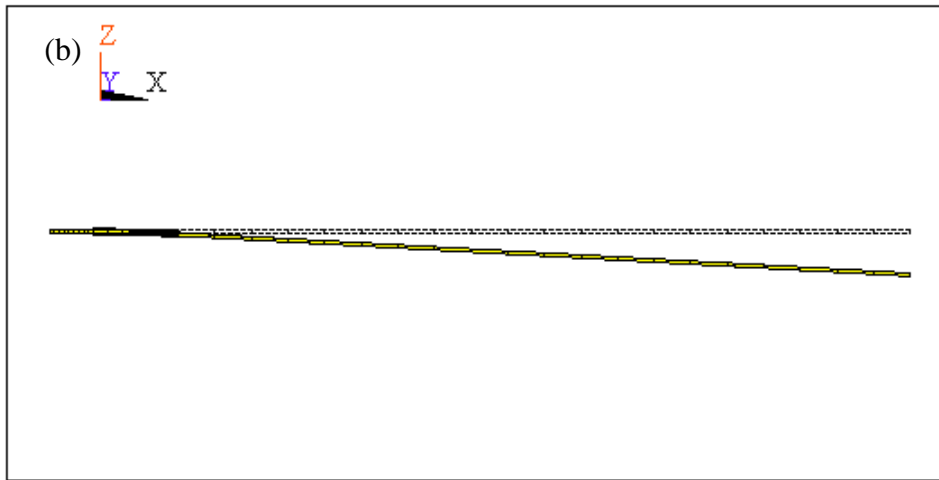


ANSYS 5.6  
APR 21 2001  
09:32:19  
ELEMENTS  
PowerGraphics  
EFACET=1  
MAT NUM

ZV =1  
DIST=.139425  
XF =.2535  
YF =.0255  
ZF =.001  
Z-BUFFER



WIND=2  
YV =-1  
DIST=.139425  
XF =.2535  
YF =.0255  
ZF =.001  
Z-BUFFER

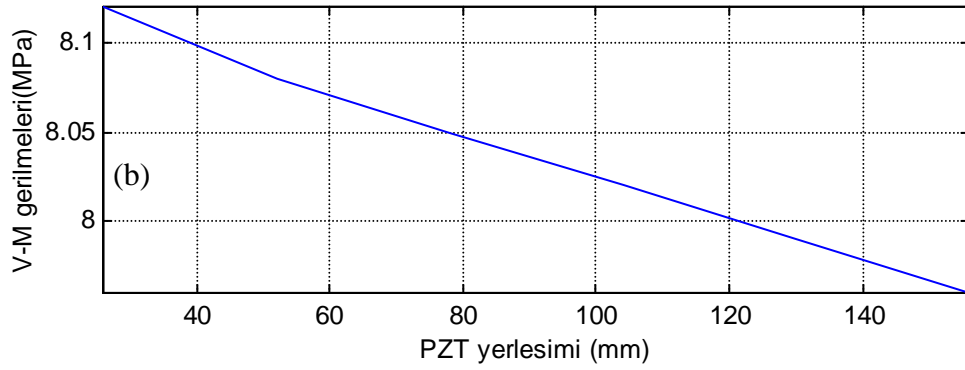
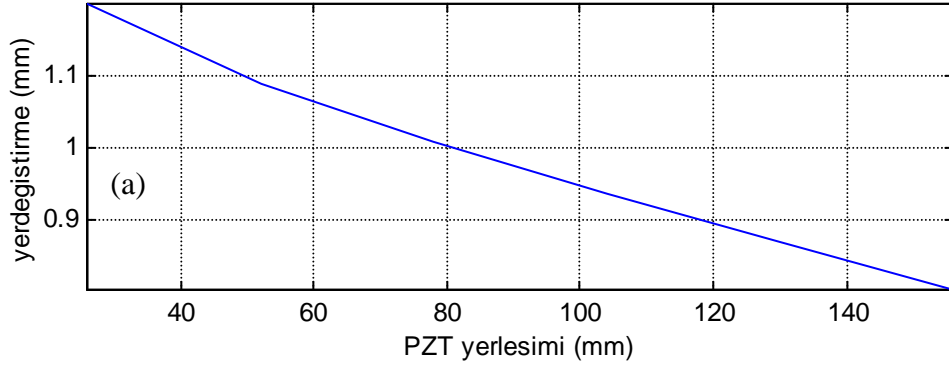


ANSYS 5.6  
APR 18 2001  
12:11:59  
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.001242

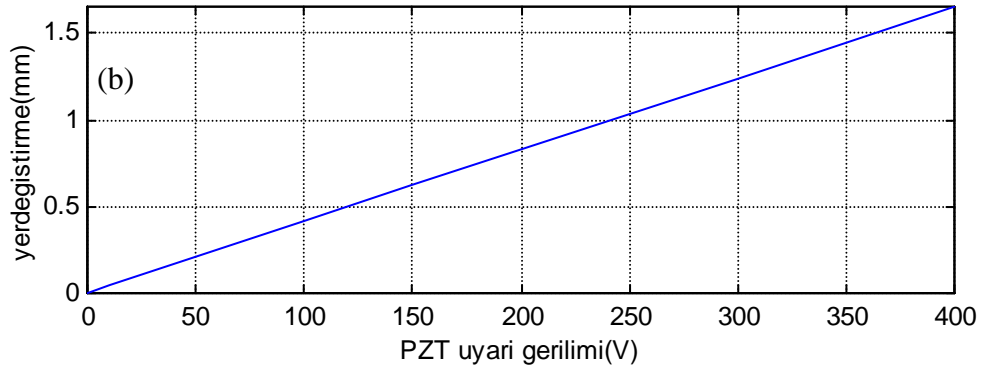
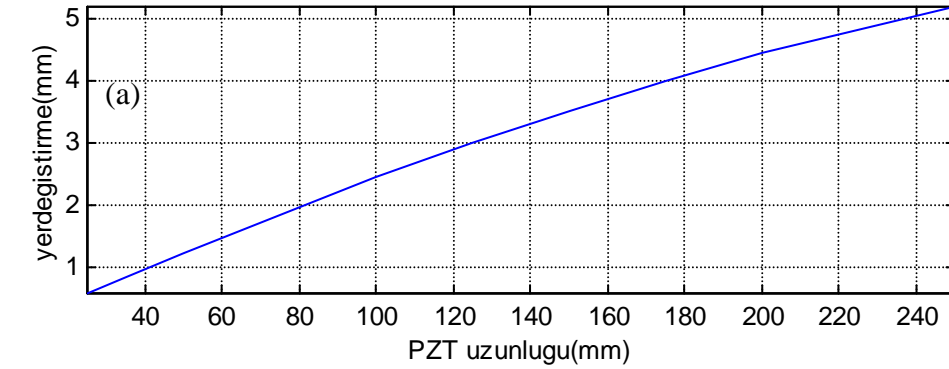
Şekil 3. Çalışmada Geliştirilen Akıllı Kiriş

a. Geometri ve sonlu elemanlar modelinin üstten ve yandan görünüşü

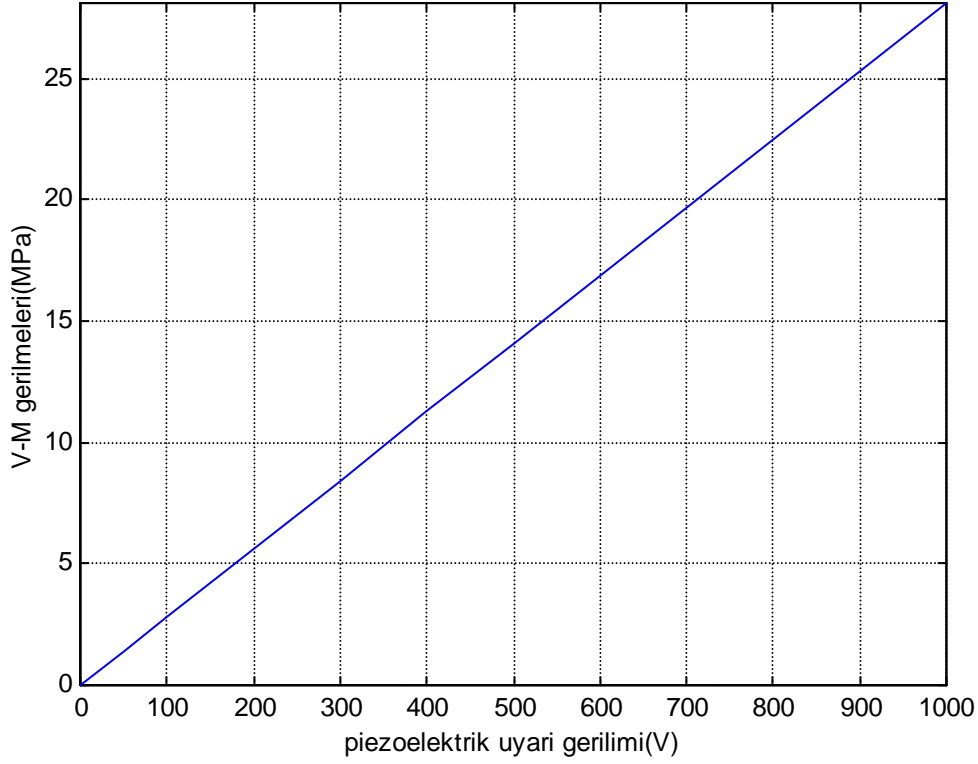
b. Akıllı kirişin piezoelektrik uyarıma cevabı ( $V_i=0, V_o=300$  Volt)



Şekil 4. Uyarıcı Yerleşiminin Akıllı Kirişin Cevabı Üzerindeki Etkileri ( $V_o=300$  Volt)  
a. Serbest uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesi  
b. PZT uyarıcılarda oluşan Von Mises gerilmeleri



Şekil 5. Akıllı Kirişin Cevabını arttıran Parametreler (507x51x2mm alüminyum kiriş)  
a. Uyarıcı uzunluğu ( $V_o=300$  Volt)  
b. Uyarım gerilim değeri (50x40x0.61mm piezoelektrik uyarıcılar)



Şekil 6. Piezoelektrik Voltaj Değişiminin Bimorf Konfigürasyonlu Piezoelektrik Uyarıcılardaki Von-Mises Gerilmeleri Üzerindeki Etkisi ( $V_i=0$ )

## 2.2. Dinamik Analiz

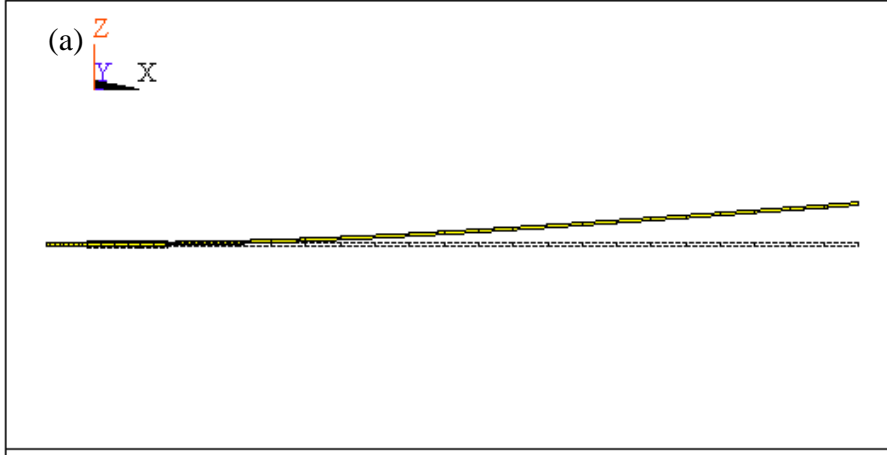
Bu kısımda yapıştırılan piezoelektrik yamaların, orijinal alüminyum kirişin doğal frekansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla bir ucundan itibaren 13 mm mesafeden tutturulan 507x51x2mm boyutlarındaki bir alüminyum kirişin doğal frekansları belirlenmiştir. Bu değerler aynı boyutlara sahip ve aynı şekilde tutturulan bir akıllı kirişin doğal frekanslarıyla karşılaştırılmıştır. Akıllı kirişin diğer özellikleri Şekil 3a'da tanımlanmıştır. Sonuçlar Tablo1'de sunulmuştur.

Yamaların direngelik artırıcı etkilerinden dolayı (stiffening effect), beklenildiği gibi, yama uygulanmasının tüm doğal frekansları arttırdığı görülmektedir. Akıllı kirişin bu frekanslara ait biçim şekilleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo1. Piezoelektrik Yamaların Kirişin Doğal Frekansları Üzerindeki Etkileri

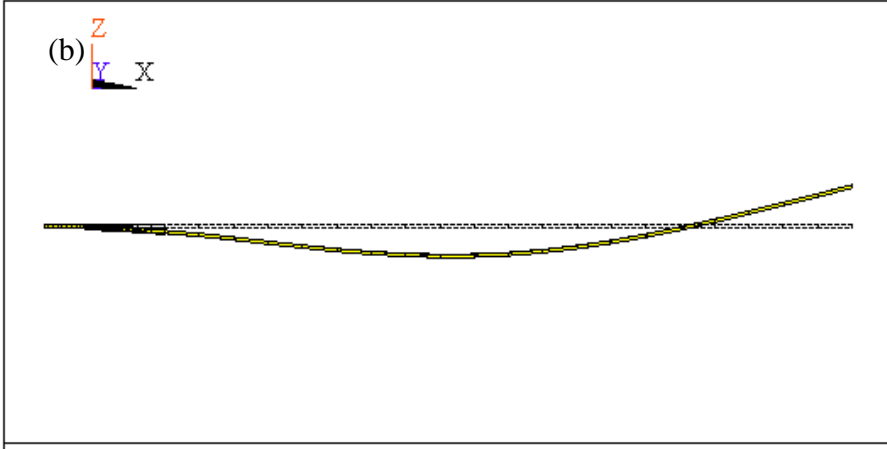
Frekans(Hz)	Aluminyum kiriş	Akıllı kiriş	Artış
$f_1$	6.679	7.503	%12.33
$f_2$	41.858	44.918	%7.31
$f_3$	117.219	121.06	%3.28





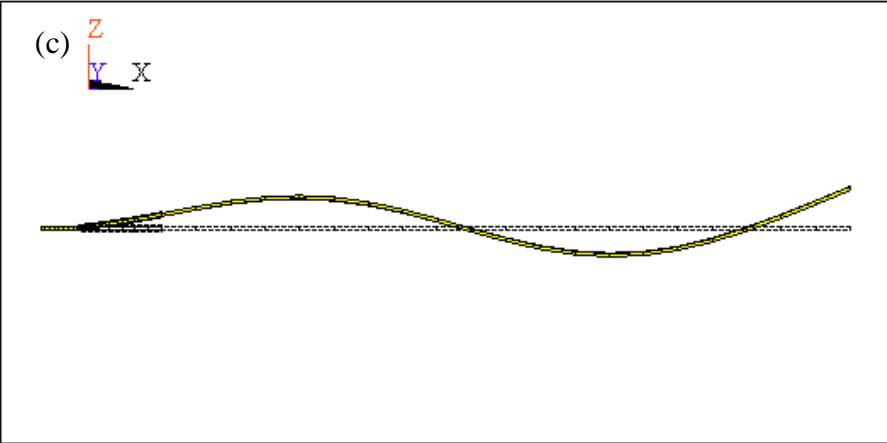
ANSYS 5.6  
 APR 18 2001  
 11:44:33  
 DISPLACEMENT  
 STEP=1  
 SUB =1  
 FREQ=7.503  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 DMX =5.542

a) Akıllı kirişin ilk doğal frekansındaki biçimi ( $f_1=7.503\text{Hz}$ )



ANSYS 5.6  
 APR 18 2001  
 11:46:38  
 DISPLACEMENT  
 STEP=1  
 SUB =2  
 FREQ=44.918  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 DMX =5.397

b) Akıllı kirişin ikinci doğal frekansındaki biçimi ( $f_2=44.918\text{Hz}$ )



ANSYS 5.6  
 APR 18 2001  
 11:48:40  
 DISPLACEMENT  
 STEP=1  
 SUB =3  
 FREQ=121.057  
 PowerGraphics  
 EFACET=1  
 AVRES=Mat  
 DMX =5.272

c) Akıllı kirişin üçüncü doğal frekansındaki biçimi ( $f_3=121.057\text{Hz}$ )

Şekil 7. Akıllı Kirişin Biçim Şekilleri

Çalışmada kullanılan PZT uyarıcı ve algılayıcılar için detaylı bilgi ve diğer piezoelektrik malzemeler hakkındaki bilgiler kaynak [12]'de bulunabilir.

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada akıllı yapıların analizinde sonlu elemanlar modelleme tekniğinin etkinliği gösterilmiştir. Bu teknik akıllı yapıların analizinde gerekli olan termo-mekanik-elektrik etkileşim problemlerinin incelenmesinde kullanılabilir. Çalışmada PZT yamaların akıllı kirişin statik ve dinamik özellikleri üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Çalışmada sunulan parametrik modelleme tekniği, akıllı yapılardaki uyarıcı ve algılayıcıların yapı üzerinde en iyi yerleşim tasarımını gerçekleştirebilmektedir.

### KAYNAKLAR

- [1] E. F. Crawley, J. Louis, 'Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures', AIAA Journal, October 1989.
- [2] E. K. Dimitridis C., R. Fuller, C. A. Rogers 'Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration excitation of Thin Plates', Journal of Vibration and Acoustics, January 1991 Vol :113.
- [3] S. E. Prasad, J.B. Wallace, B. E. Petit , H. Wang C. K. Jen. Kalaycioglu, M. Giray 'Development of Composite Structures for Static Shape Control', SPIE, Far East and Pacific Rim Symposium on Smart Materials, Structures and MEMS.(Banglor, India )
- [4] S. Hanagud, M. W. Obal, and A. J. Calise, 'Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators', Journal of Guidance, Control and Dynamics, October 1992, Vol. 15, No: 5, pp.1199-1206
- [5] J. Dosch, J. Inmann, 'Modeling and Control for Vibration Suppression of a Flexible Active Structure', Journal of Guidance, Control and Dynamics , Vol8, April 1995"
- [6] Xie H. P.S. Kalaycioglu, Patel R. V. 'Control of Residual Vibrations in the Space Shuttle Remote Manipulator System', IEEE Control Systems Magazine
- [7] A. Suleman, A.P. Costa, C Crawford, R. Sedaghati 'Wind tunnel aeroelastic response of piezoelectric and aileron controlled 3-D wing', CanSmart Workshop Smart Materials and Structures proceedings, Sep.1998
- [8] D. F. Jones, S. E. Prasad and J. B. Wallace 'The Applications of Advanced Materials in High Technology Society', Volume 1, Trans Tech Publications, 1996, Piezoelectric Materials and Their Applications
- [9] J.N. Reddy, Mechanics of Composite Plates, CRC Press,1997
- [10] ANSYS User's Manual (version 5.6)
- [11] Wang H. and C.K Jen. 'Design and Fabrication of Composites for Static Shape Control: Final Report', June 1996, Sensor Tech Limited BM Hi-Tech Division, Ontario Canada
- [12] Sensor Technology Limited Product Data Sheets, Collingwood, Ontario, Canada