

AKILLI BİR KİRİŞİN STATİK AERODİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Fatih Mutlu KARADAL* , Melin ŞAHİN* , Ömer Faruk KIRCALI **
Volkan NALBANTOĞLU*** ve Yavuz YAMAN*

(*)Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, ANKARA
(**)Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş., ANKARA
(***)MGEO, ASELSAN A.Ş., ANKARA
karadal@ae.metu.edu.tr, msahin@metu.edu.tr, fkircali@stm.com.tr
vnalbant@mgeo.aselsan.com.tr, yyaman@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen akıllı bir kirişin statik aerodinamik yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Akıllı kiriş, bir ucu tutturulmuş öteki ucu serbest bir alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan piezoelektrik yamalardan oluşmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde, piezoelektrik yamaların etkisi termal benzetim yöntemi kullanılarak göz önünde tutulmuş ve akıllı kirişin sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Piezoelektrik yamaların voltaj kullanılarak uyarılması sonucunda akıllı kirişin verdiği dikey statik cevap incelenmiş, ayrıca yamaların akıllı kirişin doğal frekansları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise çeşitli uçuş koşulları (farklı sesaltı hızlar, dinamik basınçlar ve hücum açıları) için akıllı kiriş üzerindeki statik hava yükleri hesaplanmış ve akıllı kirişin bu yük dağılımları altındaki davranışı incelenmiştir. Bu çalışma, aerodinamik yüklere maruz kalan bir akıllı kirişin titreşimlerinin aktif olarak sönmelenmesine de bir ön hazırlık amacı taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı kiriş, sonlu elemanlar modeli, termal benzetim metodu, aerodinamik yük.

THE BEHAVIOUR OF A SMART BEAM UNDER STATIC AERODYNAMIC LOADS

ABSTRACT

This study presents the response of a smart beam, which was modelled by finite element method, to static aerodynamic loads. The smart beam consists of an aluminium beam in cantilevered configuration with surface bonded piezoelectric patches. In the first part of the study, piezoelectric patches are modelled by the thermal analogy method and the finite element model of the smart beam is obtained. Then the static flexural response of the smart beam to voltage actuation is investigated. Furthermore the effects of the patches on the resonance frequencies of the smart beam are also determined. In the second part of the study, the static air loads on the smart beam are calculated for different flight conditions and the deformation of the structure is examined under these loads. This work also intends to be a pre-cursor to the active vibration control of the smart beam subjected to aerodynamic loads.

Keywords: Smart beam, finite element model, thermal analogy method, aerodynamic load.

1. GİRİŞ

Akıllı yapılar dışarıdan uygulanan bir tahriği algılayabilen ve buna aktif denetim mekanizmaları yardımıyla müdahale edebilen yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu tür yapılar, pasif yapı yüzeyine yapıştırılan ya da

içine gömülen birçok aktif parça ve işlemci ağlarından oluşmaktadır. Bu yapılarda, algılayıcı ve uyarıcılar yapının aktif parçalarını oluşturmaktadır. Piezoelektrik malzemeler gerek yapıların şekil değiştirmesinde, gerekse titreşim düzeylerinin

sönümlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Akıllı yapıların analiz ve modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Kaynak [1]'de piezoelektrik uyarıcı ve algılayıcılar içeren bir kompozit plakanın aktif titreşim kontrolüne uygun, klasik katmanlı plaka (laminated plate) teorisine dayanan bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve plakanın dinamik cevabı araştırılmıştır. Varadan ve arkadaşları [2], akıllı bir plakanın sonlu elemanlar formülasyonunu ve modelini oluşturmuşlar ve modellemenin doğruluğunu deneysel sonuçlarla karşılaştırarak göstermişlerdir. Piezoelektrik uyarıcılar içeren akıllı yapıların tasarımına olan ilginin artması ve piezoelektrik kontrol sistemlerinin daha hızlı ve daha basit bir şekilde uygulanmasına duyulan ihtiyaç nedeniyle, akıllı yapıların modellenmesinde daha uygun yöntemler geliştirilmektedir. Dong ve Meng [3], basit bir yaklaşımla piezoelektrik elemanlara uygulanan voltaj uyarımından kaynaklı gerinim (strain) ile termal gerinim arasında benzetim kurulabileceğini göstermişlerdir. Bu sayede elektrotermomekanikal elemanlara sahip olmayan MSC®/PATRAN-NASTRAN gibi paket programlar ile piezoelektrik elemanlar modellenenmekte ve akıllı yapıların gerçek koşullara daha uyumlu sonlu elemanlar modelleri elde edilebilmektedir.

Havacılık yapılarının şekil ve titreşim kontrolünde akıllı yapılar etkin bir şekilde kullanıma girmeye başlamıştır. Piezoelektrik algılayıcı ve uyarıcıların, kanat yapılarının gust yükünden kaynaklı titreşimlerinin sönümlenmesindeki [4], ve bufet zorlamasına maruz kalan bir F/A-18 uçağının dikey fininin aeroelastik etkilerinin giderilmesindeki [5] etkinliği gösterilmiştir. Aerodinamik yükler altındaki akıllı yapıların aktif titreşim kontrolü için bu yükler altında yapının davranışının bilinmesi çok önemlidir. Bu amaçla çalışmamızda öncelikle akıllı bir kirişin MSC®/PATRAN paket programı yardımıyla sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, daha sonra da statik hava yükleri altında kirişin davranışı MSC®/NASTRAN/Aeroelasticity I paket programı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan paket programlar ODTÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünün bünyesinde bulunmaktadır.

2. SONLU ELEMANLAR MODELLEMESİ

Çalışmanın bu kısmında bir akıllı kirişin MSC®/PATRAN programı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Akıllı kiriş bir pasif alüminyum kiriş ve üzerine yapıştırılan piezoelektrik yamalardan oluşmuştur. Çalışmada piezoelektrik yamaların voltaj kullanılarak uyarılması sonucunda akıllı kirişin verdiği statik cevap ve yamaların akıllı kirişin doğal frekansları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2.1. Akıllı Kiriş Modeli

Bu çalışmada modellenen akıllı kiriş, bir ucundan itibaren 13 mm'lik kısmı tutturulmuş öteki ucu serbest, 507×51×2mm boyutlarında alüminyum bir kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan 20×25×0.5mm boyutlarında 8 adet Sensortech-BM500 tipinde piezoelektrik yamalardan (PZT, Lead-Zirconate-Titanate) oluşturulmuştur. Akıllı kiriş Şekil 1' de gösterilmiştir. Modelleme esnasında piezoelektrik yamaların yapıya sıkıca yapıştırıldığı (perfect bonding) varsayılmıştır. Alüminyum kirişin ve piezoelektrik yamaların malzeme özellikleri Ek-A' da verilmiştir.

2.2. Termal Benzetim Metodu

Elektrotermomekanikal elemanlara sahip olmamasından ötürü MSC®/PATRAN-NASTRAN paketinde akıllı elemanları simgeleyen piezoelektrik elemanların direk modellenmesi mümkün olmamaktadır. Öte yandan sahip olduğu Aeroelastik analiz



Şekil 1. Çalışmada kullanılan akıllı kirişin üst ve yan görünüşleri

yetenekleri Havacılık ve Uzay Mühendisliği için MSC®/PATRAN-NASTRAN programlarının kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle uyarıcı olarak kullanılan piezoelektrik elemanların modellenmesinde termal benzetim yöntemi adı verilen bir yola başvurulmaktadır. Bu yöntem, voltaj uygulanması sonucu ortaya çıkan piezoelektrik gerinim ile termal gerinim arasında benzetim kurmak suretiyle piezoelektrik uyarıcıların modellenmesine olanak sağlamaktadır [3].

Termal kökenli gerinim aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\epsilon^{th} = \alpha \Delta T \quad (1)$$

Burada α termal genleşme katsayısını, ΔT ise sıcaklık değişimini simgelemektedir. Piezoelektrik elemanın kalınlığı yönünde (3, z-yönünde) voltaj uygulanması sonucu uzunluğu yönünde (1, x-yönünde) meydana gelen piezoelektrik gerinim ise aşağıda verildiği gibidir:

$$\epsilon_1^p = d_{31} \frac{\Delta V}{t} \quad (2)$$

Burada d_{31} , ΔV ve t sırasıyla piezoelektrik gerinim sabiti, uygulanan voltaj ve PZT kalınlığıdır. Denklem (1) ve (2) yi karşılaştırarak 1,x, 2,y ve 3,z yönlerindeki termal genleşme katsayıları:

$$\alpha_{11} = \frac{d_{31}}{t}, \quad \alpha_{22} = \frac{d_{32}}{t}, \quad \alpha_{33} = \frac{d_{33}}{t} \quad (3)$$

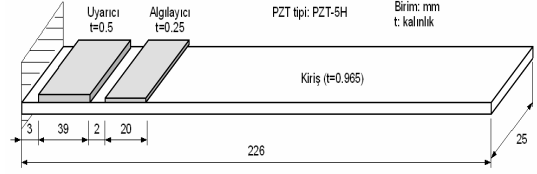
ve sıcaklık değişimi:

$$\Delta T = \Delta V \quad (4)$$

şeklinde bulunabilir ve sonlu elemanlar modelinde, piezoelektrik elemanlar termoplastik elemanlar gibi modellenebilir.

2.3. Modelleme Tekniğinin Doğrulanması

Çalışmanın bu kısmında termal benzetim metodunun doğrulanması amacıyla kaynak [2] de verilen model göz önüne alınmıştır. Bu model bir ucu tutturulmuş bir alüminyum kiriş ve kirişin tek yüzüne yapışık bir PZT uyarıcı ve bir algılayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 2). Akıllı kiriş, MSC®/PATRAN' da 8 düğüm noktasına sahip hegzagonal katı elemanlar,



Şekil 2. Modeli doğrulamak amacıyla kullanılan akıllı kirişin geometrik modeli

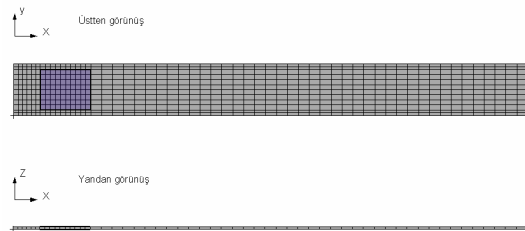
HEX8, kullanılarak modellenmiş ve uyarıcıya uygulanan 1 Voltluk voltaja olan teorik cevabı elde edilmiştir. Teorik analiz sonucu elde edilen $3.948 \mu m$ ' lik uç orta nokta dikey yerdeğiştirmesinin kaynak [2]'de verilen $3.94 \mu m$ ' ye son derece yakın olması modelleme tekniğinin doğruluğunu göstermektedir.

2.4. Statik Analiz

Akıllı kiriş, MSC®/PATRAN'da iki farklı yaklaşımla modellenmiş ve modellerin 300V'luk voltaj uyarımına verdikleri statik cevaplar incelenmiştir.

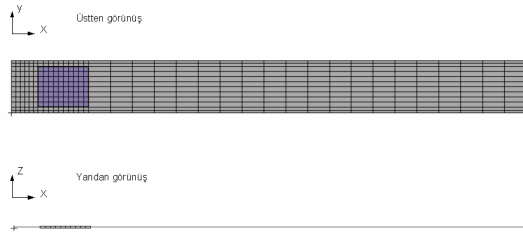
Şekil 3 akıllı kirişin HEX8 katı elemanları kullanılarak modellenmesi olan birinci yaklaşımı göstermektedir. Hem alüminyum kiriş hem de PZT'ler katı elemanlarla modellendiğinden bu model "katı-katı model" olarak adlandırılmıştır.

Donanım gereksinimlerini en aza indirebilmek, hesaplama verimliliğini geliştirmek ve üç boyutlu katı elemanların direngenlik (stiffness) artıcı etkilerini

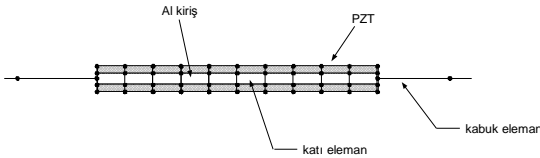


Şekil 3. Akıllı kirişin katı-katı sonlu elemanlar modeli

azaltmak için plaka yapıları genellikle düz-kabuk elemanlarla (shell elements) modellenmektedir. Bu amaçla katı-katı modelden farklı olarak PZT yamalar ve kirişin yamaların arasında kalan bölümü HEX8 tipi katı elemanlar kullanılarak, kirişin diğer kısımları da 4 düğüm noktalı QUAD4 tipi kabuk elemanlarla modellendiği ikinci bir yaklaşım geliştirilmiş ve Şekil 4’ te gösterilmiştir. Bu model ise “katı-kabuk model” olarak tanımlanmıştır. Modelde katı ve kabuk elemanlar MSC®/NASTRAN’ın katı-kabuk eleman bağlayıcısı RSSCON ile birleştirilmiştir. RSSCON, kabuk eleman düğüm noktasının üç eksende yer değiştirme ve iki dönme serbestlik derecesi ile onun bağlanacağı katı elemanın alt ve üst kenar iki düğüm noktasının üç eksende yer değiştirme serbestlik derecesinin birleştirilmesini sağlar [6]. Modelin piezoelektrik yamalara yakın bölümünün detaylı görünümü Şekil 5’ te verilmiştir.

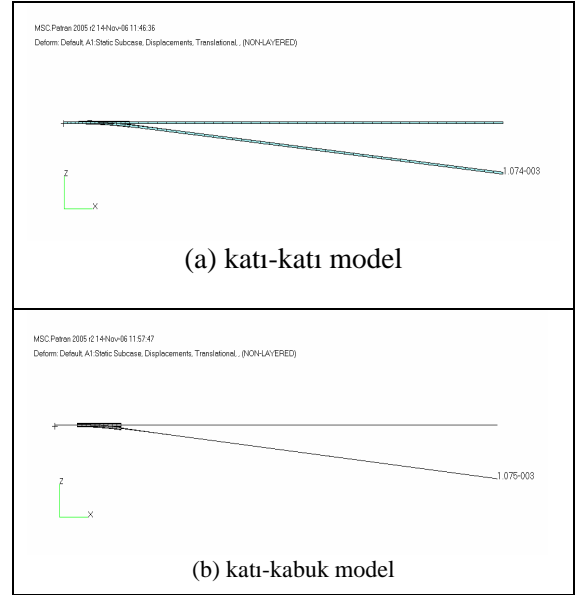


Şekil 4. Akıllı kirişin katı-kabuk sonlu elemanlar modeli



Şekil 5. Akıllı kirişin katı-kabuk modeli için PZT’lere yakın bölümünün detaylı modeli

Yukarıda elde edilen katı-katı ve katı-kabuk modellere 300V’luk voltaj uyarımı vermek için MSC®/NASTRAN’da termal benzetim metodu uygulanmıştır: Piezoelektrik yamaların termal genleşme katsayıları (3) numaralı denklem kullanılarak elde edilmiş ve yamaların ortotropik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Modellere uygulanan 300V’luk voltaj da PZT düğüm noktalarına 300°C’lik sıcaklık değişiminin verilmesi suretiyle sağlanmıştır. Akıllı kiriş modellerinin 300V’luk voltaj uyarımına verdikleri cevaplar Şekil 6’da gösterilmiştir. Maksimum dikey yerdeğiştirmelerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç hem modellemelerin doğruluğunu hem de katı-kabuk modelde kullanılan katı-kabuk eleman bağlayıcılarının etkinliğini göstermektedir.



Şekil 6. Akıllı kiriş modellerinin 300V’luk voltaj uyarımına olan cevapları

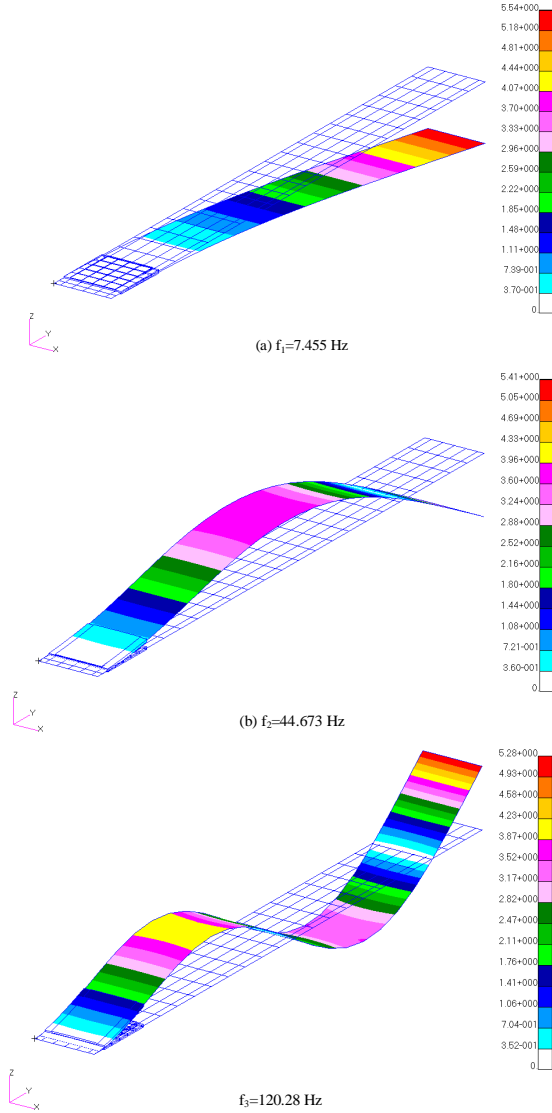
2.5. Dinamik Analiz

Bu kısımda piezoelektrik yamaların, pasif alüminyum kirişin doğal frekansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla bir ucundan itibaren 13 mm’lik kısmı tutturulmuş 507×51×2 mm boyutlarındaki bir alüminyum pasif kirişin doğal frekansları belirlenmiştir. Bu değerler akıllı kirişin doğal frekanslarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Piezoelektrik yamaların kirişin doğal frekansları üzerindeki etkileri

Frekans (Hz)	Pasif Alüminyum kiriş	Akıllı kiriş	Artış %
f_1	6.680	7.455	11.60
f_2	41.859	44.673	6.72
f_3	117.20	120.28	2.63

Yamaların direngenlik artırıcı etkilerinden dolayı, piezoelektrik yama uygulanmasının, küçük frekanslarda daha fazla olmak üzere, doğal frekansları arttırdığı görülmektedir. Akıllı kirişin bu frekanslara ait biçim şekilleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Akıllı kirişin titreşim biçimleri

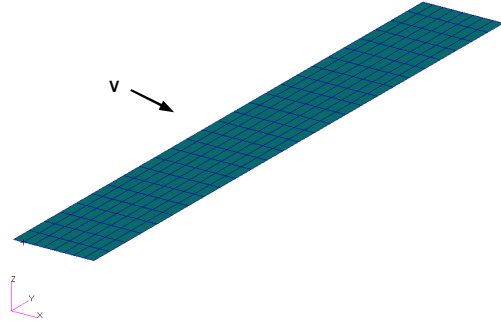
3. STATİK AEROELASTİK ANALİZ

Çalışmanın bu bölümünde akıllı kirişin statik aerodinamik yüklere karşı olan cevabı araştırılmıştır. Analizler MSC®/NASTRAN/Aeroelasticity I paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

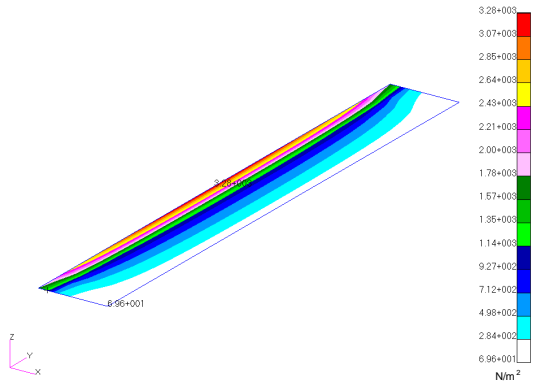
Akıllı kirişin statik aeroelastik analizi için yapısal model olarak katı-kabuk sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır.

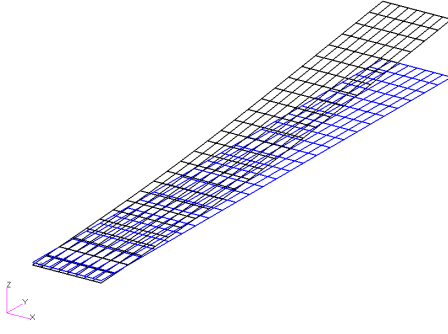
3.1 Aerodinamik Model

Kirişin aerodinamik panel modeli Şekil 8'de gösterilmiştir. Panel x eksenini boyunca (akış yönünde) 8 eşit, y eksenini boyunca da 26 eşit aerodinamik elemandan oluşmaktadır. Bu model yardımıyla DLM (Doublet-Lattice Method) yöntemi kullanılarak statik analiz için gerekli olan statik hava yükleri hesaplanmıştır. Şekil 9'da, 0.5 Mach, 2000 N/m² dinamik basınç ve 5° hücum açısı için hesaplanan aerodinamik model üzerindeki katı aeroelastik basınç dağılımı ve Şekil 10'da aerodinamik modelin yerdeğiştirmesi gösterilmiştir.



Şekil 8. Aerodinamik panel modeli

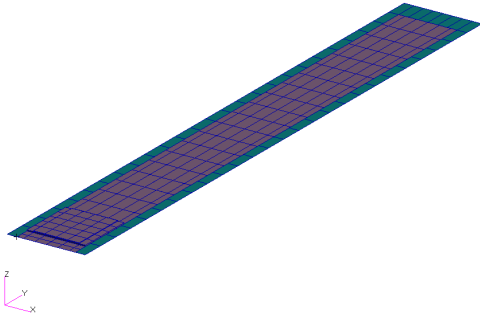
Şekil 9. Aerodinamik model üzerindeki basınç dağılımı ($V=0.5$ Mach, $q=2000$ N/m², $\alpha=5^\circ$)



Şekil 10. Aerodinamik modelin yer değiştirilmesi
($V=0.5$ Mach, $q=2000$ N/m², $\alpha=5^\circ$)

3.2 Yapısal ve Aerodinamik Modellerin Birleştirilmesi

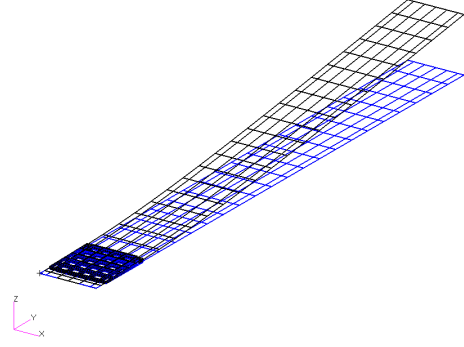
Yapısal ve aerodinamik modeller birbirlerine, yapısal serbestlik derecelerinden aerodinamik serbestlik derecelerine aradeğerlendirme yapılmasını sağlayan spline elemanlar kullanılarak bağlanmaktadır. Böylece yapısal yerdeğişirmeler ile aerodinamik yerdeğişirmeler arasında ve aerodinamik kuvvetler ile de yapısal düğüm noktalarına etkiyen eşdeğer yapısal kuvvetler arasında gerekli ilişki kurulmaktadır [7]. Şekil 11 aerodinamik ve yapısal sonlu elemanlar modellerinin yüzey spline elemanlarla birleştirilmiş durumunu vermektedir.



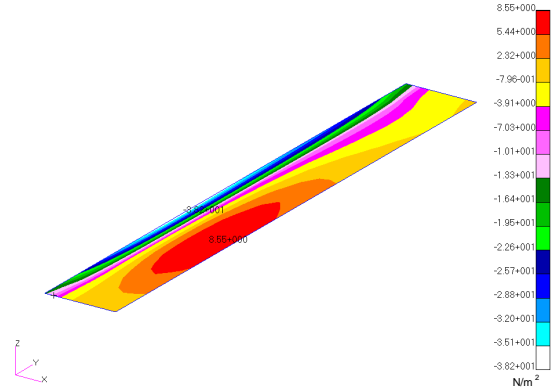
Şekil 11. Yapısal ve aerodinamik modellerin spline elemanlarla birleştirilmiş durumu

3.3 Statik Aeroelastik Analiz Sonuçları

Akıllı kirişin, hesaplanan yük durumu ($V=0.5$ Mach, $q=2000$ N/m², $\alpha=5^\circ$) için yer değiştirmesi ve bu durumdan kaynaklanan basınç dağılımı sırasıyla Şekiller 12 ve 13'de gösterilmiştir.



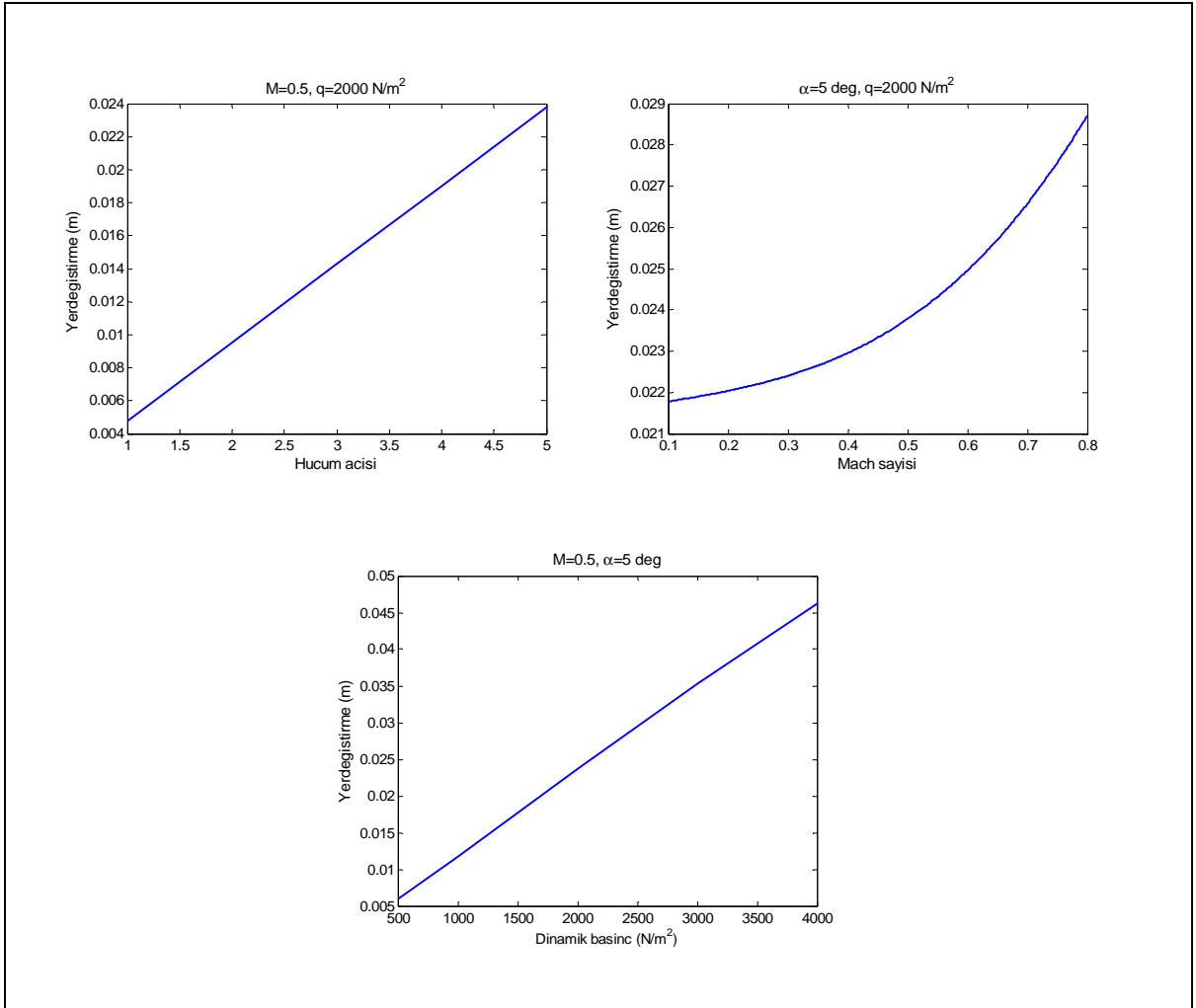
Şekil 12. Akıllı kirişin yer değiştirilmesi



Şekil 13. Akıllı kirişin yerdeğişirmesinden kaynaklanan basınç dağılımı ($V=0.5$ Mach, $q=2000$ N/m², $\alpha=5^\circ$)

Çalışmada ayrıca çeşitli uçuş koşullarının akıllı kirişin yer değiştirmesi üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Hız (Mach sayısı), hücum açısı ve dinamik basıncın yapının yer değiştirmesi üzerindeki etkileri Şekil 14'te gösterilmiştir. Burada Mach sayısı, hücum açısı ve dinamik basıncıdaki artmanın, akıllı kirişin yer değiştirmesini arttırdığı görülmektedir. Farklı uçuş koşullarında

piezoelektrik elemanlar için gerilme analiz sonuçları (maksimum Von-Mises gerilme değerleri) da Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan BM500 tipindeki piezoelektrik uyarıcılar için maksimum Von-Mises gerilme miktarı 63MPa'dır ve tablodan görüldüğü gibi sesaltı hızlar için bu değer aşılmamaktadır.



Şekil 14. Mach sayısı, hücum açısı ve dinamik basıncın akıllı kirişin yer değiştirmesi üzerindeki etkileri

Tablo 2. Farklı uçuş koşulları için piezoelektrik elemanlarda aerodinamik yük altında oluşan maksimum Von Mises gerilmeleri (MPa)

$q=2000$ N/m^2	$M = 0.1$	$M = 0.2$	$M = 0.3$	$M = 0.4$	$M = 0.5$	$M = 0.6$	$M = 0.7$	$M = 0.8$
$\alpha = 1^\circ$	3.23	3.27	3.33	3.42	3.56	3.76	4.05	4.50
$\alpha = 3^\circ$	9.67	9.78	9.97	10.25	10.66	11.25	12.11	13.48
$\alpha = 5^\circ$	16.11	16.29	16.60	17.07	17.76	18.73	20.17	22.45
$q=4000$ N/m^2	$M = 0.1$	$M = 0.2$	$M = 0.3$	$M = 0.4$	$M = 0.5$	$M = 0.6$	$M = 0.7$	$M = 0.8$
$\alpha = 1^\circ$	6.35	6.42	6.55	6.73	6.99	7.37	7.93	8.81
$\alpha = 3^\circ$	19.08	19.29	19.65	20.21	21.00	22.14	23.82	26.46
$\alpha = 5^\circ$	31.78	32.12	32.73	33.65	35.30	36.88	39.67	44.06

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, akıllı yapılarda kullanılan piezoelektrik uyarıcılar termal gerinimler ile piezoelektrik gerinimler arasında benzetim kurmaya dayanan bir yöntem yardımıyla modellenmiş ve bu modelin statik aerodinamik yükler altındaki etkinliği gösterilmiştir. Akıllı kirişin farklı eleman tipleri kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri MSC®/PATRAN programı ile elde edilmiş ve kirişin statik ve dinamik özellikleri MSC®/NASTRAN programı kullanılarak incelenmiştir. Akıllı kirişin statik hava yükleri altındaki davranışı ise oluşturulan sonlu elemanlar modeli kullanılarak MSC®/NASTRAN/Aeroelasticity I programı ile incelenmiş ve yapının farklı uçuş koşulları altındaki cevabı araştırılmıştır. Daha sonraki çalışmalarımızda akıllı kirişin dinamik aerodinamik yükler altındaki davranışı yani kanat çırpmasının (flutter) incelenmesi ve bu yüklerden kaynaklı titreşimlerin aktif sönümlenmesi (Aeroservoelastisite problemi) yapılacaktır.

5. SEMBOLLER

Sembol Açıklama

α	Hücum açısı
q	Dinamik basınç
V	Hız
M	Mach sayısı

6. EK-A: Malzeme Özellikleri

Alüminyum Kiriş (6061-T6):

Young sabiti (E): 69 [GPa], Poisson oranı (v): 0.33, yoğunluk: 2710 [kg/m³].

PZT (Sensortech-BM500):

Yoğunluk: 7650 [kg/m³]

Direngelik matrisi:

$$[c] = \begin{bmatrix} 12.1 & 7.54 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.54 & 12.1 & 7.52 & 0 & 0 & 0 \\ 7.52 & 7.52 & 11.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.26 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Piezoelektrik uzama katsayı matrisi:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.4425 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.4425 & 0 \\ -1.6538 & -1.6538 & 3.6012 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \text{ [m/V]}$$

7. KAYNAKLAR

1. Lam, K. Y., Peng, X. Q., Liu, G. R., Reddy, J. N., "A Finite Element Model for Piezoelectric Composite Laminates", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 6, 1997, 583–591.
2. Kim, J., Varadan, V. V., Varadan, V. K., Bao, X., "Finite-element Modeling of a Smart Cantilever Plate and Comparison with Experiments", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 5, 1996, 165–170.
3. Dong, X. J., Meng, G., "Dynamic Analysis of Structures with Piezoelectric Actuators Based on Thermal Analogy Method", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, 2006, 841-844.
4. Suleman, A., Moniz, P. A., Costa, A. P., "Wing Gust Alleviation Using Adaptive Shape Control", *2nd CanSmart Workshop Smart Materials and Structures Proceedings*, 1999, 177-185.
5. Chen, Y., Wickramasinghe, V., Zimcik D., "Active Control of a Hybrid Actuation System for Aircraft Vertical Fin Buffet Load Alleviation", *Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, 2006, 315-326.
6. MSC/NASTRAN, *Quick Reference Guide*, Version 70.5, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1998.
7. MSC/NASTRAN, *Aeroelastic Analysis User's Guide*, Version 68, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1994.