

PIEZOELEKTRİK YAMALARA SAHİP AKILLI BİR KİRİŞİN TİTREŞİMLERİNİN KESİR DERECELİ BİR DENETÇİ YARDIMIYLA AKTİF DENETİMİ

Cem ONAT*

*Yrd. Doç. Dr., İnönü Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Malatya
conat@inonu.edu.tr*

Melin ŞAHİN

*Yrd. Doç. Dr., ODTÜ, Mühendislik Fakültesi,
Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,
Ankara,
msahin@metu.edu.tr*

Yavuz YAMAN

*Prof. Dr., ODTÜ, Mühendislik Fakültesi,
Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,
Ankara
yyaman@metu.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışmada, piezoelektrik (PZT) yamaların hem algılayıcı hem de uyarıcı olarak kullanıldığı bir kirişin titreşimlerinin bastırılması için kesir dereceli bir denetçi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Kesir dereceli denetçinin tasarımında ilk olarak kesir dereceli türevsel etki, sürekli kesir açılımı (Continued Fractional Expansion) yönteminin dördüncü derece yaklaşımıyla hesaba katılmıştır. Ardından akıllı kirişi ilk titreşim biçiminde karakterize eden bir filtre tasarlanmıştır. Son olarak türevsel etkinin filtrelenmesiyle denetçi elde edilmiştir. Türev operatörünün farklı kesir derecesi değerlerine karşılık olarak tasarlanan denetçiler kullanılarak kurulan farklı kapalı çevrim sistemlerinin frekans tanım kümesi benzetimleri yapılmış ve sonucunda seçilen uygun bir denetçi deneysel olarak uygulanmıştır. Hem zaman tanım kümesinde, hem de frekans tanım kümesinde elde edilen deneysel sonuçlar önerilen denetçinin akıllı kirişin ilk titreşim biçimindeki dikey titreşim düzeylerini başarılı bir şekilde bastırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı kiriş, PZT, titreşim, aktif denetim

Active Vibration Suppression of a Smart Beam Having Piezoelectric Patches by Using a Fractional Order Controller

ABSTRACT

In this study, a fractional order controller was designed and applied for suppression of the flexural vibrations of a smart beam. The beam was equipped with piezoelectric patches which were used both as sensor and actuator. In the design process of the controller, first, the fractional order differential effect was considered by using a fourth degree approach of the continued fraction expansion (CFE) method. Then a filter was designed to characterize the dynamic properties of the smart beam in the first flexural mode. Finally, the controller was obtained by filtering the differential effect. In order to evaluate the closed-loop frequency domain performances; first the simulations were performed on various fractional orders of the differential effect and then a controller was selected for the experimental verifications. The obtained experimental results in both time domain and frequency domain have proved that the proposed controller successfully suppressed the first flexural vibration levels of the smart beam.

Keywords : Smart beam, PZT, vibration, active control

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 16.12.2010
Kabul tarihi : 08.02.2011

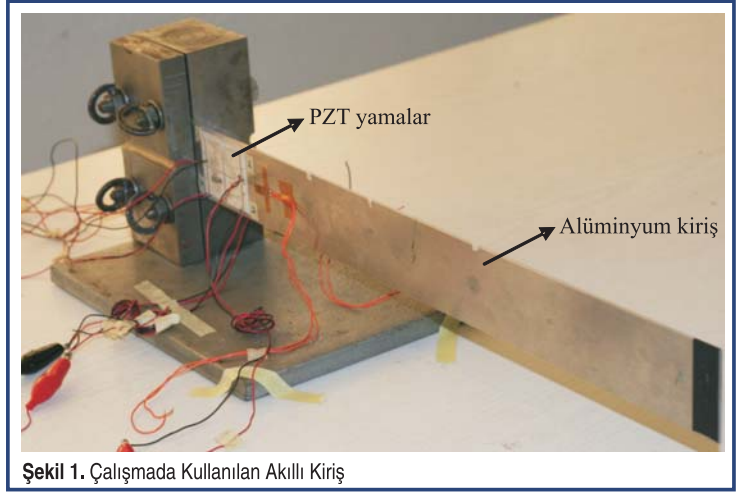
GİRİŞ

Akıllı yapılar dışarıdan uygulanan bir uyarıyı algılayabilen ve buna aktif parçalar ve aktif denetim mekanizmaları yardımıyla cevap veren yapılardır. Algılayıcı ve uyarıcılar akıllı bir yapının aktif parçalarını oluşturmaktadırlar [1].

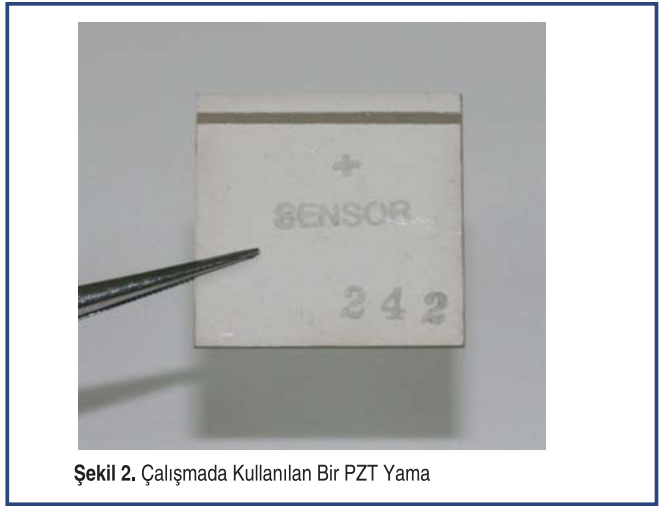
Piezelektrik malzemelerdeki son teknolojik gelişmeler sonucunda birçok araştırmacılar özellikle PZT (Lead-Zirconate-Titanate, Kurşun-Zirkonat-Titanat) yamaları akıllı yapılarda algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanmışlardır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği bünyesinde yapılan çalışmalarda [2-8] bu tür yamalar kiriş ve plak benzeri yapılar üzerindeki aktif titreşimlerin denetiminde kullanılmışlardır. PZT yamalara elektriksel alan uygulandığında boyutlarında değişiklik meydana gelmekte ve bu özellikleri nedeniyle PZT yamalar uyarıcı olarak kullanılabilirler. Bu tür yamalar mekanik şekil değişikliklerine zorlandıklarında ise elektrik sinyali üretebilmekte; böylece algılayıcı olarak da kullanılabilirler [9].

Tamsayı dereceli olarak modellenmiş sistemler için kesir dereceli denetçilerin kullanımı; tamsayı dereceli denetçiler kullanımına göre tasarımda kazanç ve faz payı karakteristiklerinin ayarlanmasında daha iyi esneklik sağlamaktadır [10-12]. Kesir dereceli denetçiler PZT yamalara sahip akıllı kirişlere de uygulanmıştır [13,14].

Bu çalışmada PZT yamaların hem algılayıcı hem de uyarıcı olarak kullanıldığı akıllı bir kiriş incelenmiştir. Önce kirişin frekans cevabı elde edilerek analitik modeli çıkartılmıştır. Ardından bu model kullanılarak kirişin dinamik özelliklerini karakterize edecek şekilde tasarlanmış bir filtreden kesir dereceli türevsel etki geçirilmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen

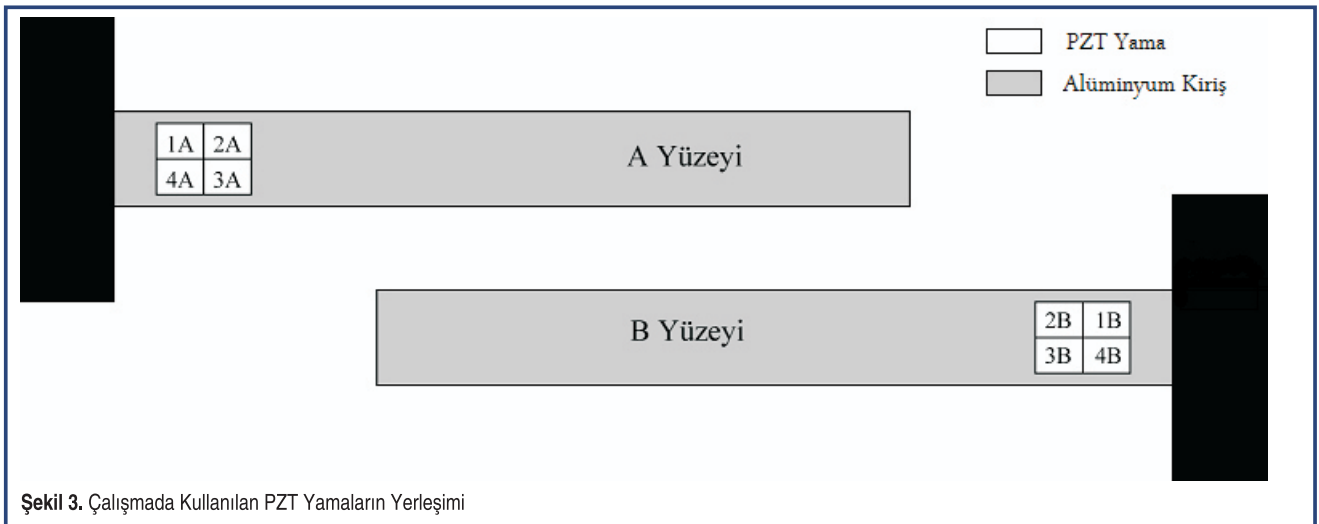


Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Akıllı Kiriş



Şekil 2. Çalışmada Kullanılan Bir PZT Yama

regülâtör denetçinin, farklı kesir dereceleri için benzetimi yapılarak, tasarımı tamamlanmış ve denetçinin kirişin birinci



titreşim biçimindeki dikey titreşimlerinin bastırılmasındaki etkinliği gösterilmiştir.

AKILLI KİRİŞ

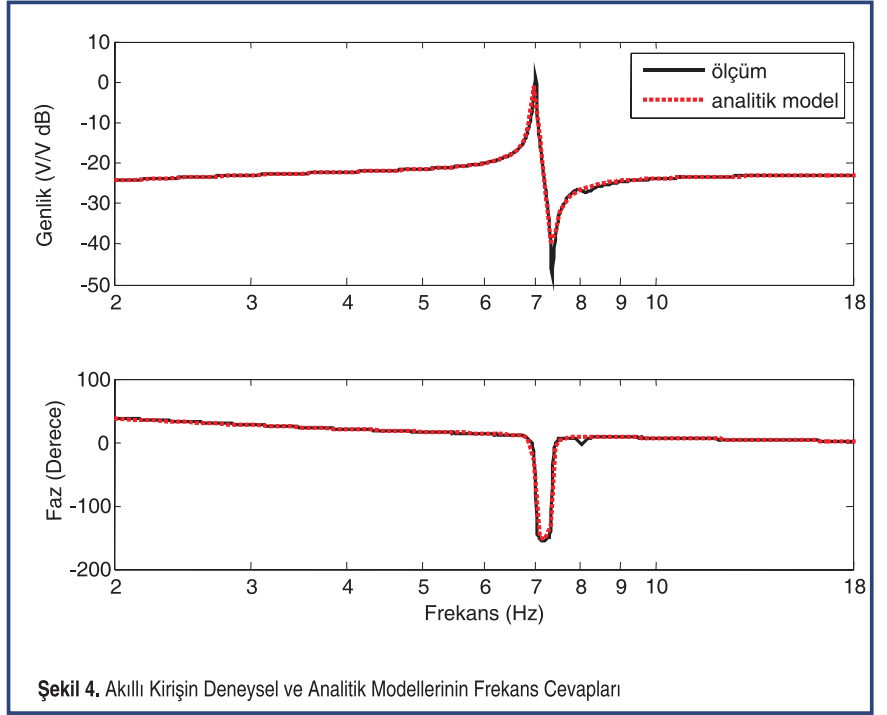
Çalışmada kullanılan akıllı kiriş Şekil 1'de gösterilmiştir. Akıllı kiriş, sekiz adet 25x10x0.5 mm boyutlarında Sensortech BM500 tipi PZT yamanın, 490x51x2 mm boyutlarında tek ucu tutturulmuş ve diğer ucu serbest olan bir pasif alüminyum kirişin her iki tarafına dörder adet ve simetrik olarak yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan tipik bir yama Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bu uygulamada PZT yamaların birbirlerinden bağımsız olarak çalışabilmeleri için alüminyum kirişle aralarına ince yalıtkan tabakalar yerleştirilmiştir. Böylece her PZT yamanın diğer yamalardan bağımsız (ya da uygulama amacına göre istenirse birlikte) algılayıcı ya da uyarıcı olarak kullanılabilmesi sağlanmıştır. Akıllı kiriş üzerindeki PZT yamaların buldukları yüzeye ve konumlarına göre adlandırılmaları Şekil 3'te gösterilmiştir. Daha güçlü bir uyarıcı etkinliği sağlanması amacıyla dört adet PZT yama uyarıcı olarak kullanılmıştır. Bu yamalar Şekil 3'teki adlandırılmalarıyla 1A, 1B, 4A ve 4B'dir. Algılayıcı olarak bir adet PZT yama (2A) seçilmiş, 3A ve 3B yamaları ise uyarıcı kuvvetin üretilme sürecinde kullanılmıştır.

DENEYSEL MODELLEME

Akıllı kirişin dinamik modelinin oluşturulması amacıyla dört adet PZT yamanın tümü (1A, 1B, 4A ve 4B) 2.0 Hz.18.0 Hz. frekans aralığındaki sinüs dalgalarıyla uyarılmış ve algılayıcı olarak kullanılan 2A numaralı PZT yamadan ölçümler alınmıştır. Sistemin frekans cevabı Brüel & Kjaer 3560-5 PULSE platformu kullanılarak elde edilmiş ve bu frekans cevabı kullanılarak MATLAB R2007b programı yardımıyla analitik bir model oluşturulmuştur. Denklem 1 akıllı kirişin "en küçük kareler" yöntemi kullanılarak bulunan 6. dereceden transfer fonksiyonunu göstermektedir. Akıllı kirişin deneysel olarak elde edilen frekans cevabıyla analitik model kullanılarak oluşturulmuş frekans cevabı Şekil 4'te gösterilmiştir.

$$G(s) = \frac{0.06449 \cdot s^6 + 13.42 \cdot s^5 + 288.7 \cdot s^4 + 54660 \cdot s^3 + 3.548 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 5.55 \cdot 10^7 \cdot s + 7.102 \cdot 10^7}{s^6 + 191.6 \cdot s^5 + 6085 \cdot s^4 + 741800 \cdot s^3 + 1.211 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 7.179 \cdot 10^8 \cdot s + 7.89 \cdot 10^9} \quad (1)$$



Şekil 4. Akıllı Kirişin Deneysel ve Analitik Modellerinin Frekans Cevapları

KESİR DERECELİ DENETÇİ TASARIMI

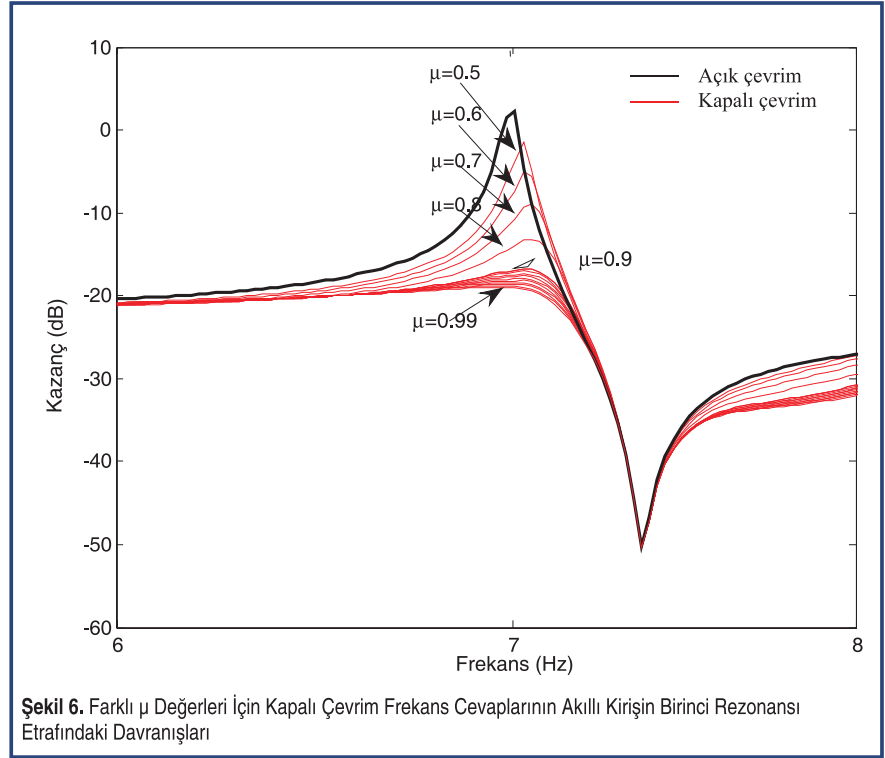
Kesir dereceli integro-diferansiyel işlemlerin zaman tabanında analizi oldukça karmaşık ve çok zaman alan çözüm süreçleri gerektirmektedir [15-18]. Bu güçlüklerin üstesinden gelmek için, kesir dereceli bir transfer fonksiyonunun yerine neredeyse onunla aynı davranışa sahip tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu kullanılabilir. Kesir dereceli sistemlerin rasyonel yaklaşımlarının elde edilmesi için Carlson'un yöntemi, Matsuda'nın yöntemi, Maclaurin serilerine dayalı yaklaşımlar gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [19]. Kesir dereceli sistemler için en önemli yaklaşımlardan biri de sürekli kesir açılımı (Continued Fractional Expansion - CFE) yöntemidir [20]. Bu yöntemin dördüncü dereceden yaklaşımıyla hesaplanan kesir dereceli türevsel etki Denklem 2'de verilmektedir [21].

$$s^\mu \cong \frac{(\mu^4 + 10 \cdot \mu^3 + 35 \cdot \mu^2 + 50 \cdot \mu + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \mu^4 - 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 + 320 \cdot \mu + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \mu^4 - 150 \cdot \mu^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \mu^4 + 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 - 320 \cdot \mu + 384) \cdot s + (\mu^4 - 10 \cdot \mu^3 + 35 \cdot \mu^2 - 50 \cdot \mu + 24)}{(\mu^4 - 10 \cdot \mu^3 + 35 \cdot \mu^2 - 50 \cdot \mu + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \mu^4 + 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 - 320 \cdot \mu + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \mu^4 - 150 \cdot \mu^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \mu^4 - 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 + 320 \cdot \mu + 384) \cdot s + (\mu^4 + 10 \cdot \mu^3 + 35 \cdot \mu^2 + 50 \cdot \mu + 24)} \quad (2)$$

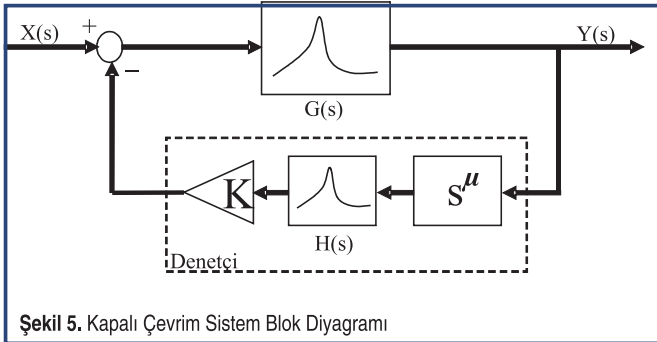
Bu çalışmada tasarlanan denetçi, doğal frekansı kirişin düzleme dik birinci rezonans frekansına ayarlanmış bir $H(s)$ filtresinden kesir dereceli bir türevsel etkinin (s^μ) geçirilmesiyle elde edilmiştir. Akıllı kirişin dinamik özelliklerini karakterize eden $H(s)$ transfer fonksiyonu Denklem 3'te verilmiştir.

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 4.901 \cdot s + 2402} \quad (3)$$

Şekil 5'te kapalı çevrim sistemin blok diyagramı gösterilmektedir. $X(s)$ giriş fonksiyonunu, $Y(s)$ çıkış fonksiyonunu, K ise denetçi kazancını ifade etmektedir. Bu tasarımda $K=100$ olarak alınmıştır. Farklı μ değerleri için kapalı çevrim benzetim frekans cevapları, akıllı kirişin birinci rezonans değeri olan yaklaşık 7 Hz civarında, Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6, türevsel etkinin yani μ değerinin



Şekil 6. Farklı μ Değerleri İçin Kapalı Çevrim Frekans Cevaplarının Akıllı Kirişin Birinci Rezonansı Etrafındaki Davranışları



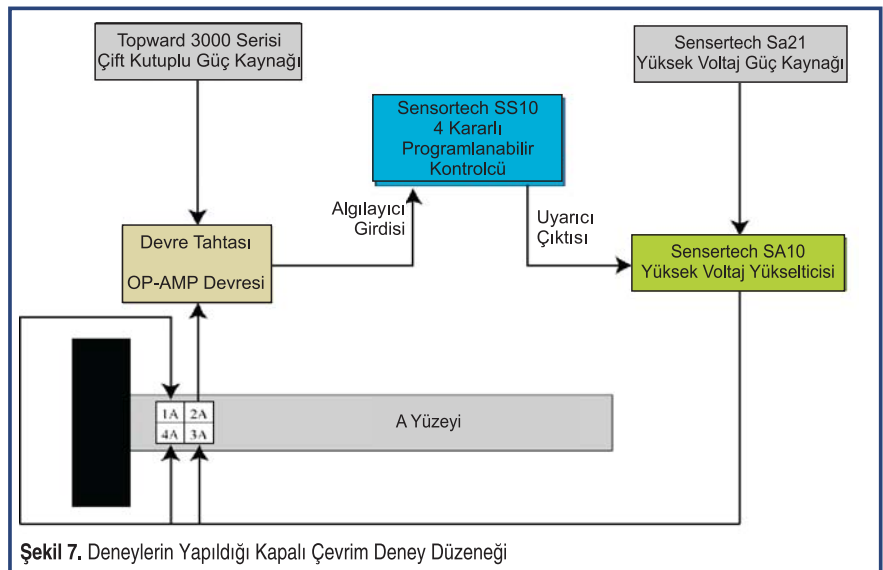
Şekil 5. Kapalı Çevrim Sistem Blok Diyagramı

artmasının rezonans bölgesinde daha etkin bir bastırma sağladığını açıkça göstermektedir. Kesir dereceli denetçilerde kabul gören $0 < \mu < 1$ yaklaşımı nedeniyle [21], deneysel uygulamalar için olası en yüksek değer olan $\mu=0.99$ seçilmiştir.

DENEY DÜZENEGİ

Denetçinin uygulanması için Şekil 7'de gösterilen düzenek kullanılmıştır. Bu düzenekte uyarıcı voltaj programlanabilir denetçi, Sensortech SS10, çıkışında SA10 yüksek voltaj yükseltici yardımıyla 30 kat artırılmıştır. SA10

voltaj yükseltici SA21 güç kaynağıyla beslenmektedir. Algılayıcı voltajının doğru şekilde programlanabilir güç kaynağına beslenebilmesi için op-amp devresi oluşturulmuştur. Bu op-amp devresinden geçen algılayıcı voltajı, programlanabilir denetçiye gönderilmiştir. Op-amp devresi devre tahtası üzerine kurulmuş olup, çift kutuplu sabit voltaj kaynağıyla çalıştırılmaktadır.



Şekil 7. Deneylerin Yapıldığı Kapalı Çevrim Deney Düzenegi

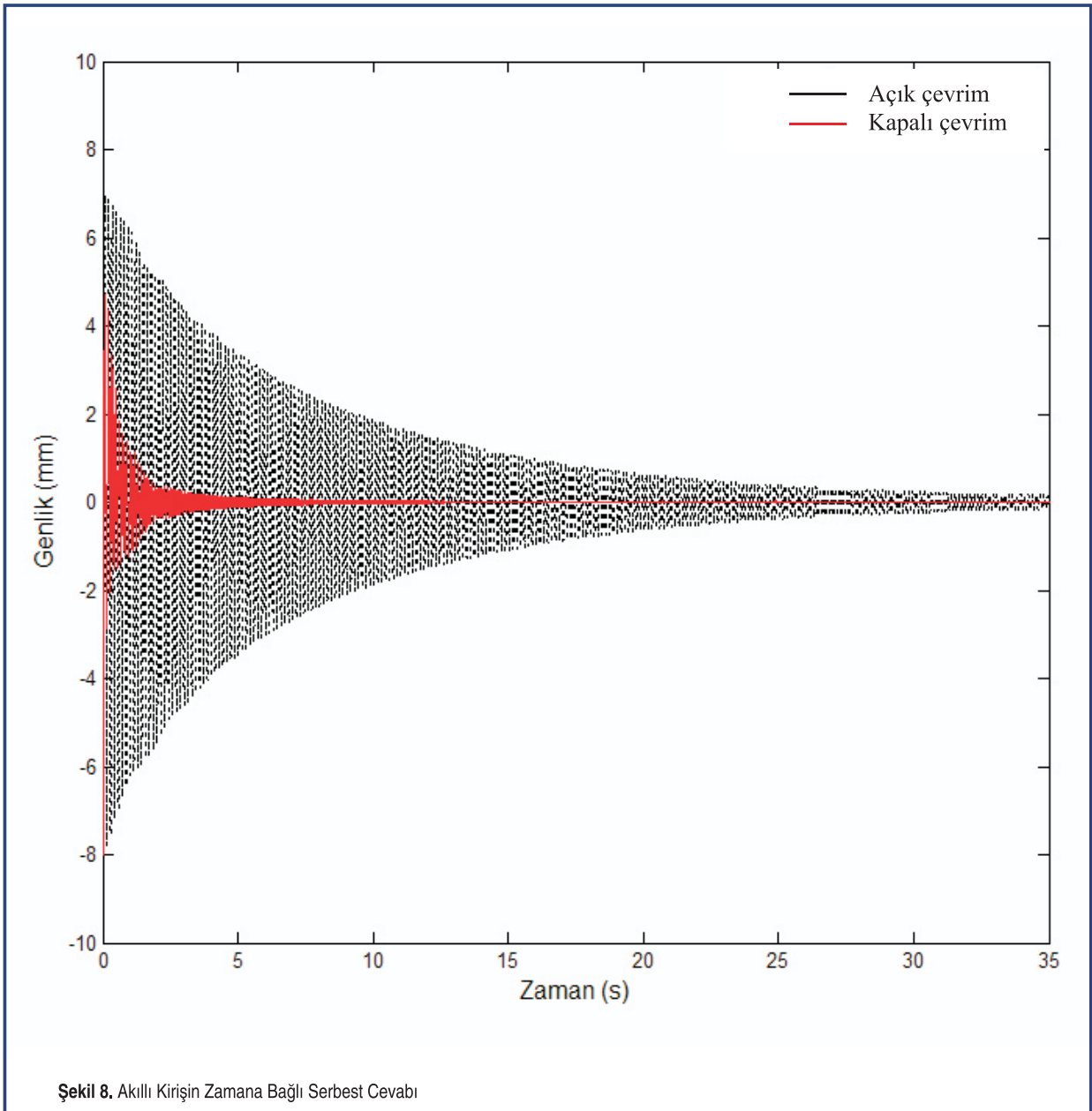
DENEYSEL SONUÇLAR

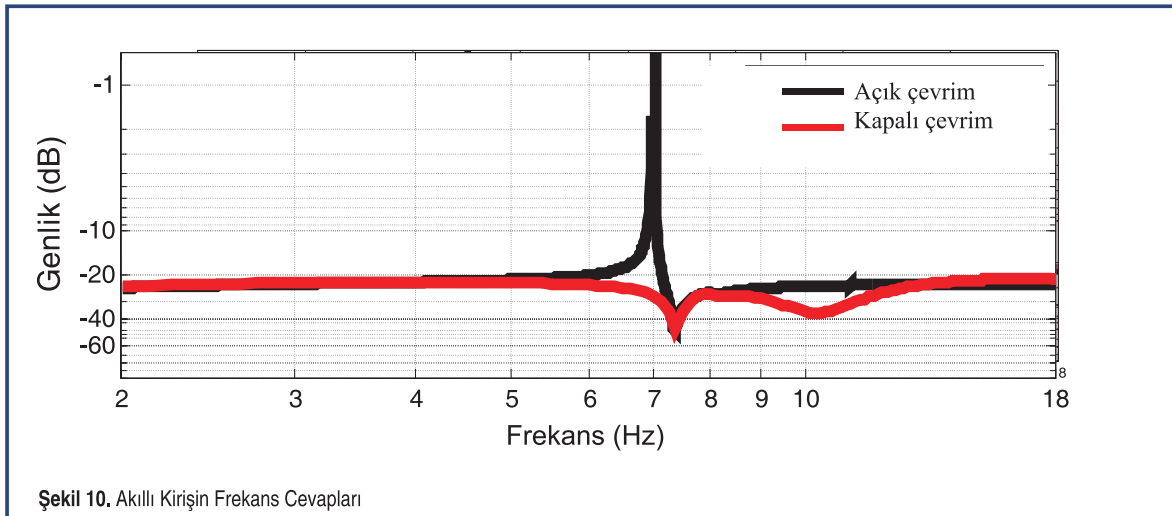
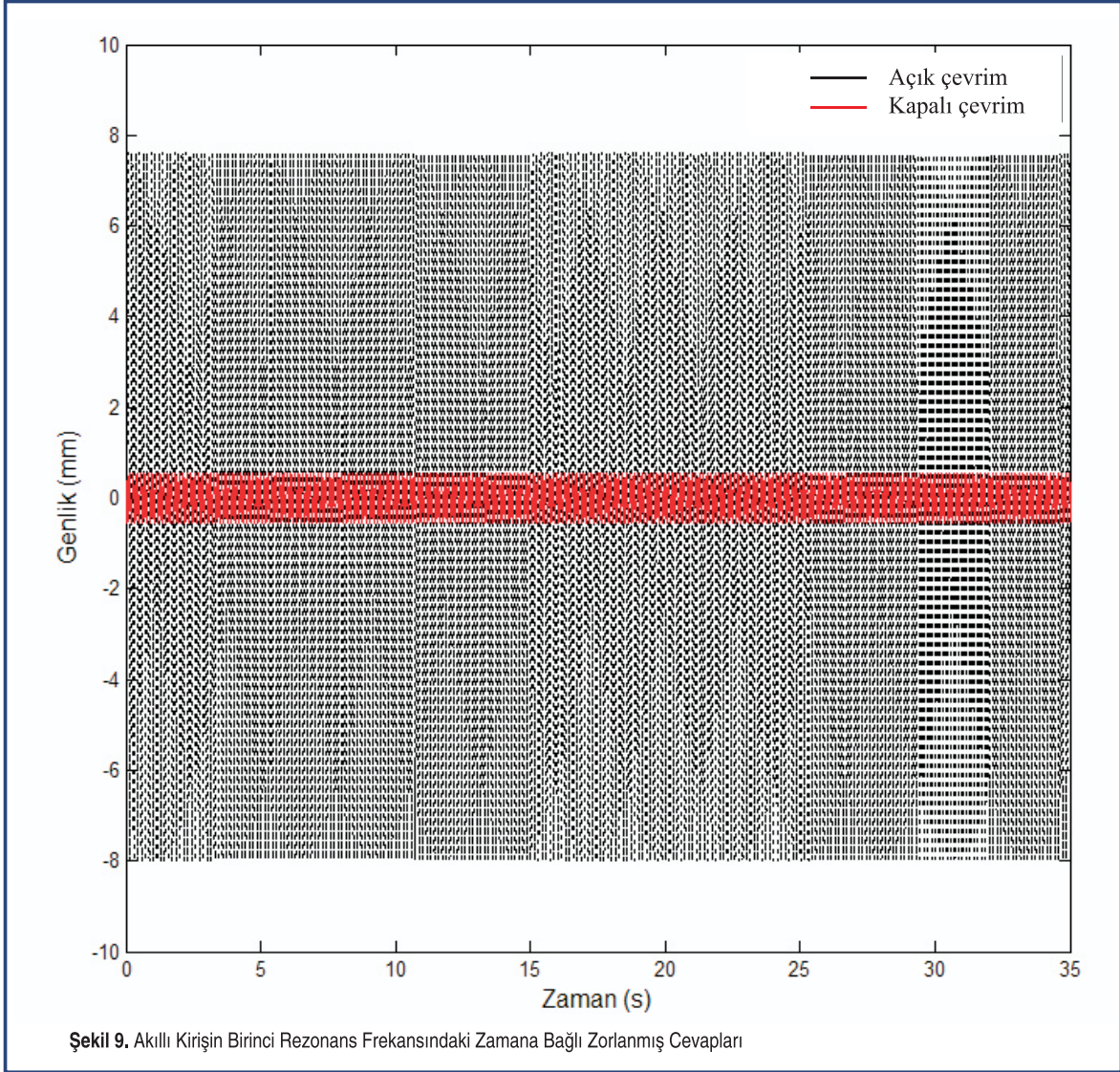
DeneySEL çalışmalar üç bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde akıllı kirişin serbest cevabını belirlemek amacıyla kirişin ucuna 8 mm'lik bir başlangıç deplasmanı verilmiştir. Şekil 8'de bu şekilde elde edilmiş açık çevrim ve kapalı çevrim serbest cevapları birlikte verilmektedir. Burada titreşimlerin durulma süresi açık çevrim durumunda yaklaşık 35 saniye olmasına karşın, kapalı çevrim durumunda yaklaşık 2.5 saniyedir.

Deneylerin ikinci bölümünde, akıllı kiriş yaklaşık 7 Hz olan rezonans frekansında 3A ve 3B olarak tanımlanan PZT

yamalar kullanılarak sinüs dalgasıyla 35 saniye boyunca uyarılmıştır. Şekil 9'da açık ve kapalı çevrim durumları için rezonans frekansındaki zamana bağlı zorlanmış cevapları birlikte verilmektedir. Bu durumda denetçinin akıllı kirişin titreşimlerini yaklaşık olarak % 93 oranında bastırdığı belirlenmiştir.

Deneylerin son bölümünde ise, açık çevrim ve kapalı çevrim durumları için akıllı kirişin frekans cevapları elde edilmiştir. Şekil 10; tasarlanan ve uyarılan denetçinin akıllı kirişin birinci rezonans bölgesinde titreşim düzeyini, açık çevrime göre yaklaşık olarak 25 dB bastırdığını göstermektedir.





SONUÇ

Bu çalışmada PZT yamaların hem algılayıcı hem de uyarıcı olarak kullanıldığı bir akıllı kirişin titreşimlerinin bastırılması için kesir dereceli bir denetçi tasarlanmış, benzetimi yapılmış ve kirişe uygulanmıştır. Denetçi tasarım sürecinde kesir dereceli türevsel etkinin kullanımı denetçinin derecesini arttırmaktadır. Denetim sürecinde özellikle donanım ve uygulama açısından zorluklar yaratabileceği düşünülen bu derece arttırımı aslında uygulamadaki doğruluğu arttırmaktadır. Benzetim sonuçlarından, kesir dereceli türevsel etkinin artmasının sistemi rezonans bölgesinde daha sönümlü bir hâle getirdiği görülmüştür. Hem zaman hem de frekans tanım kümelerinde elde edilen deneysel sonuçlar tasarlanan denetçinin kullanıldığı kapalı çevrim sistemin akıllı kirişin titreşimlerini bastırmada etkin olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

KAYNAKÇA

1. **Çalışkan, T.** 2002. "Smart Materials and Their Applications in Aerospace Structures," Doktora Tezi, ODTÜ.
2. **Şahin, M., Karadal, F. M., Yaman, Y., Kırçalı, Ö. F., Nalbantoğlu, V., Ülker, F. D., Çalışkan, T.** 2008. "Smart Structures and Their Applications on Active Vibration Control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU," J Electroceram, 20, p.167-174.
3. **Ülker, F. D.** 2003. "Active Vibration Control of Smart Structures," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ.
4. **Yaman, Y., Çalışkan, T., Nalbantoğlu, V., Prasad, E., Waechter, D., Yan, B.** 2001. "Active Vibration Control of a Smart Beam," Canada-US CanSmart Workshop on Smart Materials and Structures, Montreal, Canada Proceedings, p.137-147.
5. **Yaman, Y., Ülker, F. D., Nalbantoğlu, V., Çalışkan, T., Prasad, E., Waechter, D., Yan, B.** 2003. "Application of H_{∞} Active Vibration Control Strategy in Smart Structures," AED2003, 3rd International Conference on Advanced Engineering Design, Paper A5.3, Prague, Czech Republic, June 1-4.
6. **Kırçalı, Ö. F., Yaman, Y., Nalbantoğlu, V., Şahin, M., Karadal, F. M., Ülker, F. D.** 2008. "Spatial Control of a Smart Beam," J Electroceram, 20, p. 175-185.
7. **Kırçalı, Ö. F., Yaman, Y., Nalbantoğlu, V., Şahin, M.** 2008. "Active Vibration Control of a Smart Beam by Using a Spatial Approach," in New Developments in Robotics, Automation and Control, ed. Aleksandar Lazinica, I-Tech Education and Publishing, p. 377-410.
8. **Arıdoğan, U.** 2010. "Performance Evaluation of Piezoelectric Sensor/Actuator on Investigation of Vibration Characteristics and Active Vibration Control of a Smart Beam," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ.
9. **Yang, J.** 2005. "An Introduction to the Theory of Piezoelectricity," vol. 9., New York: Springer.
10. **Xue, D., Zhao, C., Chen, Y. Q.** 2006. "Fractional Order PID Control of A DC-Motor with Elastic Shaft: A Case Study," Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16.
11. **Cao, J. Y., Cao, B. G.** 2006. "Design of Fractional Order Controller Based on Particle Swarm Optimization," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 4, no. 6, December, p. 775-781.
12. **Maiti, D., Biswas, S., Konar, A.** 2008. "Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique," 2nd National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08).
13. **Onat, C., Şahin, M., Yaman, Y.** 2010. "Active Vibration Suppression of a Smart Beam via PI^D Control," International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA2010), October 10-13, Antalya, Turkey.
14. **Onat, C., Şahin, M., Yaman, Y.** 2011. "Active Vibration Suppression of a Smart Beam by Using a Fractional Control," 2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II) June 22-24, Mykonos, Greece (Sunulmak üzere kabul edilmiştir.)
15. **Jifeng, W., Yuankai, L.** 2005. "Frequency Domain Analysis and Applications for Fractional Order Control System," IOP, Journal of Physics: Conf. 13, p. 268-273.
16. **Vinagre, B., Podlubny, I., Dorcak L., Feliu, V.** 2000. "On fractional PID controllers: A Frequency Domain Approach", IFAC Workshop on Digital Control. Past, Present and Future of PID Control, p. 53-58, Terrasa, Spain.
17. **Xue, D., Chen, Y. Q.** 2002. "A Comparative Introduction of Four Fractional Order Controllers," Proceeding the 4th World Congress, Intelligent Control and Auto, vol. 4, p. 3228-3235.
18. **Xue, D., Chen, Y.Q., Atherton, D. P.** 2007. "Linear Feedback Control Analysis and Design With MATLAB," Advances in Design and Control, Siam.
19. **Krishna, B. T., Reddy, K. V. V. S.** 2008. "Active and Passive Realization of Fractance Device of Order $\frac{1}{2}$," Active and Passive Electronic Components, p.15.
20. **Özyetkin, M. M., Tan, N.** 2010. "Kesir Dereceli Sistemlerin Tamsayı Dereceli Yaklaşımı," SIU-2010, Diyarbakır, 22-24 Nisan.
21. **Özyetkin, M. M., Yeroğlu, C., Tan, N., Tağluk, M. E.** 2010. "Design of PI and PID Controllers For Fractional Order Time Delay Systems," 9th IFAC Workshop on Time Delay Systems (IFAC TDS 2010), Prague, Czech Republic, June 7-9.