

## AKILLI BİR KİRİŞİN TİTREŞİMLERİNİN AKTİF DENETİMİ İÇİN PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> ve PID DENETÇİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Cem ONAT <sup>\*,\*\*</sup>, Melin ŞAHİN <sup>\*\*</sup>, Yavuz YAMAN <sup>\*\*</sup>

(\*) Makina Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya

(\*\*) Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
[conat@inonu.edu.tr](mailto:conat@inonu.edu.tr), [msahin@metu.edu.tr](mailto:msahin@metu.edu.tr), [yaman@metu.edu.tr](mailto:yaman@metu.edu.tr)

### ÖZET

Bu bildiride, piezoelektrik yamalara sahip akıllı bir kirişin titreşimlerinin aktif denetimi için PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> ve PID denetçiler tasarlanıp değerlendirilmiştir. Denetçilerin gerekli parametrelerinin eniyileştirilmesi akıllı kirişin, deneysel olarak elde edilmiş, transfer fonksiyonu ve optimal referans model kullanılarak yapılmıştır. Optimal referans model, tam durum geri-beslemeli denetçili bir kapalı çevrim sistem olarak elde edilmiştir. PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçi ise sürekli kesir açılımı yönteminin dördüncü derece yaklaşımı ile hesaba katılmıştır. PID ve PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçi parametrelerinin eniyileştirilmesi, MATLAB Simulink ortamında geliştirilen bir eniyileştirilme modeliyle yapılmıştır. Frekans ve zaman tanım kümesi benzetim sonuçları, tasarlanan PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçinin akıllı kirişin titreşimlerini bastırmada daha etkin olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı kiriş, PZT, PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> kontrol

### EVALUATION OF PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> AND PID CONTROLLERS FOR THE ACTIVE VIBRATION SUPPRESSION OF A SMART BEAM

#### ABSTRACT

In this study PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> and PID controllers were designed for the active vibration suppression of a smart beam equipped with piezoelectric patches. The optimization of the controller's required parameters was established by using the experimentally obtained transfer function of the smart beam and an optimal reference model. The optimal reference model was obtained as a closed loop system which had a full-state feedback controller. During the study, the PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> controller was considered by using a fourth degree approach of continued fraction expansion method. The optimization of the PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> and PID controller's parameters was then performed by using an optimization model which has been developed in house by using MATLAB Simulink package program. The frequency and time domain simulations demonstrated that the designed PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> controller was more effective in suppressing the vibrations of the smart beam.

**Keywords:** Smart beam, PZT, PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> control

#### 1. GİRİŞ

Güncel hafif ve esnek havacılık yapıları, istenmeyen bir titreşimsel yük altında yapısal tutarlılıklarını korumak için uygun bir denetim sistemini gerektirirler.

Piezoelektrik malzemelerdeki son teknolojik gelişmeler, aktif titreşim denetim sistemleri için önemli bir seçenek sunmaktadır. Kurşun-Zirkonyum-Titanyum (PZT) gibi piezoelektrik malzemeler aktif denetim sistemlerinde hem uyarıcı hem de algılayıcı

olarak kullanılabilirler. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümünde yapılan çalışmalarda, dışarıdan uygulanan bir uyarıcı algılayabilecek ve buna aktif denetim mekanizmaları aracılığıyla müdahale edebilecek akıllı kiriş ve akıllı plaka benzeri yapılarda piezoelektrik yamalar hem uyarıcı olarak hem de algılayıcı olarak kullanılmışlardır [1-8].

Bu çalışmalarda, akıllı kiriş tamsayı dereceli model olarak ele alınmıştır. Tamsayı dereceli

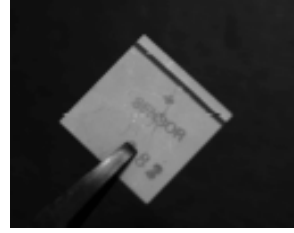
sistemler için kesirli dereceli denetçilerin kullanımı; tamsayı dereceli denetçiler kullanımına göre kazanç ve faz payı karakteristiklerinin ayarlanmasında daha fazla esneklik sağlamaktadır [9-11]. Bu yüzden, pratikte çok geniş kullanım alanına sahip PID denetçiler ailesinin önemli üyelerinden olan  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçiler birçok araştırmacıyı bu konuda daha iyi tasarım yöntemleri geliştirmeye yönlendirmiştir [12-17].

Bu çalışmada, bir akıllı kirişin aktif titreşim denetimi için PID ve  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçi tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Denetçilerin gerekli parametrelerinin elde edilmesi optimal bir referans model aracılığıyla kurulmuş bir eniyileştirme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada optimal referans model tam durum geri beslemeli LQR (Linear Quadratic Regulator) denetçili kapalı çevrim sistemdir. Denetçi parametrelerinin eniyileştirilmesi problemi “Matlab Eniyileştirme Araç-Kutusu” ve “Matlab-Simulink” ortamında geliştirilen bir model kullanılarak çözülmüştür.  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçi sürekli kesir açılımı yönteminin dördüncü derece yaklaşımıyla hesaba katılmıştır.

## 2. AKILLI KİRİŞ MODELİ

Çalışmada kullanılan akıllı kiriş Şekil 1 de gösterilmiştir. Akıllı kiriş 8 adet 25x10x0.5 mm boyutlarında Sensortech BM500 tipi yamanın 490x51x2 mm boyutlarında tek ucu tutturulmuş ve diğer ucu

serbest olan pasif alüminyum kirişin her iki tarafına dörder adet ve simetrik olarak yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Şekil 2 bir tipik PZT yamayı, Şekil 3 ise PZT yamaların yerleşimini göstermektedir.

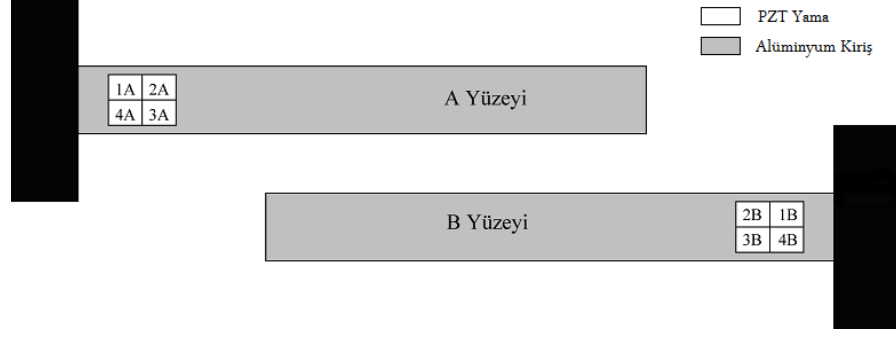


Şekil 2. Çalışmada kullanılan bir PZT yama.

Uyarıcı olarak kullanılan 4 adet PZT yama (1A-1B-4A-4B) 2 Hz. – 48 Hz. frekans aralığındaki sinüs dalgalarıyla uyarılmış ve algılayıcı olarak kullanılan 2A PZT yamasından ölçüm alınmıştır. Sistemin frekans cevabı Brüel & Kjaer 3560-5 PULSE platformu kullanılarak elde edilmiş ve ölçümlenen bu frekans cevabı kullanılarak MATLAB R2007b programı yardımıyla analitik bir model oluşturulmuştur. Akıllı kirişin “en küçük kareler” yöntemi kullanılarak bulunan 6. dereceden transfer fonksiyonu Denklem 1 de gösterilmiştir. [18].



Şekil 1. Çalışmada kullanılan akıllı kiriş.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan PZT yamaların yerleşimi.

$$G(s) = \frac{0.05513 \cdot s^6 + 0.284 \cdot s^5 + 4067 \cdot s^4 + 1.517 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 1.586 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 2.877 \cdot 10^7 \cdot s + 1.567 \cdot 10^{10}}{s^6 + 4.922 \cdot s^5 + 6.611 \cdot 10^4 \cdot s^4 + 1.089 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 2.294 \cdot 10^8 \cdot s^2 + 1.815 \cdot 10^8 \cdot s + 2.044 \cdot 10^{11}} \quad (1)$$

### 3. KESİR DERECELİ MATEMATİK TEORİSİ

Kesir dereceli matematiğin derecesi bir reel sayıdır [19]. Literatürde, kesir dereceli genel integro-diferansiyel işlemler için birçok tanım bulunmaktadır. Bunların arasında en çok kullanılan integro-diferansiyel ifadeler Cauchy, Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov ve Caputo tarafından verilmiştir [12]. Kesir dereceli diferansiyel için Caputo ifadesi şöyle verilir;

$${}_0 D_t^\alpha y(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\gamma)} \int_0^t \frac{y^{(m+1)}(\tau)}{(t-\tau)^\gamma} d\tau \quad (2)$$

burada  $\alpha = m + \gamma$ ,  $m$  bir tamsayı ve  $0 < \gamma < 1$  alınıyor. Kesir dereceli integral için Caputo ifadesi ise şöyle tanımlanıyor [20];

$${}_0 D_t^\gamma = \frac{1}{\Gamma(-\gamma)} \int_0^t \frac{y(\tau)}{(t-\tau)^{1+\gamma}} d\tau, \quad \gamma < 0 \quad (3)$$

Üzerinde işlemler kolay yapılabildiğinden dolayı, Laplace dönüşümü İntegro-diferansiyel işlemler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir kesir dereceli diferansiyelin Laplace dönüşümü şöyle verilebilir [20];

$$L[{}_0 D_t^\alpha f(t)] = s^\alpha L[f(t)] - \sum_{k=1}^{n-1} s^k [{}_0 D_t^{\alpha-k-1} f(t)] \quad (4)$$

Eğer  $f(t)$  fonksiyonunun bütün türevleri sıfır ise aşağıdaki eşitlik yazılabilir [20].

$$L[{}_0 D_t^\alpha f(t)] = s^\alpha L[f(t)] \quad (5)$$

Kesir dereceli bir kontrol sisteminin kesir dereceli diferansiyel ifadesi şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^{\alpha_n} y(t)}{dt^{\alpha_n}} + a_{n-1} \frac{d^{\alpha_{n-1}} y(t)}{dt^{\alpha_{n-1}}} + \dots + a_0 \frac{d^{\alpha_0} y(t)}{dt^{\alpha_0}} \\ & = b_m \frac{d^{\beta_m} x(t)}{dt^{\beta_m}} + b_{m-1} \frac{d^{\beta_{m-1}} x(t)}{dt^{\beta_{m-1}}} + \dots + b_0 \frac{d^{\beta_0} x(t)}{dt^{\beta_0}} \end{aligned} \quad (6)$$

Burada  $y(t)$  sistemin çıkışı  $x(t)$  ise sistemin girişidir. Dolayısıyla (5) eşitliğinin Laplace dönüşümü ile gösterilen geçiş fonksiyonu şöyle elde edilebilir [14].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^{\beta_m} + b_{m-1} s^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 s^{\beta_0}}{a_n s^{\alpha_n} + a_{n-1} s^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0 s^{\alpha_0}} \quad (7)$$

Burada  $\alpha_n > \alpha_{n-1} > \dots > \alpha_0 \geq 0$  ve  $\beta_m > \beta_{m-1} > \dots > \beta_0 \geq 0$  sağlanmalıdır  $a_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ) ve  $b_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, m$ ) ise sabitlerdir.

$$s^\alpha = \frac{(\alpha^4 + 10 \cdot \alpha^3 + 35 \cdot \alpha^2 + 50 \cdot \alpha + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \alpha^4 - 20 \cdot \alpha^3 + 40 \cdot \alpha^2 + 320 \cdot \alpha + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \alpha^4 - 150 \cdot \alpha^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \alpha^4 + 20 \cdot \alpha^3 + 40 \cdot \alpha^2 - 320 \cdot \alpha + 384) \cdot s + (\alpha^4 - 10 \cdot \alpha^3 + 35 \cdot \alpha^2 - 50 \cdot \alpha + 24)}{(\alpha^4 - 10 \cdot \alpha^3 + 35 \cdot \alpha^2 - 50 \cdot \alpha + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \alpha^4 + 20 \cdot \alpha^3 + 40 \cdot \alpha^2 - 320 \cdot \alpha + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \alpha^4 - 150 \cdot \alpha^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \alpha^4 - 20 \cdot \alpha^3 + 40 \cdot \alpha^2 + 320 \cdot \alpha + 384) \cdot s + (\alpha^4 + 10 \cdot \alpha^3 + 35 \cdot \alpha^2 + 50 \cdot \alpha + 24)} \quad (8)$$

Kesir dereceli integro-diferansiyel işlemlerin zaman tabanında analizi oldukça karmaşık ve çok zaman alan çözüm süreçleri gerektirmektedir. 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 [21]. Kesir dereceli sistemler için en önemli yaklaşımlardan biri de sürekli kesir açılımı (Continuous Fractional Expantion) yöntemidir.

Bu çalışmada,  $PI^\lambda D^\mu$  denetçi sürekli kesir açılımı (CFE) yönteminin dördüncü derece yaklaşımı kullanılarak elde edilen tamsayı dereceli yaklaşımıyla hesaba katılmıştır. Denklem 8'de kesir dereceli bir ifadenin, CFE yönteminin 4. derece yaklaşımı ile elde edilmiş tamsayı dereceli yaklaşımı verilmektedir. Söz konusu yöntemin farklı derecelerdeki yaklaşımlarının bir incelemesi [22]'de verilmektedir.

#### 4. DENETÇİLERİN TASARIMI

$PI^\lambda D^\mu$  ve PID denetçileri parametrelerinin belirlenmesinde ilk olarak, Denklem 1'de verilen akıllı girişin transfer fonksiyonu ve bir referans model kullanılarak eniyileştirme problemi kurulmuştur. Bu problem, referans model çıkışı ile kendi kapalı çevrim çıkışı arasındaki farkın alınmasıyla oluşturulan hata fonksiyonunu sifıra götüreceğ biçimde, denetçinin tasarlanması problemidir. Bunun çözümü aslında Şekil 4'de verilen kapalı çevrim sistemin çıkışının minimize edilmesidir.

Burada  $R(s)$  ve  $y_r(t)$  referans modelin transfer fonksiyonunu ve çıkışını,  $x(t)$  ve  $y(t)$  sistem girişini ve çıkışını göstermektedirler.  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  ifadeleri oransal, integral ve türevsel kazancı göstermektedirler.  $A(s)$  ve  $B(s)$  transfer fonksiyonları ise sırasıyla  $1/s^\lambda$  ve  $s^\mu$  kesir dereceli ifadelerinin CFE yöntemiyle elde edilmiş dördüncü dereceden tamsayı yaklaşımlarını göstermektedirler ve sırasıyla Denklemler 9 ve 10'da verilmektedirler.

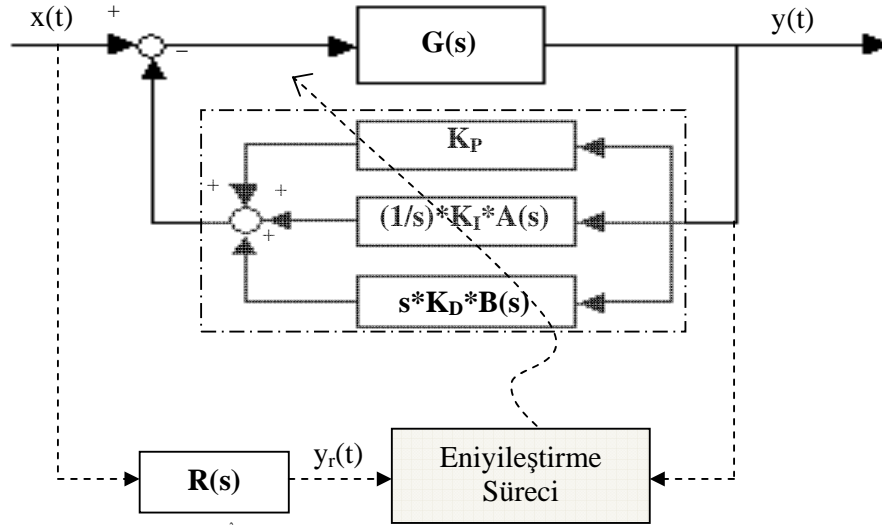
Çalışmanın bir sonraki adımı,  $PI^\lambda D^\mu$  ve PID denetçilerin parametrelerinin ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ) bulunması için gerekli eniyileştirme probleminin çözülmesidir. Bu, MATLAB Eniyileştirme Araç-Kutusu'nun *lsqnonlin* fonksiyonu rutini ile kontrol edilen bir süreç olarak Şekil 5'de verilen Matlab-Simulink ortamında geliştirilmiş eniyileştirme modelinin yinelemeli biçimde çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Burada giriş fonksiyonu olarak Şekil 6'da gösterilen bir darbe fonksiyonu kullanılmıştır. Eniyileştirme süreci sonunda bulunan  $PI^\lambda D^\mu$  ve PID denetçileri parametrelerinin değerleri  $K_P=0.37$ ,  $K_I=0.02$ ,  $K_D=1.24$ ,  $\lambda=0.19$  ve  $\mu=-0.90$  dir.

Şekil 5'de gösterilen A, B, C ve D matrisleri akıllı giriş transfer fonksiyonu  $G(s)$ 'in durum değişkeni-uzayı modelini temsil eden matrislerdir. K ise tam-durum geri beslemeli optimal denetçinin kazanç vektörüdür. Optimal denetçinin tasarımında kullanılan Q ve R matrisleri Denklem 11'de verilmektedir.

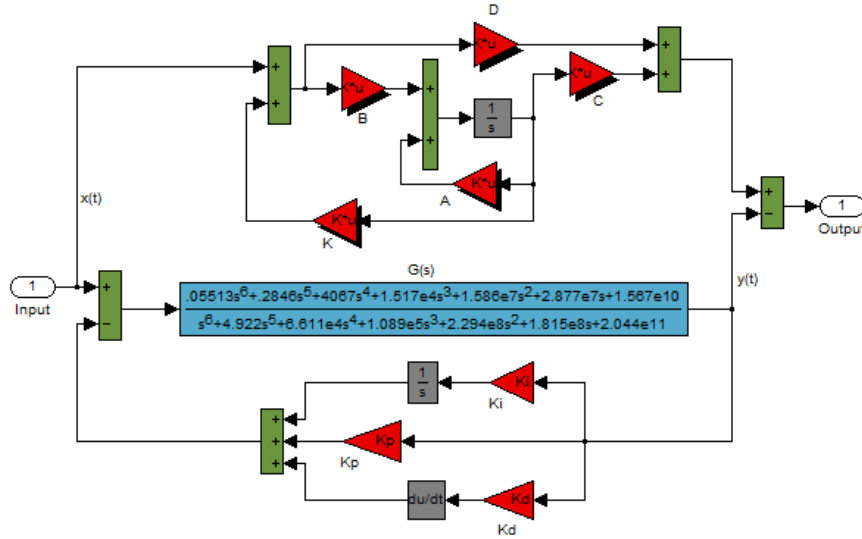
$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = [0.05] \quad (11)$$

$$\frac{1}{s^4} \equiv A(s) = \frac{(\lambda^4 - 10 \cdot \lambda^3 + 35 \cdot \lambda^2 - 50 \cdot \lambda + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \lambda^4 + 20 \cdot \lambda^3 + 40 \cdot \lambda^2 - 320 \cdot \lambda + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \lambda^4 - 150 \cdot \lambda^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \lambda^4 - 20 \cdot \lambda^3 + 40 \cdot \lambda^2 + 320 \cdot \lambda + 384) \cdot s + (\lambda^4 + 10 \cdot \lambda^3 + 35 \cdot \lambda^2 + 50 \cdot \lambda + 24)}{(\lambda^4 + 10 \cdot \lambda^3 + 35 \cdot \lambda^2 + 50 \cdot \lambda + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \lambda^4 - 20 \cdot \lambda^3 + 40 \cdot \lambda^2 + 320 \cdot \lambda + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \lambda^4 - 150 \cdot \lambda^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \lambda^4 + 20 \cdot \lambda^3 + 40 \cdot \lambda^2 - 320 \cdot \lambda + 384) \cdot s + (\lambda^4 - 10 \cdot \lambda^3 + 35 \cdot \lambda^2 - 50 \cdot \lambda + 24)} \quad (9)$$

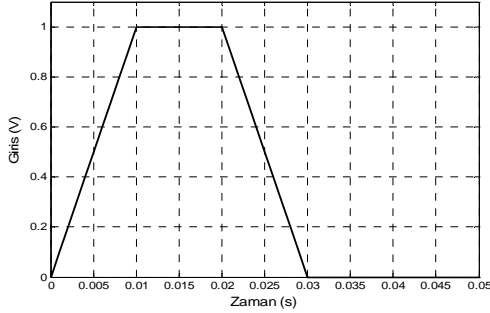
$$s^\mu \equiv B(s) = \frac{(\mu^4 + 10 \cdot \mu^3 + 35 \cdot \mu^2 + 50 \cdot \mu + 24) \cdot s^4 + (-4 \cdot \mu^4 - 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 + 320 \cdot \mu + 384) \cdot s^3 + (6 \cdot \mu^4 - 150 \cdot \mu^2 + 864) \cdot s^2 + (-4 \cdot \mu^4 + 20 \cdot \mu^3 + 40 \cdot \mu^2 - 320 \cdot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



Şekil 4. PID ve PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçi parametrelerinin ayarlanması için sistem yapısı.



Şekil 5. Simulink eniyileştirme modeli.



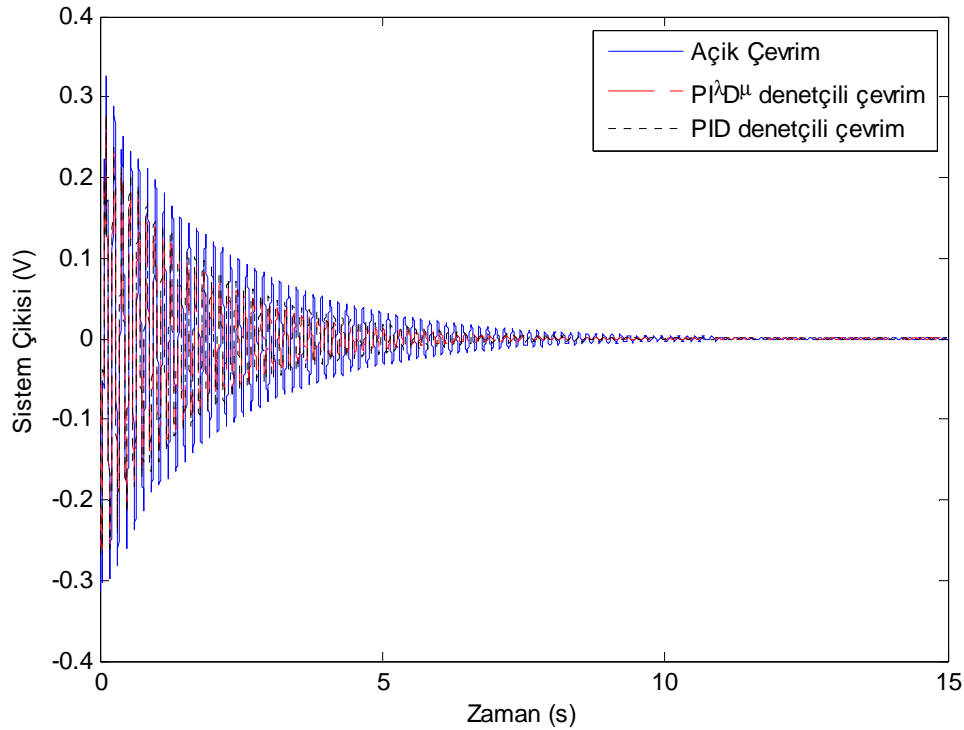
Şekil 6. Eniyileştirme modelinde kullanılan giriş işareti.

### 5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

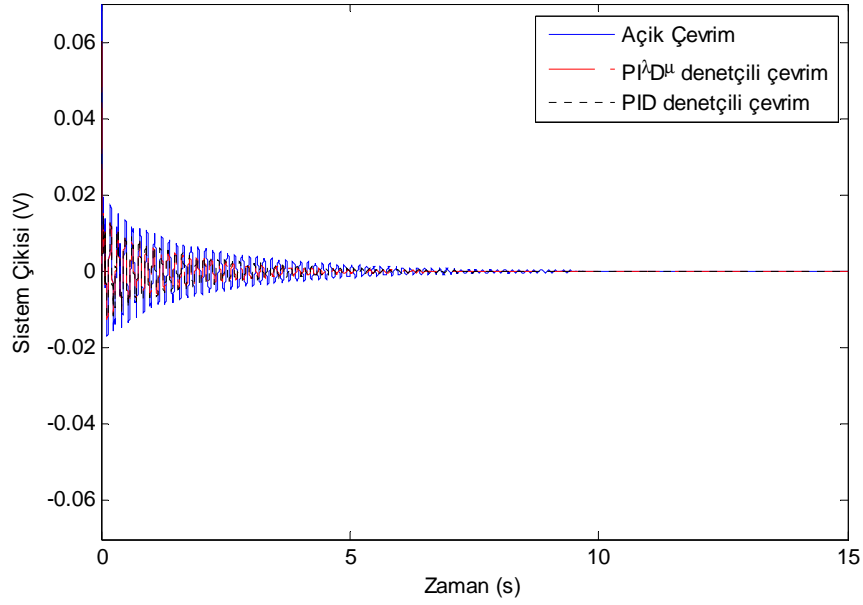
Çalışmada  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  ve PID denetçilerin kullanıldığı kapalı çevrim sistemler ve açık çevrim sistem için zaman ve frekans tanım kümesi benzetimleri yapılmıştır. PZT yamaların hem algılayıcı ve hem de uyarıcı olarak düşünüldüğü bu çalışmada giriş işareti PZT uyarıcıya uygulanan gerilim (voltaj) değeri, çıkış işareti ise PZT algılayıcıdan alınan akımdan hesaplanan gerilim değeridir.

Sistemin serbest cevapları Şekil 7'de verilmiştir. Burada açık çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 0.4454, PID denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 0.3378 ve  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 0.3340 olarak kaydedilmiştir.

Şekil 6'da verilen 1V gerilim genliğindeki yaklaşık bir darbe girişine karşılık sistemin serbest cevapları Şekil 8'de verilmiştir. Açık çevrim sistemin çıkışının en yüksek değeri 0.0699 V, 2 normu değeri 0.2241, PID denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının en yüksek değeri 0.0602 V, 2 normu değeri 0.1729 ve  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının en yüksek değeri 0.0612 V, 2 normu değeri 0.1725 olarak kaydedilmiştir.



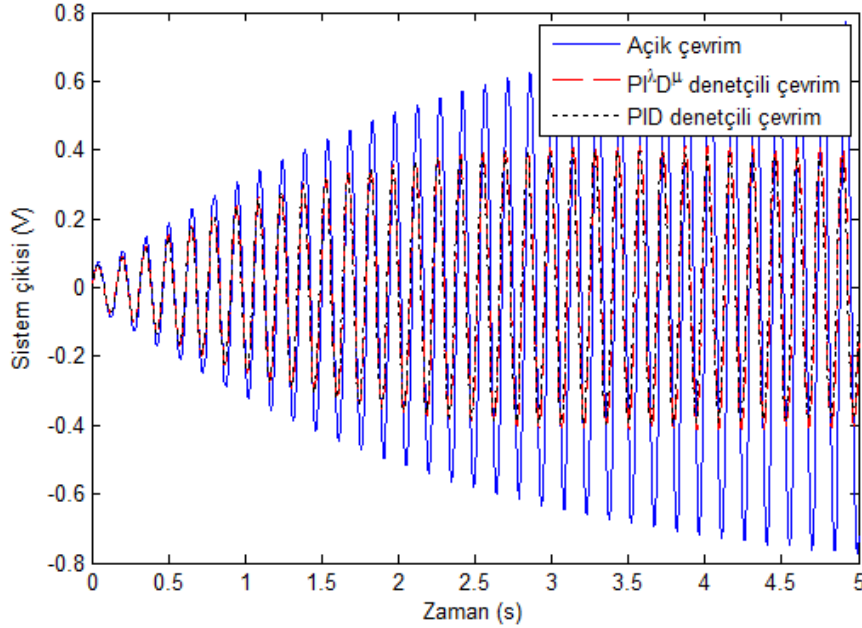
Şekil 7. Akıllı kirişin serbest cevabı.



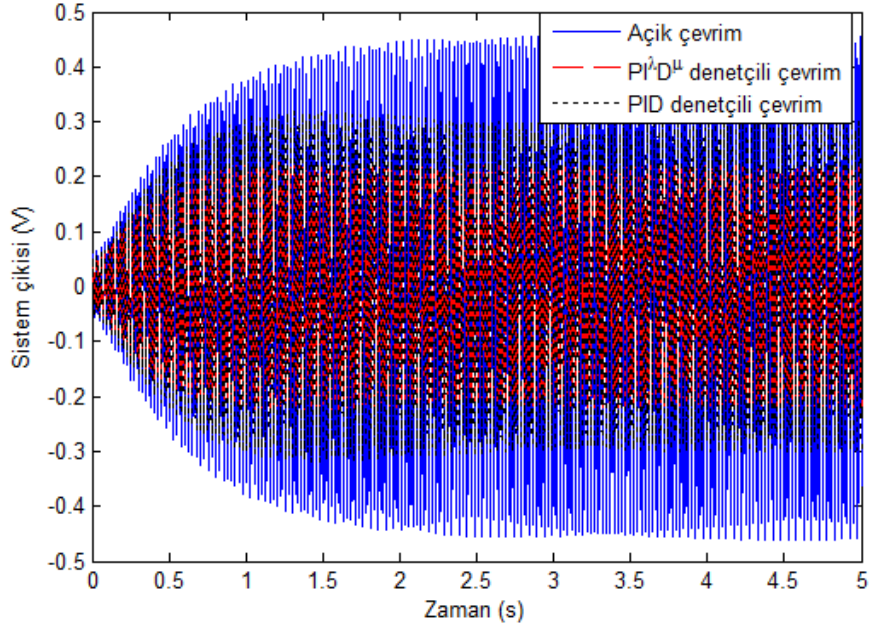
Şekil 8. Akıllı kirişin darbe cevabı.

Şekil 9'da, akıllı kirişin birinci rezonans frekansında ( $\omega_1=6.8071$  Hz) ve 1 V gerilim genliğinde bir sinüzoidal girişe karşılık sistem cevapları verilmektedir. Burada, açık çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 12.4132, PID denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 7.4318,  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 7.6865 olarak kaydedilmiştir.

Akıllı kirişin ikinci rezonans frekansında ( $\omega_1=39.7773$  Hz) ve 1 V gerilim genliğinde bir sinüzoidal girişe karşılık gelen sistem cevapları Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada, açık çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 11.4629, PID denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri 7.9337,  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  denetçili kapalı çevrim sistemin çıkışının 2 normu değeri ise 5.7978 olarak kaydedilmiştir.



Şekil 9. Akıllı kirişin ilk rezonans frekansındaki zorlanmış cevabı.



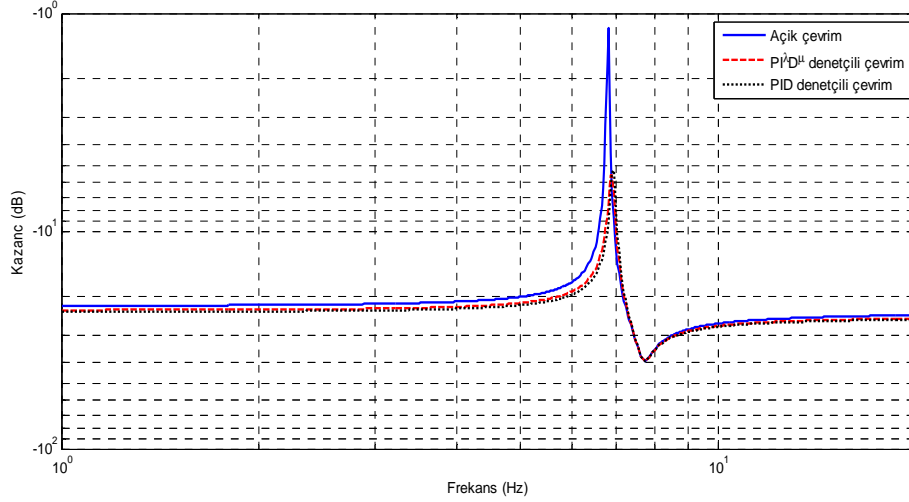
Şekil 10. Akıllı kirişin ikinci rezonans frekansındaki zorlanmış cevabı.

Şekil 11 ve 12'de sırasıyla akıllı kirişin birinci ve ikinci rezonans bölgesindeki kapalı çivrim frekans cevapları ve açık çivrim cevabı verilmiştir. Burada, ilk rezonans bölgesinde PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçili kapalı çivrim ile PID denetçili kapalı çivrim benzer bir performans sergileyerek titreşim seviyesini açık çivrim sisteme göre yaklaşık %35 oranında bastırmışlardır. İkinci rezonans bölgesinde ise PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçili kapalı çivrim açık çivrim sisteme göre yaklaşık %50 oranında, PID denetçili kapalı çivrim ise yaklaşık %20 oranında titreşim düzeyini bastırmışlardır.

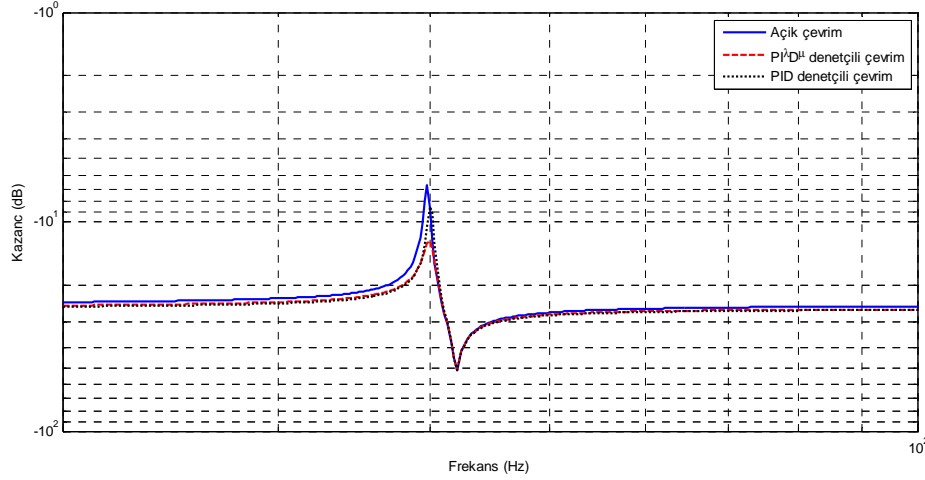
## 6. SONUÇ

Bu çalışmada tamsayı dereceli bir sistem olarak modellenen PZT yamalı bir akıllı kirişin titreşimlerinin bastırılması için; Matlab Eniyileştirme araç kutusu aracılığıyla PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> ve PID denetçiler tasarlanmış ve değerlendirilmiştir. Frekans ve zaman tanım kümesinde yapılan benzetimler PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> ve PID denetçilerin akıllı kirişin titreşimlerini bastırmada etkin olduklarını göstermiştir. Yüksek frekans dinamiklerinin etkisini azaltmak için denetçi bant genişliğinin ayarlanmasında, PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçinin PID denetçiye göre esnekliği ön plana çıkmış ve PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup> denetçi bu nedenle ikinci rezonans bölgesinde daha başarılı bir performans sergilemiştir.





Şekil 11. Birinci rezonans bölgesinde frekans cevabı.



Şekil 12. İkinci rezonans bölgesinde frekans cevabı.

## 7. KAYNAKLAR

1. Sahin M., Karadal F. M., Yaman Y., Kircali O. F., Nalbantoglu V., Ulker F. D., Caliskan T., "Smart Structures and Their Applications on Active Vibration Control: Studies in the Department of Aerospace Engineering", METU, J Electroceram, 20, 2008, 167-174.
2. Caliskan T., "Smart Materials and Their Applications in Aerospace Structures", Ph.D Thesis, Middle East Technical University, September, 2002.
3. Ulker D. F., "Active Vibration Control of Smart Structures", Master's thesis, Middle East Technical University, 2003.
4. Yaman Y., Caliskan T., Nalbantoglu 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, 2001, pp:137-147.
5. Yaman Y., Ulker F. D., Nalbantoglu V., Caliskan T., Prasad E., Waechter D., Yan B., "Application of  $H_\infty$  Active Vibration Control Strategy in Smart Structures, AED2003, 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Engineering Design", Paper A5.3, Prague, Czech Republic, 01-04 June, 2003.

6. Kircali O. F., Yaman Y., Nalbantoglu V., Sahin M., Karadal F. M., Ulker F. D., "Spatial Control of a Smart Beam", *J Electroceram*, 20, 2008, 175–185.
7. Kircali, O. F., Yaman, Y., Nalbantoglu, V., Sahin, M. "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, 2008, 377-410.
8. Arıdoğan U., "Performance Evaluation of Piezoelectric Sensor/Actuator on Investigation of Vibration Characteristics and Active Vibration Control of a Smart Beam", Master Thesis, Middle East Technical University, June, 2010.
9. Xue D., Zhao C., Chen Y. Q., "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, 2006*.
10. Cao J. Y., Cao B. G., "Design of Fractional Order Controller Based on Particle Swarm Optimization", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 6, December 2006, pp. 775-781.
11. Maiti D., Biswas S., Konar A., "Design of a Fractional Order PID Controller Using Particle Swarm Optimization Technique", *2<sup>nd</sup> National Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS-08)*, 2008.
12. Vinagre B., Podlubny I., Dorcak L., Feliu V., "On fractional PID controllers: A Frequency Domain Approach", *IFAC Workshop on Digital Control. Past, Present and Future of PID control*, pp. 53–58, Terrasa, Spain, 2000.
13. Chen Y. Q., Vinagre B. M., Podlubny I., "Continued Fraction Expansion Approaches to Discretizing Fractional Order Derivatives—An Expository Review", *Nonlinear Dynamics*, vol.38, 2004, pp.155–170.
14. Xue D., Chen Y. Q., "A Comparative Introduction of Four Fractional Order Controllers", *Proceeding the 4<sup>th</sup> World Congress, Intelligent Control and Auto*, vol. 4 , 2002, pp. 3228-3235.
15. Hamamci S.E., "An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional-Order PID Controllers", *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 52, 2007, pp. 1964-1969.
16. Barbosa R. S., Machado J. A. T., Ferreira I. M., "Tuning of PID Controllers Based Bode's Ideal Transfer Function, *Nonlinear Dynamics*, vol. 38, 2004, pp.305-321.
17. Monje C. A., Vinagre B. M., Feliu V., Chen Y.Q., "Tuning and Auto-Tuning of Fractional Order Controllers for Industry Applications", *Control Engineering Practice*, vol. 16, 2008, pp. 798–812.
18. Arıdoğan U., Sahin M., Nalbantoglu V., Yaman Y., "Piezoelektrik Yamaların Akıllı Bir Kirişin Titreşim Kontrolünde Algılayıcı ve Uyarıcı Olarak Kullanılması", *UMTS-2009*, 2-4 Temmuz 2009.
19. Jifeng W., Yuankai L., "Frequency Domain Analysis and Applications for Fractional Order Control System", *IOP, Journal of Physics:Conf. 13*, 2005, pp.268-273.
20. Xue D., Chen Y.Q., Atherton D. P. "Linear Feedback Control Analysis and Design with MATLAB", *Advances in Design and Control*, Siam, 2007.
21. Krishna B. T., Reddy K. V. V. S., "Active and Passive Realization of Fractance Device of Order  $\frac{1}{2}$ ", *Active and Passive Electronic Components*, 2008.
22. Ozyetkin, M. M., Tan N., "Kesir Dereceli Sistemlerin Tamsayı Dereceli Yaklaşımı", *SİU-2010, Diyarbakir*, 22-24 Nisan 2010.