

AKILLI YAPILAR YARDIMIYLA AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Tarkan Çalışkan

Havacılık Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

Volkan Nalbantoğlu

ASELSAN A.Ş., MGEO Grubu, Akyurt, 06011, Ankara

Yavuz Yaman

Havacılık Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, 06531, Ankara

ÖZ

Bu çalışmada akıllı yapılarda titreşim frekanslarından dolayı oluşan titreşim enerjisinin sönmülmesinde kullanılacak olan bir kapalı döngü denetçi tasarımı geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan akıllı kiriş, bir ucu tutturulmuş öteki ucu serbest alüminyum bir kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılan piezoelektrik (PZT) yamalardan oluşmaktadır. Çalışmada yapısal modellemeler ANSYS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Titreşim sönmülmesinde 'H_∞ kapalı döngü denetçi tasarım' tekniği kullanılmıştır. Çalışmada, önerilen tekniğin akıllı kirişin ilk iki doğal frekansından dolayı oluşan titreşimlerinin sönmülmesindeki etkinliği ve akıllı yapılardaki belirsizliklerin modellenmesindeki uyumluluğu gösterilmektedir.

ABSTRACT

This work presents an active vibration controller design, which effectively suppresses the vibrations of a smart beam due to its first two modes. The smart beam consists of an aluminum beam modelled in cantilevered configuration with surface bonded piezoelectric (PZT) patches. The structural modelling was done by using ANSYS software. The vibration suppression was achieved by the application of H_∞ controllers. The effectiveness of the technique in active vibration control and in the modeling of the uncertainties is shown.

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. Aktif parçalar olarak genelde piezoelektrik kristaller kullanılmaktadır. Piezoelektrik kristaller arasında en yaygın kullanım payını halen birçok noktasal algılayıcı ve uyarıcıda kullanılan PZT (Lead-Zirconate-Titanate) almaktadır.

Piezoelektrik malzemelerin gerek yapıların şekil değiştirmesinde, gerekse titreşim düzeylerinin sönmülmesindeki etkinliğini gösteren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [1,7]. Akıllı yapıların modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi etkin sonuçlar vermektedir [8]. Ancak özellikle titreşim kontrol algoritmalarının tasarlanması aşamasında, sonlu elemanlar

modelleme teknikleri yeterli hassasiyette çözümler üretememektedir ve problemin doğru olarak modellenmesinde de kullanılamamaktadır [5]. Bu gibi durumlarda modeldeki belirsizliklerinin de sistematik olarak olarak çözüme dahil edilmesi gerekmektedir. H_∞ kapalı denetçi tasarım teknikleri bu belirsizliklerin sistem tarafından absorbe edilebilmesini sağlayarak çözüme dahil edebilmektedir. Bu teknik ayrıca ortamda algılayıcı ve uyarıcı sinyallerin bozulmasına neden olan gürültü faktörünü de etkin olarak çözüme dahil edebilmektedir. Teknik, ayrıca sonlu elemanlar modeli kullanılarak elde edilen sonuçların doğrulanması ve düzeltilmesi aşamasında da kullanılabilir [9].

2. TEORİK MODELLEME

Yapısal analiz tekniklerinde sistem dinamiği, hareket serbestliklerini tanımlayan ikinci dereceden differansiyel denklem setleri ile modellenirken; denetçi tasarımında kullanılan durum zaman gösteriminde (state-space representation), sistemin durumlarını (state) belirleyen birinci dereceden denklem setleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem modeli belirlemesinde nodal (düğüm) veya modal koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Nodal koordinat sistemlerinde belirli düğüm noktalarında tanımlanan yerdeğiştirme ve hız koordinatları nodal koordinat sistemini oluşturmaktadır. Modal koordinat sistemlerinde ise, sistem doğal frekanslarındaki yerdeğiştirme ve hız koordinatlarıyla tanımlanmaktadır. Modal koordinatlar içeren modellemelerin deneysel çalışmalar ile olan uyumu literatürde gösterilmiştir [5]. Nodal koordinat sistemleri ise sonlu elemanlar modellemesinin etkin olduğu durumlarda yüksek hassasiyette sonuçlar sunabilmektedir [10].

Sistem modelleme tekniklerinin hepsi sadece kontrol sistemlerinin tasarlanmasına yönelindiklerinden, tasarım sadece yapının durum uzay yada buna eşdeğer olan sistemin sıfır ve kutuplarını veren transfer fonksiyonunun belirlemesini yeterli saymaktadır. Gerekli model problemin verilmesine bağlı olarak analitik modelleme teknikleri veya sonlu elemanlar metodu ile elde edilebilir [5-10].

Akıllı yapıların modellenmesinde sonlu elemanlar metodunun etkinliği bilinmektedir [3,8-9]. Bu çalışmada düğüm koordinat sistemi kullanılmıştır. Akıllı yapıların piezoelektrik zorlama altındaki hareket denklemi aşağıda verildiği gibidir.

$$\left[M \right] \left\{ \ddot{q} \right\} + \left[C \right] \left\{ \dot{q} \right\} + \left[K \right] \left\{ q \right\} = \left\{ P \right\} \quad (1)$$

Burada M, C ve K sırasıyla sonlu elemanlar metodu ile bulunacak olan kütle, sönüm ve dirençlik matrislerini göstermektedir. Ayrıca, $\left\{ P \right\}$ birim voltaj-kuvvet transformasyon vektörünü, $\left\{ q \right\}$ genelleştirilmiş yerdeğiştirme vektörünü, $\left\{ \dot{q} \right\}$ genelleştirilmiş hız vektörünü ve $\left\{ \ddot{q} \right\}$ genelleştirilmiş ivme vektörünü simgelemektedir. Akıllı kirişdeki sönüm, Rayleigh sönüm modeli olarak formülasyona dahil edilebilmektedir [9-10]. Bu durumda sönüm matrisi denklem (2)' de gösterildiği gibi dirençlik matrisi ile orantılı olarak modellenebilmektedir.

$$\begin{aligned} [C] &= \beta [K] \\ \beta &= \frac{2\zeta_r}{\omega_r} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada β Rayleigh sönüm oranını simgelemektedir

2.1. Durum Uzay Gösteriminin Formülasyonu

Akıllı kirişin kutup-sıfır gösterimi sonlu elemanlar metodu ile elde edilebilir. Akıllı kirişin difransiyel hareket denklemi denklem (1)'de verilmiştir. Kütle matrisinin tekil olmadığı durumlarda denklem (1)'in kütle matrisinin tersi ile çarpılması ile denklem (1), aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\left\{ \ddot{q} \right\} + M^{-1} D \left\{ \dot{q} \right\} + M^{-1} K \left\{ q \right\} = M^{-1} \left\{ P \right\} \quad (3)$$

Bu durumda çıktı vektörü,

$$y = C_{oq} \left\{ q \right\} + C_{ov} \left\{ \dot{q} \right\} \quad (4)$$

olarak yazılabilir [10]. Burada C_{oq} ve C_{ov} sırasıyla yerdeğiştirme ve hız çıktı matrislerini vermektedir

Akıllı kirişin hareket denklemini veren denklem (1) in uygulanması ikinci dereceden difransiyel denklem tanımlamasını gerektirmektedir. Denklem formu, yerdeğiştirme ve hız vektörlerinin durum değişkeni olarak seçilmesiyle değişmekte ve denklem (1) birinci dereceden, durum uzay formunda simetrik parçalı matris formunda gösterilebilmektedir. Bu durum denklem (5) te gösterilmektedir.

$$x = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}P \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Burada I $n \times n$ birim matrisini simgelemektedir. Denklemler (4) ve (5) in denklem (6) da genel formülasyonu verilen durum zaman gösterimi ile karşılaştırılması, denetici tasarımında kullanılacak formun bulunmasını sağlar.

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Burada u matrisi sistem girdi matrisidir ve piezoelektrik uyarıcılara uygulan gerilim değerlerini vermektedir. Sistemin hareket serbestlik derece sayısı n ile, uyarıcı sayısı s , algılayıcı sayısı r ve u $s \times s$ biçiminde gösterildiğinde denklem (7)'de gösterilen $2n \times 2n$ A sistem matrisini ve B $2n \times s$ girdi matrisleri bulunabilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}P \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = [C_{oq} \quad C_{ov}]$$

Modellemenin son aşamasını transfer fonksiyonunun bulunması oluşturmaktadır. Denklem (6) formundaki bir sistemin transfer fonksiyonu $G(s)$, ilk koşulların sıfır olduğu durumlar için denklem (8)'de verilmiştir.

$$G_{rxs}(s) = C_{orx2n} (sI - A)^{-1} B_{2nxs} \quad (8)$$

2.2. Durum Uzay Denklemlerinin Ayrık Hale Getirilmesi: Sonlu Elemanlar Modellemesi Uzaysal Model Formülasyonu

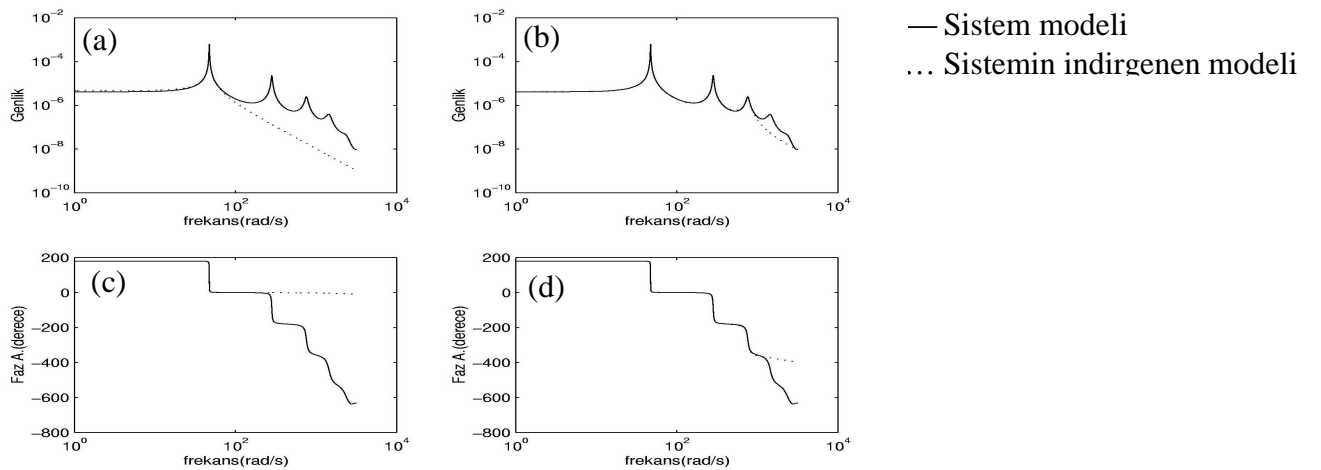
Aktif/pasif entegre yapılarda karşılaşıldığı gibi termal-yapısal-elektriksel etkileşim problemlerinin analizinde ANSYS sonlu elemanlar yazılım paketinin etkinliği kaynak [8] de gösterilmiştir. Bu yazılım akıllı kirişlerdeki sönümü modal analize dahil edip sönümlü frekansları ve bu frekanslardaki biçim şekillerini bulamasa da, sönümsüz frekansları ve biçim şekillerini belirleyebilmektedir. Bunlara ek olarak yazılım yapının uzaysal gösterimini belirleyen kütle matrisi, direnç matrisi ve piezoelektrik uyarımdan ötürü yapıda oluşan piezoelektrik uyarım kuvvetlerin belirlenmesinde de etkin olarak kullanılabilir.

2.3. Modelin İndirgenmesi

Akıllı kirişlerin sonlu elemanlar tekniği ile analizinde, akıllı kiriş birçok serbestlik derecesine sahip olacak şekilde modellenmektedir [8,9]. Fakat denetçi tasarımında gereğinden yüksek dereceli modellerin sayısal zorluklardan ötürü, düşük hassasiyetli sonuçlar bulunmasına yol açtığı bilinmektedir [5,10]. Bu durumda uygulanacak olan yöntem, sistem modelinin sadece denetçi tasarımında kullanılacak olan kısmını, diğer kısmının etkisini de kabul edilebilir ölçüde hesaba dahil edebilecek şekilde, indirgemektir [9,11].

Hesaplamlarda, kaynak [8] de geometrisi, malzeme özellikleri ve sonlu elemanlar modeli verilen bimorf konfigürasyonlu akıllı kiriş kullanılmış ve elde edilen uzaysal gösterim verilerinden transfer fonksiyonunun bulunmasında yararlanılmıştır. Bu aşamada MATLAB® (v5.6) yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen en yüksek dereceli sistem modeli yine aynı yazılımın karalı sistemler için tasarlanmış olan dengelenmiş gösterim (balanced realization) tekniği kullanılarak, sistem için belirlenen en uygun dereceye indirgenmiştir.

Çalışmada frekans ilgi aralığı akıllı kirişin üç doğal frekansını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Çalışmada kullanılan Rayleigh sönümlenme modelinde kullanılan kayıp faktörü ve frekans aralığı $\beta_{AB} = \beta_{PZT} = 1 \times 10^{-4}$ $0 \leq f \leq 130$ Hz olarak alınmış ve sonlu elemanlar modelinde piezoelektrik uyarım miktarı $\pm 100V$ olarak seçilmiştir. Çalışmada sistemin ilk üç doğal frekans değerindeki cevabını belirleyen modelinin bulunması için, indirgenen sistemler ile ilk sistemin frekans cevapları karşılaştırılmış ve bunlar Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistemin 2. ve 6. dereceye indirgenmiş modellerinin frekans cevaplarının karşılaştırılması

- (a) Sistem ve 2. Dereceye indirgenen sistem (genlik)
- (b) Sistem ve 6. Dereceye indirgenen sistem (genlik)
- (c) Sistem ve 2. Dereceye indirgenen sistem (faz açısı)
- (d) Sistem ve 6. Dereceye indirgenen sistem (faz açısı)

Burada sistemi ilk üç doğal frekans değerinde hassas olarak belirleyen modelin 6. dereceden olduğu görülmektedir

3. DENETÇİ TASARIMI

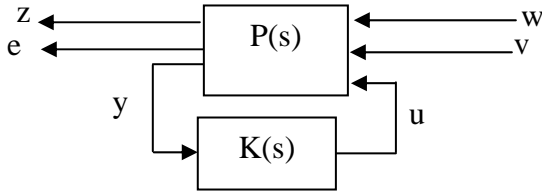
Piezoelektrik uyarıcıların açık döngü denetim sistemleri üzerindeki etkinliği bilinmektedir [4-7]. Çalışmanın bu kısmı, geliştirilen akıllı giriş modelinin H_∞ geri beslemeli denetim algoritmaları tasarımındaki etkinliğinin araştırılmasını amaçlamaktadır.

H_∞ denetçi tasarımında amaç, sistemin girdileri olarak modellenen gürültü sinyalleri ile çıktıları olarak belirlenen hata sinyalleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan transfer fonksiyonun H_∞ normunun minimize edilmesidir. Birden çok girdili-çıktılı olarak tanımlanan \mathbf{M} sisteminin H_∞ normu, sistemin kompleks düzlemin $j\omega$ ekseninde hesaplanan transfer fonksiyon matrisinin en üst tekil değerlerinin üst sınırı (supremum) olarak tanımlanmaktadır [9,13,14].

$$\|\mathbf{M}\|_\infty = \sup \bar{\sigma}(\mathbf{M}(j\omega)) \quad (9)$$

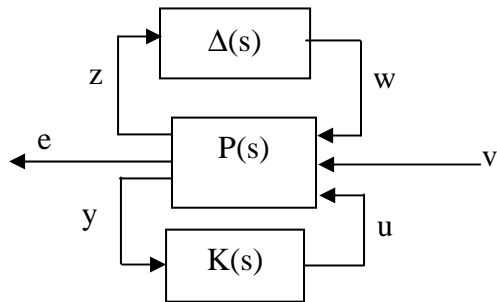
Burada j kompleks birim sayıyı ve $\bar{\sigma}(\mathbf{M})$ \mathbf{M} matrisinin tekil değerlerinin en büyüğünü simgelemektedir.

Şekil 2’de gösterilen kapalı döngü denetim sisteminde, K denetçisi sistemin ölçülebilir çıktı değerleri olarak belirlenen y sinyallerini en uygun şekilde işledikten sonra sisteme geri besleyerek sistemin kararlılığını sağlamaktadır. Bu süreçte denetçi, w , v ile simgelenen gürültü sinyallerini z , e ile simgelenen hata sinyallerine dönüştüren sistemin ∞ normunu minimize etmektedir.



Şekil 2. H_∞ kapalı döngü denetim sistemi

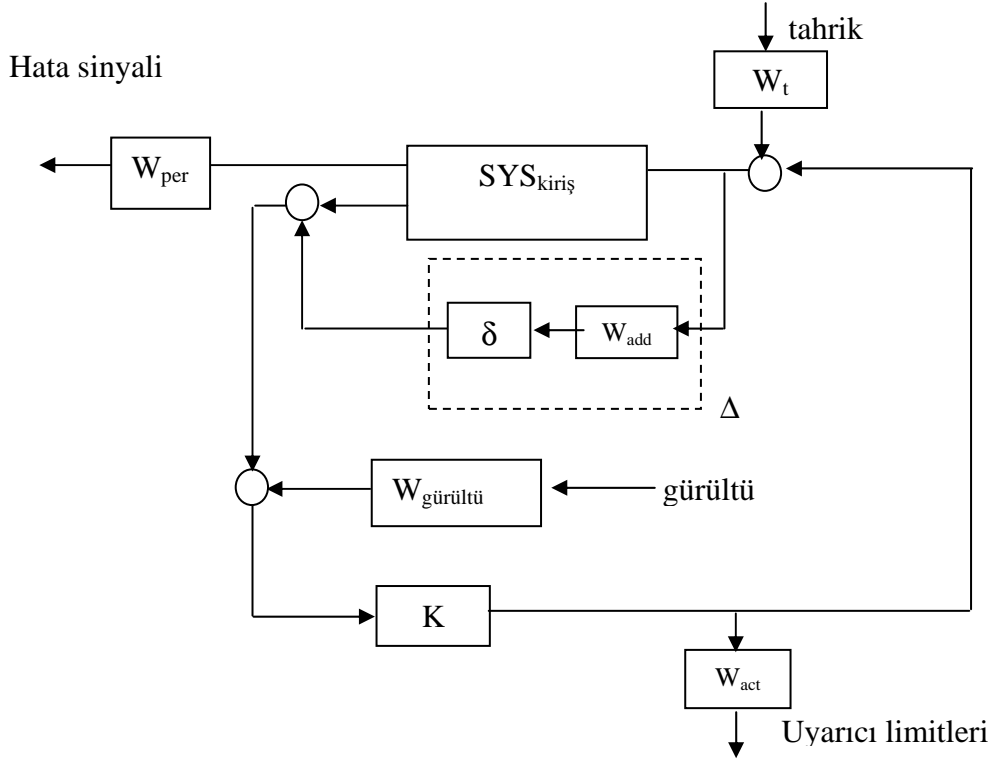
Şekil 2’de denetlenecek sistemin nominal transfer fonksiyonu $P(s)$ ile simgelenmiştir. Matematiksel modellemedeki yetersizlikler, bazı parametrelerin tam olarak ölçülememesi ve parametrelerin zaman içerisinde değişmesi gibi nedenlerden ötürü hiçbir model gerçek sistemi tam olarak ifade edememektedir. H_∞ kapalı döngü denetçi tasarım tekniğinde ise bu tip hatalar ve belirsizlikler sistematik olarak modellemeye dahil edilebilmektedir [15,16]. Bu tasarım algoritmasında belirsizliklerin $P(s)$ ile simgelenen sistemin zaman değişimsiz lineer sisteme, yine ∞ normuyla sınırlı bir Δ sistemi aracılığı ile etkilediği varsayılmaktadır. Bu durumda belirsizlikleri de içeren sistemin blok gösterimi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Modellemedeki belirsizliklerin denetçi algoritmasına katılımı

Tasarım amacına ulaştığında, K denetçisi Δ ile ifade edilen belirsizliklerin varlığına rağmen e sinyal enerjisinin ν sinyal enerjisine olan oranının belirli bir değerin altında kalmasını sağlayacaktır.

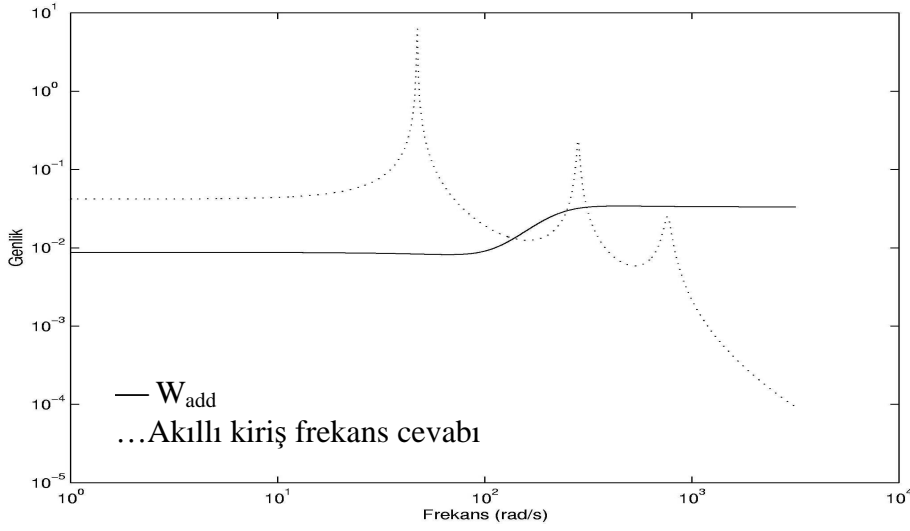
Akıllı kirişte frekans ilgi aralığında oluşan yapısal titreşimlerin sönümlenmesi aşamasında kullanılan H_∞ kapalı döngü denetim sistemin blok gösterimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Akıllı kirişin titreşim enerjisinin sönümlenmesinde kullanılan H_∞ kapalı döngü denetim probleminin blok diagram formülasyonu

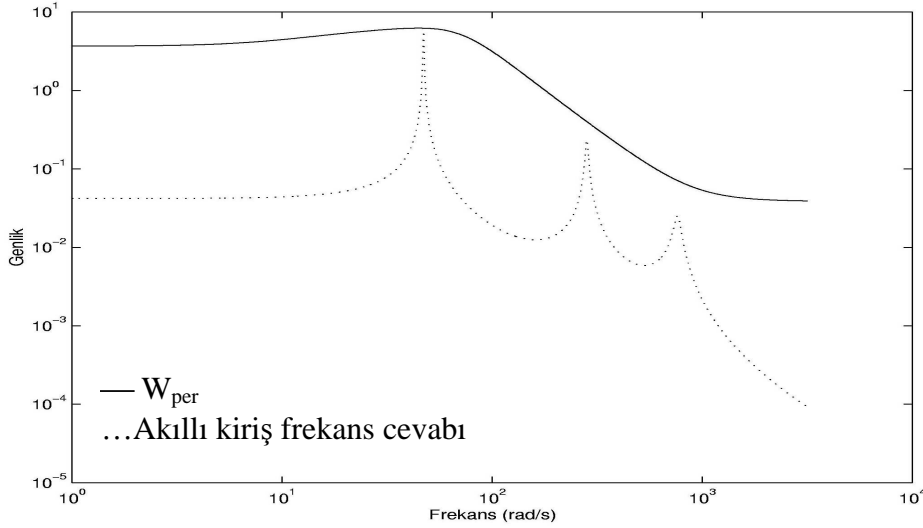
Şekil 4'te blok diagramı gösterilen modellemelerde $SYS_{kiriş}$ akıllı kiriş modelini, δ , $\|\delta\| < 1$ koşulunu sağlayacak olan bir kompleks sayıyı ve W_{add} sisteme eklenen belirsizlik ağırlığının genliğini tanımlamaktadır. Şekildeki δ ile W_{add} 'nın çarpımından oluşan Δ , kirişin nominal modellemesiyle etkileşerek belirsizlikleri de içeren akıllı kiriş modelini oluşturmaktadır. W_{per} ise kirişin serbest uç orta noktasından yapılan yerdeğiştirme ölçümüne uygulanan performans ağırlığıdır. Denetçi tasarımında, bu ağırlığın genliğinin yüksek olduğu frekans aralığında Şekil 4'te verilen blok gösterimindeki tüm ağırlıkların $SYS_{kiriş}$ ile simgelenen sistem içerisine katılması ve giriş-çıkış sinyallerinin de düzenlenebilmesi durumunda sistem, Şekil 2 de gösterilen standart forma getirilebilmektedir. Tasarımda, düşük frekans aralığında yerdeğiştirme sinyali minimize edilirken yüksek frekans aralığında, deneticinin yerdeğiştirme sinyaline müdahale etmemesi amaçlanmaktadır [14]. Sisteme giren tahrik sinyali üzerindeki W_t ağırlığı 1 olarak seçilmiştir. Bu, tahrik sinyalinin denetçinin ürettiği girdi sinyali ile aynı mertebeden olduğunu ifade etmektedir. 1/100 değerinde bir sinyal-gürültü oranını temsil etmek için $W_{gürültü}$ 0.01 olarak seçilmiştir. Uyarıcı çıktısını sınırlamak için kullanılan W_{act} ise 0.01 olarak seçilmiştir.

Şekil 5 W_{add} ile akıllı kirişin frekans cevaplarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Gösterilen bu durumda, yüksek W_{add} değeri modellemenin yüksek geçiren (high pass) filtre olacak şekilde seçilmesi modelin düşük frekanslarda daha iyi modellendiğini, ancak frekans arttıkça modellemedeki belirsizliğin de arttığını göstermektedir.



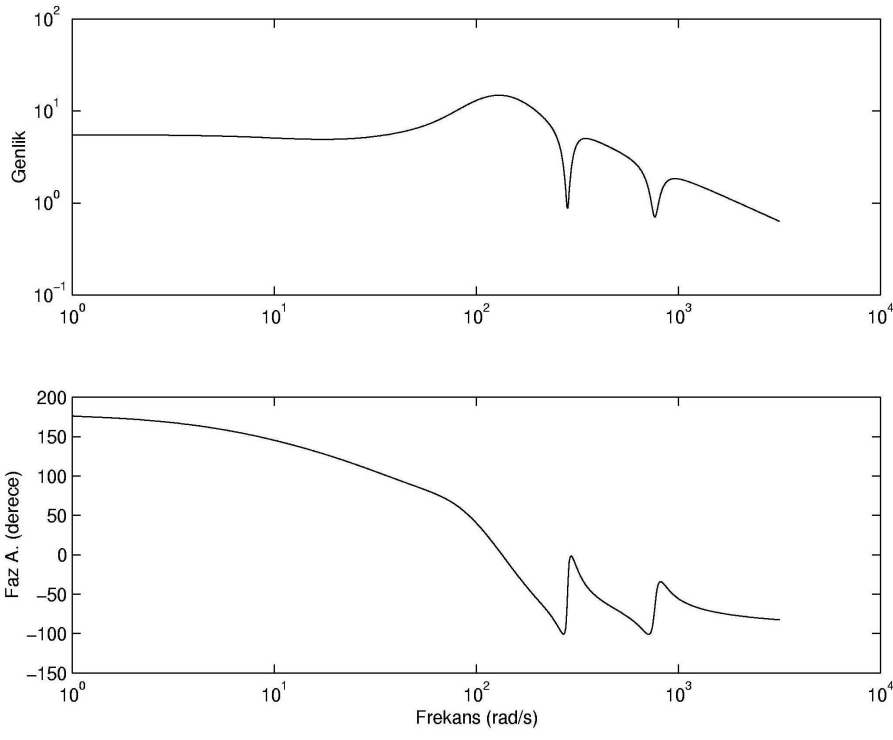
Şekil 5 W_{add} ile akıllı kiriş frekans cevaplarının karşılaştırılması

Şekil 6'da kirişin serbest uç orta noktasından yapılan ölçüme uygulanan performans ağırlığının yapının transfer fonksiyonu ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu ağırlığın uygulanması ile, denetçi tasarımında genliğin yüksek olduğu düşük frekans aralığında yerdeğiştirme sinyali minimize edilirken, yüksek frekans aralığında ise deneticinin yerdeğiştirme sinyaline müdahale etmemesi amaçlanmaktadır[15].

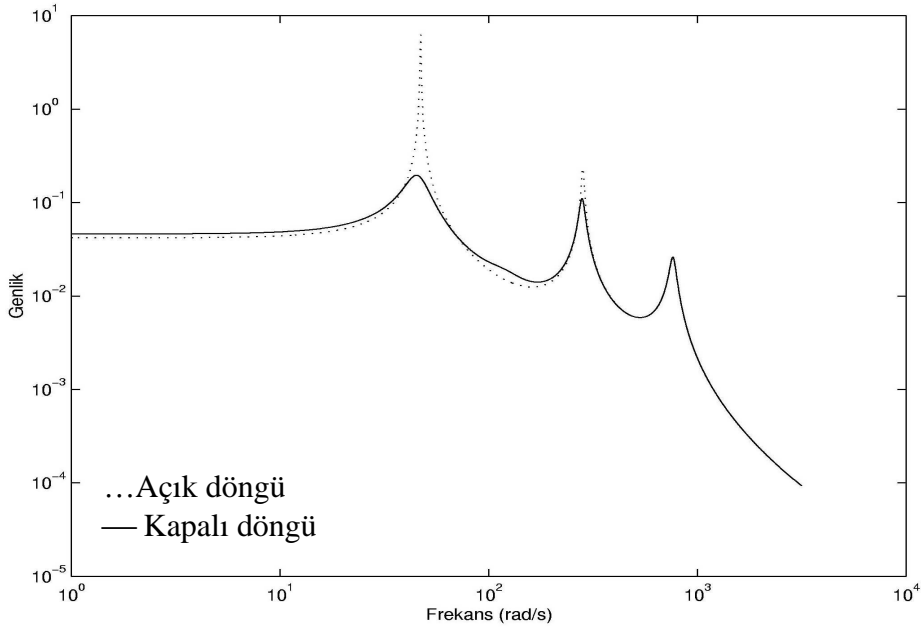


Şekil 6 W_{per} ile akıllı kiriş frekans cevaplarının karşılaştırılması

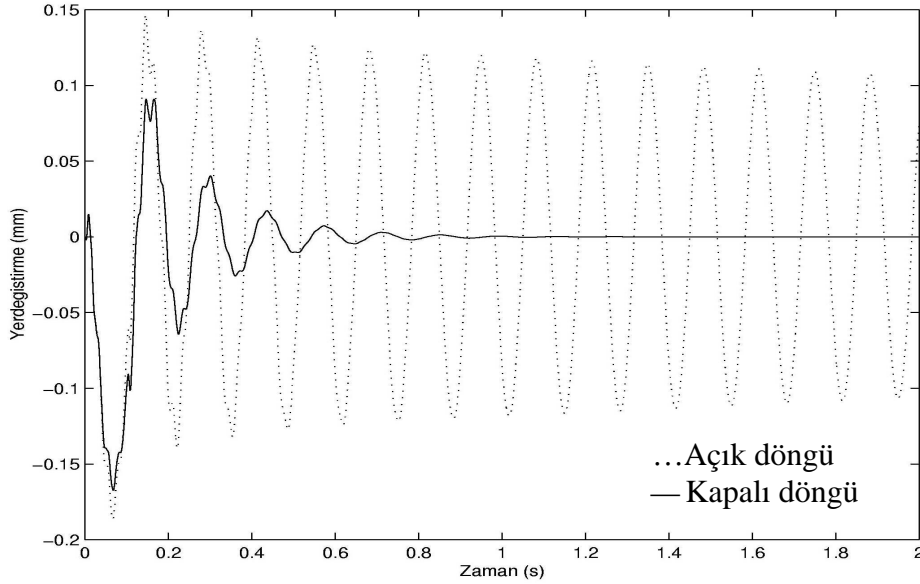
Bu sistem için, standart çözüm teknikleri kullanılarak 11. dereceden bir denetçi bulunmuştur [13]. Şekil 7'de frekans cevabı gösterilen bu denetçinin model indirgeme teknikleriyle 2. Dereceye indirgenmesi ve sisteme uygulanması ile elde edilen açık ve kapalı döngü frekans ve zaman cevapları Şekiller 8 ve 9'da karşılaştırılmıştır. Frekans cevabından görüldüğü gibi, sistemin birinci doğal frekans genliğinde 1/30 ve ikinci frekans genliğinde ise 1/2.2 oranında bir azalma sağlanmıştır.



Şekil 7. 11. orderlu K denetçisinin frekans cevabı



Şekil 8. Akıllı kirişin açık ve kapalı döngü frekans cevaplarının karşılaştırılması



Şekil 9. Akıllı kirişin atım (impulse) zorlamasına olan açık ve kapalı döngü zaman cevaplarının karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen bir akıllı kiriş için denetçi tasarımına elverişli bir model elde edilmiştir. Bu model kullanılarak bir H_∞ denetçisi tasarlanmıştır. Uygulanan denetçi algoritması, akıllı kirişin frekans ilgi aralığında olan ilk iki doğal frekansından dolayı oluşan titreşimlerin sönümlenmesinde etkin olarak kullanılabilir. Ayrıca önerilen denetçi piezoelektrik uyarıcılarda var olan belirsizliklerin modellenmesinde de aynı kolaylıkla kullanılabilir.

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] T. Çalışkan, Y. Yaman ve V. Nalbantoğlu 'Akıllı Yapıların Sonlu Elemanlar Tekniği Kullanılarak Modellenmesi' UMTS2001, Selçuk Üniversitesi, Konya
- [9].V. Nalbantoğlu, Ph.D. Thesis,_University of Minnesota, 1998,'Robust Control and System Identification for flexible structures'

- [10] J. M. M. Silva, M. M. Maia 'Theoretical and Experimental Modal Analysis', Research Studies Press Ltd., 1998
- [11] Sensor Technology Limited Product Data Sheets,
- [12] ANSYS User's Manual (version 5.6)
- [13] G. Balas, J. Doyle, K. Glover, A. Packard, Matlab μ -toolbox Users's manual
- [14] K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glove 'Robust and Optimal Control', Prentice Hall, New Jersey, 1996
- [15] V. Nalbantoğlu, G. Balas, P. Thompson, 'The role of performance criteria selection in the control of flexible structures', AIAA Guidance and Navigation and Control Conference, San Diego, CA, pages 1-9, 1996.
- [16] J. Doyle, B. Francis and A. Tanenbaum, 'Feedback Control Theory', Mac Millan publishing, New York, 1992