



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

AKILLI BİR KİRİŞİN TİTREŞİMLERİNİN DOĞRUSAL KARESEL DÜZENLEYİCİ (LQR) İLE AKTİF DENETİMİ

Onur Akın¹ ve Melin Şahin²

^{1,2} Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ABSTRACT

In this study, active vibration control of a smart beam equipped with piezoelectric patches which are used as both sensor and actuator is investigated by using linear quadratic regulator (LQR) method. Frequency response function that includes the first natural frequency of the smart beam is obtained by applying exponential sine wave within the specified frequency range to the piezoelectric actuator patch and measuring the response of the system from another piezoelectric patch as a sensor. Then, by using the obtained frequency response function and MATLAB software, an analytic model which characterize the dynamic system of the smart beam is determined. Free and forced vibration control performances of the linear quadratic controllers which are obtained by using different Q and R parameters are tested and compared on Simulink software. Furthermore, by using the best controller which is obtained by considering the output voltage of the controller, an experimental study is conducted. Finally, the experimental results are compared with the simulation outputs.

ÖZET

Bu bildiride, piezoelektrik yamaların hem algılayıcı hem de uyarıcı olarak kullanıldığı akıllı bir kirişin titreşimlerinin lineer karesel düzenleyici (LQR) metodu kullanılarak aktif denetimi incelenmiştir. Akıllı kirişin birinci rezonans frekansını kapsayan frekans cevap fonksiyonu, uyarıcı piezoelektrik yamaya belli frekans aralığında üssel olarak sinüs dalgası verilerek ve algılayıcı olarak kullanılan piezoelektrik yama yardımıyla sistemin tepkisi ölçülerek elde edilmiştir. Ardından bu frekans cevap fonksiyonu kullanılarak, MATLAB programı yardımıyla akıllı kirişin dinamik özelliğini karakterize eden bir analitik modeli ortaya çıkartılmıştır. Farklı Q ve R parametreleri kullanılarak elde edilen (LQR) denetçilerin, Simulink ortamında serbest ve zorlanmış titreşimlerini bastırma performansları test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ek olarak, kontrolcü çıkış voltajı da gözönüne alınarak elde edilen en iyi kontrolcü de kullanılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Son olarak, deney sonuçları benzetim çıktılarıyla karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Havacılık ve uzay yapılarında esneklik, hafiflik ve dayanıklılık en önemli kriterlerdir ve bu kriterlerin sağlanması genellikle istenmeyen titreşimlerin oluşmasına da sebep olmaktadır. Bu titreşimler, yapının sağlığında olumsuz etkiler yaratarak servis ömrünün kısılmasına,

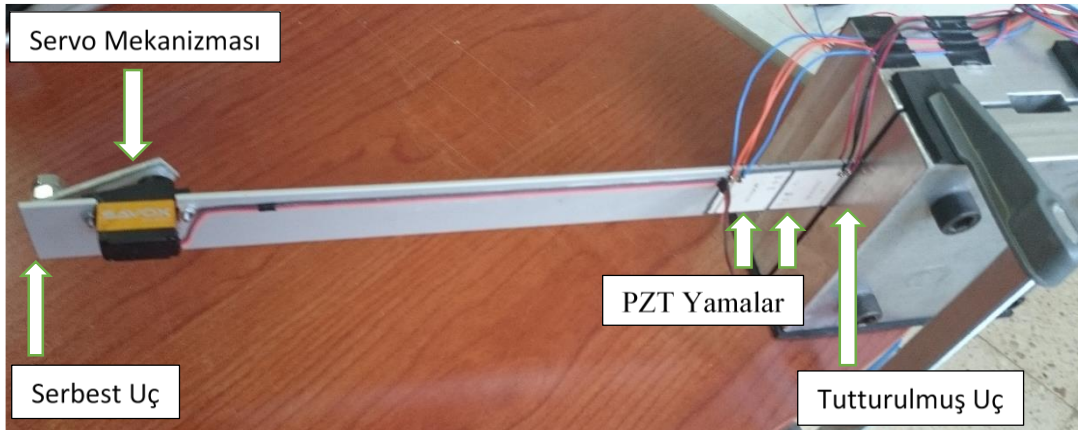
gürültüye, verimliliğin azalmasına, bu bağlamda çevre kirliliğine, yolcu sağlığının olumsuz etkilenmesine vb. olumsuzluklara neden olmaktadır [1]. Yapıların titreşimlerinin sönümlenmesinde aktif ve pasif olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır ancak, düşük frekans ve yüksek genlik uygulamaları için pasif sönümlenme uygun bir yöntem olarak değerlendirilmemektedir [1]. Aktif kontrol uygulamalarında piezoelektrik malzemeler uygun maliyetli çözümler sunmakta ve bu yüzden kullanımları hızla artmaktadır. Piezoelektrik malzemeler, boyutsal değişikliklere zorlandıklarında elektrik sinyalleri ürettikleri gibi voltaj farkına maruz bırakıldıklarında da boyutsal olarak değişim meydana getirmektedirler. Bu özellikler piezoelektrik malzemelerin hem uyarıcı, hem de algılayıcı olarak kullanımına olanak sağlamaktadır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü bünyesinde daha önce teorik ve deneysel olarak yapısal modal karakteristiklerinin bulunmasına ve aktif titreşim kontrolüne yönelik çalışmalar [2] yapılmıştır. PZT (Lead Zirconate Titanate) yamaların uyarıcı ve algılayıcı olarak kullanıldığı denetçi uygulamalarında akıllı kirişin titreşimlerinin aktif kontrolünde etkin bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Akıllı kiriş üzerinde aktif titreşim sönümlenmesine yönelik birçok denetçi tasarımı da yapılmıştır. Performansları incelenmiş olan denetçiler arasında H_∞ [3], PID [4], LQG [5], CFE [6] ve LPV [7] sayılabilir. Ayrıca yapılan bir çalışmada [8] ise, bir Q ve R parametresi seçimi sonucunda ortaya çıkan LQR denetçi kullanılmış ve uygulanmıştır.

Bu çalışmada ise, titreşim sönümlenmesinde farklı Q ve R parametreleri kullanılarak tasarlanan doğrusal karesel düzenleyici (LQR) denetçilerinin performansları ve denetçi çıkış voltajları da incelenmektedir. İlk olarak akıllı kirişin analitik sistem modeli çıkarılmış, daha sonra denetçi tasarlanmış, akıllı kirişin serbest ve zorlanmış titreşim sonuçları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

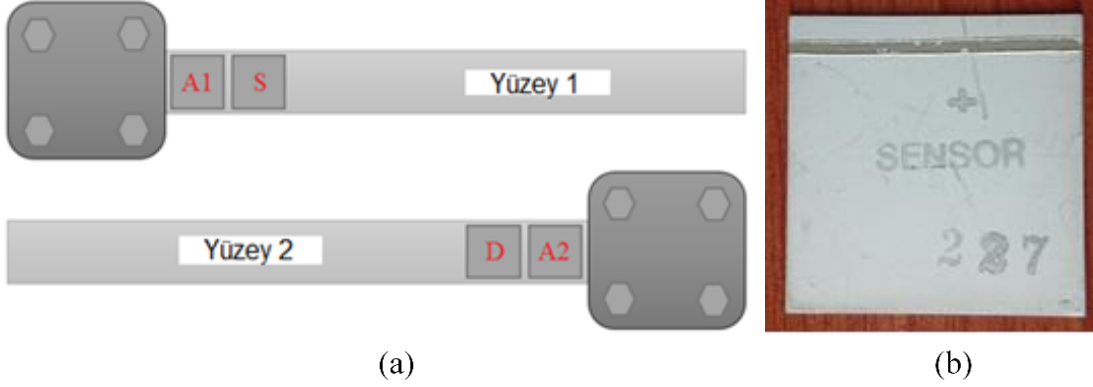
AKILLI KİRİŞ MODELİ

Akıllı kiriş (Şekil 1) bir ucu tutturulmuş, diğer ucu serbest olan 350x30x2 mm boyutlarında alüminyum malzemeden oluşmaktadır. Üzerine Şekil 2 (b)'de görülen 25.37x25.37x0.50 mm boyutlarında BMP500 tipi PZT yamadan simetrik olarak ikisi bir yüzeyde, ikisi diğer yüzeyde olmak üzere 4 adet yapıştırılmıştır. Bu piezoelektrik yamalar kullanım amaçlarına göre A1, A2, D, S şeklinde adlandırılmıştır (Şekil 2 (a)). A1 ve A2 kontrol piezoelektrik yamaları olarak kullanılmış ve daha güçlü etki sağlaması amacıyla bimorf konfigürasyonunda bağlanmıştır. Algılayıcı olarak S, uyarıcı olarak D ile adlandırılmış piezoelektrik yamalar kullanılmıştır.



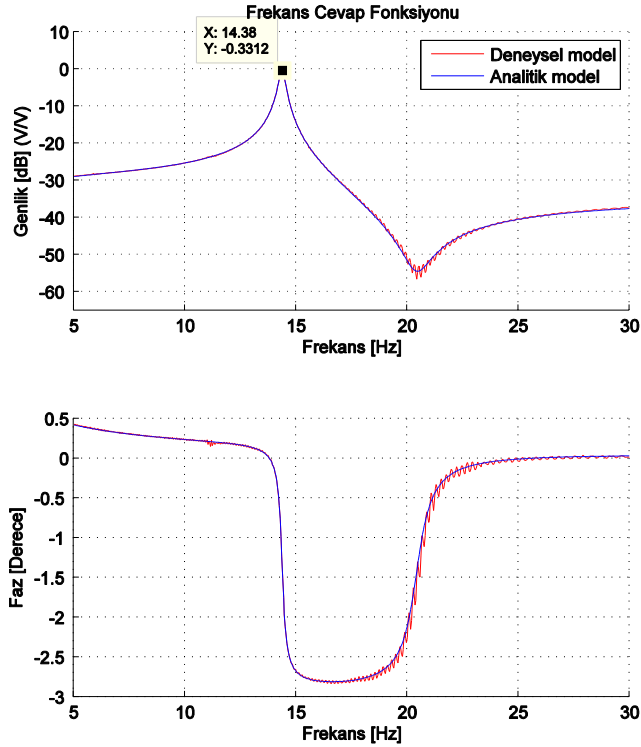
Şekil 1 Akıllı Kiriş

Akıllı kirişin uç kısmında ağırlık değişiminin frekans cevaplarına etkisini görmek amacıyla kurulmuş bir servo mekanizması da bulunmaktadır. Bu çalışmada servo kolundaki ağırlık sabit bir konumda tutulmaktadır.



Şekil 2 (a) PZT Yama Adları (b) BMP500 Tipi PZT Yama

A1 ve A2 piezoelektrik yamalarına 5 Hz – 30 Hz frekans aralığında üssel artan sinüs dalgalarıyla uyarılmış ve algılayıcı olarak kullanılan S piezoelektrik yaması ile sistemin cevabı ölçülmüştür. Bu giriş-çıkış verileri, MATLAB programı yardımıyla hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak frekans cevap fonksiyonuna çevrilmiştir. Şekil 3’de akıllı kirişin deneysel ve analitik frekans cevap fonksiyonları gösterilmiş ve akıllı kirişin ilk rezonans frekansı 14.38 Hz olarak bulunmuştur.



Şekil 3 Akıllı kirişin deneysel ve analitik modellerinin frekans cevapları

Denklem 1, akıllı kirişin elde edilen 3. dereceden transfer fonksiyonunu göstermektedir.

$$G(s) = \frac{0.01879 s^3 + 0.1993 s^2 + 310.7 s + 1269}{s^3 + 20.58 s^2 + 8214 s + 1.539 \times 10^5} \quad (1)$$

DENETÇİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Doğrusal karesel düzenleyici (LQR) denetçisi optimal bir kontrolcü yaklaşımı olup, kontrol çıkışı tüm durum uzayı parametreleri fonksiyonudur. Doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistemde durum uzayı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

Burada, x: durum vektörü, u: kontrol vektörü, y: çıkış vektörü, A: sistem matrisi, B: giriş matrisi, C: çıkış matrisi ve D: doğrudan iletim matrisidir. Denklem 1’de verilen akıllı girişin transfer fonksiyonu durum uzayına çevrilmiş ve A, B, C, D matrisleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$A = \begin{bmatrix} -20.5771 & -64.1702 & -37.5772 \\ 128.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 32.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [-0.1875 \quad 1.2215 \quad -0.3964]$$

$$D = 0.0188$$

Denetçi tasarlamadan önce sistemin kontrol edilebilirliğinin doğrulanması da gerekmektedir. Sistemin tüm durum uzayı parametreleriyle kontrol edilebilir olması için kontrol edilebilirlik matrisinin rankının, sistemin durum parametre sayısına (yani 3 e) eşit olması gerekmektedir. Kontrol edilebilirlik matrisi Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$C = [A|AB|A^2B| \dots |A^{n-1}B] \quad (2)$$

LQR denetçisinin yapısı karesel maliyet fonksiyonunu minimum yapacak şekilde tasarlanan bir durum geribeslemeli kontrol yöntemidir. Denklem 3’te karesel maliyet fonksiyonu gösterilmiştir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (3)$$

Burada Q pozitif tanımlı, R pozitif yarı tanımlı ağırlık matrisler, x durum vektörü, u ise giriş vektörüdür. Geribeslemeli kontrol kuralı ve geribesleme kazanç vektörü K aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$u = -Kx \quad K = R^{-1}B^T P$$

Kazanç vektöründe yer alan P, Riccati denkleminde elde edilir ve bu denklem Denklem (4)'te gösterilmiştir.

$$A^T P + PA - BPR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4)$$

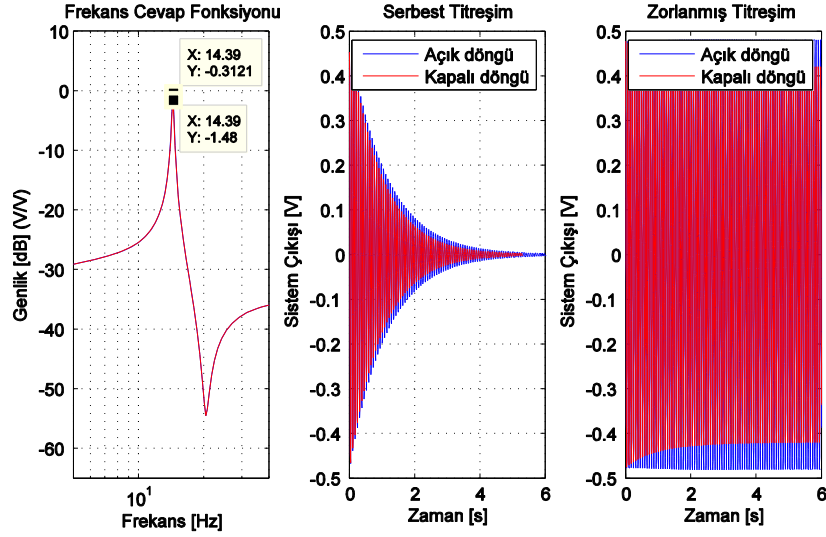
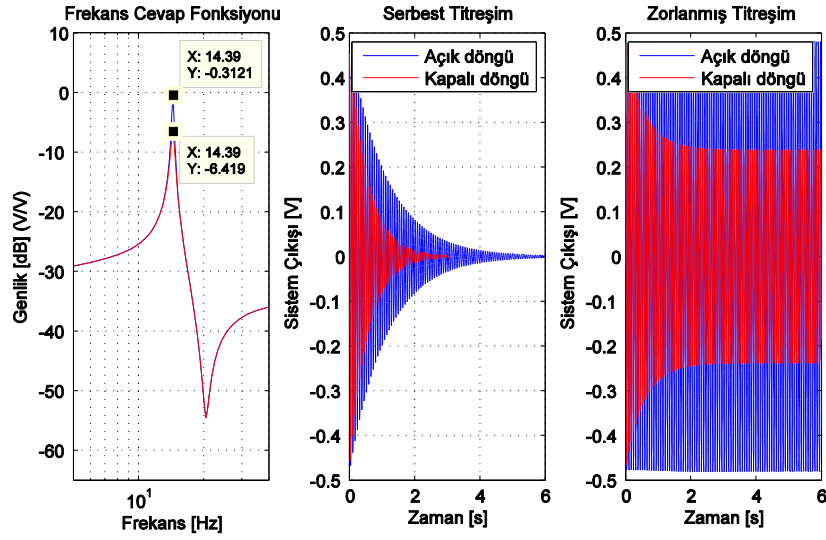
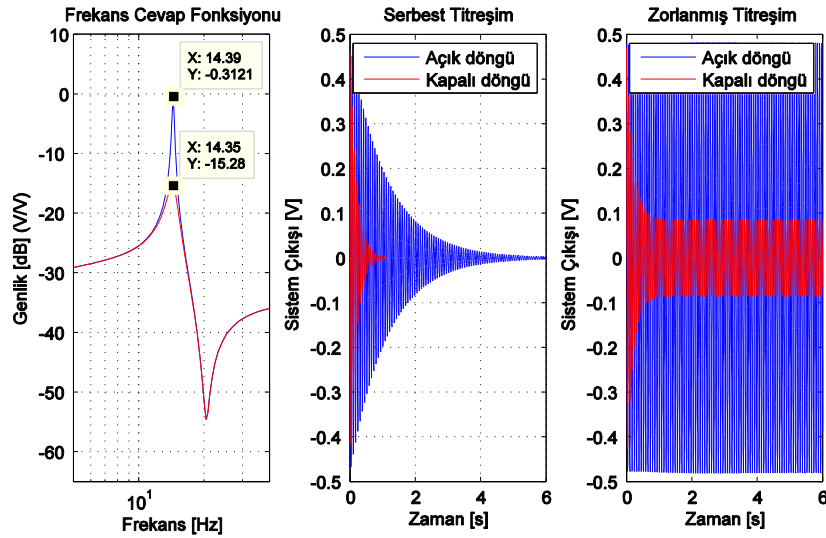
Geribesleme kazanç vektörü K, Q ve R parametreleri kullanılarak elde edilmektedir. Bu çalışmada Q ve R parametreleri şu şekilde seçilmiştir.

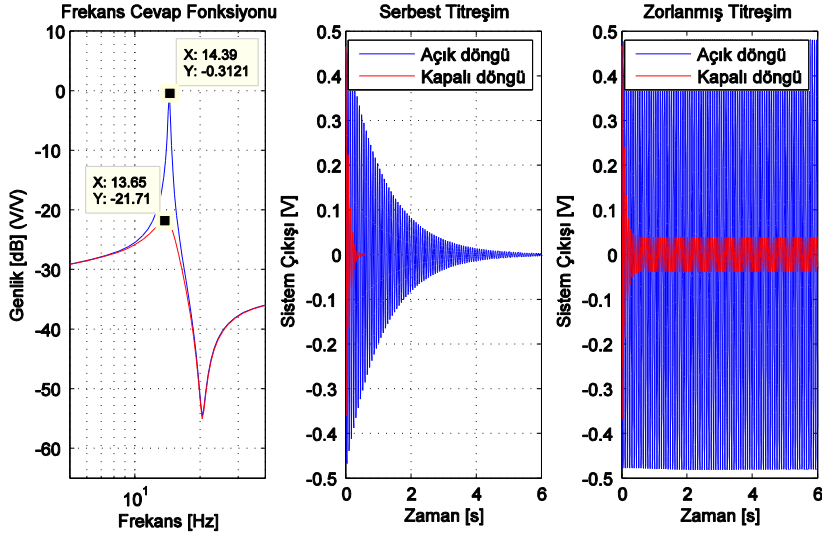
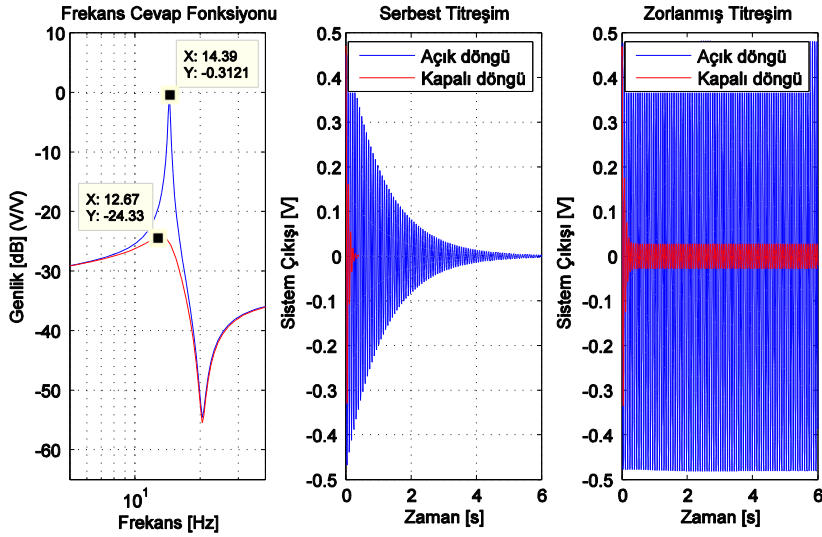
$$Q = \alpha \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \beta$$

Farklı alfa ve beta değerleri verilerek kontrolcünün performansı ve akıllı kirişin ilk rezonans frekansında (14.38 Hz) serbest ve zorlanmış titreşimlerinin sönümlenmesi gözlenmiştir. Serbest titreşimlerin benzetimi için sistem modeline ilk rezonans frekansında (14.38 Hz) ± 0.5 Volt sinüs dalgası uygulanmış ve sistem çıktısının sabit genliğe ulaştığındaki (± 0.48 Volt) herhangi bir değerinin durum parametreleri (Denklem 5) kaydedilmiştir. Bu durum parametreleri sistemin başlangıç koşuluna göre serbest titreşim hareketini izlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, titreşimlerin sönümlenme benzetim çalışmalarında sisteme ± 0.5 Volt sinüs dalgası uygulanmış ve kontrolcü, sistem ± 0.48 Volt (algılayıcı piezoelektrik yamadan ölçülen) değerinde sinüs dalgası ile 14.38 Hz frekansında zorlanırken çalıştırılmıştır.

$$x_{\text{başlangıç}} = \begin{bmatrix} -4.5930 \times 10^{-4} \\ 0.0031 \\ 5.6389 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Benzetim çalışmalarında alfa değeri 1 sabit olarak alınmış ve beta değerleri 1'den başlatılarak azaltılmıştır. 5 farklı parametre ile benzetim yapılmış ve sonuçları (Şekil 4'ten 8'e kadar) gösterilmiştir. Ayrıca, en yüksek kontrolcü çıkış voltajı her benzetim için bulunmuş ve giriş/çıkış modülünün limitiyle karşılaştırmak amacıyla kaydedilmiştir.

Şekil 4 Senaryo 1'in ($\alpha=1$, $\beta=1$) benzetim sonuçlarıŞekil 5 Senaryo 2'nin ($\alpha=1$, $\beta=0.1$) benzetim sonuçlarıŞekil 6 Senaryo 3'ün ($\alpha=1$, $\beta=0.01$) benzetim sonuçları

Şekil 7 Senaryo 4'ün ($\alpha=1$, $\beta=0.002$) benzetim sonuçlarıŞekil 8 Senaryo 5'in ($\alpha=1$, $\beta=0.001$) benzetim sonuçları

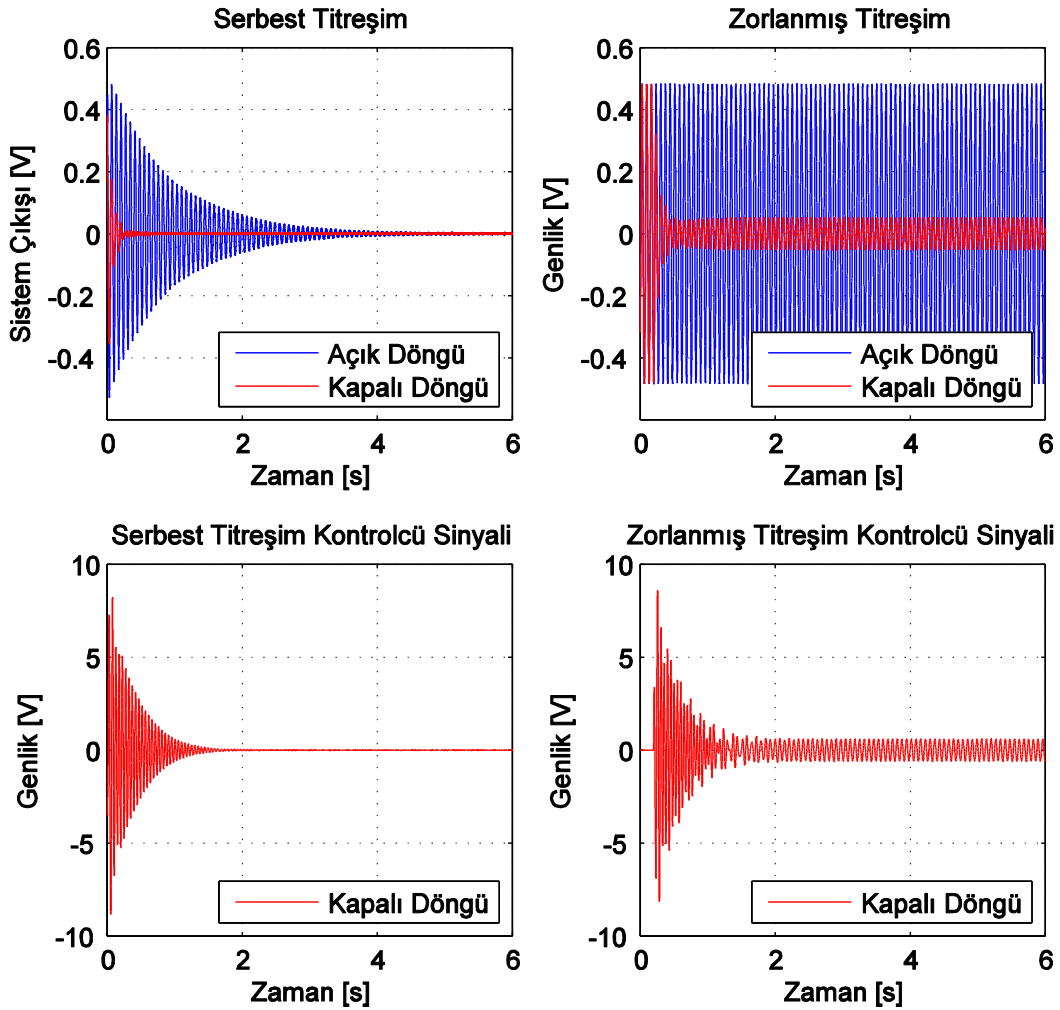
Kontrolcü devrede olmadan sistemin verilen başlangıç koşulunun değeri sonucundaki yatışma süresi yaklaşık 5.2 saniye olarak hesaplanmıştır. Tablo 1'de benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 1 Senaryoların karşılaştırılması

Parametreler	Kazanç [dB]	Kontrolcü Çıkışı [V] (En yüksek değeri)	Yatışma Süresi [s]	Zorlanmış Titreşim Bastırma Oranı
$\alpha=1$, $\beta=1$	-1.17	0.14	4.50	12 %
$\alpha=1$, $\beta=0.1$	-6.11	0.96	2.57	50 %
$\alpha=1$, $\beta=0.01$	-14.97	3.93	0.95	82 %
$\alpha=1$, $\beta=0.002$	-21.40	8.40	0.42	92 %
$\alpha=1$, $\beta=0.001$	-24.02	10.80	0.30	94 %

Kontrolcü çıkışının en büyük voltaj değeri, verilen başlangıç koşulu ve Senaryo 5 için 10.80 Volt bulunmuştur ancak bu değer, giriş-çıkış modülünün limitlerini (± 9 V) geçtiği için bu kontrolcü deneysel çalışmada kullanılamamaktadır. Bu durumda, verilen başlangıç koşulunun değeri sonucu ortaya çıkan en yüksek titreşim miktarını sönmüleyebilecek en iyi kontrolcü parametreleri ($\alpha=1$, $\beta=0.002$) olarak bulunmuştur.

Ayrıca, deneysel çalışmalar ile akıllı kirişin serbest ve zorlanmış titreşimleri, elde edilen en iyi kontrolcü kullanılarak bastırılmış ve sonuçlar Şekil 9'da gösterilmiştir. Ek olarak, kontrolcü sinyallerinin limitler (yani ± 9 V) içerisinde olduğu da gözlenmiştir.



Şekil 9 Serbest ve Zorlanmış Titreşim Sönümlenme Deneysel Sonuçları

SONUÇLAR

Akıllı kirişin, serbest (Tablo 2) ve zorlanmış (Tablo 3) titreşimlerinin benzetim ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, akıllı kirişin titreşimlerinin bastırılmasında, doğrusal karesel düzenleyici yöntemi kullanılarak tasarlanan denetçinin etkin olduğu gösterilmiştir.

Tablo 2 Serbest Titreşim Sönümlenme Benzetim ve Deney Sonuçları

	Yatışma Süresi [s]	Kontrolcü Çıkışı [V]
--	--------------------	----------------------

	Açık Döngü	Kapalı Döngü	(En Yüksek Değeri)
Benzetim	5.20	0.42	8.40
Deney	5.18	0.44	8.83

Tablo 3 Zorlanmış Titreşim Sönümlenme Benzetim ve Deney Sonuçları

	Bastırma Performansı	Kontrolcü Çıkışı [V] (En Yüksek Değeri)
Benzetim	92 %	8.40
Deney	89 %	8.60

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Bilimsel Araştırma Projesine (BAP-03-13-2014-001) donanım, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezine (RÜZGEM) yazılım ve SENSOR Technology Ltd. şirketine de piezoelektrik yamaların temini için verdiği desteğe teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] M. Ugur Aridogan. Performance Evaluation of Piezoelectric Sensor/Actuator on Investigation of Vibration Characteristics and Active Vibration Control of A Smart Beam. Master's thesis, Middle East Technical University, 2010.
- [2] M. Sahin, F. M. Karadal, Y. Yaman, O. F. Kircali, V. Nalbantoglu, F. D. Ulker, and T. Caliskan. Smart structures and their applications on active vibration control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU. Journal of Electroceramics, 20(3-4):167–174, 2008.
- [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, Paper A5.3, Prague, Czech Republic, 01-04 June, 2003
- [4] Onat, C., Sahin, M., Yaman, Y. Active Vibration Suppression of a Smart Beam via PID μ Control. IWPMA 2010, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, 10-13 October 2010, Antalya, Turkey.
- [5] C. Onat, M. Sahin, Y. Yaman Active Vibration Suppression of a Smart Beam by Using an LQG Control Algorithm, 2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II), 22-24 June 2011, Mykonos, Greece.
- [6] C. Onat, M. Sahin, Y. Yaman Active Vibration Suppression of a Smart Beam by Using a Fractional Control, 2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II), 22-24 June 2011, Mykonos, Greece.
- [7] C. Onat, M. Sahin, Y. Yaman, E. Prasad and S. Nemana, "Design of an LPV Based Fractional Controller for the Vibration Suppression of a Smart Beam" CanSmart2011, International Workshop on Smart Materials & Structures and NDT in Aerospace, 02-04 November 2011, Montreal, Canada.

- [8] C. Onat, M. Sahin, Y. Yaman "Optimal Control of a Smart Beam by Using a Luenberger Observer", ICEAF III, 3rd International Conference of Engineering Against Failure, 26-28 June 2013, Kos, Greece.