

AKILLI YAPILARIN ZORLANMIŞ TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLU

Fatma Demet ÜLKER

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

E-posta: dulker@ae.metu.edu.tr

Volkan NALBANTOĞLU

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

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

Tarkan ÇALIŞKAN

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

E-posta: tarkan@ae.metu.edu.tr

Yavuz YAMAN

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

E-posta: yyaman@metu.edu.tr

Eswar PRASAD

Sensor Technology Limited, P. O. Box 97 Collingwood, Ontario, Canada

E-posta: eprasad@sensortech.ca

ÖZET

Bu çalışmada, akıllı bir kirişin ve akıllı bir plağın zorlanmış titreşimlerinin aktif kontrolü için tasarlanan bir H_∞ denetçisi sunulmuştur. Akıllı kiriş bir ucu tutturulmuş, öteki ucu serbest bir alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan piezoelektrik (PZT, Lead-Zirconate-Titanate) yamalardan oluşmuştur. Akıllı yapıların teorik incelenmesinde ANSYS® v5.6 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Akıllı kirişin istenmeyen titreşimlerinin sönümlenmesi için tasarlanan H_∞ denetçi, üretilen akıllı kirişin açık döngü frekans cevabını içeren deneysel veriler kullanılarak elde edilen sistem modeli yardımıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan denetçinin etkinliği hem MATLAB v6.0 kullanılarak, hem de deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu çalışmada, H_∞ denetçi ile elde edilen zorlanmış titreşim kapalı döngü deney sonuçları, akıllı kirişin ilk iki rezonans frekansındaki titreşim düzeyinin sönümlendiğini göstermiştir. Akıllı fin olarak tanımlanan akıllı plak bir ucu tutturulmuş, öteki ucu serbest bir alüminyum plaktan ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan piezoelektrik (PZT, Lead-Zirconate-Titanate) yamalardan oluşmuştur. Akıllı plak için sadece serbest titreşim kapalı döngü sonuçları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı yapılar, sistem tanımlanması, sinyal analizi, H_∞ denetçi tasarımı.

ABSTRACT

This study presents an H_{∞} controller which was designed for the suppression of free and sinusoidally forced vibrations of a smart beam and the free vibrations of a smart plate. The smartbeam was modelled by gluing eight piezoelectric patches (Lead-Zirconate-Titanate, PZT) on a passive aluminium beam in bimorph condition. In the analysis the smartbeam was considered in clamped-free configuration. ANSYS® v5.6, finite element analysis program was used in the theoretical studies of the smart structures. For the H_{∞} controller design, the required system model was obtained from the system identification methods based on the experimental data from the smart structures. The effectiveness of the H_{∞} controller was verified both with the simulation results of MATLAB v6.0 and with the experimental results. The closed loop experimental results of the sinusoidally forced vibrations of the smart beam showed that the vibration levels at the first two resonance frequencies of the smart beam were suppressed. The smart plate which was called as the smart fin in the study, was also considered in clamped-free configuration. It was an aluminum plate on which twenty-four piezoelectric patches (PZTs) were attached. Only the free vibration results of the smart fin were presented in this study.

Keywords: Smart structures, system identification, signal processing, H_{∞} controller design.

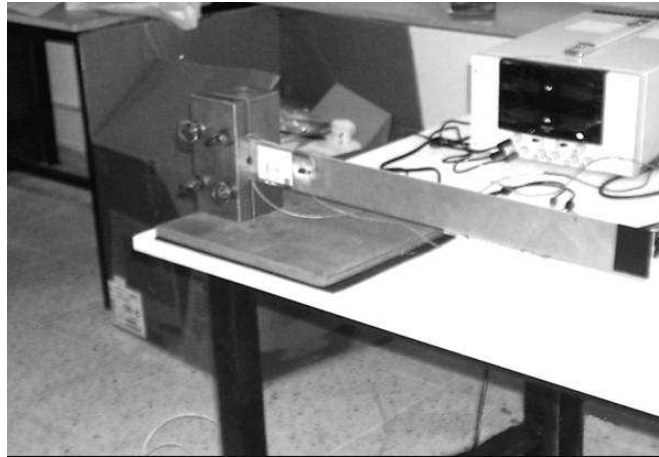
1. GİRİŞ

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. Akıllı malzemeler çeşitli gruplara ayrılırlar. Bunlar hafızalı alaşımlar (Shape Memory Alloys), fiber optikler, magnetostriktif malzemeler, ve magneto-rheological malzemeler, piezoelektrik malzemeler, electrostriktif malzemeler, elektro-rheological malzemeler gibi gruplara ayrılırlar. Piezoelektrik malzemeler

arasında en yaygın kullanılan, halen birçok noktasal algılayıcı ve uyarıcıda kullanılan, PZT (Lead-Zirconate-Titanate) seramiklerdir. [1].

2. AKILLI KİRİŞ VE AKILLI FİN

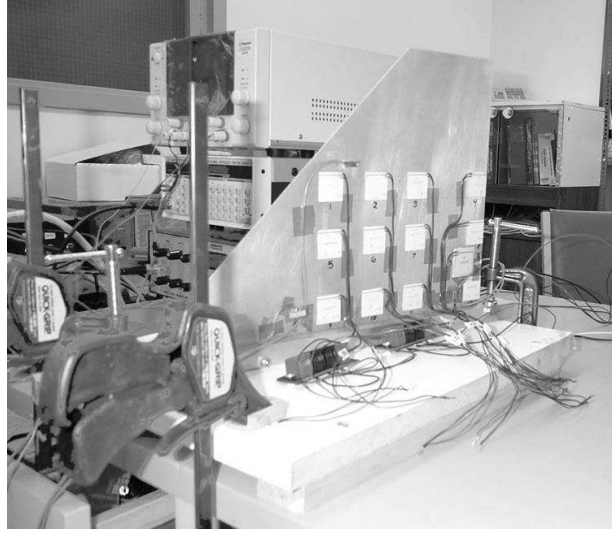
Çalışmada kullanılan akıllı kiriş bir ucu tutturulmuş, öteki ucu serbest $507 \times 51 \times 2$ mm boyutlarındaki alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan 8 adet ($20 \times 25 \times 0.61$ mm) boyutlarındaki Sensortech BM500 tipindeki piezoelektrik (PZT, Lead-Zirconate-Titanate) yamalardan oluşmuştur. Çalışmada kullanılan akıllı kiriş Şekil 1 de verilmiştir..



Şekil 1. Çalışmada kullanılan akıllı kiriş

Bu çalışmada şekli nedeni ile akıllı fin olarak adlandırdığımız bir akıllı plak ta incelenmiştir. Akıllı fin bir ucu tutturulmuş, diğer ucu serbest alüminyum bir fin ve bunun üzerine yapıştırılmış 24 adet ($25 \times 25 \times 0.5$ mm) boyutlarındaki Sensortech BM532 tipindeki PZT lerden

oluşturmuştur. Çalışmada kullanılan akıllı fin Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan akıllı fin

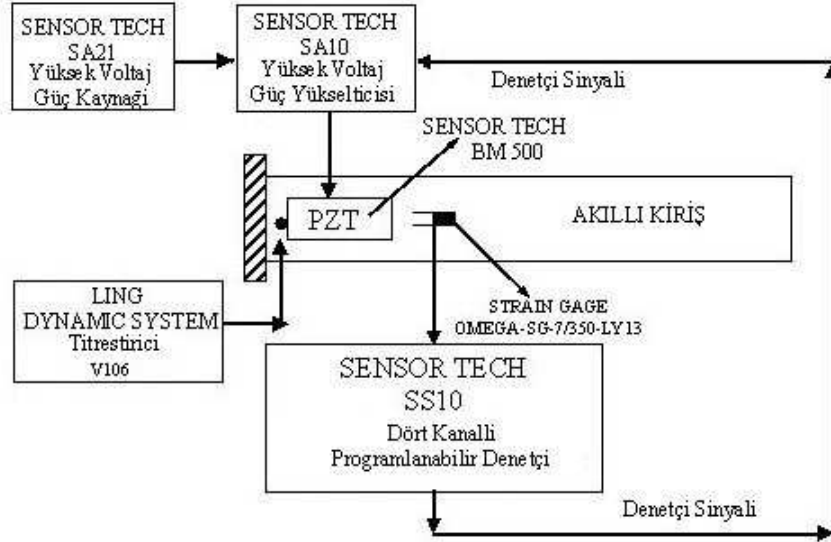
3. AKILLI YAPILARLA İLGİLİ DENEYSEL DÜZENEKLER

İki ayrı sistemde yürütülen çalışmaların ilkinde uzama ölçer, ikincisinde ise lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazı, algılayıcı olarak kullanılmıştır. PZT ler her iki sistemde de uyarıcı olarak kullanılmışlardır.

3.1. Uzama Ölçerin Kullanıldığı Çalışmalar

Şekil 3 te uzama ölçerin algılayıcı olarak kullanıldığı deney düzeneği verilmiştir. Bu deney düzeneğinde, dört kanallı programlanabilir denetçi

içerisinde, uzama ölçer voltaj yükselticisi, analog sinyali digitale, digital sinyali de analog sinyale çeviren kartlar bulunmaktadır. Bu programlanabilir denetçi, Linux ortamında çalışan bir kişisel bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. H_{∞} denetçi algoritması için C dilinde yazılan bilgisayar programı denetçi üzerinden çalıştırılmakta ve ölçülen uzama miktarına bağlı olarak titreşimin sönümlenmesi için gerekli olan denetçi sinyali C programında hesaplanarak piezoelektrik yamalara uygulanmaktadır.

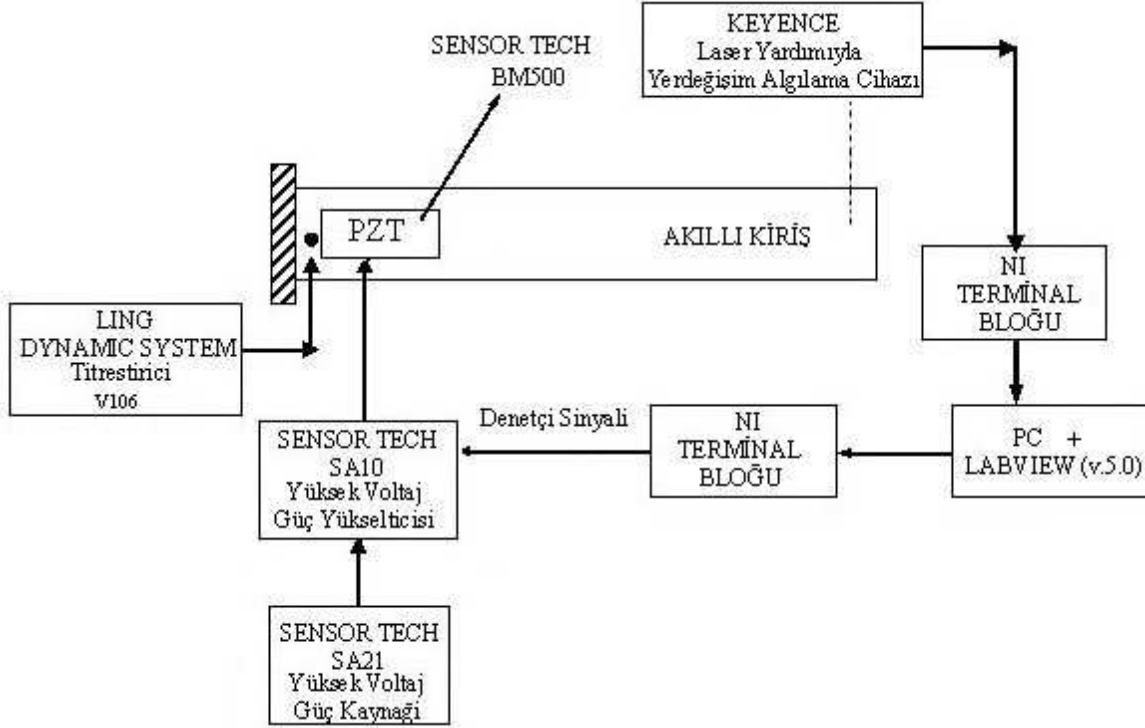


Şekil 3. Uzama ölçerin kullanıldığı deney düzeneği

3.2 Lazer Yardımıyla Yerdeğişim Algılama Cihazının Kullanıldığı Çalışmalar

Şekil 4 te lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazının kullanıldığı deney düzeneği verilmiştir. Bu sistem Labview v5.0 kullanılarak yazılan bir

bilgisayar programı ile uygulanmaktadır. Lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazından elde edilen veriler bilgisayara aktarılmakta ve yazılmış olan bilgisayar programı titreşimin sönümlenmesi için gerekli olan sinyali hesaplayarak piezoelektrik yamalara göndermektedir.



Şekil 4. Lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazının kullanıldığı deney düzeneği

4. AKILLI YAPILARIN SİSTEM MODELLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Sistem modelinin elde edilmesinde temel olarak iki yaklaşım kullanılır. Bunlardan ilki, temel fizik kurallarının uygulanması veya sonlu elemanlar yöntemi gibi teorik analizi kapsayan beyaz kutu modellemesidir (white-box modelling). İkinci yöntem ise siyah kutu modellemesi (black-box modelling) diye adlandırılır ve deneysel bulgulara göre sistem modelinin elde edilmesini amaçlar. Üçüncü yöntem ilk iki yöntemin birbirini desteklemesi ile oluşan gri kutu modellemesidir (grey-box modelling). Bu yaklaşımda teorik modellemenin yetersiz kaldığı kısımlar deneysel bulgular yardımıyla tamamlanır.

Daha önceki çalışmada deneysel veriler kullanılarak elde edilen sistem modellerinin denetçi tasarımında ki etkinlikleri gösterilmiştir [2]. Sistem modelinin elde edilmesinde parametrik veya parametrik olmayan teknikler kullanılabilir [3]. Parametrik sistem tanımlanmasında, sistem model takımı hesaplanacak olan parametreler vektörü ile ifade edilir. Parametrelerin belirlenmesinde önemli

olan, elde edilen frekans cevabının deneysel veriler ile elde edilen frekans cevabı ile en iyi şekilde uyumasıdır. Parametrik olmayan sistem tanımlanmasında ise belirli sayıda parametre vektörünün seçilmesine gerek yoktur.

Bu çalışmada sırasıyla parametrik olmayan sistem tanımlanması ve parametrik sistem tanımlanması kullanılmıştır. Sistemin itme cevabı (impulse response), basamak cevabı (step reponse) veya sistemin sinüs dalgasına verdiği cevap (sine-wave testing) parametrik olmayan sistem tanımlanması içinde incelenir. Daha önceki çalışmalarda, itme karşısında sistemin gösterebileceği doğrusal olmayan etkilerden ve basamak tipindeki girdilerin sistem tanımlanmasında büyük hatalara yol açmasından dolayı sinüs dalgası deneyinin sistem tanımlanmasında etkinliği gösterilmiştir [3].

Parametrik olmayan sistem tanımlanmasında, sistem belirli bir frekans aralığında değişen frekanstaki sinüs dalgası ile uyarılmış ve sistemin cevabı kaydedilmiştir. Sistemin frekans cevabının elde edilmesi için yaygın olarak kullanılan ve

sistemin cevabının uygulanan sinyal ile bağlantısından yola çıkan teknikler kullanılmıştır. Elde edilen frekans cevabının düzgün (smooth) hale getirilmesi için “Windowing” ve “Welch ortalama” teknikleri kullanılmıştır. Sistemin frekans cevabının düzgün olması parametrik tanımlama için önemlidir.

Yukarıda belirtilen aşama sonucunda bulunan frekans cevabının sistem modeli “en küçük kareler” (least square curve fitting) yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Parametrik olmayan sistem modellenmesinden elde edilen sistemin frekans cevabı transfer fonksiyonu cinsinden Denklem 1. deki gibi ifade edilebilir

$$g(z) = \frac{\sum_{j=1}^p n_j z^j}{z^p + \sum_{j=1}^{p-1} d_j z^j} \quad (1)$$

Burda “ p ” sistemin kaçınıcı dereceden olacağını belirler. Denklem 2 de verilen “ m ” ise frekans nokta sayısını verir. Bulunması gereken parametreler ise transfer fonksiyonun pay ve paydasının katsayılarıdır. Çeşitli matematiksel işlemler sonucunda Denklem 1 de verilen ifade

standard “en küçük kareler” problemine dönüştürülür.

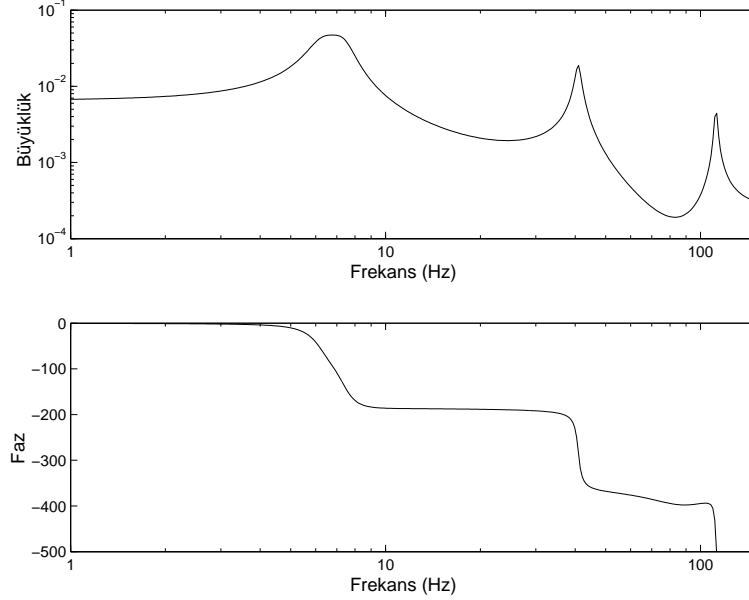
$$A\hat{x} = \hat{b} + \hat{r} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^{p-1} & -1 & -z_1 & -z_1^2 & \dots & -z_1^p \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^{p-1} & -1 & -z_2 & -z_2^2 & \dots & -z_2^p \\ 1 & z_3 & z_3^2 & \dots & z_3^{p-1} & -1 & -z_3 & -z_3^2 & \dots & -z_3^p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & z_m & z_m^2 & \dots & z_m^{p-1} & -1 & -z_m & -z_m^2 & \dots & -z_m^p \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{n} \end{bmatrix}, \quad \hat{b} = \begin{bmatrix} g(z_1)z_1^p \\ g(z_2)z_2^p \\ \vdots \\ g(z_m)z_m^p \end{bmatrix}$$

Denklem 2 deki “ r ”, Denklem 2 ‘yi sağlayan minimum norma sahip bir vektörü ifade eder.

Denklem 3 akıllı kirişin “en küçük kareler” yöntemi kullanılarak bulunan 8. dereceden transfer fonksiyonunu, Şekil 5 ise bu sistemin frekansa bağlı grafiğini göstermektedir. Bu modelin elde edilmesinde piezoelektrik malzemeler uyarıcılar, lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazı ise algılayıcı olarak kullanılmıştır.



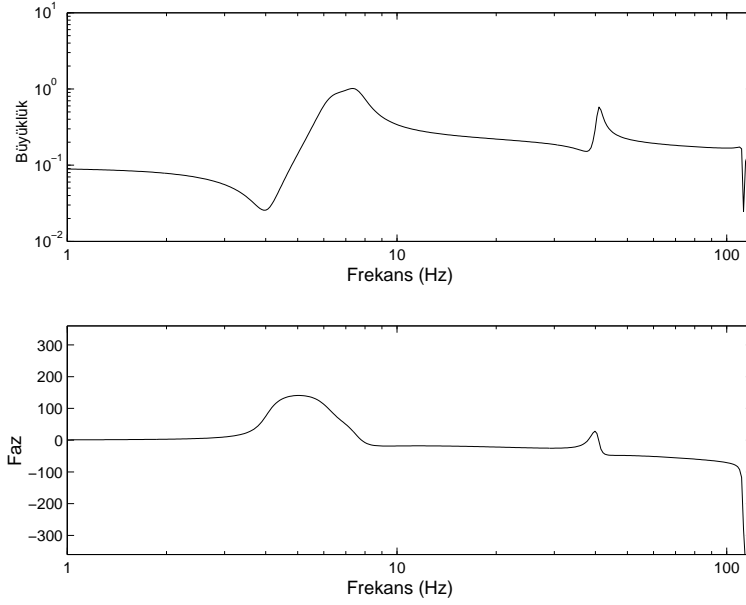
Şekil 5. PZT - lazer uygulaması için akıllı kirişin sistem modeli

$$\begin{aligned} & -0.00024 s^8 - 0.01185 s^7 - 128.9 s^6 + 3552 s^5 - 2.294 \cdot 10^7 s^4 - 9.158 \cdot 10^8 s^3 + 3.117 \cdot 10^{11} s^2 \\ & + 6.433 \cdot 10^{12} s + 7.224 \cdot 10^{14} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & s^8 + 41.43 s^7 + 5.648 \cdot 10^5 s^6 + 1.637 \cdot 10^7 s^5 + 3.492 \cdot 10^{10} s^4 + 6.383 \cdot 10^{11} s^3 + 1.262 \cdot 10^{14} s^2 \\ & + 1.134 \cdot 10^{15} s + 1.1 \cdot 10^{17} \end{aligned}$$

Akıllı kiriş için, piezoelektrik malzemelerin uyarıcı uzama ölçerlerin algılayıcı olarak kullanıldığı sistem modeli de aynı yöntemle elde edilmiştir.

Matematiksel sistem modeli Denklem 4, frekans cevabı ise Şekil 6 da gösterilmiştir.



Şekil 6. PZT- uzama ölçer uygulaması için akıllı kirişin sistem modeli

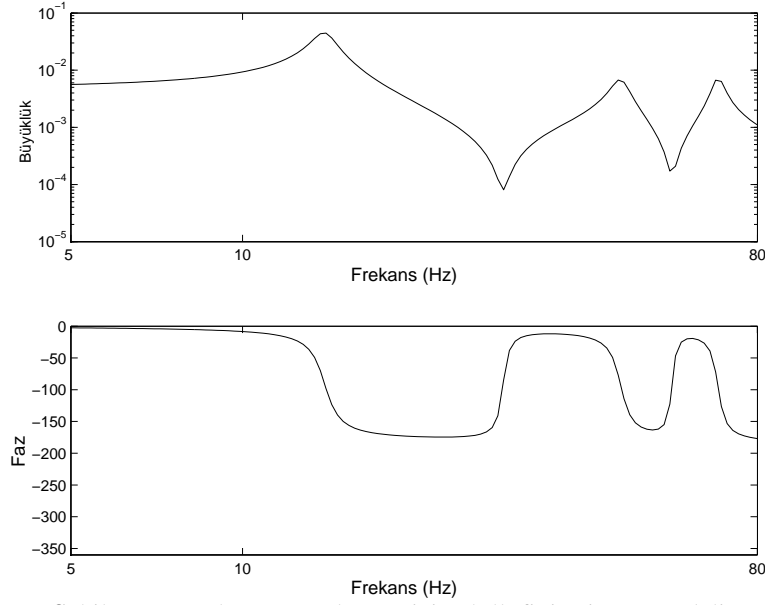
$$\begin{aligned} & -0.129 s^{10} + 119.7 s^9 + 1219 s^8 + 7.06 \cdot 10^7 s^7 + 3.761 \cdot 10^{10} s^6 + 5.618 \cdot 10^{12} s^5 + 2.317 \cdot 10^{15} s^4 \\ & + 6.037 \cdot 10^{16} s^3 + 6.308 \cdot 10^{18} s^2 + 4.998 \cdot 10^{19} s + 2.988 \cdot 10^{21} \end{aligned}$$

(4)

$$\begin{aligned} & s^{10} + 1462 s^9 + 9.092 \cdot 10^5 s^8 + 8.336 \cdot 10^8 s^7 + 2.192 \cdot 10^{11} s^6 + 5.491 \cdot 10^{13} s^5 + 1.099 \cdot 10^{16} s^4 \\ & + 3.514 \cdot 10^{17} s^3 + 3.828 \cdot 10^{19} s^2 + 4.641 \cdot 10^{20} s + 3.234 \cdot 10^{22} \end{aligned}$$

Aynı yöntem uygulanarak akıllı fin için elde edilen 6. dereceden sistem modeli Şekil 7 de verilmiştir. Bu model bir yüzdeki 12 adet PZT nin uyarıcı olarak kullanılması ve lazer yardımıyla yerdeğişim

algılama cihazının ise algılayıcı olarak kullanılması ile bulunmuştur. Denklem 5 te akıllı fin için elde edilen 6. dereceden transfer fonksiyon verilmiştir.



Şekil 7 . PZT - lazer uygulaması için akıllı finin sistem modeli

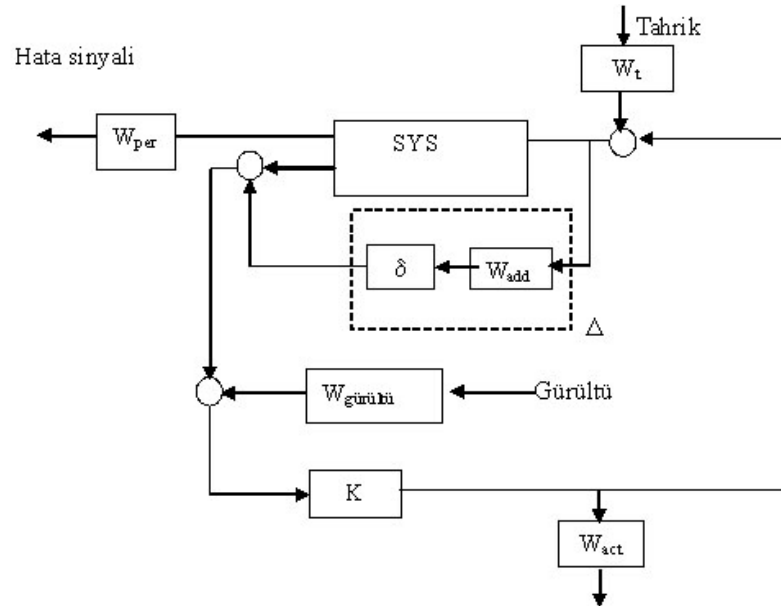
$$\frac{0.0001179 s^6 - 0.02197 s^5 + 162.4 s^4 - 1302 s^3 + 2.339 \cdot 10^7 s^2 + 6.697 \cdot 10^7 s + 5.913 \cdot 10^{11}}{s^6 + 46.71 s^5 + 2.758 \cdot 10^5 s^4 + 7.644 \cdot 10^6 s^3 + 1.748 \cdot 10^{10} s^2 + 1.623 \cdot 10^{11} s + 1.179 \cdot 10^{14}} \quad (5)$$

Deneysel verilerden elde edilen sistem modelleri çalışmanın daha sonraki aşamalarında denetçi tasarımında kullanılmıştır.

5. H_∞ DENETÇİ TASARIMI

Bu bölümde kısaca H_∞ denetçi teorisi ve akıllı giriş ve akıllı fin için tasarlanan H_∞ denetçileri anlatılmaktadır. Tasarlanmış olan denetçiden

sistemi kararlı yapmasının yanı sıra belirlenmiş olan performans özelliklerine de ulaşması beklenmektedir. Bu çalışmada tasarlanan H_∞ denetçisinin amacı, ilgilenilen frekans aralığındaki sönümlenme katsayısını artırarak herhangi bir dış etki altında sistemin kararlılığını artırmaktır. Şekil 8 de tasarlanan H_∞ denetçisinin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 8. H_∞ denetçisinin blok diyagramı

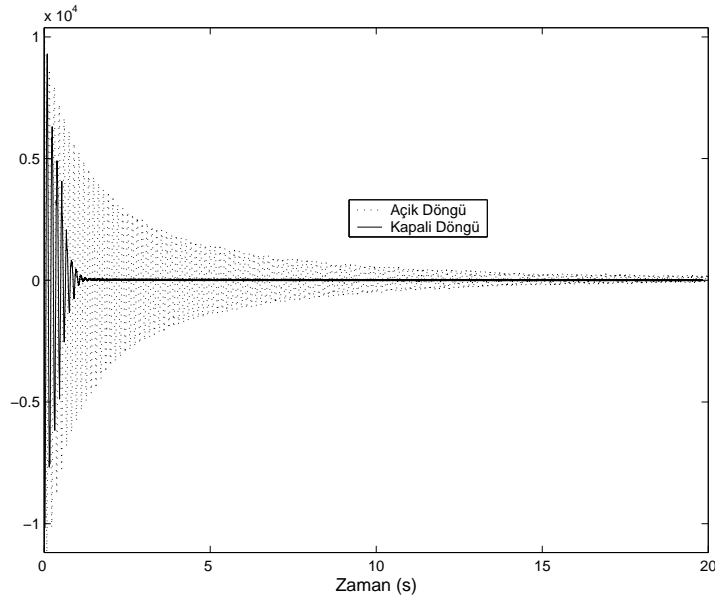
Şekil 8 de SYS olarak gösterilen blok, elde edilmiş sistem modelini ifade eder. Deneysel olarak elde edilen modelin belli bir frekans aralığında olması yüksek frekanslar için modelin eksik olduğu anlamına geldiğinden, yüksek frekanslar için sistem modeline belirsizlikler eklenir. Aynı zamanda deneysel hatalar da dikkate alınarak, sistemin doğal frekanslarında ve/veya bu doğal frekanslardaki sönümlenme katsayılarındaki hatalar da sisteme belirsizlik olarak eklenir ve Şekil 8 de verilen blok

diyagramda W_{add} olarak gösterilir. W_{per} sistemden beklenen performans özelliklerini, W_{act} uyarıcıdaki sınırı, W_d dışarıdan gelebilecek tahriği, $W_{gürültü}$ de algılayıcının ölçtüğü değeri etkileyecek gürültüyü simgeler. Elde edilen sistem modeline bu değerler de eklenerek H_{∞} denetçi tasarımı için gerekli forma getirilir. Tasarlanan denetçinin gürbüzlük (Robustness) analizi yapılır [4,5,6].

6. AKILLI KİRİŞ İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Uzama Ölçerle Yapılan Deneyler

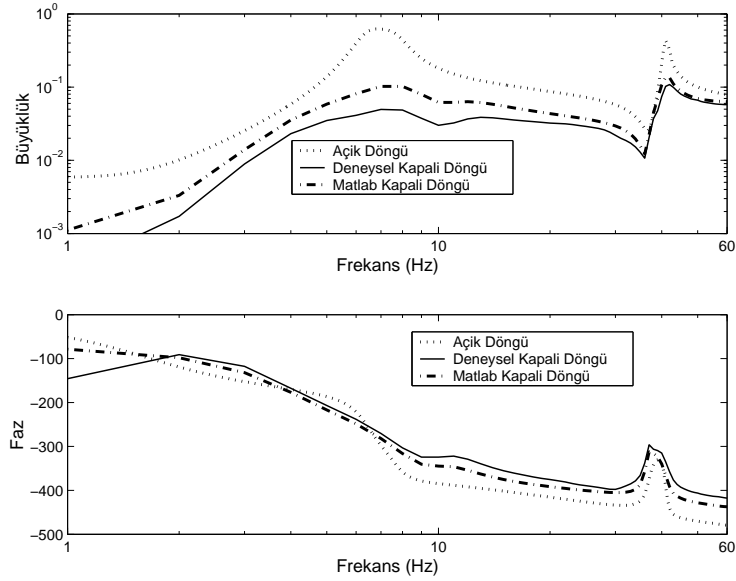
Şekil 9 da kirişin serbest ucuna uygulanan 5 cm lik yerdeğiştirme ve sıfır hız sonunda elde edilen açık döngü ve kapalı döngü zaman cevapları gösterilmiştir. Kiriş için tasarlanan H_{∞} denetçisi için belirlenen performans ve belirsizlik grafikleri daha önceki çalışmalarımızda verilmiştir [11].



Şekil 9. Uzama ölçerin kullanıldığı akıllı kirişin açık döngü ve kapalı döngü zaman cevapları

Şekil 10 da akıllı kirişin tutturulmuş kenarına yakın bir yere yerleştirilen titreştirici ile uyarılması sonucu oluşan açık döngü, deneysel kapalı döngü

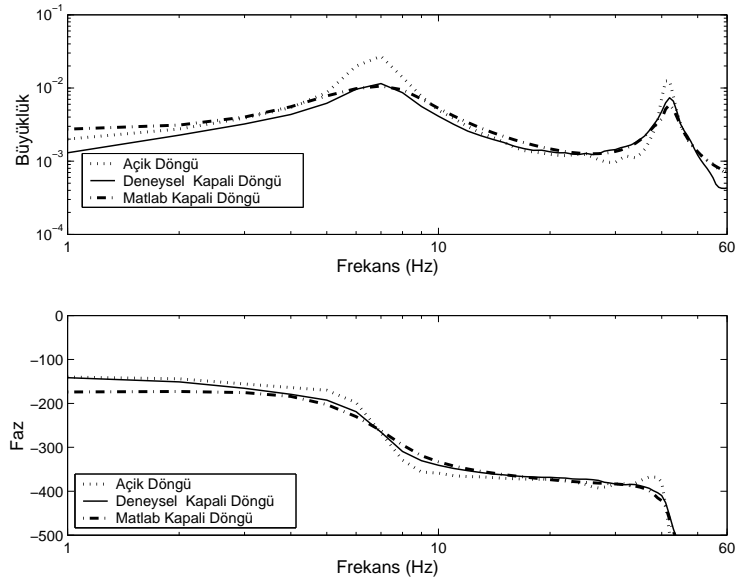
ve matlab simulasyonu kapalı döngü sonucunda elde edilen frekanslı cevapları gösterilmiştir.



Şekil 10. Uzama ölçerin kullanıldığı akıllı kirişin açık döngü ve kapalı döngü frekans cevapları

6.2. Lazer Yardımıyla Yerdeğişim Algılama Cihazıyla Yapılan Deneyler

Şekil 11de titreştirici ile tahrik edilen sistemin açık döngü ve deneysel kapalı döngü ve matlab simülasyonu kapalı döngü sonucunda elde edilen frekans cevapları verilmiştir.



Şekil 11. Lazerin kullanıldığı akıllı kirişin açık döngü ve kapalı döngü frekans cevapları

Şekiller 10 ve 11 de verilen frekans cevapları incelendiğinde ilk iki doğal frekanstaki titreşimin sönümlendiği gözlenmektedir. Şekil 10 daki Matlab simülasyonu sonucunda elde edilen kapalı döngü frekans cevabı ile deney sonucunda elde edilen kapalı döngü frekans cevabının birbiriyle tam olarak örtüşmediği görülmektedir. Oysa Şekil 11 de

Matlab simülasyonu ile elde edilen kapalı döngü frekans cevabı ve deneysel olarak elde edilen kapalı döngü frekans cevabının çok iyi uyduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, lazerin algılayıcı olarak kullanıldığı akıllı kirişin sistem modeline, yüksek frekansları kapsaması için sisteme eklenen belirsizliğe ilaveten sönümlenme katsayısının da göz

önünde bulunduran belirsizliğin eklenmesidir. Yalnız, lazerin algılayıcı olarak kullanıldığı deneylerde, piezoelektrik malzemelere uygulanması gereken denetçi sinyalindeki sınırlamalardan dolayı ilk iki doğal frekanstaki titreşim sönümlenmesi uzama ölçerin algılayıcı olarak kullanıldığı deneylere göre daha düşük olmuştur. Bu açıdan hem sistemin belirsizliği hemde denetçiden beklenen performans özelliklerinin iyi belirlenmesi gerekir [7,8].

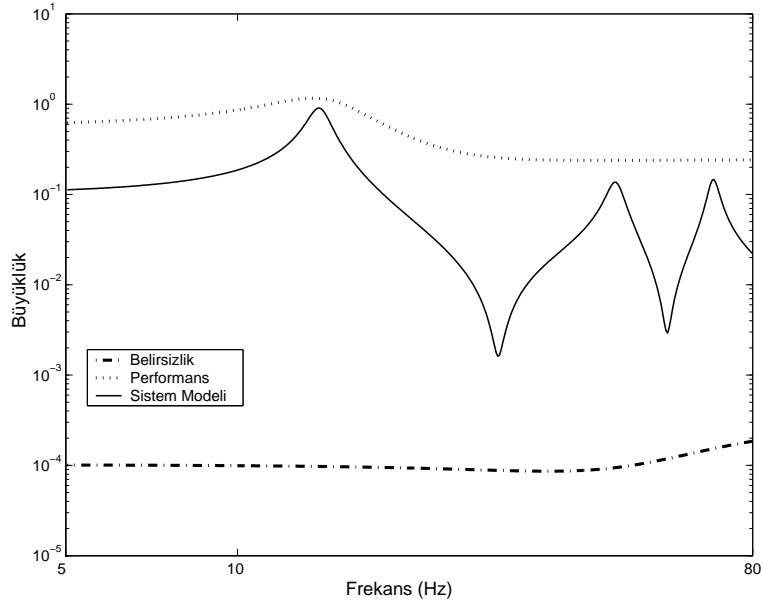
6. AKILLI FİN İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Şekil 2 de verilen akıllı fin sistem modeli kullanarak bir H_∞ denetçi tasarlanmıştır. Bu model piezoelektrik malzemenin yapıyı uyarması ve lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazının sistemin

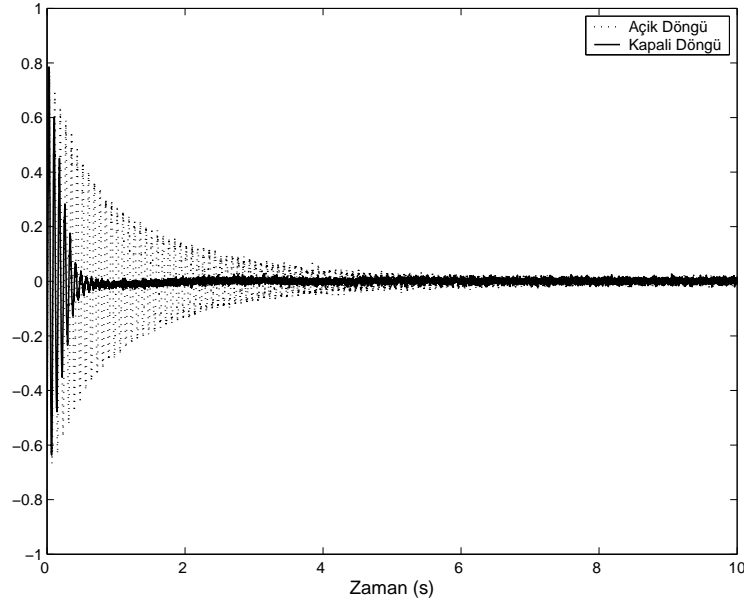
bu uyarıya verdiği cevabı kaydetmesi ile elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi uyarıcıların yapı üzerindeki konumu kadar algılayıcıların konumu da önemlidir. Sonlu elemanlar modelinden yararlanılarak yapı üzerindeki yerdeğişimin en yüksek olduğu yer, lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazı için yerdeğişimin ölçüleceği nokta olarak belirlenmiştir [1,9,10].

Akıllı fin için tasarlanan H_∞ denetçisi için seçilmiş olan performans ve belirsizlik grafikleri Şekil 12 de verilmiştir.

Şekil 4 te verilen deney düzeneği kullanılarak akıllı fin için uç noktasından verilen yerdeğişime karşı akıllı finin açık ve kapalı döngü zaman cevapları Şekil 13 de verilmiştir.



Şekil 12. Akıllı finin performans ve belirsizlik seçimi



Şekil 13. Akıllı finin açık döngü ve kapalı döngü zaman cevapları

Şekil 12 den de görüldüğü üzere yapıda oluşan titreşim kısa sürede sönümlenmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir akıllı kirişin üzerine sürekli uygulanan bir sinüs dalgası tarafından tahrik edilmesi sonucunda oluşan titreşimlerinin geliştirilen bir H_∞ denetçi tarafından sönümlenebildiği hem teorik hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Denetçinin tasarımında H_∞ denetçi algoritması kullanılmış ve bu tasarım tekniğinin sistem belirsizliklerinin modellenmesindeki başarısı gösterilmiştir. Aynı zamanda akıllı fin için de serbest titreşim, açık ve kapalı döngü zaman testleri yapılmış ve tasarlanan H_∞ denetçisinin hedeflenen şekilde çalıştığı gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan iki ayrı deneysel sistemin çalışma performansları karşılaştırılmış ve birbirlerine göre olan üstünlük ve zayıflıkları tespit edilmiştir. Uzama ölçerlerin kullanıldığı SS10 denetçi ünitesinin veri toplama, işleme ve veri göndermedeki yüksek hızı (4096 Örnekleme/saniye) bu sistemi başarılı kılmıştır. Labview ile birlikte çalışan lazer yardımıyla yerdeğişim algılama cihazının kullanıldığı sistem ise daha kesin ölçümler yapabildiği için titreşimi algılamada uzama ölçer ile karşılaştırıldığında daha başarılı olmuştur. Aynı zamanda görsel bir arayüze sahip olan Labview programının kullanım kolaylığı da SS10 denetçisi kullanılarak çalıştırılan C programına göre avantajlıdır.

8. KAYNAKLAR

1. Çalışkan T. , 'Piezoelectric Ceramics and Their Applications in Smart Aerospace Structures", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, September 2002
2. Nalbantoğlu V., 'Robust Control and System Identification for flexible structures' Doktora Tezi, University of Minnesota, 1998
3. Ljung L., System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall,1987
4. Zhou, K., – Doyle, J. – Glover K., Robust and Optimal Control. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
5. Doyle, J.– Francis, B. – Tanenbaum, A., Feedback Control Theory, Mac Millan Publishing, New York,1992.
6. Francis B. A., Zames G., 'On H_∞ Optimal Sensitivity Theory for SISO Feedback Systems', IEEE Transactions on Automatic Control, Vol., AC-29, No.1, January 1984
7. Nalbantoglu V., Balas G., Thomson P., 'The Role of Performance Criteria Selection in the Control of Flexible Structures'. AIAA GNC Conference, San Diego, 1996.
8. Balas G., Doyle J. C., 'Robustness and Performance Trade-Offs in Control Design for Flexible Structures', IEEE Transactions on Control systems Technology, Vol. 2, No.4, December 1994

9. Yaman, Y. et al. ‘Vibration Control of Smart Plates by Using Piezoelectric Actuators’, ESDA2002, 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design And Analysis, 2002, Istanbul,Turkey

10. alışkan T., Yaman Y. ve Nalbantoğlu V. ‘Akıllı Yapıların Sonlu Elemanlar Tekniđi Kullanılarak Modellenmesi’ UMTS2001, Seluk Üniversitesi Konya, bildiri kitabı sayfa 539-548

11. Yaman Y. et al, “Application of H_{∞} Active Vibration Control Strategy in Smart Structures”, 3rd International Conference on Advanced Engineering Design 01 - 04 June 2003, Prague, Czech Republic.