

AKILLI BİR PLAĞIN BURULMA TİTREŞİMLERİNİN KONTROLÜ

Fatma Demet ÜLKER*, Yavuz YAMAN*, Volkan NALBANTOĞLU*, Ömer Faruk KIRCALI*

(*)Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, ANKARA

dulker@ae.metu.edu.tr, yyaman@metu.edu.tr, volkan@ae.metu.edu.tr, fkircali@stm.com.tr

ÖZET

Bu çalışmada, akıllı bir plağın zorlanmış burulma titreşimlerinin aktif kontrolü için H_{inf} denetçi tasarım metodu ile bir denetçi tasarımı ve tasarlanan denetçinin birinci burulma titreşimlerini (first torsional mode) sönümlemedeki etkinliği sunulmuştur. Akıllı fin olarak tanımlanan akıllı plak bir kenarı tutturulmuş, diğer üç kenarı serbest, uçak fin biçiminde bir alüminyum plaktan ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılmış piezoelektrik yamalardan ve uzama ölçerlerden oluşmuştur. Piezoelektrik yamalar ile alüminyum plaka arasına yerleştirilen yalıtkan yüzeyler sayesinde piezoelektrik yamaların birbirlerinden bağımsız hareket etmeleri sağlanmıştır. Sistem modelinin elde edilmesi için akıllı fin, piezoelektrik yamalar vasıtasıyla uyarılmış ve sistemin cevabı uzama ölçerler ve/veya lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı kullanılarak akıllı finin uç kısmından toplanmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde, deneysel verilerden elde edilen sistem modeli yardımıyla akıllı finin birinci burulma titreşim biçimini sönümlendirmek için H_{inf} denetçi tasarım metodu ile denetçi tasarlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise tasarlanan denetçinin titreşim sönümlemedeki etkinliği deneysel olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı plak, sistem tanımlaması, H_{inf} denetçi tasarım metodu.

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF FIRST TWISTING MODE OF A SMART PLATE

ABSTRACT

This study presents the design of a controller by using H_{inf} controller design method for the active vibration control of the first twisting mode of a smart plate. The smart plate consisted of an aluminum passive plate-like structure, called as smart fin, with surface bonded piezoelectric (PZT, Lead- Zirconate-Titanate) patches having insulating layers and strain gages. The piezoelectric patches and strain gages were symmetrically bonded on the passive aluminum plate and the smart plate was analyzed in cantilevered (clamped-free-free-free) configuration. With the help of the insulating layers, which were bonded between aluminum plate and piezoelectric patches, the piezoelectric patches moved independent from each other. For the determination of the system model, the smart plate was excited by piezoelectric patches and the system response is measured by strain gages and/or laser displacement sensor. In the first part of the study, the controllers were designed by using H_{inf} controller design method for the forced active vibration control of a smart plate due to its first torsional mode. In the second part of the study, the effectiveness of the designed controller for the vibration suppression was experimentally demonstrated.

Keywords: Smart plate, system identification, H_{inf} controller design method.

1. GİRİŞ

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 ya da içine gömülen birçok aktif parça ve işlemci ağlarından oluşmaktadır. Bu yapılarda, algılayıcı ve uyarıcılar yapının aktif parçalarını oluşturmaktadırlar. Bu çalışmada uzama ölçerler ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı algılayıcı, pasif alüminyum yapı üzerine yapıştırılan

piezoelektrik yamalar ise uyarıcı olarak kullanılmıştır.

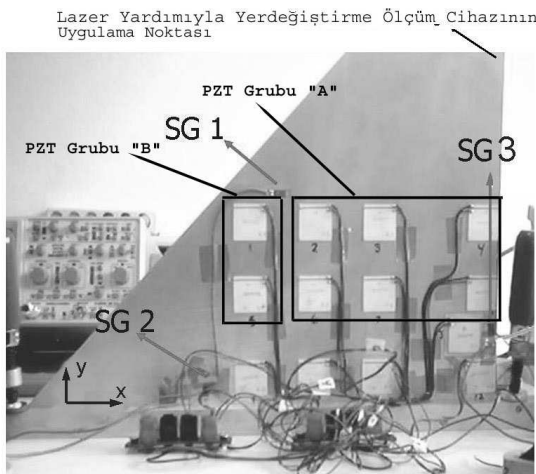
Önceki çalışmalarda [1,2], piezoelektrik malzemelerin titreşim düzeylerinin sönümlenmesindeki etkinliği gösterilmiştir. Denetçi tasarım tekniği olarak kullanılan H_{inf} metodunun [3-4] yapıların titreşimlerinin sönümlenmesinde etkin olduğu Nalbantoğlu [5] tarafından gösterilmiştir.

Yaman ve arkadaşları [6-10], Çalışkan [11], Ülker [12], Ülker ve arkadaşları [13] akıllı yapıların teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak modellenmesi ve denetçi tasarımı ve uygulanması üzerinde çalışmışlardır.

2. AKILLI FİN

Çalışmada kullanılan akıllı fin, pasif alüminyum fin üzerine simetrik olarak yapıştırılmış 24 adet Sensortech BM500 tipindeki 25mmx25mmx0.5mm ebatlarındaki piezoelektrik yamalardan ve 6 adet simetrik olarak yapıştırılmış yarım köprü konfigürasyonundaki uzama ölçerlerden oluşmuştur. Piezoelektrik yamaların birbirlerinden bağımsız hareket etmeleri için, piezoelektrik yamalar ile alüminyum fin arasında çok ince yalıtkan yüzeyler yerleştirilmiştir. Analizlerde akıllı fin üç kenarı serbest, bir kenarı tutturulmuş olarak incelenmiştir.

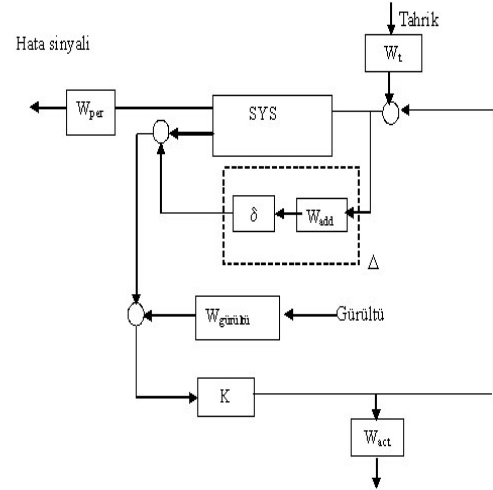
Şekil 1’ de çalışmada kullanılan akıllı fin ve bir yüzeyindeki piezoelektrik yamalar ve uzama ölçerler gösterilmiştir.



Şekil 1. Akıllı Fin

3. DENETÇİ TASARIMI

Bu bölümde akıllı finin ilk burulma modundan kaynaklanan zorlanmış titreşimlerinin kontrolünü sağlamak için, H_{inf} denetçi tasarım yöntemi kullanılarak, tasarlanan denetçi sunulmuştur. Şekil 2 H_{inf} denetçisinin blok diyagramını vermektedir.



Şekil 2. H_{inf} denetçisinin blok diyagramı

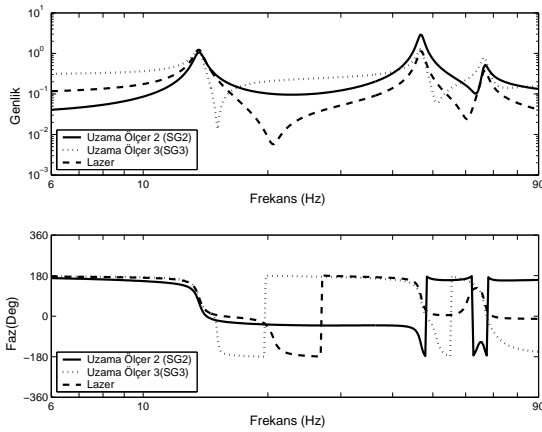
Şekil 2’de SYS olarak gösterilen blok sistem modelini, K olarak gösterilen blok denetçiyi, Δ olarak gösterilen blok tüm belirsizlik bloğunu, δ gerçek ya da kompleks skalar belirsizliği, W_{add} sisteme eklenen belirsizlikleri, W_{per} sistemden beklenen performans özelliklerini, W_{act} uyarıcıdaki sınırı, W_t dışarıdan gelen tahriği ve $W_{gurultu}$ de algılayıcının ölçtüğü değeri etkileyebilecek gürültüyü simgelemektedir.

Denetçi tasarımı için ilk olarak deneysel yoldan sistem modeli elde edilmiştir.

Denetçi tasarımında kullanılacak piezoelektrik yama grubunun belirlenmesi için ilk olarak değişik piezoelektrik yama grupları belirlenmiştir. Belirlenen piezoelektrik yama gruplarının herbiri frekansı 0.1 Hz ile 90 Hz arasında değişen sinüs dalgası ile uyarılmıştır. Bu uyarma sonucunda uzama ölçerlerden ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazından elde edilen değerler karşılaştırılmış ve ilk burulma frekansında en yüksek uyarımı yapan piezoelektrik yama grubu denetçi tasarımında kullanılmak üzere seçilmiş ve Şekil 1’de PZT grubu “A” ve PZT grubu “B” olarak gösterilmiştir.

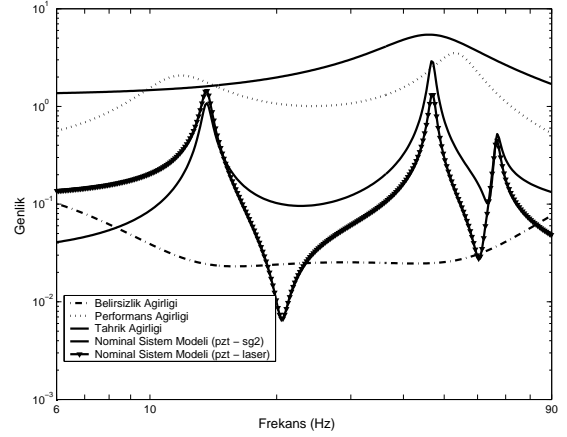
Sistem modeli, Şekil 1’de PZT grubu “A” ve PZT grubu “B” olarak gösterilen her iki yüzeyde bulunan piezoelektrik yamalara frekansı 0.1 Hz ile 90 Hz arasında değişen sinüs dalgası ile uyarılması sonucunda oluşan sistemin cevabı ile uygulanan sinyal arasındaki bağıntıdan bulunmuştur. Sistemin cevabı, Şekil 1’de SG1, SG2 ve SG3 olarak gösterilen uzama ölçerler kullanılarak ve bunlara ilaveten lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı ile akıllı finin uç kısmından toplanmıştır.

Şekil 3’de denetçi tasarımında kullanılan deneysel yollardan elde edilmiş sistem modeli verilmiştir.



Şekil 3. Denetçi Tasarımında Kullanılan Sistem Modeli

Deneysel yoldan elde edilen bu sistem modeli elde edilirken göz önünde bulundurulmayan yüksek frekanstaki modlar denetçi tasarımında belirsizlik olarak hesaba katılmış ve denetçiden beklenen performans kriteri ilk burulma modundan kaynaklanan titreşimi sönmümlendirecek şekilde belirlenmiştir. Matlab v6.5 kullanılarak belirlenen performans ve belirsizlik değerlerinin sistem modeline eklenmesi ile H_{inf} denetçisi tasarımı için gerekli olan form oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan değerlerin nasıl belirlendiği Kaynak [12]’de detaylı şekilde anlatılmıştır. Bu değerler Şekil 4’de belirtilmiştir.



Şekil 4. Hinf Denetçi Tasarımında Kullanılan Belirsizlik, Performans ve Tahrik Değerleri

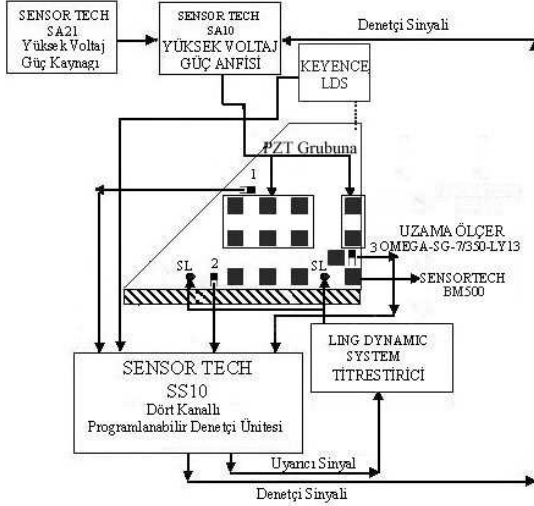
Ayrıca, $W_{gürültü}$ önerilen değer olan 0.01 olarak, W_{act} ise verilen maksimum voltaj değerine göre ölçeklendirilerek 0.7 olarak alınmıştır.

Tasarlanan denetçilerin mu-analizleri yapılmış ve bu analizler sonucunda denetçilerin belirsizliklere karşı gürbüz (robust) oldukları gösterilmiştir.

Denetçi tasarımında tek-girdili çok-çıkıtlı sistem modeli olarak lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı ile uzama ölçerden (SG2) ölçülen sistem cevabı denetçi girdisi olarak kullanılmıştır. Her iki durumda da akıllı finin her iki yüzeyinde bulunan ve Şekil 1’de PZT grubu “A” ve PZT grubu “B” olarak gösterilen piezoelektrik yamalar denetçi sinyalinin uygulanmasında kullanılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DENEY DÜZENEGİ

Tasarlanan denetçinin gerçek zamanda uygulanabilmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 5’te verilmiştir.

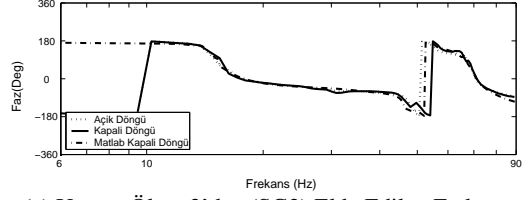
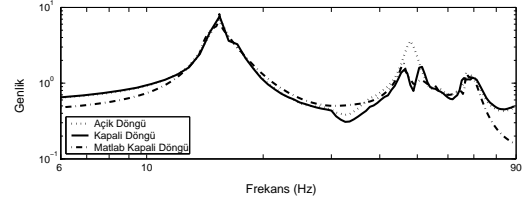


Şekil 5. Deney Düzenneği

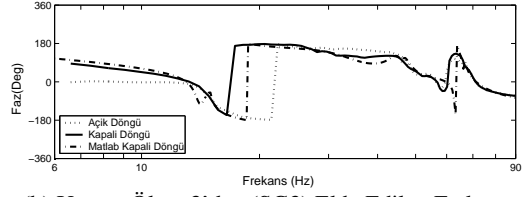
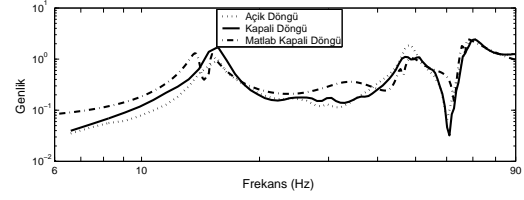
Bu çalışmada sistemin titreştiricilerden gelen zorlama altındaki cevabı gerçek zamanda uzama ölçerlerle ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazından birlikte toplanıp dört kanallı programlanabilir denetçi ünitesine gönderilmiştir. Titreşimlerin sönümlenmesini sağlamak için, tasarlanan denetçinin katsayıları kullanılarak gerekli olan denetçi sinyali hesaplanıp 30 kat artırıldıktan sonra piezoelektrik yama gruplarına gönderilmiştir. Denetçinin kullanıldığı analizler kapalı döngü (closed-loop), kullanılmadığı analizler açık döngü (open-loop) olarak tanımlanmaktadır.

4.1 Akıllı Finin Zorlanmış Titreşimlerinin Kontrolü

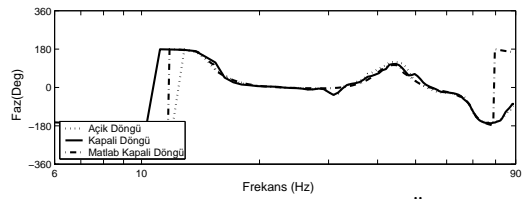
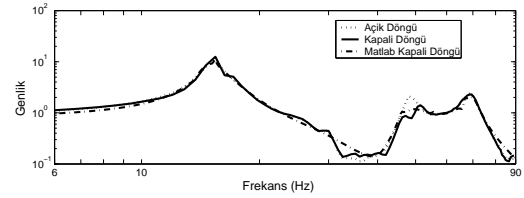
Akıllı fin üzerindeki zorlama, Şekil 5'te gösterilen titreştiricilerin (SL) akıllı fin üzerine deney süresince frekansı 0.1 Hz ile 90 Hz arasında değişen sinüs sinyalini uygulaması ile oluşturulmuştur. Sistemin bu zorlama altındaki açık döngü ve kapalı döngü frekans cevapları incelenmiş ve elde edilen grafikler Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 Matlab yardımıyla elde edilen kapalı döngü sonuçlarını da göstermektedir.



(a) Uzama Ölçer 2'den (SG2) Elde Edilen Frekans Cevapları



(b) Uzama Ölçer 3'den (SG3) Elde Edilen Frekans Cevapları



(c) Lazer Yardımıyla Yerdeğiştirme Ölçüm Cihazından Elde Edilen Frekans Cevapları

Şekil 6. Akıllı Finin Uzama Ölçerler ve Lazer Yardımıyla Yerdeğiştirme Ölçüm Cihazı Kullanılarak Ölçülen Açık ve Kapalı Döngü Zorlanmış Frekans Cevapları

Akıllı finin açık ve kapalı döngü titreşimlerinin genliğinin birbirlerine olan oranı sönümlenme değeri olarak tanımlanmıştır. Akıllı finin ilk burulma modundan kaynaklanan titreşimlerinin sönümlenme değerleri uzama ölçerler ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı ölçümlerinden elde edilmiş ve Tablo-1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sönümlenme Değerleri (Uzama Ölçer (SG2)’nin ve Lazer Yardımıyla Yerdeğiştirme Ölçüm Cihazının Ölçümleri Denetçi Girdisidir)

Titreşim Biçimi	İlk Burulma
SG2	4.57
SG3	1.91
Lazer	2.68

Tablo 1’den görüldüğü üzere, uzama ölçer 2 (SG2)’nin ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazının ölçümlerinin denetçi girdisi olarak kullanıldığı durumda sistemin ilk burulma modundan kaynaklanan titreşimlerinin sönümlenmesinde elde edilen sönümlenme değerleri tatmin edici düzeydedir. Bununla birlikte Şekil 6’dan da görüldüğü gibi tasarlanan denetçi sistemin ilk eğilme modundan (first bending mode) kaynaklanan titreşimi sönümleyememektedir (Yaklaşık 13.8 [Hz] civarındaki rezonans). Bunun sebebi denetçi tasarımında performans kriterinin sadece sistemin ilk burulma modundan kaynaklanan titreşimin sönümlenmesi olarak belirlenmesidir.

Aynı akıllı fin modeli için yapmış olduğumuz bir önceki çalışmamızda da [13], akıllı finin sadece ilk eğilme modundan kaynaklanan titreşiminin sönümlenmesi sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR

Çalışmanın ilk bölümünde sistemin ilk burulma modundan kaynaklanan titreşimlerinin sönümlenmesi için kullanılacak olan piezoelektrik yama grubu belirlenmiştir. Belirlenen yama gruplarının yapıyı uyarması ile yapının cevabı arasındaki bağıntıdan sistem modeli elde edilmiştir. Elde edilen sistem modelindeki olası belirsizlikler ve denetçiden beklenen performans özellikleri belirlenip H_{inf} denetçisi tasarlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde tasarlanan denetçinin gerçek zamandaki performansının belirlenmesi için açık döngü ve kapalı döngü deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen frekans cevabına göre sönümlenme değerleri hesaplanmış ve tablo halinde sunulmuştur. Sistemin ilk burulma modundan titreşimlerinin uzama ölçer SG2’nin yerleştirildiği bölgede ve lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazının ölçümlerinin yapıldığı akıllı finin uç kısmında tatmin edici düzeyde iken uzama ölçer SG3’nin yerleştirildiği bölgede yeterince iyi değildir. Bunun nedeni, uzama ölçer SG3’ün denetçi girdisi olarak kullanılamamasıdır. SG3’ün ölçüm değerlerinin denetçi girdisi olarak kullanılamamasının nedeni ise bu bölgede ölçülen titreşim büyüklüğünün işlemlerde kullanılacak yeterli düzeyde olmamasıdır. Bundan dolayı o bölgede sistemin titreşimi yeterince algılanamamakta ve bu değerleri kullanan denetçi yeterli etkinliği gösterememektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Crawley, E. F., Louis, J., “Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures”, *AIAA Journal*, October 1989
2. Prasad, S. E., Wallace, J.B., Petit, B. E., Wang, H., Jen, C. K., Kalaycıoğlu, 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)
3. Zhou K., Doyle J.C., *Essentials of Robust Control*, Prentice Hall, 1998.
4. Balas G. J., Doyle J. C., Glover K., Packard A., Smith R., *µ-Analysis and Synthesis Toolbox*, Musyn Inc. and Math Works Inc., Minneapolis, MN, 1993
5. Nalbantoglu, V., *Robust Control and System Identification for Flexible Structures*, PhD Thesis, University of Minnesota, July 1998.
6. 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.

7. Yaman Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu V., Ülker, F., D., Prasad, E., Waechter, D., Yan, B., "Vibration Control of Smart Plates by Using Piezoelectric Actuators", ESDA2002, 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design And Analysis, 2002, Istanbul, Turkey.
8. Yaman, Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu, V., Prasad, E., Waechter, D., "Active Vibration Control of a Smart Plate", ICAS2002, Toronto, Canada, 2002.
9. 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.
10. Yaman, Y., Ulker, F. D., Nalbantoglu, V., Çalışkan, T., Prasad, E., Waechter, D., Yan, B., "Application of m-synthesis Active Vibration Control Technique to a Smart Fin", 6th CanSmart Meeting, International Workshop on Smart Materials and Structures, 16-17 October, 2003, Montreal, Canada.
11. Çalışkan, T., Piezoelectric Ceramics and Their Application in Aerospace Structures, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, September, 2002.
12. Ülker, F. D., Active Vibration Control of Smart Structures, MSc Thesis, Middle East Technical University, September, 2003.
13. Ülker, F. D., Yaman, Y., Nalbantoğlu V., "Akıllı bir Plakanın Titreşimlerinin Sönümlenmesinde Bağımsız Çalışan Piezoelektrik Yamaların Etkisi", Havacılıkta İleri Teknolojiler ve Uygulamaları Sempozyumu, 9-10 Aralık, 2004, İstanbul, Türkiye.