

## PIEZOELEKTRİK YAMALARIN AKILLI BİR KİRİŞİN TİTREŞİM KONTROLÜNDE ALGILAYICI VE UYARICI OLARAK KULLANILMASI

Uğur Arıdoğan<sup>\*,\*\*</sup>, Melin Şahin<sup>\*\*</sup>, Volkan Nalbantoğlu<sup>\*\*,\*\*\*</sup> ve Yavuz Yaman<sup>\*\*</sup>

(\*) Havelsan A.Ş., Simülasyon ve Eğitim Sistemleri Grup Başkanlığı, 06520 ANKARA  
(\*\*) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 06531 ANKARA  
(\*\*\*) Aselsan A.Ş., Mikroelektronik, Güdüm ve Elektro-Optik Grup Başkanlığı, 06011 ANKARA  
[maridogan@havelsan.com.tr](mailto:maridogan@havelsan.com.tr), [msahin@metu.edu.tr](mailto:msahin@metu.edu.tr), [vnalbant@mgeo.aselsan.com.tr](mailto:vnalbant@mgeo.aselsan.com.tr)  
[yaman@metu.edu.tr](mailto:yaman@metu.edu.tr)

### ÖZET

Bu bildiri, akıllı bir kirişin titreşim kontrolünde piezoelektrik (PZT) yamaların algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanılması sunulmuştur. Akıllı kiriş olarak tanımlanmış yapı, piezoelektrik yamaların tek ucu tutturulmuş ve diğer ucu serbest olan alüminyum kirişin her iki yüzeyine simetrik olarak yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Piezoelektrik malzemeler, boyutsal şekil değişikliklerine zorlandıklarında elektrik sinyali ürettikleri gibi elektriksel alana maruz bırakıldıklarında da boyutsal değişiklik meydana getirmektedirler. Bu özellikler piezoelektrik malzemelerin algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Çalışmamızda öncelikle, piezoelektrik yamalar algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanılarak sistemin frekans cevabı elde edilmiş ve analitik sistem modeli bulunmuştur. Daha sonra, bu sistem modeli kullanılarak gürbüz kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Son olarak, akıllı kirişin serbest ve ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşim sonuçları açık ve kapalı döngüler olarak verilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Akıllı kiriş, piezoelektrik algılayıcı, sistem tanımlaması, gürbüz kontrolcü, titreşim sönümlenmesi

### ACTIVE VIBRATION CONTROL OF A SMART BEAM USING PIEZOELECTRIC SENSOR AND ACTUATOR

#### ABSTRACT

In this paper, an active vibration control of a smart beam using piezoelectric (PZT) sensor and actuator is presented. The smart beam is a cantilever aluminum beam with symmetrically surface-bonded piezoelectric patches. Piezoelectric materials can transform mechanical deformation to electric signal and vice versa. This property of piezoelectric materials enables them to be employed as sensors and actuators. In our study, frequency response of the system is obtained by using piezoelectric patches as sensor and actuator. Then, analytical system model is acquired from this measured frequency response. Following this, robust controller is designed for the active vibration control of the smart beam. Finally, free and the first resonance frequency forced vibration results of open and closed loop are presented.

**Keywords:** Smart beam, piezoelectric sensor, system identification, robust controller, vibration suppression

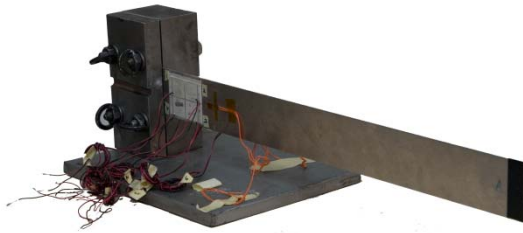
#### 1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemelerdeki son teknolojik gelişmeler birçok araştırmacıyı, dışarıdan gelen uyarıları algılayabilen ve bu uyarılara aktif denetim mekanizmaları yardımıyla müdahale edebilen ve akıllı yapılar olarak da

tanımlanan bu yapılar ve uygulamaları üzerinde çalışmaya yöneltmiştir [1]. Havacılık ve uzay yapıları, aeroelastik özellikleri sebebiyle dışarıdan gelen uyarılar altında yapısal hasara uğrayabilirler. Bu hasarın önlenmesine yönelik çalışmalarda piezoelektrik malzemeler özellikle yapısal

titreşimlerin sönümlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [2,3,4]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde yapılan daha önceki çalışmalarda kiriş ve plaka benzeri yapıların titreşim kontrolünde lazer ile yer değiştirme ölçüm cihazı veya uzama ölçerler algılayıcı olarak kullanılırken tüm bu çalışmalarda piezoelektrik yamalar da uyarıcı olarak kullanılmıştır [5,6]. Bahsi geçen PZT yamalara elektriksel alan uygulandığında boyutlarında değişiklik meydana gelmekte ve bu özellikleri nedeniyle uyarıcı olarak kullanılabilirler. Bu yamalar ayrıca mekanik şekil değişikliklerine zorlandıklarında elektrik sinyali üretmeleri sebebiyle algılayıcı olarak da kullanılabilirler [7].

Bu çalışmada ise, piezoelektrik yamaların akıllı bir kirişin aktif titreşim kontrolünde hem algılayıcı hem de uyarıcı olarak kullanıldığı durum incelenmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde üzerinde PZT yamalar bulunan akıllı kirişin frekans cevabı elde edilmiş ve analitik sistem modeli çıkarılmıştır. Daha sonra bir gürbüz kontrolcü tasarlanmış ve sistemde kullanılmıştır. Son olarak da, akıllı kirişin serbest ve ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşim sonuçları açık ve kapalı döngüler olarak verilmiştir.

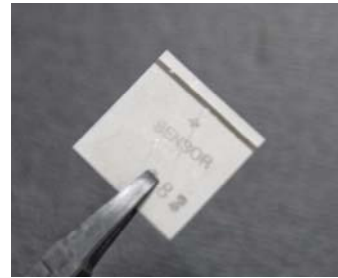


Şekil 1. Akıllı Kiriş

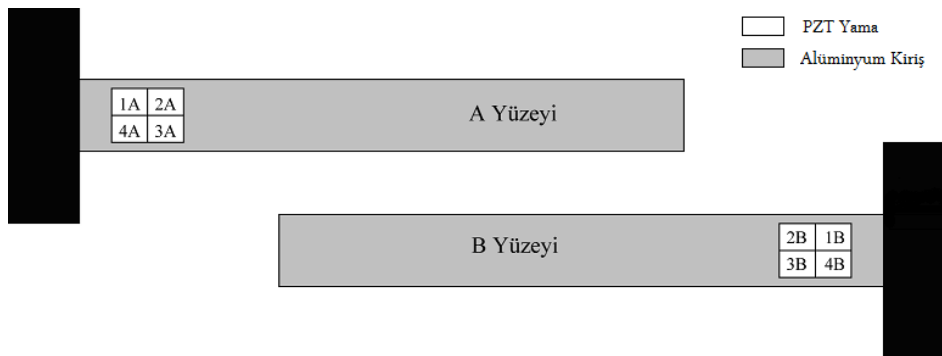
## 2. AKILLI KIRIŞ

Akıllı kiriş (Şekil 1), 8 adet 25x10x0.5 mm boyutlarında Sensortech BM500 tipi PZT (Lead-Zirconate-Titanate) yamanın (Şekil 2) 490x51x2 mm boyutlarında tek ucu tutturulmuş ve diğer ucu serbest olan alüminyum kirişin her iki tarafına dörder adet ve simetrik olarak yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 3).

Bu akıllı kiriş uygulamasında PZT yamaların birbirlerinden bağımsız olarak kullanılabilmesi için alüminyum kirişle aralarına ince yalıtkan tabakalar yerleştirilmiştir. Böylece her PZT yamanın diğer yamalardan bağımsız (ya da kullanım amacına göre istenirse birlikte) algılayıcı ya da uyarıcı olarak kullanılabilmesi sağlanmıştır. Çalışmada öncelikle, akıllı kiriş üzerinde bulunan PZT yamaların buldukları yüzeye ve konumlarına göre adlandırılmaları yapılmıştır. (Şekil 3). Daha güçlü uyarıcı etkinliği sağlanmak amacıyla 4 adet PZT yama uyarıcı olarak kullanılmıştır. Bu yamalar Şekil 3'teki adlandırılmalarıyla 1A, 1B, 4A ve 4B'dir. Algılayıcı olarak ise bir adet PZT yama (2A) kullanılmıştır.



Şekil 2. BM500 PZT Yama



Şekil 3. PZT Yamaların Adlandırılması

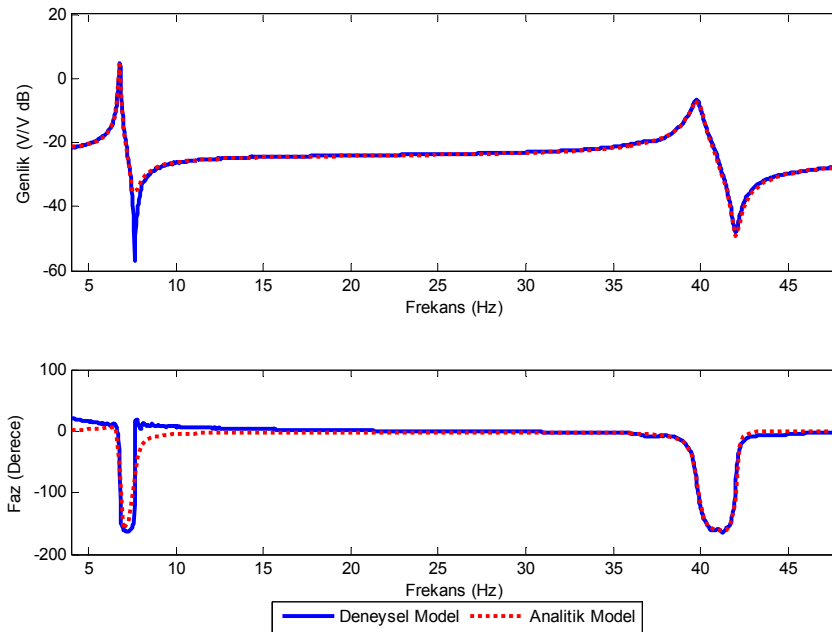
### 3. DENEYSEL MODELLEME

Uyarıcı olarak kullanılan 4 adet PZT yamaların tümü (yani 2 adet bimorf konfigürasyonda) 2 Hz. – 48 Hz. frekans aralığındaki sinüs dalgalarıyla uyarılmış ve algılayıcı olarak kullanılan PZT yamadan ölçüm alınmıştır. Sistemin frekans cevabı Brüel & Kjaer 3560-5 PULSE platformu kullanılarak elde edilmiş ve ölçülen 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. Bu modelin elde edilmesinde PZT yama grubu (1A, 1B, 4A ve 4B) uyarıcı ve bir adet PZT (2A) yama da algılayıcı olarak kullanılmıştır. Şekil 4’te deneysel olarak elde edilen frekans cevabı ile oluşturulmuş analitik modelin frekans cevabı gösterilmiştir.

### 4. KONTROLÇÜ TASARIMI

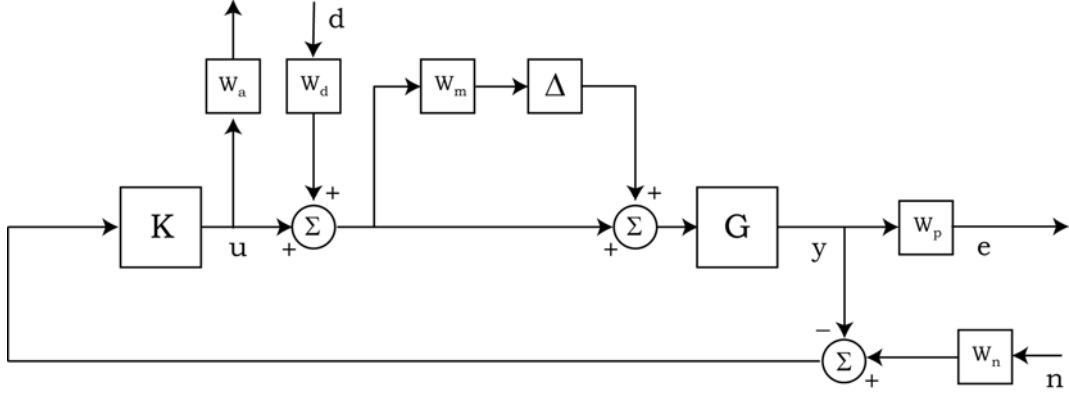
Bu bölümde akıllı kirişin serbest ve ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşimlerinin kararlı şekilde aktif olarak bastırılması amaçlayan  $H_\infty$  gürbüz kontrolçüsünün tasarımı açıklanmıştır.  $H_\infty$  denetçi tasarımında amaç, sistemin girdileri olarak modellenen gürültü sinyalleri ile çıktıları olarak belirlenen hata sinyalleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan transfer

fonksiyonun  $H_\infty$  normunun minimize edilmesidir. Kontrolcü tasarımında kullanılan blok diyagram Şekil 5’te verilmiştir. Bu blok diyagramda sistem ve kontrolcü blokları dışında sistem belirsizliğini, sistem girdi ve çıktıların ağırlıklarını ve beklenen performans değerini içeren bloklar da bulunmaktadır. Sistemin yüksek frekans dinamikleri belirsizlik olarak  $W_m$  bloğunda gösterilmiştir. Sisteme giren tahrik ağırlığı  $W_d$  ve gürültü ağırlığı da  $W_n$  ile ifade edilmiştir. Sistemden beklenen performans ise  $W_p$  bloğuyla kontrolcü tasarımına eklenmiştir. Tahrik ve performans ağırlıkları ile belirsizlik blokları kontrolçünün kararlı bir şekilde akıllı kirişin titreşimlerini sönümlendirebilmeleri için seçilmiştir, bu blokların frekans cevapları Şekil 6’da gösterilmiştir. Şekil 6’da görülebileceği gibi kontrolçüden beklenen ilk rezonans frekansında titreşimin sönümlenmesi olduğu için performans ve tahrik ağırlıkları alçak filtre şeklindedir. Gürültü ağırlığı ( $W_n$ ) 0.01 olarak, kontrolcü çıktısını sınırlı tutmak için kullanılan  $W_a$  ise 0.03 olarak seçilmiştir. Akıllı kirişin titreşiminin  $H_\infty$  kontrolçüsü ile sönümlenmesindeki etkinliği Şekil 7’de gösterilmiş ve ilk eğilme titreşim biçiminin sönümlenme seviyesi -7 dB olarak belirlenmiştir.

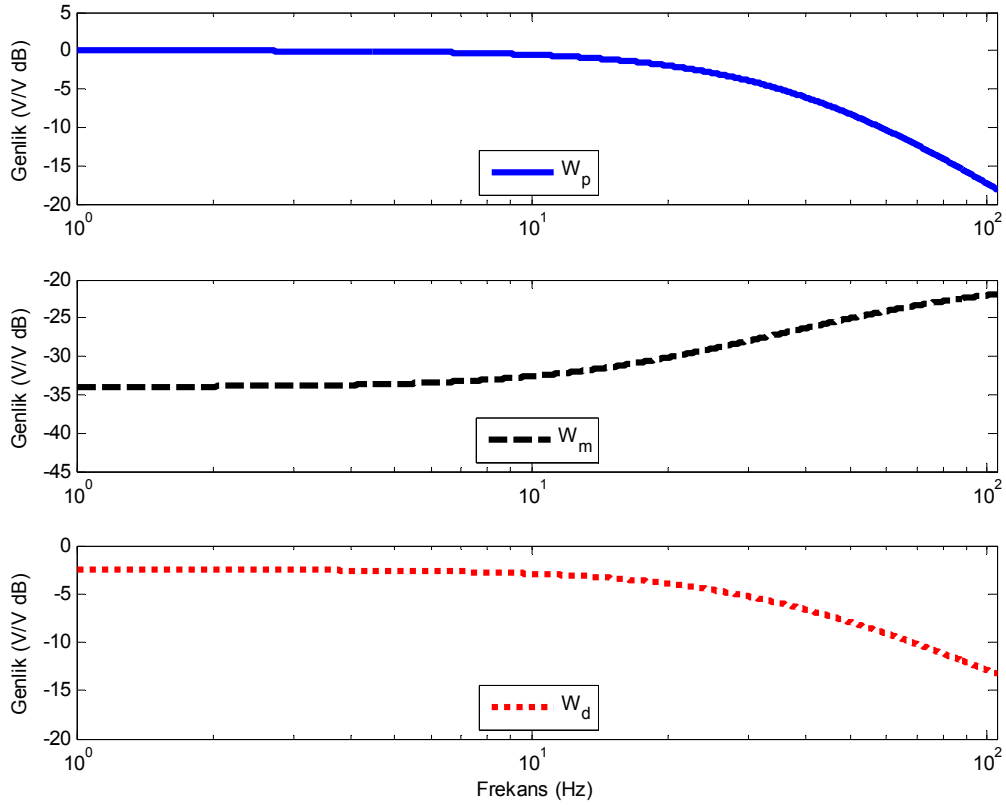


Şekil 4. Deneysel ve Analitik Modellerin Frekans Cevabı

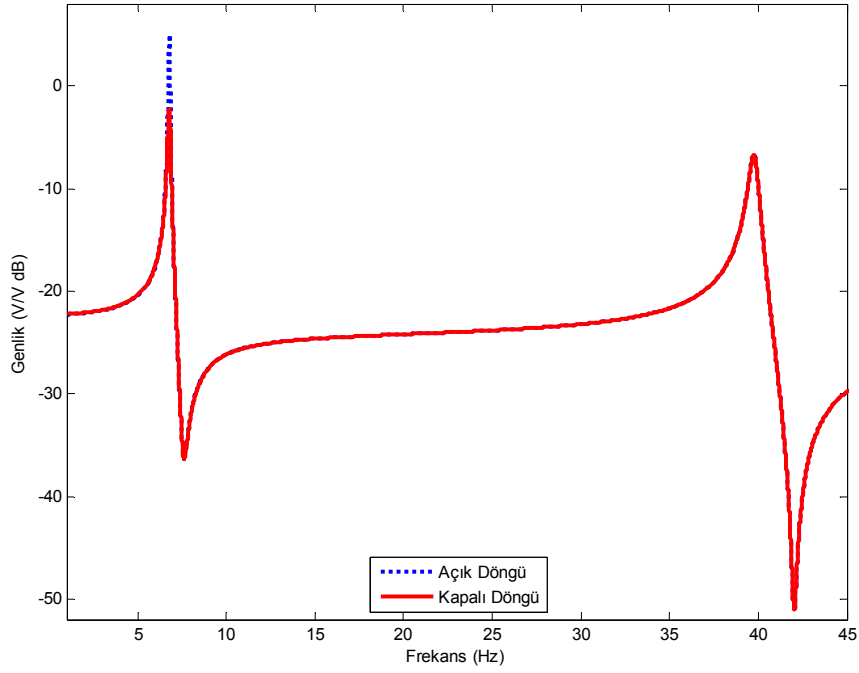
$$G(s) = \frac{0.05513s^6 + 0.2846s^5 + 4067s^4 + 1.517 \times 10^4 s^3 + 1.586 \times 10^7 s^2 + 2.877 \times 10^7 s + 1.567 \times 10^{10}}{s^6 + 4.922s^5 + 6.611 \times 10^4 s^4 + 1.089 \times 10^5 s^3 + 2.294 \times 10^8 s^2 + 1.815 \times 10^8 s + 2.044 \times 10^{11}} \quad (1)$$



Şekil 5. Kontrolcü Blok Diyagramı



Şekil 6. Kontrolcü Tasarımında Seçilen Blokların Frekans Cevapları

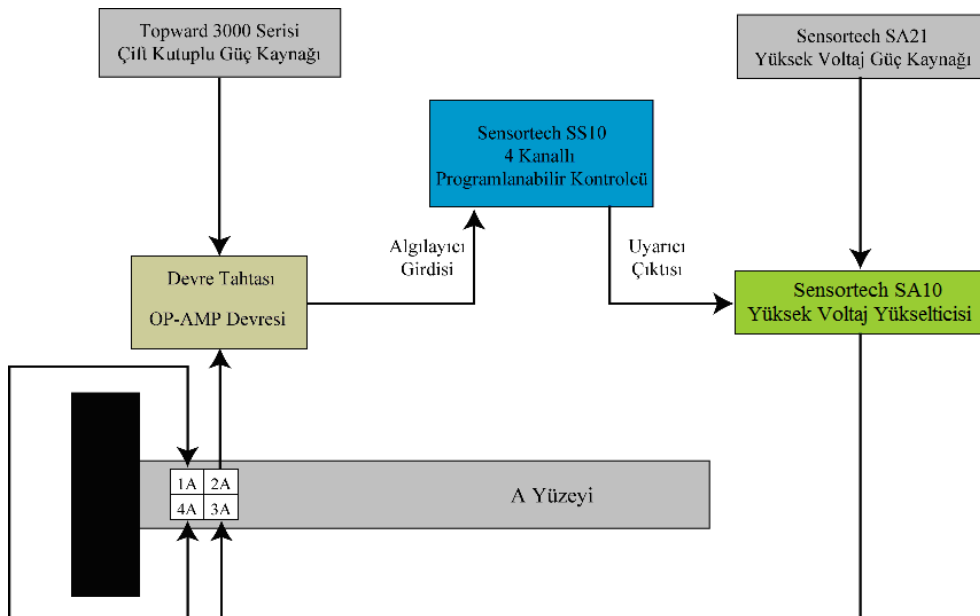


Şekil 7. Açık ve Kapalı Döngü Frekans Cevabı

## 5. DENEY DÜZENEGİ

Kontrolcü uygulaması için Şekil 8'de gösterilen düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenekte, 4 kanallı Sensortech SS10 programlanabilir kontrolcü, algılayıcı voltaj girdisi ve uyarıcı voltajın çıktısı gösterilmiştir. Uyarıcı voltaj programlanabilir kontrolcü 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 kontrolcüye gönderilmiştir. Op-amp devresi devre-tahtası üzerine kurulmuş olup, çift kutuplu sabit voltaj kaynağıyla çalıştırılmaktadır.



Şekil 8. Kontrolcü Düzenegi

## 6. AKILLI KİRİŞ İÇİN DENEYSEL TİTREŞİM KONTROL ÇALIŞMALARI

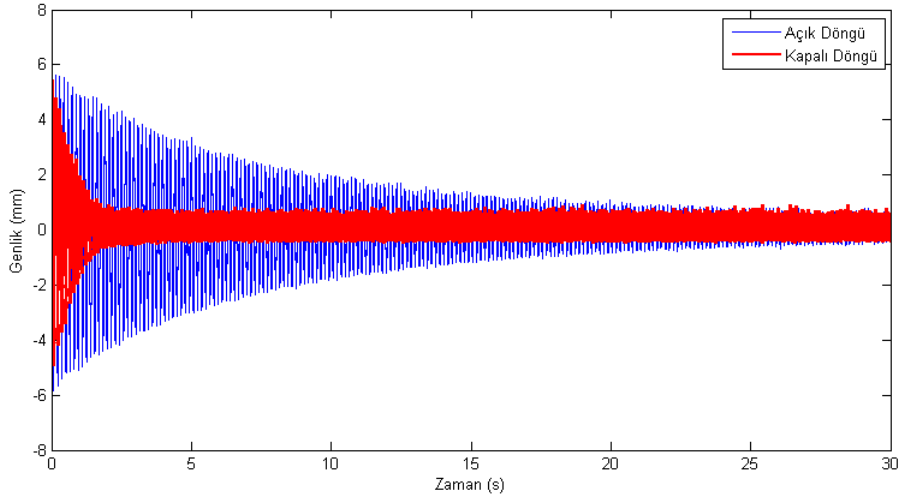
### 6.1. Serbest Titreşim Kontrolü

Titreşim kontrol çalışmalarının ilk bölümü olan serbest titreşim deneylerinde akıllı kirişin serbest ucuna 5 mm'lik bir yer değiştirme verilmiş ve bu yer değişimi sonucunda sistemin verdiği zaman cevapları açık ve kapalı döngü için ölçülmüştür. Kontrolcünün çalışmadığı ve kirişin tamamen serbest titreşime bırakıldığı durum açık döngü, kontrolcünün çalıştığı ve kirişin PZT yamalar ile uyarılarak titreşimin sönümlenmeye çalışıldığı durum ise kapalı döngü olarak tanımlanmıştır. Şekil 9 da akıllı kirişin serbest ucuna uygulanan yer

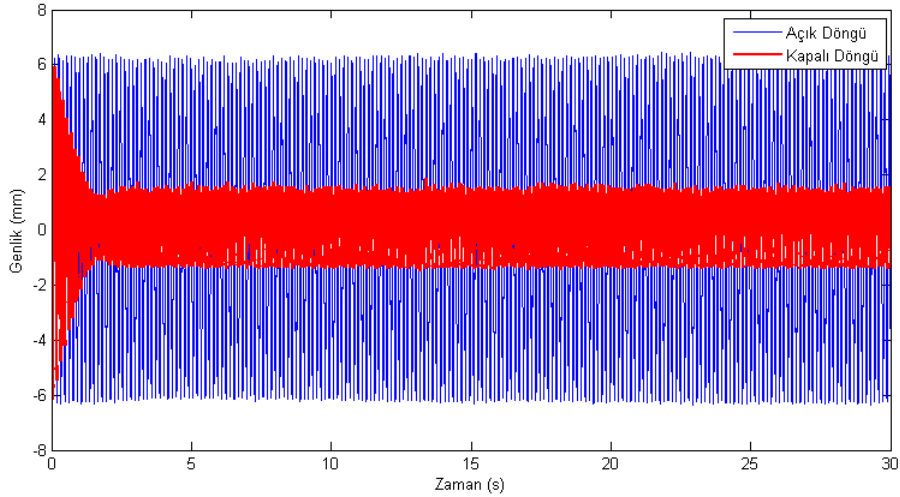
değiştirme ve sıfır hız sonunda elde edilen açık ve kapalı döngü zaman cevapları gösterilmiştir.

### 6.2. Zorlanmış Titreşim Kontrolü

Deneyisel titreşim çalışmalarının ikinci bölümünde akıllı kiriş ilk rezonans frekansında (yaklaşık 6.78 Hz.) 3A ve 3B olarak adlandırılan PZT yamalar bimorf konfigürasyonunda kullanılarak sinüs dalgası ile 20 saniye uyarılmış ve bu uyarım süresince kontrolcü zorlanmış titreşimin sönümlenmesi için çalıştırılmıştır. Şekil 10 akıllı kirişin ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşim sonuçlarını açık ve kapalı döngüler olarak vermektedir.



Şekil 9. Serbest Titreşimin Açık ve Kapalı Döngü Zaman Cevabı



Şekil 10. Zorlanmış Titreşimin Açık ve Kapalı Döngü Zaman Cevabı

## 7. SONUÇLAR

Bu bildiriye, akıllı bir kirişin titreşim kontrolünde PZT yamaların algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanılması, kirişin serbest ve ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşimlerinin kararlı bir şekilde aktif olarak bastırılmasını amaçlayan gürbüz kontrolcü uygulaması deneysel olarak gösterilmiştir.

Akıllı kirişin serbest titreşiminin sönümlenmesi açık döngü düzeneğinde 30 saniyeden fazla sürdüğü halde kapalı döngü düzeneğinde bu titreşimin 2 saniyeden daha kısa bir süre içerisinde sönümlendiği gözlenmiştir. Akıllı kirişin ilk rezonans frekansındaki zorlanmış titreşimleri göz önüne alındığında ise kapalı döngü düzeneği ile elde edilen titreşim genliği açık döngü düzeneğindeki göre yaklaşık %75'lik bir oranda azalma göstermiştir.

Sonuç olarak bu çalışma ile, PZT yamaların algılayıcı ve uyarıcı olarak kullanıldığı  $H_\infty$  kontrolcü uygulamasının akıllı kirişin titreşimlerinin aktif kontrolünde hedeflendiği gibi etkin bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir.

## 8. KAYNAKÇA

1. Crawley, E. F. , Luis, J., “Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures”, *AIAA Journal*, 25(10),1987, 1373-1385.
2. Canfield, R. A., Morgenstern S. D., Kunz, D. L., “Alleviation of Buffet-induced Vibration using Piezoelectric Actuators”, *Computers and Structures*, 86, 2008, 281-291.
3. Suleman A. and Costa A. P. , “Adaptive Control of an Aeroelastic Flight Vehicle using Piezoelectric Actuators”, *Computers and Structures*, 82, 2004, 1303-1314.
4. Mehrabian A. R. and Koma-Yousefi A., “A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures”, *Journal of the Franklin Institute*, 2009 (available online).

5. Şahin, M., Karadal, F. M., Yaman, Y., Kırçalı, Ö.F., Nalbantoğlu, V., Ülker, D.F., and Çalışkan, T., “Smart Structures and Their Applications on Active Vibration Control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU”, *Journal of Electroceramics*, 20(3-4), 2008, 167-174.
6. Kırçalı, Ö.F., Yaman, Y., Nalbantoğlu, V., Şahin, M., Karadal, F. M., and Ülker, F. D., “Spatial Control of a Smart Beam”, *Journal of Electroceramics*, 20(3-4), 2008, 175-185.
7. Yang, J., An Introduction to the Theory of Piezoelectricity. Vol. 9., New York: Springer, 2005.