

AKILLI BİR KİRİŞİN UZAMSAL SİSTEM MODELİNİN ELDE EDİLMESİ

(SPATIAL SYSTEM IDENTIFICATION OF A SMART BEAM)

Ömer Faruk KIRCALI^{1,2}

e-posta: fkircali@stm.com.tr

Melin ŞAHİN¹

e-posta: msahin@metu.edu.tr

Yavuz YAMAN¹

e-posta: yyaman@metu.edu.tr

Fatih Mutlu KARADAL¹

e-posta: karadal@ae.metu.edu.tr

Volkan NALBANTOĞLU¹

e-posta: volkan@ae.metu.edu.tr

Fatma Demet ÜLKER³

e-posta: fdulker@connect.carleton.ca

¹ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, ANKARA

² Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş., ANKARA

³ Makine ve Havacılık Mühendisliği Bölümü, CARLETON ÜNİVERSİTESİ, KANADA

ÖZET

Bu çalışmada, akıllı bir kirişin gürbüz (robust) kontrol tasarımına uygun uzamsal (spatial) sistem modelinin elde edilmesi sunulmuştur. Akıllı kiriş bir kenarı tutturulmuş, diğer kenarı serbest pasif bir alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılmış piezoelektrik yamalardan oluşmuştur. Sistem modelinin elde edilmesi için akıllı kiriş, piezoelektrik yamalar vasıtasıyla uyarılmış ve sistemin cevabı lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı kullanılarak akıllı kiriş boyunca 17 farklı noktadan toplanmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde, sistem tanımlama yöntemiyle deneysel verilerden akıllı kirişin ilk 2 eğilme titreşim biçimlerini içeren sistem modelleri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, ölçüm ve uyumlama bazlı belirsizlik (uncertainty) değerlerini tahmin etmek için deneysel sistem modelleri ile analitik sistem modelleri frekans düzleminde karşılaştırılmış, modellerinin frekans düzlemindeki cevaplarının eşlenmeleri için sönüm oranları (damping ratio) uyumlanmış, uyumlama sonucundaki genlik değerleri tahmin edilmiştir. Her nokta için deneysel ve analitik sistem modellerinin karşılaştırılmasından sistemin rezonans frekans ve sönüm oranlarındaki belirsizlik değerleri incelenmiştir.

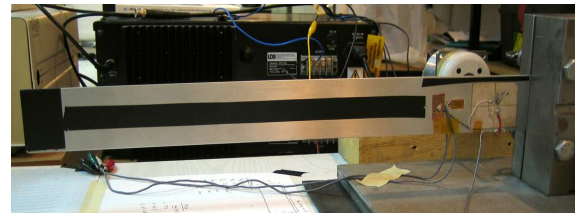
I. GİRİŞ

Akıllı yapılar dışarıdan uygulanan bir tahriği algılayabilen ve buna aktif denetim mekanizmaları yardımıyla müdahale edebilen yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu yapılar, pasif yapı yüzeyine yapıştırılan ya da içine gömülen birçok aktif parça ve işlemci ağlarından oluşmaktadır. Bu yapılarda, algılayıcı ve uyarıcılar yapının aktif parçalarını oluşturmaktadırlar. Önceki çalışmalarda [1],

piezoelektrik malzemelerin titreşim düzeylerinin sönümlemesindeki etkinliği gösterilmiş, akıllı yapıların teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak modellenmesi ve denetçi tasarımı ve uygulanması üzerinde Yaman ve arkadaşları [2-3], Çalışkan [4], Ülker [5] çeşitli çalışmalar yapmışlardır.

II. AKILLI KİRİŞ

Çalışmada kullanılan akıllı kiriş, pasif alüminyum kiriş üzerine simetrik olarak yapıştırılmış 8 adet Sensortech BM500 tipindeki 25mmx20mmx0.5mm ebatlarındaki piezoelektrik oluşmuştur. Piezoelektrik yamalar uyarıcı olarak görev yaparken, algılayıcı olarak Keyence LB-1201(W)LB-300 lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı kullanılmıştır. Analizlerde akıllı kiriş bir kenarı tutturulmuş, diğer kenarı serbest olarak incelenmiştir.



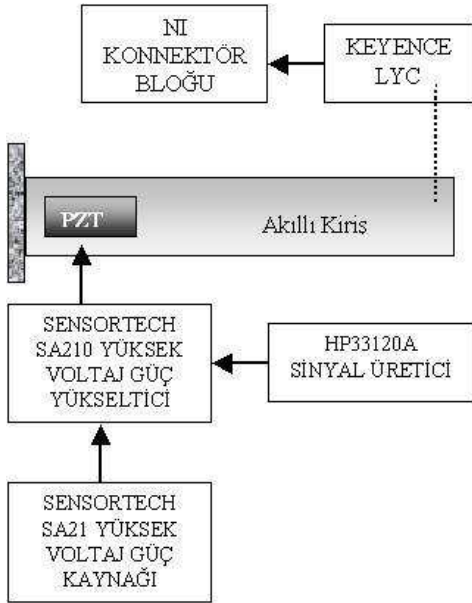
Şekil 1. Akıllı kiriş

III. DENEY DÜZENEGİ ve DENEYSEL SİSTEM TANIMLAMA

Şekil 2'de çalışmamızda kullandığımız deney düzeneği gösterilmiştir. Deney düzeneği temelde Tek-Girdi-Çok-Çıktı (Single-Input-Multi-Output) bir sistem olarak ele alınabilir. Sistemin girdisi piezoelektrik yamaları uyarıcı voltaj, çıktısı ise lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazından toplanan, kirişin ölçüm noktalarındaki yerdeğiştirme değeridir.

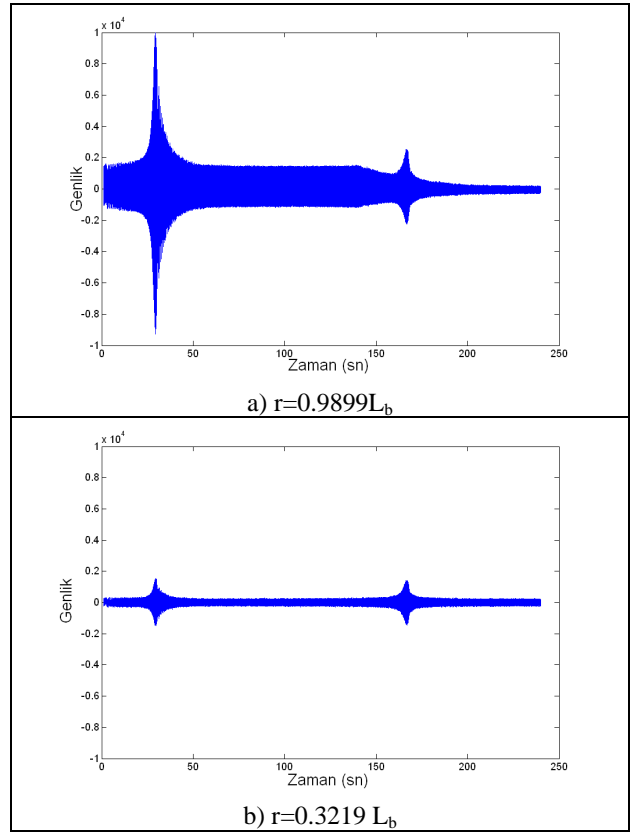
Sistem ilgilendiğimiz frekans aralığında, tek boyutlu ve uzamsal olarak dağıttık bir sistem varsayımıyla incelenmiştir. Bu varsayımla, ilgilendiğimiz frekans aralığındaki tüm titreşim biçimleri kirişin eğilme titreşim biçimleridir.

Elastik yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle aktif kontrol amaçlı modellenmelerinin doğru olmayan sonuçlar verebileceği bilindiğinden çoğunlukla deneysel verilerden sistem modeli elde etme yöntemi tercih edilmektedir[6]. Sistem tanımlamada parametrik ve parametrik olmayan teknikler kullanılabilir. Parametrik sistem tanımlama tekniğinde sistemin katsayı matrisleri üzerinde ayarlamalar yapılarak frekans cevaplarından elde edilen modellerle deneysel verilerden elde edilenlerin en iyi şekilde eşlenmeleri sağlanır. Parametrik olmayan sistem tanımlama tekniğinde sisteme sinüs dalgası şeklinde uyarı verilir ve sistemin cevabı ölçülür. Sistemin frekans analizi olarak da adlandırılacak bu işlem sayesinde belirli bir frekans aralığında sistemin cevabı hakkında detaylı bilgi sahibi olunur. Sistem üzerindeki girdi/çıkış ilişkisinden sistemin aktarım işlevi (transfer function) elde edilir [7]. Elde edilen bu gürültülü aktarım işlevine düzleme (smoothing) uygulanır ve sonuçta çıkan daha düzgün aktarım işlevi üzerine “en küçük kareler” (least square) yöntemi kullanılarak eğri oturtulur ve sistemin aktarım işlevi elde edilir.

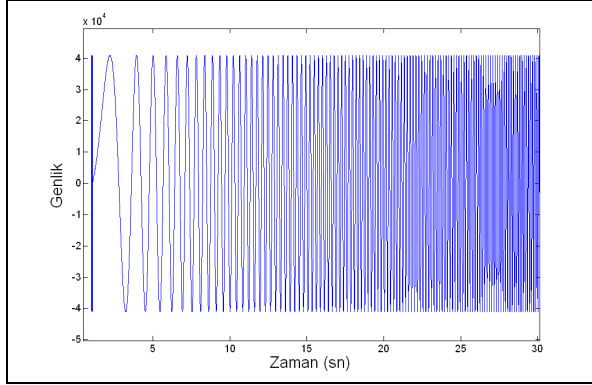


Şekil 2. Deney düzeneği

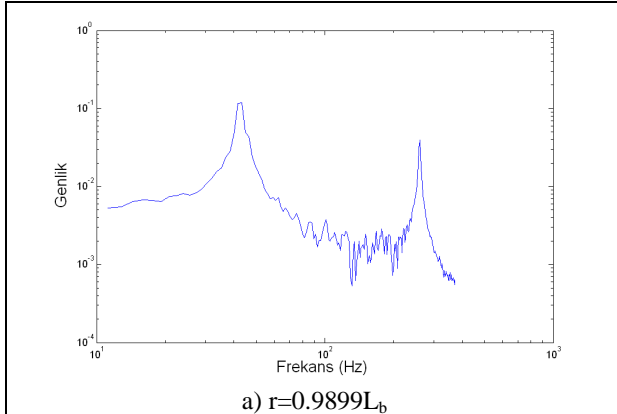
Şekil 3'te örnekleri verilen, kiriş boyunca eşit aralıklarla 17 farklı noktadan elde edilen sistem cevapları ve Şekil 4'te gösterilen uyarıcı kuvvet kullanılarak sistem tanımlama tekniğiyle akıllı kirişin her noktadan, ilk iki eğilme titreşim biçimlerini içeren deneysel frekans cevapları elde edilmiştir. Şekil 5'te de örnek frekans cevapları gösterilmiştir. Şekillerde 'r' ölçüm yapılan farklı noktaların akıllı kiriş boyunca (L_b) yerlerini tanımlamaktadır.



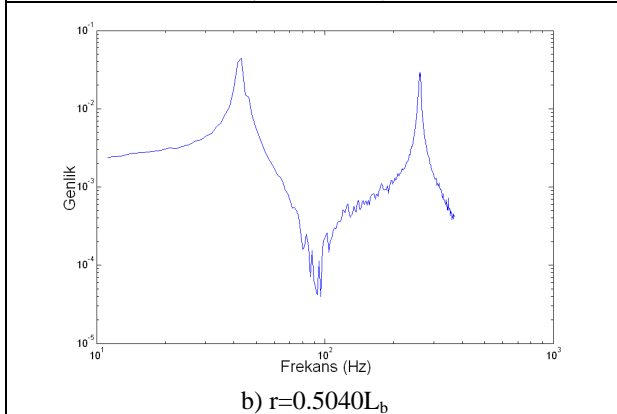
Şekil 3. Örnek sistem cevapları



Şekil 4. Uygulanan kuvvet



a) $r=0.9899L_b$



b) $r=0.5040L_b$

Şekil 5. Örnek frekans cevapları

IV. AKILLI KİRİŞİN ANALİTİK MODELİ

Akıllı kirişin analitik olarak sistem modelinin elde edilmesi, "Akıllı Bir Kirişin Varsayılan Biçimler Metodu ile Uzamsal Sistem Modelinin Elde Edilmesi ve Elde Edilen Modelin İyileştirilmesi" adlı bir önceki çalışmamızda detaylı bir şekilde anlatılmıştır. "Varsayılan Biçimler" metodu [8] kullanılarak

analitik olarak modellenen akıllı kirişin, ilk 2 eğilme titreşim biçimini içeren iyileştirilmiş sistem modelinin uzamsal ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$G(s) = \sum_{i=1}^2 \frac{C_p \phi_i(r) [\phi_i'(r_2) - \phi_i'(r_1)]}{\{\rho A L^3\}_c (s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2)} + \sum_{i=3}^N \phi_i(r) K_{r_i} \dots (1)$$

Akıllı kirişin özfonksiyonları (mode shapes), ϕ_i değerleri, yerine aynı sınır durumlarına sahip, benzer bir pasif kirişin özfonksiyonları varsayılmıştır.

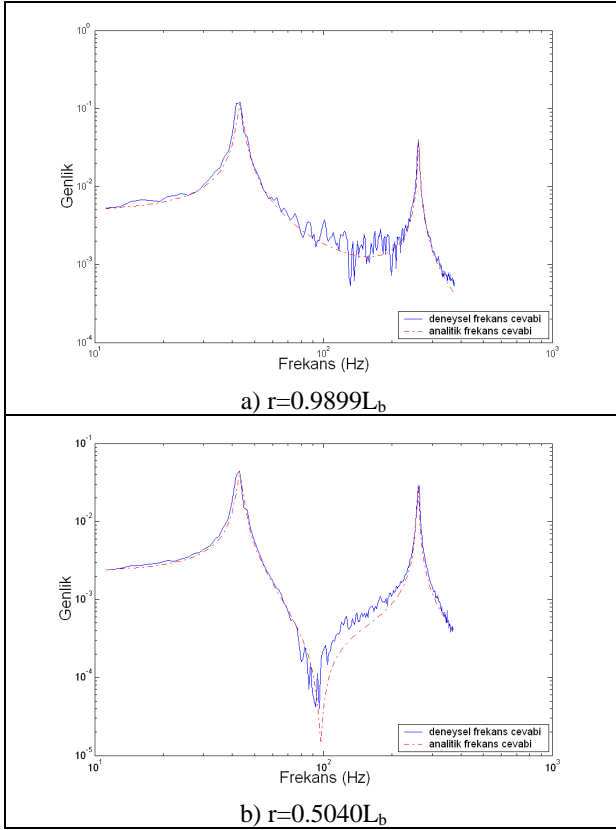
$$\phi_i(r) = L_b (\cosh \beta r - \cos \beta r - \alpha (\sinh \beta r - \sin \beta r)) \dots (2)$$

ve,

$$\alpha = \frac{\cosh \beta L_b + \cos \beta L_b}{\sinh \beta L_b + \sin \beta L_b} \dots (3)$$

V. DENEYSEL SİSTEM MODELİ ile ANALİTİK MODELİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bilindiği gibi akıllı kirişin rezonans frekansları ve modal sönümlenme değerleri tüm kiriş için tektir. Yani, sistem modeli elde edilirken hangi noktadan ölçüm yapılırsa yapılsın bu parametreler değişmez. Bu sebeple deneysel olarak yaptığımız ölçümlerden herhangi birisi kullanılarak elde edilen rezonans frekansları ve modal sönümlenme değerleri, diğer tüm noktalar için sistem modeli oluşturulmasında kullanılabilir. Analitik modelin deneysel modelle örtüşmesi gerektiği bilinerek, sönümlenme değerleri, iki modelin frekans düzlemindeki maksimum değerleri eşlenene kadar uyumlanmıştır. Elde edilen rezonans frekansları ve modal sönümlenme değerleri kullanılarak diğer tüm noktalar için deneysel ve analitik modeller frekans düzleminde karşılaştırılmıştır. Çeşitli ölçüm noktalarından elde edilen deneysel sistem modelleri ile aynı noktalar için uyumlama sonucundaki analitik sistem modelleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

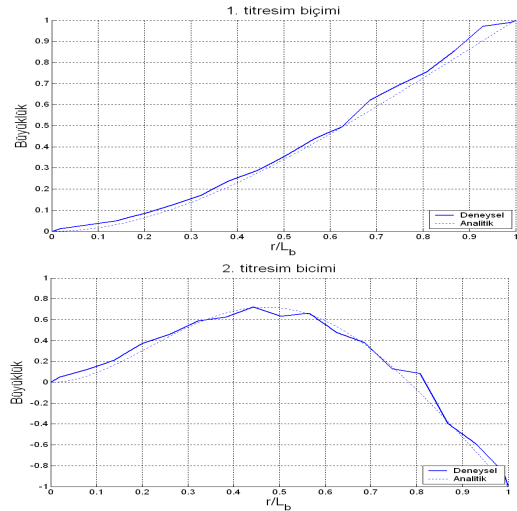


Şekil 6. Deneyel ve analitik frekans cevapları

Her nokta için modal sönümlenme değerleri, o noktaya ait deneysel model kullanılarak, tekrar uyumlanıp iyileştirilmiş ve elde edilen sistem modellerinden sistemin genlik değerleri tahmin edilmiştir. Ölçüm noktalarındaki genlik değerlerinden aradeğerlendirme (interpolation) yardımıyla kiriş üzerindeki herhangi bir noktanın genlik değeri tahmin edilmiş ve elde edilen bu genlik değerleri kirişin uç noktasına göre normalize edilerek ilk iki biçim şekli Şekil 7’te gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilen bu biçim şekillerinin aynı konfigürasyondaki pasif kiriş için bilinen analitik titreşim biçimlerine benzediği gözlemlenmiştir.

VI. BELİRSİZLİK DEĞERLERİ

Her noktadaki deneysel ölçümden elde edilen rezonans frekansları ve deneysel ve analitik modellerin karşılaştırılmasından elde edilen modal sönümlenme değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Tutturulmuş kenara en yakın iki noktanın yer değiştirmelerinin çok düşük genlikli olmasından dolayı bu yer değiştirmelerin lazer yardımıyla yer değiştirme ölçüm cihazı tarafından algılanması oldukça güç olmuştur.



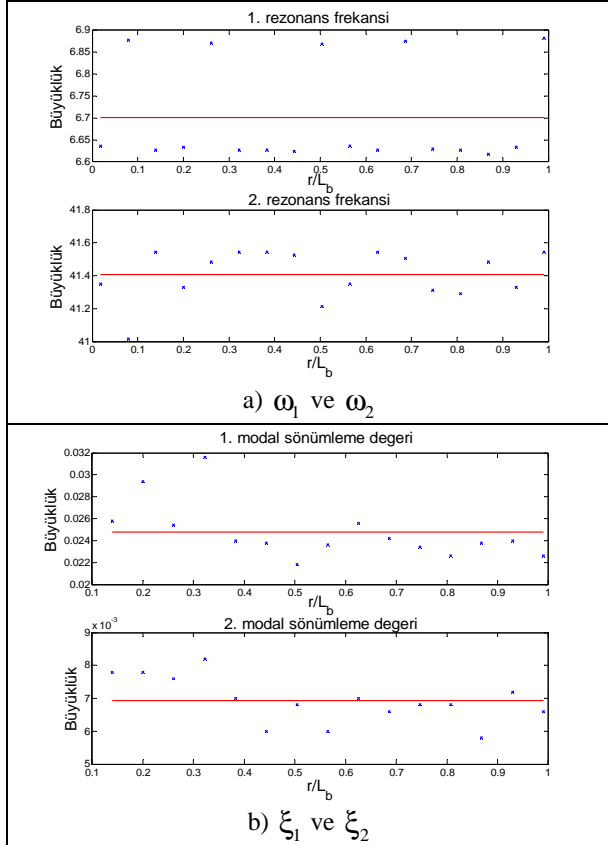
Şekil 7. Kirişin ilk iki biçim şekli

Tablo 1. İlk 2 rezonans frekansı ve sönümlenme oranı değerleri

r/L_b	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ξ_1	ξ_2
0.9899	6.882	41.546	0.023	0.007
0.9292	6.633	41.331	0.024	0.007
0.8684	6.617	41.486	0.024	0.006
0.8076	6.627	41.291	0.023	0.007
0.7470	6.630	41.311	0.023	0.007
0.6862	6.875	41.506	0.024	0.007
0.6255	6.627	41.546	0.026	0.007
0.5648	6.637	41.350	0.024	0.006
0.5040	6.869	41.212	0.021	0.007
0.4433	6.624	41.526	0.024	0.006
0.3826	6.627	41.546	0.024	0.007
0.3218	6.627	41.546	0.032	0.008
0.2611	6.872	41.486	0.025	0.008
0.2004	6.633	41.331	0.029	0.008
0.1396	6.627	41.546	0.026	0.008
0.0790	6.879	41.017	0.082	0.031
0.0182	6.637	41.350	0.030	0.117

Aynı zamanda sisteme etki eden gürültü bu ölçümlerin sonuçlarının sağlıklı olmamasına yol açmıştır. Tablo 1’de de görüleceği gibi $r=0.0790L_b$ ve $r=0.0182L_b$ ölçüm noktaları gözönüne alınarak yapılan analiz sonucu elde edilen sönümlenme oranları diğer tüm sonuçlarla tutarsızdır. Bu yüzden bu iki noktadan elde edilen sönümlenme oranı değerleri dışarıda bırakılarak, çoklu noktalardan ölçümle elde edilen ilk iki rezonans frekans ve sönümlenme oranı değerlerinin ortalama değerleri sistemin değerleri olarak kabul edilmiş ve Şekil 8’de grafiksel olarak

gösterilmiştir. Ortalama değerler ve standart sapmaları Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 8. İlk iki rezonans frekansları ve sönümlenme oranları ortalama grafikleri

Tablo 2. İlk iki rezonans frekansı ve sönümlenme oranı ortalama değerleri ve standart sapmaları

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ξ_1	ξ_2
Ortalama	6.701	41.407	0.025	0.007
Standart Sapma	0.116	0.151	0.003	0.001

Sistemin rezonans frekanslarının ve sönümlenme oranlarının tespitinde çok noktadan elde edilen değerlerin ortalaması kullanıldığından bu değerler hakkında daha doğru bilgi elde edilmiştir.

VII. SONUÇLAR

DeneySEL çalışmalarda tek noktadan ölçümle sistem modeli elde edilmesi sırasında sistemin uzamsal doğası hakkında kesin bilgi elde edilememektedir. Aynı zamanda ölçüm noktasının sistemin ilgililenen titreşim biçimlerinden herhangi birisi için düğüm noktası olması riski veya ölçümden kaynaklı

belirsizlikler sönümlenme oranlarının tespitinde yanlış sonuçlar elde edilmesine yol açabilmektedir. Bu çalışmada çok noktadan ölçümler toplayarak hem sistemin uzamsal doğası hakkında hem de ölçümlerden kaynaklı belirsizlikler hakkında daha kesin bilgi elde edilebileceği gösterilmiştir.

VIII. KAYNAKLAR

- [1] Crawley, E. F., Louis, J., “Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures”, AIAA Journal, October 1989.
- [2] Yaman, Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu V., Waechter, D. Prasad, E., “Active Vibration Control of a Smart Beam”, Proceedings, Canada-US CanSmart Workshop, Smart Materials and Structures, Montreal, Quebec, Canada, Oct. 2001.
- [3] Yaman, Y., Ülker, F., D., Nalbantoğlu, V., Çalışkan, T., Prasad, E., Waechter, D., Yan, B., “Application of H_∞ Active Vibration Control Strategy in Smart Structures”, AED2003, 3rd International Conference on Advanced Engineering Design, Prague, Czech Republic, June, 2003.
- [4] Çalışkan, T., Piezoelectric Ceramics and Their Application in Aerospace Structures, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, September, 2002.
- [5] Ülker, F. D., Active Vibration Control of Smart Structures, MSc Thesis, Middle East Technical University, September, 2003.
- [6] Nalbantoglu, V., Robust Control and System Identification for Flexible Structures, PhD Thesis, University of Minnesota, July 1998
- [7] Ljung, L., System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall, 1987.
- [8] Meirovitch, L., Analytical Methods in Vibrations, The MacMillan Company, 1967.