

AKILLI BİR KİRİŞİN TİTREŞİM KONTROLÜNDE UZAMSAL ve NOKTASAL DENETÇİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ömer Faruk KIRCALI[†]
ODTÜ/STM A.Ş., ANKARA

Yavuz YAMAN^{*}
ODTÜ, ANKARA

Volkan NALBANTOĞLU[‡]
ODTÜ, ANKARA

Melin ŞAHİN["]
ODTÜ, ANKARA

Fatih Mutlu KARADAL⁺
ODTÜ, ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada, akıllı bir kirişin titreşimlerinin kontrolünde gürbüz (robust) noktasal denetçi ile uzamsal (spatial) denetçinin etkilerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Akıllı kiriş bir kenarı tutturulmuş, diğer kenarı serbest pasif bir alüminyum kirişten ve bunun her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılmış 8 adet Sensortech BM500 tipinde 25mmx20mmx0.5mm ebatlarındaki piezoelektrik yamalardan oluşmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde "Varsayılan-Biçimler" (Assumed-modes) metodu ile modellenen kirişin ilk iki eğilme titreşim biçimini içeren iyileştirilmiş modeli üzerine uzamsal bir denetçi tasarlanmıştır ve bu denetçinin kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerinin kontrolündeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise aynı model üzerine noktasal bir denetçi tasarlanmıştır ve bu denetçinin kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerinin kontrolündeki etkisi incelenmiştir. İki denetçinin de titreşim sönümlemedeki etkinlikleri karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Elastik havacılık yapılarının maruz kaldığı istenmeyen titreşimler bu yapılar için ciddi hasarlar meydana getirebilirler. Bu sebeple istenmeyen titreşimlerin aktif kontrol mekanizmaları vasıtasıyla sönümlenmesi konusu havacılık biliminde uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir alandır. Akıllı malzemelerin uyarıcı ve/veya algılayıcı olarak kullanılmaları aktif titreşim kontrolü alanına yeni bir boyut kazandırmıştır [12].

[†] Havacılık Mühendisi, STM A.Ş. / Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: fkircali@stm.com.tr

^{*} Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: yvaman@metu.edu.tr

[‡] Öğretim Görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: volkan@ae.metu.edu.tr

["] Y. Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: msahin@metu.edu.tr

⁺ Araştırma Görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: karadal@ae.metu.edu.tr

Akıllı yapılar dışarıdan uygulanan bir uyarıyı algılayabilen ve buna aktif denetim mekanizmaları yardımıyla cevap veren yapılardır. Bu yapılar, pasif yapı yüzeyine yapıştırılan ya da içine gömülen birçok aktif parça ve işlemci ağlarından oluşmaktadır. Akıllı yapılarda, algılayıcı ve uyarıcılar yapının aktif parçalarını oluşturmaktadırlar [6].

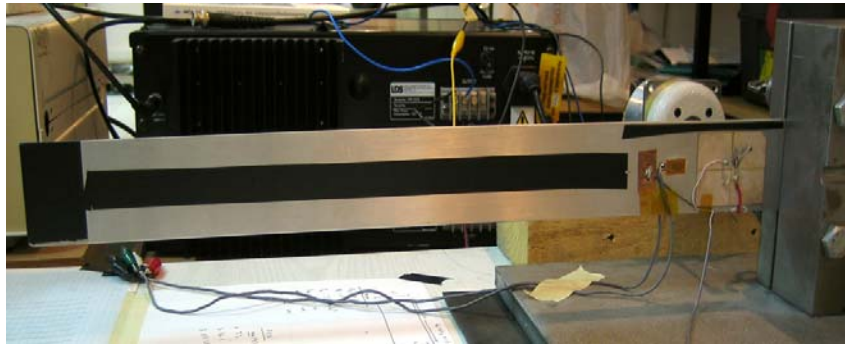
Günümüzde, akıllı yapıların aktif titreşim kontrolü için gürbüz (*robust*) denetçi tasarımı konusu ciddi öneme sahip bir bilimsel çalışma alanıdır. Yaman ve arkadaşları et al. [5,10] H_∞ denetçisinin akıllı bir kirişin ilk iki eğilme titreşim biçimlerinin sönümlenmesindeki etkinliğini çalışmışlardır. Benzer bir çalışmayı akıllı bir plaka için de uygulamışlar ve piezoelektrik uyarıcıların H_∞ denetçisi ile beraber titreşim kontrolünde etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir [9]. Akıllı yapıların titreşimlerinin sönümlenmesinde H_∞ kontrol tekniğinin yanısıra μ -sentez tabanlı denetçilerin de etkin bir şekilde kullanılabilceği Ülker tarafından gösterilmiştir [4].

Bilindiği gibi elastik yapılar bir çok parçacıktan oluşan dağıtık yapılar olarak düşünülebilirler. Bu yüzden, kullanılan denetçi tasarımı tekniğinden bağımsız olarak, yapı üzerinde belirli noktalardaki titreşimlerin sönümlenmesi yerine tüm yapı üzerindeki titreşimlerin sönümlenmesi denetçi tasarımında esas kriter olmalıdır. Moheimani ve Fu [13], ve Moheimani ve arkadaşları [14] uzamsal (*spatial*) titreşim kontrolü için gerekli tasarım kriterlerini karşılayabilmek için uzamsal H_2 ve H_∞ norm kavramlarını tanımlamışlar, aynı zamanda tasarlanan uzamsal denetçinin akıllı bir kirişin titreşimlerinin kontrolündeki etkinliğini benzetimler vasıtasıyla göstermişlerdir. Moheimani ve arkadaşları uzamsal H_∞ denetçi tasarımı probleminin matematiksel manipülasyonlar ile standart H_∞ denetçi tasarımı problemi haline dönüştürülebileceğini göstermişlerdir [11]. Uzamsal denetçilerin deneysel ortamda uygulanmaları Halim [7,8] tarafından çalışılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, bu çalışmalar her iki ucu tutturulmuş sınır durumlarına sahip akıllı bir kiriş ile sınırlı kalmıştır.

Bu çalışmada ankastre sınır durumlarına sahip akıllı bir kirişin ilk iki eğilme titreşimlerinin aktif kontrolü için hem uzamsal hem de noktasal H_∞ denetçilerinin tasarımı, deneysel olarak gerçekleştirimi ve etkinliklerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

AKILLI KİRİŞ SİSTEM MODELİ

Çalışmada kullanılan ve Şekil-1’de gösterilen akıllı kiriş, pasif alüminyum bir kiriş üzerine simetrik olarak yapıştırılmış 8 adet Sensortech BM500 tipinde 25mmx20mmx0.5mm ebatlarındaki PZT (Lead-Zirconate-Titanate) yamalardan oluşmuştur. Piezoelektrik yamalar uyarıcı olarak görev yaparken, algılayıcı olarak Keyence LB-1201(W)LB-300 lazer yardımıyla yer değiştirme ölçüm cihazı kullanılmıştır. Analizlerde akıllı kiriş, ankastre sınır durumlarına sahip şekilde incelenmiştir.



Şekil-1 Çalışmada Kullanılan Akıllı Kirişin Yandan Görünüşü

Akıllı kirişin aktif titreşim kontrolünde öncelikli olarak yapının geçerli bir sistem modeli elde edilmelidir. Sistem modeli elde edilmesi esnasında pasif ve aktif parçaların beraber modellenmeleri sistemin modelinin gerçeğe yakın olmasını sağlar. Elastik yapıların modellenmesinde sonlu elemanlar tekniği, modal analiz veya varsayılan biçimler metodu kullanılabilir [16]. Akıllı kirişin varsayılan biçimler metodu ile modellenmesinden yüksek ölçekli bir sistem modeli elde edilir [2]. Ancak yapısal titreşimleri sönmek için denetçi tasarlanmasındaki amaç genellikle düşük frekanstaki titreşim biçimlerinin sönmelenmesini sağlamaktır. Bu yüzden öncelikle sistem modeli indirgenerek ölçeği küçültülür, daha sonra da indirgenmiş model yüksek frekanstaki titreşim biçimlerinin bir kısmı da modele dahil edilerek iyileştirilir. Çalışmada kullanılan akıllı kirişin varsayılan biçimler metodu ile elde edilen ve kirişin ilk 50 titreşim biçimini içeren yüksek ölçekli sistem modeli, ilk 2 titreşim biçimini içerecek şekilde indirgenmiş; dışarıda bırakılan titreşim biçimlerinin modele olan negatif etkileri model iyileştirme ile giderilmiştir [2]. Aynı zamanda akıllı kirişin rezonans frekanslarının ve modal sönmeme oranlarının tespiti için uzamsal sistem tanımlama metodu kullanılmıştır [3]. Elde edilen rezonans frekansları ve modal sönmeme değerleri Tablo-1'de belirtilmiştir.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ξ_1	ξ_2
Değer	6.742	41.308	0.027	0.008

Tablo-1 Akıllı Kirişin İlk 2 Rezonans Frekans Değeri ve Modal Sönmeme Oranı

Aşağıda akıllı kirişin iyileştirilmiş sistem modeli verilmiştir [1]:

$$\bar{G}_C(s, r) = \sum_{i=1}^2 \frac{\bar{P}_i \phi_i(r)}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} + \sum_{i=3}^{50} \phi_i(r) k_i^{opt} \quad (1)$$

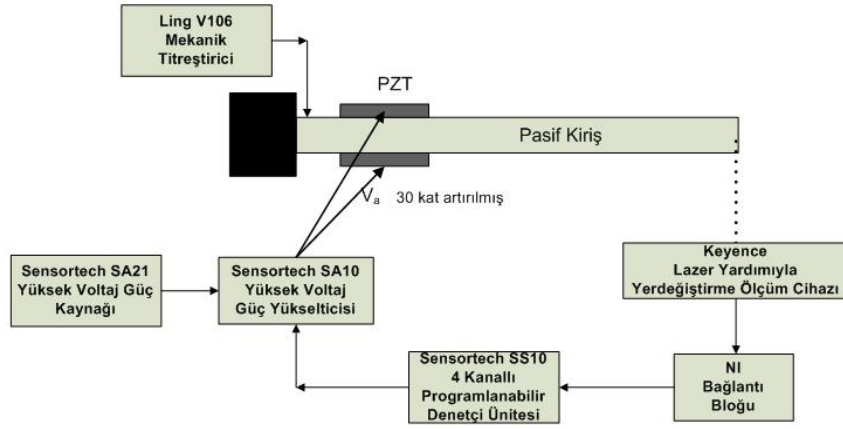
iyileştirme değeri ise:

$$k_i^{opt} = \frac{1}{4\omega_c \omega_i} \frac{1}{\sqrt{1-\xi_i^2}} \ln \left\{ \frac{\omega_c^2 + 2\omega_c \omega_i \sqrt{1-\xi_i^2} + \omega_i^2}{\omega_c^2 - 2\omega_c \omega_i \sqrt{1-\xi_i^2} + \omega_i^2} \right\} \bar{P}_i \quad (2)$$

Burada r boylamasına eksenini, $\bar{G}_C(s, r)$ sistem modelini, $\phi(r)$ pasif kirişin özfonksiyonunu, ω rezonans frekansı, ξ sönmeme oranını, ω_c kesme frekansını ve \bar{P} kuvvet sabitini simgeler. Bu parametrelerin ve ilgili denklemin detayları kaynak [1, 2]'de bulunabilir.

KAPALI DÖNGÜ DENEY DÜZENEĞİ

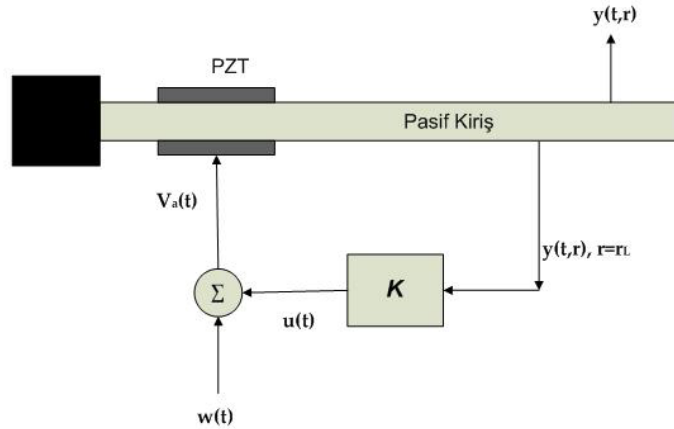
Şekil-2'de akıllı kirişin aktif titreşim kontrolü için kapalı döngü deney düzeneği gösterilmiştir. Akıllı kirişin yerdeğiştirilmesi lazer yardımıyla yerdeğiştirme ölçüm cihazı vasıtasıyla algılanmıştır. Algılanan bu yerdeğiştirme voltaja dönüştürülerek SS10 denetçi ünitesine gönderilmiş, denetçi ünitesinden çıkan uyarıcı voltaj ise 30 kat artırılarak PZT yamalarına uygulanmıştır. Çalışmada kirişin her iki yüzeyindeki PZT yamaları uyarıcı olarak kullanılmıştır. Bu yamalar kiriş üzerinde zıt kutuplu ve çift şekilli (*bimorph*) konfigürasyonda uyarılmışlardır. Böylelikle yamalara uygulanan voltaj kiriş üzerinde istenmeyen titreşimlere ters yönde bir eğilme momenti yaratmakta ve bu titreşimlerin sönmelenmesi sağlanmaktadır.



Şekil-2 Kapalı Döngü Deney Düzeneği

UZAMSAL DENETÇİ TASARIMI

Şekil 3'te uzamsal denetçi tasarımı için kapalı döngü sistem gösterilmiştir. Denetçi tasarımında amaç, sisteme uyarıcı girdisiyle aynı kanaldan giren tahriğin, $w(t)$, tüm kiriş üzerindeki etkisinin PZT yamalar vasıtasıyla azaltılmasıdır.



Şekil-3 Kapalı Döngü Sistem Modeli

Bu sistemin durum-uzay (*state-space*) şeklinde ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ y(t,r) &= C_1(r)x(t) + D_1(r)w(t) + D_2(r)u(t) \\ y(t,r_L) &= C_2x(t) + D_3w(t) + D_4u(t)\end{aligned}\quad (3)$$

Yukarıdaki sistem için uzamsal denetçi tasarımı aşağıda verilen durum-uzay denklemleriyle ifade edilir:

$$\begin{aligned}\dot{x}_k(t) &= A_k x_k(t) + B_k y(t, r_L) \\ u(t) &= C_k x_k(t) + D_k y(t, r_L)\end{aligned}\quad (4)$$

Bu uzamsal denetçi etkisinde çalışan kapalı döngü sistemin aşağıdaki maliyet eşitliğini karşılaması tasarım kriteridir:

$$\inf_{K \in U} \sup_{w \in L_2[0, \infty)} J_\infty < \gamma^2 \quad (5)$$

Burada J_∞ sistemin maliyet denklemini, γ ise maliyet denklemini için üst sınırı belirleyen sabit sayıyı ifade eder.

$$J_\infty = \frac{\int_0^\infty \int_R y(t, r)^T Q(r) y(t, r) dr dt}{\int_0^\infty w(t)^T w(t) dt} \quad (6)$$

Maliyet denklemini (6)'da bulunan $Q(r)$ ifadesi uzamsal ağırlık fonksiyonudur ve giriş üzerinde titreşimlerin sönümleneceği alanı belirler. Bu çalışmada $Q(r)$ fonksiyonu sabit 1 değeri olarak seçilmiştir. Böylelikle tüm giriş üzerinde titreşim sönümlenmesi hedeflenmiştir.

Uzamsal H_∞ denetçisi tasarımı matematiksel manipülasyonlar sonucunda standart H_∞ denetçisi haline dönüştürülmektedir [11]. Bu durumda maliyet denkleminin pay ifadesi aşağıdaki hali alır:

$$\int_0^\infty \int_R y(t, r)^T Q(r) y(t, r) dr dt = \int_0^\infty \tilde{y}(t)^T \tilde{y}(t) dt \quad (7)$$

Nihai denetçi tasarımı problemi aşağıdaki durum-uzay denklemiyle ifade edilir. Dikkat edilmesi gereken nokta sistem girdisinin sınırlarını belirleyici bir kontrol ağırlığının, κ , sistem modeline dahil edilmesidir. Kontrol ağırlığının olmadığı veya sıfır olduğu durumda tasarım sonsuz ölçekli bir denetçinin elde edilmesine yol açmaktadır. Kontrol ağırlığının küçüklüğü denetçi ölçeğinin büyüklüğüyle ters orantılı iken titreşim sönümlenme miktarı ile doğru orantılıdır [11]. Bu yüzden, hem yeterli titreşim sönümlenmesi elde edilmesi hem de denetçinin uygulanabilirliğinin sağlanması için kontrol ağırlığının optimum değeri tasarımcı tarafından belirlenmelidir.

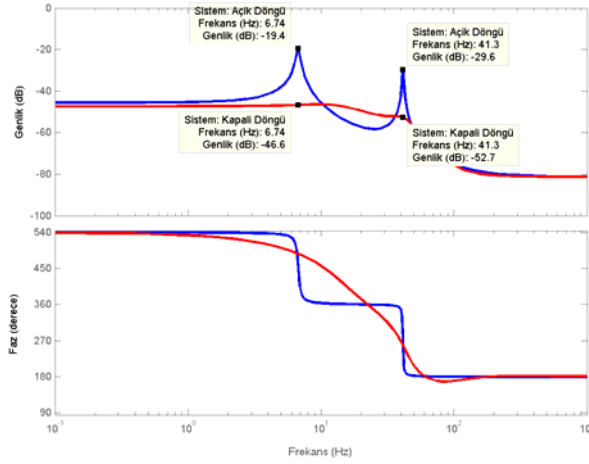
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ \tilde{y}(t) &= \begin{bmatrix} \Pi \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \kappa \end{bmatrix} u(t) \\ y(t, r_L) &= C_2 x(t) + D_3 w(t) + D_4 u(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Bu çalışmada uzamsal denetçi tasarımı için ilgili sistemin durum-uzay parametreleri aşağıdadır. Bu parametrelerin ve denklem (8)'in detaylı çıkarımı kaynak [1]'de verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & 0 & -2\xi_1\omega_1 & 0 \\ 0 & -\omega_2^2 & 0 & -2\xi_2\omega_2 \end{bmatrix}, B_1 = B_2 = [0 \quad 0 \quad \bar{P}_1 \quad \bar{P}_2]^T, C_2 = [\phi_1(r_L) \quad \phi_2(r_L) \quad 0 \quad 0],$$

$$D_3 = D_4 = \sum_{i=3}^{50} \phi_i(r_L) k_i^{opt}, \Pi = \begin{bmatrix} L_b^{3/2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_b^{3/2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Theta_1 = \Theta_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \left(\sum_{i=3}^{50} L_b^3 (k_i^{opt})^2 \right)^{1/2} \end{bmatrix} \text{ ve } \kappa = 7.87 \times 10^{-7}$$

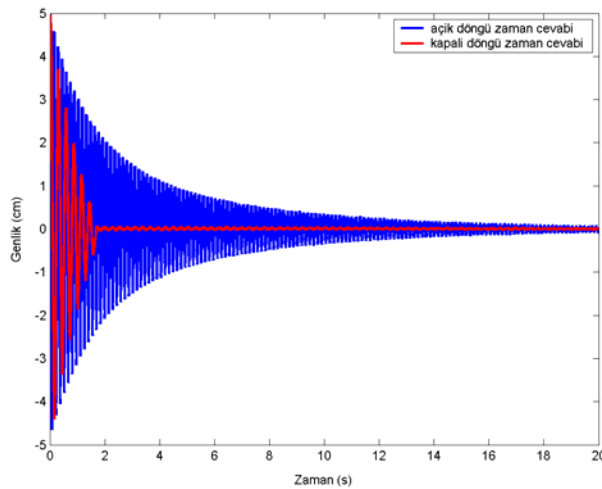
Tasarlanan uzamsal H_∞ denetçisinin akıllı kirişin ilk iki eğilme titreşim biçiminin sönümlenmesindeki etkinliği Şekil-4'te gösterilmiştir.



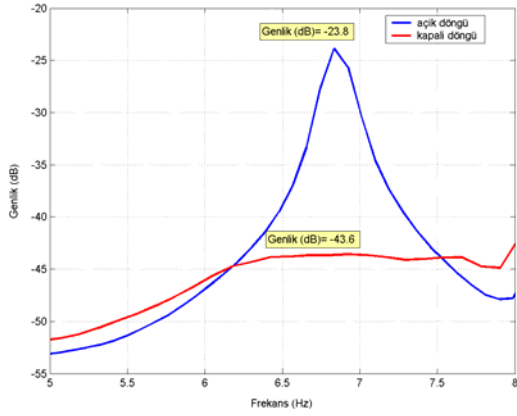
Şekil-4 Uzamsal Denetçinin Etkisinde Açık ve Kapalı Döngü Sistem Modelleri

Uzamsal H_∞ denetçisinin akıllı kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Serbest titreşimler için kirişe uç noktasından 5 cm'lik bir yerdeğiştirme verilmiş ve bu girdiye sistemin verdiği zaman cevapları açık ve kapalı döngü olarak ölçülmüştür. Serbest titreşimlerin uzamsal denetçi etkisinde yaklaşık olarak 1.7 saniye içerisinde sönümlendiği gözlemlenmiştir. Şekil-5'te sistemin cevapları görülmektedir. Şekil-5'te de görüleceği üzere akıllı kirişin serbest titreşimlerinin kontrolünde uzamsal denetçi bir hayli etkilidir.

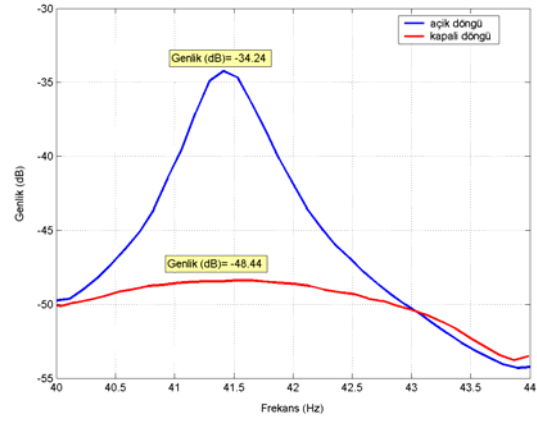
Zorlanmış titreşimlerin sönümlenmesinde ise kiriş 180 saniye boyunca mekanik bir titreştirici tarafından titreştirilmiş, sistemin açık ve kapalı döngü frekans cevapları incelenmiştir. Mekanik titreştirici üzerine 4.5 Volt büyüklüğünde voltaj uygulanmış ve sistem ilk iki rezonans frekansını içerecek şekilde 5-8 Hz ve 40-44 Hz frekans aralıklarında çalışması sağlanmıştır. Sistemin açık ve kapalı döngü frekans cevapları Şekil-6 da gösterilmiştir. Şekil-6'da da görüleceği gibi uzamsal denetçinin etkisinde akıllı kirişin ilk eğilme titreşiminde 19.8 dB, ikinci eğilme titreşiminde ise 14.2 dB'lik sönümlenme kaydedilmiştir.



Şekil-5 Uzamsal Denetçinin Etkisinde Akıllı Kirişin Serbest Titreşimlerinin Açık ve Kapalı Döngü Zaman Cevapları



a) 5-8 Hz

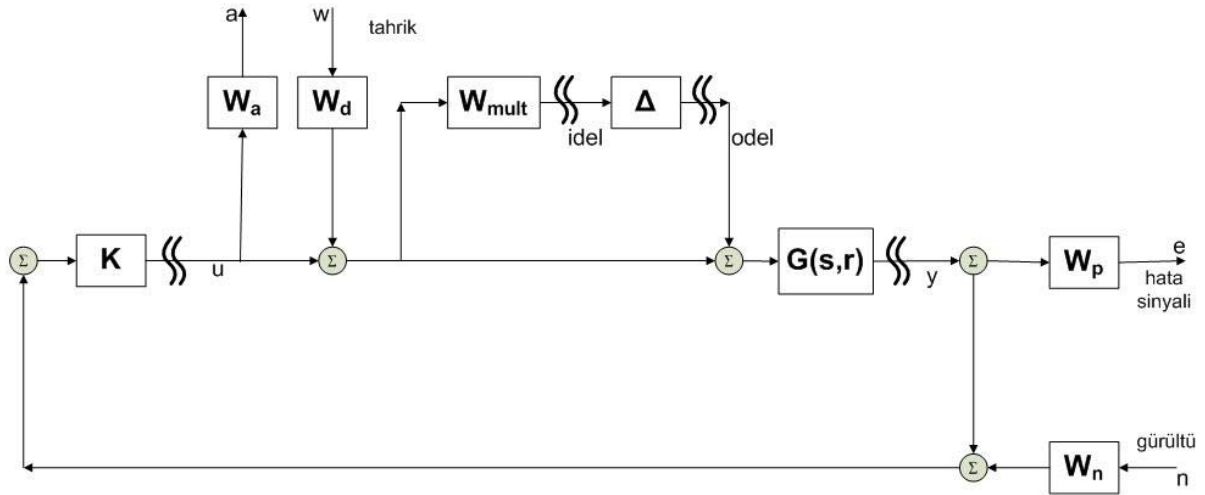


b) 40-44 Hz

Şekil-6 Uzamsal Denetçinin Etkisinde Akıllı Kirişin Zorlanmış Titreşimlerinin Açık ve Kapalı Döngü Frekans Cevapları

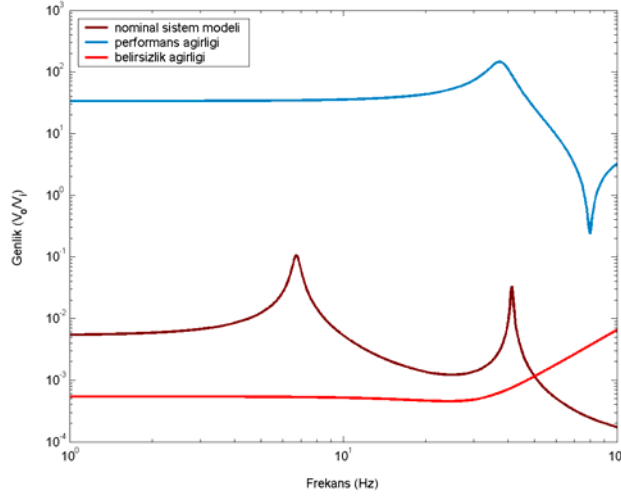
NOKTASAL DENETÇİ TASARIMI

Noktasal denetçi tasarımı için kullanılan genel blok diyagramı Şekil-7'de gösterilmiştir. Burada $G(s, r)$ akıllı kiriş sistem modelini simgeler. Sisteme giriş yapan tahriğin seviyesi tahrik ağırlığı W_d ile kontrol edilir. W_a uyarıcının satürasyonunu önleyici sınır değerini ifade eder. Modelleme esnasında dışarıda bırakılan sistemin yüksek frekanslardaki dinamikleri sistem modeline belirsizlik olarak eklenir ve W_{mult} ile gösterilir. W_p sistemden beklenen performans özelliklerini, W_n ise algılayıcı ölçümlerini etkileyen gürültü sınırını belirler.



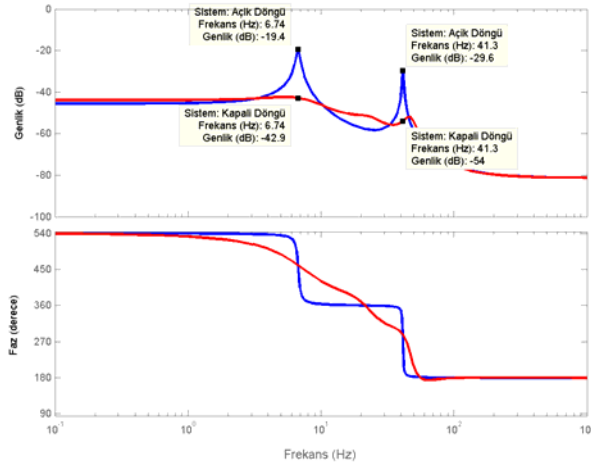
Şekil-7 Noktasal Denetçi için Blok Diyagram

Tasarlanan noktasal H_∞ denetçisi için $W_d = 1$, $W_n = 0.01$ ve $W_a = 0.2$ seçilmiş, performans ve belirsizlik ağırlıkları ise Şekil-8'de gösterilmiştir.



Şekil-8 Performans ve Belirsizlik Ağırlıkları

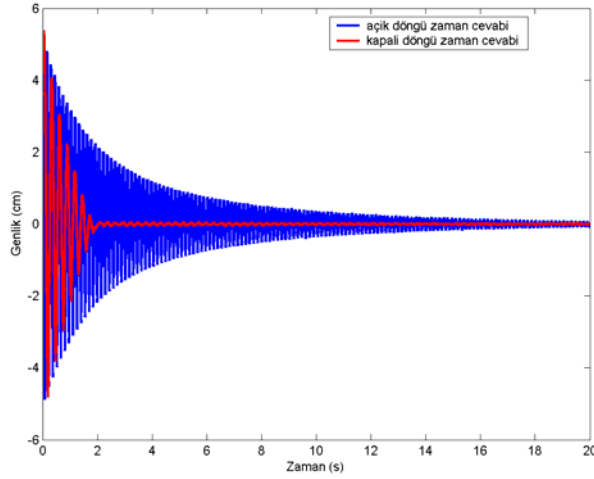
Noktasal H_{∞} denetçisinin akıllı kirişin ilk iki eğilme titreşim biçiminin sönümlenmesindeki etkinliği Şekil-9'da gösterilmiştir.



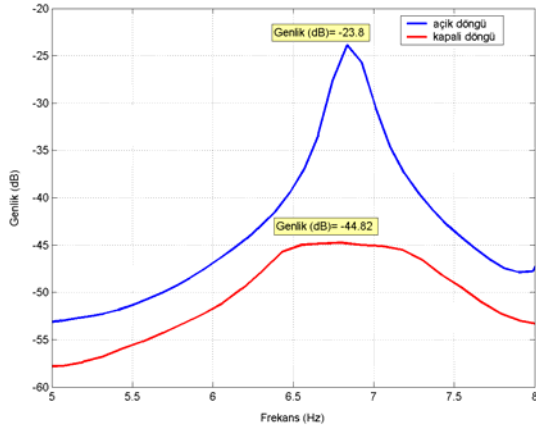
Şekil-9 Noktasal Denetçinin Etkisinde Açık ve Kapalı Döngü Sistem Modelleri

Noktasal H_{∞} denetçisinin akıllı kirişin serbest ve zorlanmış titreşimlerine etkisi de deneysel olarak incelenmiştir. Serbest titreşimler için uzamsal denetçi tasarımında olduğu gibi kirişe uç noktasından 5 cm'lik bir yerdeğiştirme verilmiş ve bu girdiye sistemin verdiği zaman cevapları açık ve kapalı döngü olarak ölçülmüştür. Serbest titreşimlerin noktasal denetçi etkisinde yaklaşık olarak 1.9 saniye içerisinde sönümlendiği gözlemlenmiştir. Şekil-10'da sistemin cevapları görülmektedir.

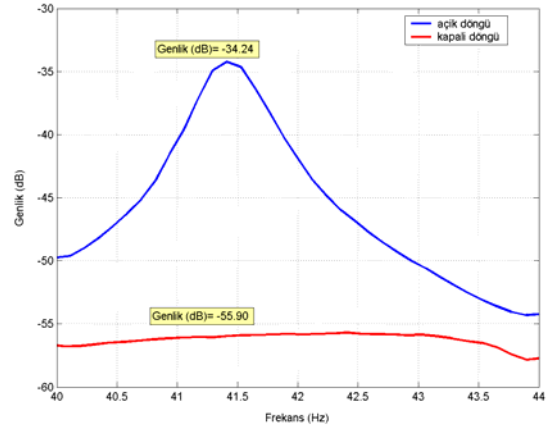
Zorlanmış titreşimlerin sönümlenmesinde de uzamsal denetçi tasarımında olduğu gibi kiriş 180 saniye boyunca mekanik bir titreştirici tarafından titreştirilmiş, sistemin açık ve kapalı döngü frekans cevapları incelenmiştir. Sistemin açık ve kapalı döngü frekans cevapları Şekil-11'de gösterilmiştir. Şekil-11'de de görüleceği gibi noktasal denetçinin etkisinde akıllı kirişin ilk eğilme titreşiminde 21.02 dB, ikinci eğilme titreşiminde ise 21.66 dB'lik sönümlenme kaydedilmiştir.



Şekil-10 Noktasal Denetçinin Etkisinde Akıllı Kirişin Serbest Titreşimlerinin Açık ve Kapalı Döngü Zaman Cevapları



a) 5-8 Hz



b) 40-44 Hz

Şekil-11 Noktasal Denetçinin Etkisinde Akıllı Kirişin Zorlanmış Titreşimlerinin Açık ve Kapalı Döngü Frekans Cevapları

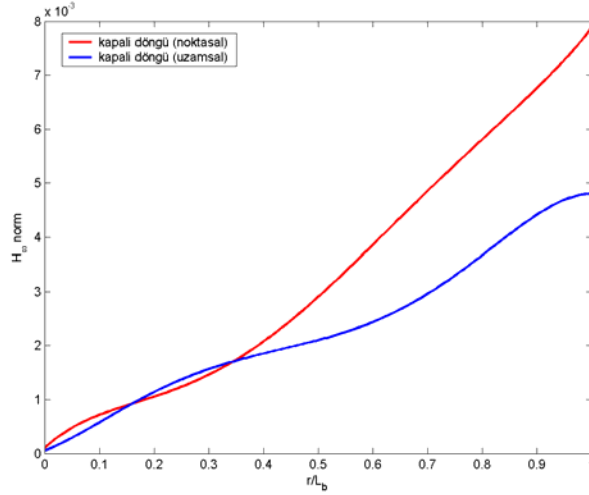
NOKTASAL ve UZAMSAL DENETÇİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Uzamsal ve noktasal H_{∞} denetçilerinin akıllı kirişin ilk iki eğilme titreşim biçiminin sönümlenmesindeki etkinlikleri Tablo-2'de özetlenmiştir.

	Uzamsal H_{∞} denetçisi		Noktasal H_{∞} denetçisi	
	1. titreşim biçimi	2. titreşim biçimi	1. titreşim biçimi	2. titreşim biçimi
Benzetim (dB)	27.2	23.1	23.5	24.4
DeneySEL (dB)	19.8	14.2	21.02	21.66

Tablo-2 Denetçilerin Akıllı Kirişin İlk 2 Eğilme Titreşimlerini Sönümleme Miktarları

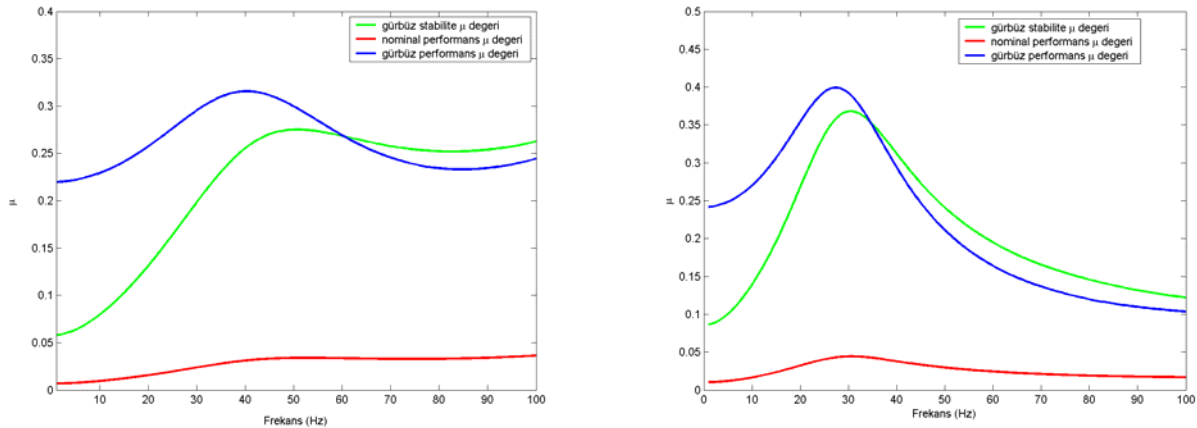
Benzetimler ve deneysel uygulamalar her iki denetçinin de akıllı kirişin ilk iki eğilme titreşimlerinin sönümlenmesinde bir hayli etkili olduklarını göstermiştir. Zorlanmış titreşimlerin sönümlenmesinde noktasal denetçinin çok az da olsa daha etkin olduğu Tablo-2'de görülmektedir. Bu durum, noktasal denetçinin tasarım kriterinin sadece o noktadaki titreşimlerin sönümlenmesi olduğundan, beklenen bir durumdur. Her iki denetçinin tüm kiriş üzerindeki titreşimleri sönümlemedeki etkisi bütün kirişin H_∞ norm dağılımı ile anlaşılabilir.



Şekil-12 Akıllı Kirişin Noktasal ve Uzamsal Denetçilerin Etkisinde H_∞ Norm Dağılımı

Şekil-12'de bütün kirişin H_∞ norm dağılımı kirişin uzunluğuna, L_b , göre normalize edilmiş halde gösterilmiştir. Şekil-12'de görüleceği gibi, uzamsal denetçi tüm kiriş üzerindeki titreşimlerin sönümlenmesinde noktasal denetçiye göre çok belirgin olmamakla birlikte daha etkin çalışmaktadır. Bu etkinin fazlaca belirgin olmamasındaki sebep ankastre sınır durumlarına sahip yapıların titreşimlerinin kontrolünde, yerdeğiştirmenin en fazla olduğu uç noktaya göre tasarlanan noktasal denetçinin de yeterli etkinliğe ulaşabilmesidir.

Denetçilerin belirsizliklere karşı tutarlı davranmaları, yani gürbüz (*robust*) bir karakteristiğe sahip olmaları da önemli bir tasarım kriteridir. Denetçiler sisteme dahil edilen belirsizliklere karşı, kontrol edilen sistemin dengeli (*robust stable*) ve performanslı (*robust performance*) davranış göstermesini garanti etmelidirler. Bu durum μ -sentez yöntemiyle analiz edilebilir. μ değerlerinin 1'den küçük olmaları sistemin gürbüzlüğü için gerekli kriterdir [15]. Tasarlanan denetçilerin gürbüz olduğu Şekil-13'te gösterilmiştir.



a) Noktasal

b) Uzamsal

Şekil-13 Noktasal ve Uzamsal Denetçilerin μ Analizi

SONUÇ

Bu çalışmada akıllı bir kirişin ilk iki eğilme titreşimlerinin aktif kontrolünde uzamsal ve noktasal denetçilerin etkinlikleri çalışılmıştır. Her iki tip denetçinin titreşim sönümlemedeki etkinlikleri benzetimler ve deneysel uygulamalarla gösterilmiştir. Uzamsal denetçinin tüm kiriş üzerindeki titreşimlerin sönümlenmesinde noktasal denetçiye kıyasla daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kırçalı Ö.F., *Active Vibration Control of a Smart Beam: a Spatial Approach*, M.S. Thesis, Middle East Technical University
- [2] Kırçalı Ö.F., Yaman Y., Nalbantoğlu V., Şahin M., Karadal F.M., *Akıllı bir Kirişin Varsayılan Biçimler Metodu ile Uzamsal Sistem Modelinin Elde Edilmesi ve Elde Edilen Modelin İyileştirilmesi*, Kayseri VI. Havacılık Sempozyumu, Mayıs 12-14, 2006, Nevşehir, Türkiye
- [3] Kırçalı Ö.F., Yaman Y., Nalbantoğlu V., Şahin M., Karadal F.M., Ülker F.D., *Akıllı bir Kirişin Uzamsal Sistem Modelinin Elde Edilmesi*, Kayseri VI. Havacılık Sempozyumu, Mayıs 12-14, 2006, Nevşehir, Türkiye
- [4] Ülker F.D., *Active Vibration Control of Smart Structures*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, September 2003.
- [5] 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, Paper A5.3, Prague, Czech Republic, 01-04 June, 2003
- [6] Çalışkan T., *Smart Materials and Their Applications in Aerospace Structures*, PhD Thesis, Middle East Technical University, September 2002
- [7] Halim D., Moheimani S.O.R., *Experimental Implementation of Spatial H_{∞} Control on a Piezoelectric Laminate Beam*, September 2002, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No: 3
- [8] Halim D., Moheimani S.O.R., *Spatial H_2 Control of a Piezoelectric Laminate Beam: Experimental Implementation*, July 2002, *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 10, No: 4
- [9] Yaman Y., Çalışkan T., Nalbantoğlu V., Ülker F. D., Prasad E., Waechter D., Yan B., *Active Vibration Control of Smart Plates by Using Piezoelectric Actuators*, ESDA2002, 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Paper APM-018, Istanbul, Turkey, July 8-11, 2002.
- [10] Yaman Y., Çalışkan T., Nalbantoğlu V., Prasad E., Waechter D., Yan B., *Active Vibration Control of a Smart Beam*, Canada-US CanSmart Workshop on Smart Materials and Structures, Montreal, Canada Proceedings pp:137-147, 2001
- [11] Moheimani S.O.R., Petersen I.R., Pota H.R., *Broadband Disturbance Attenuation over an Entire Beam*, *Journal of Sound and Vibration* 227(4): 807-832, 1999
- [12] Prasad S.E., Ahmad A., Wheat T.A., *The Role of Smart Structures in Robotics*, Canada-US CanSmart Workshop on Smart Materials and Structures, Quebec, Canada Proceedings pp:133-147, 1998

- [13] Moheimani S.O.R, Fu M., *Spatial H_2 Norm of Flexible Structures and its Application in Model Order Selection*, International Proceedings of 37th IEEE Conference on Decision and Control, Tampa Florida, USA, 1998
- [14] Moheimani S.O.R., Pota H.R., Petersen I.R., *Spatial Balanced Model Reduction for Flexible Structures*, Proceedings of the American Control Conference, pp. 3098-3102, Albuquerque, New Mexico, June 1997
- [15] Skogestad S., Postlethwaite I., *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons Ltd., 1996
- [16] Meirovitch L., *Elements of Vibration Analysis*, The McGraw-Hill Company, 1986