

PZT Eyleyici ve Algılayıcı İçeren Kiriş için Sonlu Seri Tabanlı Adaptif Kontrolcü Tasarımı ve Deneysel Çalışması

R. Berk Gezer¹, A. Burkay Alan², Ali Türker Kutay³, Melin Şahin⁴

¹Roketsan A.Ş., Ankara
rbgezer@gmail.com

²Roketsan A.Ş., Ankara
alanasimburkay@gmail.com

³Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
kutay@metu.edu.tr

⁴Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
msahin@metu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, birinci bükülme modu titreşimini ölçmek ve kontrol etmek için kök bölgesine kurşun zirkonyum titanyum (PZT) yamalar yerleştirilmiş ve bir ucu tutturulmuş diğer ucu serbest bırakılmış akıllı kiriş yapısından oluşan bir aktif titreşim kontrol sisteminin, deneysel çalışmalarını sunmaktadır. Aktif titreşim kontrolü adaptif yapıda olup kontrolcü periyodik bozucuları azaltmak için sonlu serilerle temsil edilen frekans uzayı elemanlarından yararlanmaktadır. Sonlu serilerin periyodik fonksiyon büyüklükleri, PZT algılayıcı ölçümleri kullanılarak uyumlanmakta olup, elde edilen adaptif kontrolcü girdisi, eyleyici PZT bimorph yamalar aracılığıyla, kirişteki periyodik bozucuların baskılanması için kullanılmaktadır. Bu çalışma ile, önerilen adaptif kontrol yönteminin piezo-kiriş yapılarında istenmeyen titreşimleri azaltmadaki etkinliğine dair başarıları gösterilmektedir.

1. Giriş

Akıllı bir kiriş olarak bilinen piezo-kiriş yapısı, kökte konumlandırılmış PZT yamalar ile dahili ve harici bozucuları algılamak ve sistemin yapısal modlarında ortaya çıkarttığı yanıtı kontrol etmek amacıyla kullanılabilir. Akıllı yapılar aktif titreşim kontrolü alanında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Literatürde akıllı kirişler için çeşitli kontrol stratejileri bulunmaktadır. [1], ağırlıklı geometrik merkez yöntemi ile PID kontrolcüsü tasarımı; [2], [3] ise LPV tabanlı kesirli kontrol kullanarak titreşim kontrolü yöntemlerini göstermektedir. Akıllı kirişlerin titreşim kontrolü için bulanık mantık (*fuzzy logic*) kontrolcülerinin etkinliği [4] da, değişen parametreler altında aktif titreşim kontrolü elde etmek için kazanç planlamalı H_∞ kontrol yapısı gibi gürbüz kontrol stratejileri ise [7] da gösterilmiştir. Akıllı kirişler için LQR tabanlı kontrol [11] içerisinde açıklanırken, [12], akıllı kiriş kontrolü için hiperbolik

tanjant sigmoid fonksiyonlarıyla yapay sinir ağı tabanlı kontrolcü anlatılmaktadır. Zaman içerisinde adaptif kontrol yöntemlerinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve bu yöntemler adaptif kontrol sistemlerinin performansını artırmak için yapılan düzenlemelerle geliştirilmiştir. Adaptif kontrol üzerine literatür, ağırlık güncelleme kurallarını iyileştirmeyi hedefleyen [13]'de verilen σ -modifikasyonu, arka plan öğrenme metodu [14] ve [15], ALR yöntemi [16], Kalman filtresi tabanlı yaklaşım [17], κ modifikasyonu [18] ve tahminleyici tabanlı adaptif kontrol yöntemi [19] gibi yöntemler içermektedir. [20] çalışmaları ölçüm geri beslemeli adaptif kontrolcülerin etkinliğini göstermektedir. [25] çalışması ise girdi ve durum zaman geçmişlerini kullanarak en küçük kareler problemi formülasyonu ile garanti edilmiş üstel yakınsamaya sahip bir yapı önermektedir. Sistem cevabının zamana bağlı performansını iyileştirmek için [26] MRAC yöntemine bir modifikasyon olarak zamanla değişen bir öğrenme oranı tanımlanmıştır.

Bahsi geçen bu adaptif kontrolcülerin çoğu sistemin kendi durum değişkenlerine dayalı fonksiyonlar veya global benzeticiler kullanarak sistemdeki bozucuları tahmin etmektedir. Bu yaklaşımlara alternatif olarak sonlu serilerden faydalanan tahminciler, bahsi geçen kontrolcü yapılarında bozuculara yönelik benzeticiler olarak kullanılabilir. Özellikle titreşim kontrolü çalışmaları kapsamında, periyodik fonksiyonlardan oluşan kestirim fonksiyonlarının kullanımı olumlu sonuçlar elde etme potansiyeli taşımaktadır. Fourier serisinin ağırlıklarını öğrenme elemanları olarak kullanan bir kontrolcünün analitik sonuçları [27] çalışmasında gösterilmektedir. Benzer bir MRAC yapısı [28]'te tarif edilmiştir. [29]'te sunulan çalışmada tek gizli katmanlı sinir ağı temelli bir MRAC yapısı kullanılarak oluşturulmuş bir kontrolcü yapısı tanıtılmaktadır. Burada periyodik fonksiyonların genlikleri dış katmanda güncellenirken frekansları iç katmanda güncellenmektedir.

Literatürde yapay sinir ağları içerisinde Fourier serisi elemanlarının kullanılmasını içeren çalışmalar [30] örneklerinde sunulurken [33] çalışmalarında ise Fourier serisi elemanlarının ağırlıklarının ve ağırlık değişikliklerinin en küçük kareler tabanlı bir maliyet fonksiyonu kullanarak sıkıştırılmasını inceleyen adaptif kontrolcü çalışmaları bulunmaktadır.

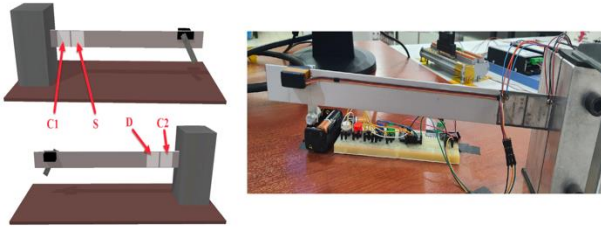
Bu çalışma, sistem üzerinde oluşan titreşimlerin periyodik davranışlar olarak ele alındığı ve bu periyodik davranışların periyodik fonksiyonlardan oluşturulmuş sonlu seri içeren bir yapay sinir ağının adaptif olarak güncellenmesiyle aktif titreşim kontrolü sağlanmasının deneysel sonuçlarını sunmaktadır. Yapay sinir ağı Lyapunov denklemine dayalı bir ağırlık güncelleme kuralı ile ölçümlere dayalı olarak uyarlanmakta ve güncellenmektedir. Makalenin içeriği şu şekildedir: Bölüm II'de test düzeneği tanımlanmış, ardından Bölüm III'te test sistemi için sistem tanımlama çalışması sunulmuştur. Bölüm IV'te kontrolcü yapısı tanımlanırken, Bölüm V'te yürütülen deneyleri ve elde edilen sonuçları sunulmaktadır. Son olarak, Bölüm VI'da makalenin sonuçlarına ilişkin nihai açıklamalar yapılmıştır.

2. Deneysel Test Düzeneği

Deneysel kurulum, dört temel bileşenden oluşmaktadır, bunlar PZT (piezoelektrik) yamalarla donatılmış bir akıllı kiriş, veri toplama ve sinyal işleme için kullanılan gerçek zamanlı bir hedef makine, bir güç yükseltme (amplifikatör) sistemi ve bir algılayıcı sistemidir.

2.1. Akıllı Kiriş

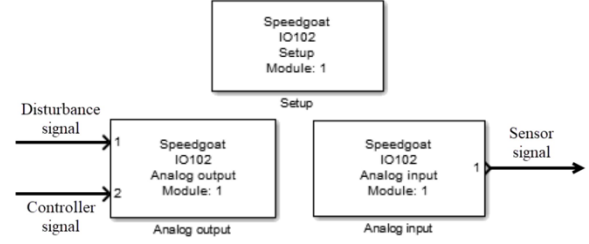
Akıllı kiriş Şekil 1'de gösterildiği gibi PZT yamaların kapalı döngü sisteme iki konektör aracılığıyla entegre edilmesi ile oluşturulmaktadır. İlk konektör, dört pin içeren bir bağlantı elemanıdır ve bu pinler bozucu PZT yama (D) ile eyleyici PZT yamaları (C1 ve C2) sürmek amacıyla kullanılmaktadır. Eyleyici yamalar bimorf olarak bağlanmış olup kirişin bükülme modlarının kontrol edilmesini sağlamaktadır. İkinci konektör de dört pinle donatılmış olup, algılayıcı PZT yama (S) ile doğrudan bağlantılıdır ve kirişin titreşim ölçümlerinin gerçekleşmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 1: Piezo-kiriş yapısı üzerinde PZT yamalar [6]

2.2. Veri Toplama Sistemi

Veri toplama sistemi, ana makine olan bilgisayardan ve hedef makine olan Speedgoat Education Real-Time Target Machine'den oluşmaktadır. MATLAB ve Simulink yazılımları ana bilgisayarda kod çevrimi için kullanılmaktadır. Hedef makine, girdi/çıkırtı işlemlerini gerçekleştirebilen Speedgoat I/O 102 modülünü içermektedir. Şekil 2, PZT yamaların kapalı döngü sistem içerisinde çalışabilmesi için oluşturulmuş Simulink bloklarını göstermektedir.



Şekil 2: Speedgoat I/O 102 için Simulink blokları [6]

2.3. Amplifikatör Sistemi

Aktif titreşim kontrolünde piezoelektrik malzemelerin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için yüksek gerilim gerekmektedir. Bu amaç için yüksek gerilimli bir amplifikatör yüksek gerilimli bir güç kaynağı ile beslenmektedir. Amplifikatör, bozucu ve eyleyici sinyallerin gerilimini 15 kat arttırmaktadır. Sonuç olarak hem bozucu hem de eyleyici kanallar için çıktı aralığı $\pm 135V$ olarak elde edilmektedir.

2.4. Algılayıcı Sistemi

Speedgoat I/O'nun çıktı voltaj limiti $\pm 10V$ ile sınırlıdır ancak algılayıcı PZT yamalar daha yüksek gerilimler üretebilme yeteneğine sahiptir. Bu ikilemi çözebilmek adına algılayıcı sistemi içinde bir gerilim amplifikatörü devresi geliştirilmiş ve uygulanmıştır [12].

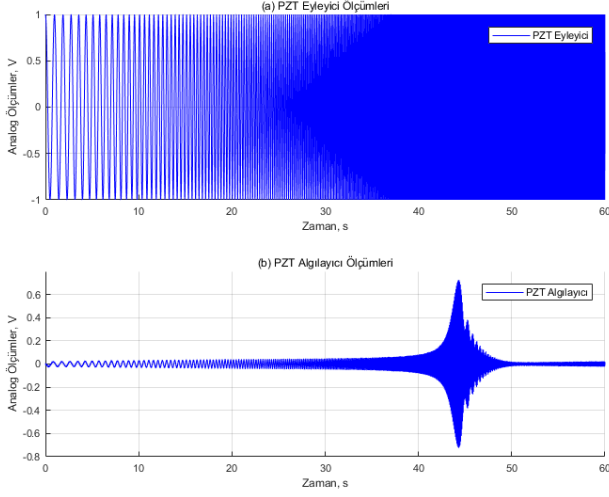
3. Akıllı Kirişin Sistem Tanımlaması

Bu çalışmada, eyleyici girdisi olarak tarama sinyali uygulanmış ve akıllı kirişin hareketleri algılayıcı çıktısıyla gözlemlenmiştir. Sistem cevapları 1-40 Hz frekans aralığında tarama yapılarak 60 saniye süresince tekrarlanarak toplanmıştır. Kullanılan tarama sinyalinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

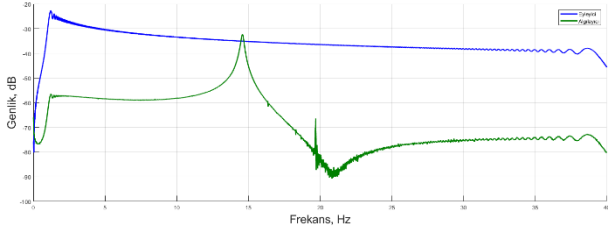
Tablo 1: Tarama sinyali özellikleri

Frekans Taraması	Logaritmik
Başlangıç Frekansı	1 Hz
Hedef Frekans	40 Hz
Tarama Süresi	60 s
Tarama Sayısı	10
Örnekleme Süresi	0.001 s

Tarama girdisine sistem tarafından verilen zaman uzayındaki cevaplar frekans uzayına dönüştürülmüştür. Girdi ve çıktı sinyallerinin genlikleri ve fazları karşılaştırılarak, eyleyici girdisinden algılayıcı çıktısına transfer fonksiyonu seçilen girdi frekansı için belirlenmiştir. Şekil 3'te bir dizi tarama frekansı için eyleyici girdisi ve algılayıcı çıktısı zaman uzayında gösterilmektedir. Tarama girdi sinyalinin frekansı akıllı kirişin ilk bükülme moduna yaklaştıkça kirişin cevap genliğinde bir artış görülmektedir. Girdi ve çıktı verilerinin zaman uzayında toplanması sonrası Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak akıllı kirişin frekans uzayı özellikleri belirlenmiştir. FFT analizi sonuçları Şekil 4'te gösterilmektedir.



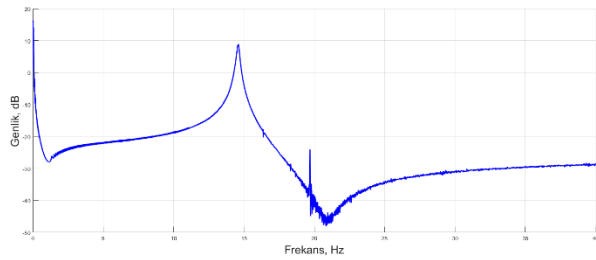
Şekil 3: Akıllı giriş için sistem tanımlama (a) girdi ve (b) çıktısı



Şekil 4: Sistem tanımlama verisinin FFT dönüşümü

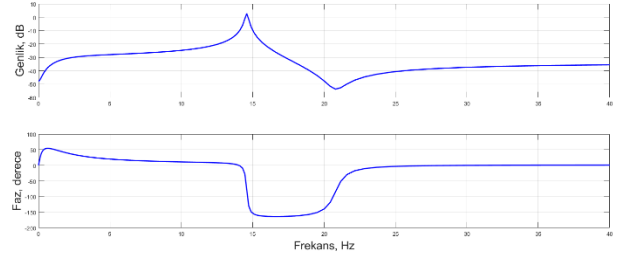
Girdi frekansı girişin ilk bükülme moduna bağlı rezonans frekansına yaklaştıkça, frekans cevabının genliği önemli ölçüde artmaktadır. Girdi verisindeki genlik değişimlerinin etkisini daha iyi anlayabilmek için frekans cevap fonksiyonunun hesaplanması gerekmektedir. Frekans cevap fonksiyonu, sistemin dinamik karakterini görselleştirecek şekilde Şekil 5'te gösterilmiştir. Toplanan verilerden sistem tanımlama sonucu elde edilen transfer fonksiyonu Denklem 1'de verilmiştir. Tanımlanan transfer fonksiyonunun bode diyagramı Şekil 6'da gösterilmektedir. Denklem 1 içindeki A_{2S} ifadesi ile transfer fonksiyonunun eyleyiciden sensöre olduğu ifade edilmektedir.

$$G_{A2S} = \frac{0.01991(s + 1.298)(s^2 + 6.921s + 1.709 \cdot 10^4)}{(s + 12.66)(s^2 + 1.377s + 8398)} \quad (1)$$

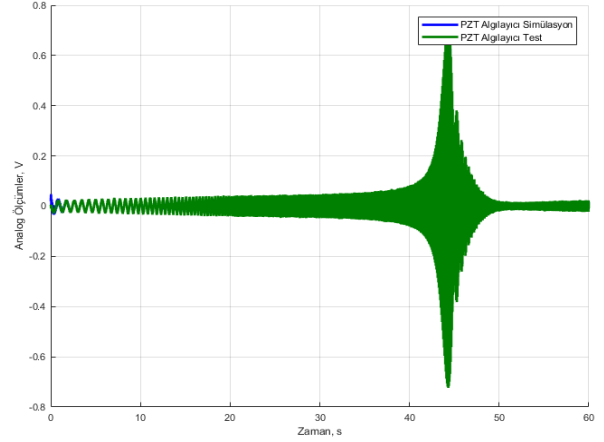


Şekil 5: Sistem tanımlama verisinin frekans cevabı fonksiyonu

Chirp girdi sinyali ile transfer fonksiyon simülasyonu üzerinde beslenmiş ve çıktılar elde edilmiştir. Simüle edilen çıktı ile sistem tanımlama çıktısı arasındaki karşılaştırma Şekil 7'de görsel olarak verilmiştir. Tanımlanan transfer fonksiyon ile test kurulmasının zaman uzayındaki cevapları arasında yakın bir benzerlik saptanmıştır. Bu sonuç tanımlanan transfer fonksiyonun akıllı girişin davranışını etkili bir şekilde yansıttığını göstermektedir.



Şekil 6: Belirlenen transfer fonksiyonunun bode diyagramı



Şekil 7: Simülasyon ve test sonuçlarının karşılaştırılması

4. Sonlu Seri Tabanlı Adaptif Kontrolcü

Sistemin durum-uzay temsili Denklem 2'de olduğu gibi ifade edilebilir. Burada $x \in R^3$ sistemin durum vektörünü, $u \in R$ sistem girdi vektörünü, A_{SYS} 3x3 sistem matrisini, B_{SYS} 3x1 girdi matrisini, $y \in R$ sistem çıktı vektörünü, C çıktı matrisini ve D ileri besleme matrisini ifade etmektedir. Denklem 2'teki \dot{x} sembolü x elemanının zaman türevine karşılık gelmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{SYS}x + B_{SYS}u \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

Tam durum geri beslemeli nominal bir kontrolcü, titreşim kontrolü için istenilen dinamiklere uygun şekilde Denklem 2'te gösterilen sistem için tasarlanmıştır. Pratik senaryolarda genellikle sistemin tüm durum değişkenlerinin doğrudan ölçülmesi, özellikle yeterli özellikte ve sayıda algılayıcı

olmadığında, zorlu bir durumdur ve bu tür durumlarda gözlemci yapıları kullanılarak mevcut algılayıcı çıktıları üzerinden ölçülemeyen durum değişkenlerinin tahmini yapılabilir. Denklem 3'te gösterildiği gibi, Luenberger Gözlemcisi'nin kullanılmasıyla mevcut algılayıcı ölçümleri kullanılarak sistem durum değişkenleri tahmin edilebilmektedir.

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}} &= A_{sys}\hat{x} + B_{sys}u + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du\end{aligned}\quad (3)$$

Denklem 3'teki $\hat{\cdot}$ sembolü Luenberger Gözlemcisi tarafından üretilen tahmini durum değişkenlerini temsil ederken, L gözlemci kazanç matrisini temsil etmektedir. Gözlemci sistem denklemlerinin gözlemci durum değişkenleri ve girdiler açısından yeniden düzenlenmesi Denklem 4'te verilmektedir.

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}} &= A_{sys}\hat{x} + [B_{sys} \quad L] \begin{bmatrix} u \\ (y - \hat{y}) \end{bmatrix} \\ \hat{y} &= C\hat{x} + [D \quad 0] \begin{bmatrix} u \\ (y - \hat{y}) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4)$$

Piezo-kiriş yapısının aktif titreşim kontrolü için uygulanan bozucu Denklem 5'de gösterildiği gibi matematiksel olarak tanımlanabilir. Δ bozucuyu, w_i ağırlığı, ω_i frekansı ve ϕ_i fazı temsil etmektedir.

$$\Delta = \sum_{i=1}^N w_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (5)$$

Sisteme uygulanmak üzere seçilen bozucu Denklem 6'da verilmektedir.

$$\Delta = 1.37 * \sin(14.58 * 2\pi t) \quad (6)$$

Nominal kontrolçüye ek olarak nominal kontrolcü tarafından yeterince bastırılmayan bozucu titreşimleri ele almak ve azaltmak için bir adaptif kontrolcü girdisi kullanılmaktadır. Bu adaptif kontrolcü girdisi artık titreşimleri adaptif olarak tanımlamak ve bastırmak için hesaplanmaktadır. Bu iki kontrol girdisinin kombinasyonu eyleyici yamalar aracılığıyla sisteme toplam girdiyi oluşturmakta olup çıkarımı Denklem 7'de verilmiştir ve nominal kontrolcü girdisi Denklem 8'deki ilişki kullanılarak hesaplanmıştır.

$$u_{1x1} = u_{nom} - u_{ad} \quad (7)$$

$$u_{nom} = -K\hat{x} \quad (8)$$

Sonlu seride yalnızca bir frekans bileşeni bulunan adaptif kontrolcü girişi Denklem 9'da gösterilmektedir.

$$u_{ad} = (\hat{W}(t))^T \beta(t) \quad (9)$$

Denklem 9'da verilen \hat{W} adaptif kontrolcünün tahmini ağırlıklarını temsil etmektedir. Sadece zamanın periyodik bir

fonksiyonu olan $\beta(t)$ sonlu seri yapısını tanımlamaktadır (Denklem 10).

$$\beta(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) \\ \sin(\omega_1 t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Denklem 11'de adaptif kontrolcü için nominal ağırlık güncelleme kuralı verilmektedir. Γ tasarım kararı olan öğrenme hızını temsil ederken, P Denklem 12'te verilen Lyapunov denkleminin çözüm matrisidir.

$$\hat{W}(t) = \Gamma \beta(t) (e(t))^T P B_{sys} \quad (11)$$

$$A_r^T P^T + P^T A_r + R^T = 0 \quad (12)$$

Denklem 12'de verilen Lyapunov denkleminde kullanılan A_r referans sistem matrisi Denklem 13'te gösterilen ilişkiye sahip nominal kontrolcünün kapalı döngü formudur.

$$A_r = A_{sys} - B_{sys}K \quad (13)$$

Adaptasyon sürecine sabit sönümlenme ektisini ekleyen sigma ağırlık güncelleme modifikasyonu Denklem 14'te verilmiş olup, σ terimi ağırlık güncelleme sönümlenme oranını temsil etmektedir.

$$\hat{W}(t) = \Gamma \beta(t) (e(t))^T P B_{sys} + \sigma \hat{W}(t) \quad (14)$$

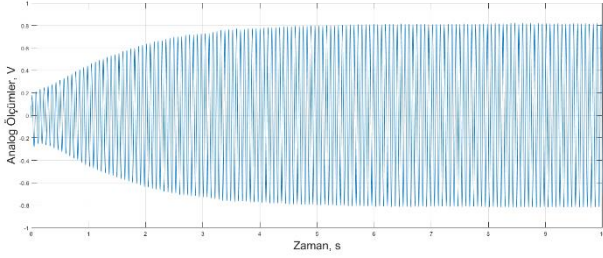
Ağırlık güncelleme kuralına değişken sönümlenme e-modifikasyonu ile eklenmektedir. Adaptasyonun sönümlenme hızı, ölçümdeki hatanın büyüklüğü üzerinden Denklem 15'te gösterildiği şekilde belirlenmektedir.

$$\hat{W}(t) = \Gamma \beta(t) (e(t))^T P B_{sys} + \sigma \hat{W}(t) (e(t))^T e(t) \quad (15)$$

Piezo-kiriş yapısı bozucu yamaları kullanarak ilk bükülme modunda rezonansa uyandırılmaktadır. Rezonans oluşturulduğunda, akıllı giriş titreşim tepkisini karakterize eden belirli durum değişkenleri üretmektedir. Giriş üzerine yerleştirilen algılayıcı yamalardan elde edilen ölçümler Luenberger Gözlemcisi tarafından sistemin iç durumlarını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Tahmin edilen tüm durum değişkenlerinin tam durum geri beslemeli yapıda kullanılmasıyla nominal kontrolcü için sistem girdisi hesaplanmaktadır. Nominal kontrolcünün yalnız başına artık titreşimleri veya bozucuları tam olarak ortadan kaldıramadığı durumlarda adaptif bir kontrolcü yapısı devreye girmektedir. Bu adaptif kontrolcü, sonlu serileri ve Lyapunov temelli ağırlık güncelleme kurallarını (Denklem 11, 14 ve 15) içermekte ve kontrol girdisini adaptif olarak güncelleyerek kalan titreşimleri aktif bir şekilde bastırabilmektedir.

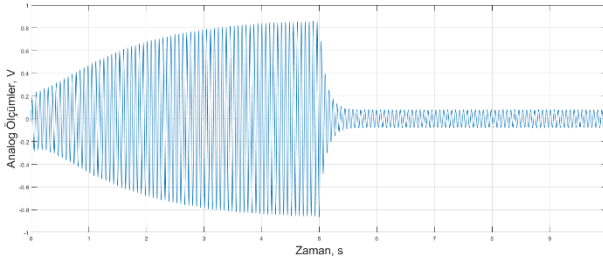
5. Deneysel Test Sonuçları

Bu bölümde sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün deneysel etkinliği test sisteminde gösterilmektedir. Akıllı kirişin sistem tanımlanmasıyla belirlenen ilk bükülme modunun rezonans frekansında bozucu girişi uygulanarak, sistem üzerinde yüksek genlikli titreşim tepkisi elde edilmiş, bu tepkinin algılayıcı yaması aracılığıyla ölçülmesi Şekil 8'de görselleştirilmiştir. Salınımın frekansı Şekil 5'te gösterilen frekans cevap fonksiyonu grafiğindeki tepe frekansıyla uyumludur. Herhangi bir kontrolcü faaliyeti olmadığında algılayıcı ölçümü yoluyla gözlenen sistem çıktısı grafikte kirişin rezonans bölgesinde belirtilen genliğe ulaşmaktadır.



Şekil 8: Titreşim kontrol olmadan piezo-kiriş yapısının cevabı

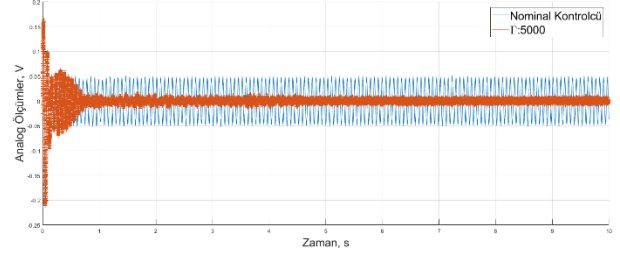
Nominal kontrolcünün 5. saniyede devreye alınmasıyla algılayıcı tarafından ölçülen titreşim genliği Şekil 9'da gösterilmiştir. Sönümleme profili, titreşim genliklerinde azalma miktarını göstererek nominal kontrolcünün sistem titreşimlerini kontrol etmedeki etkinlik seviyesini ortaya koymaktadır. Bu test süresince bozucu girdisi sabit tutulmuştur.



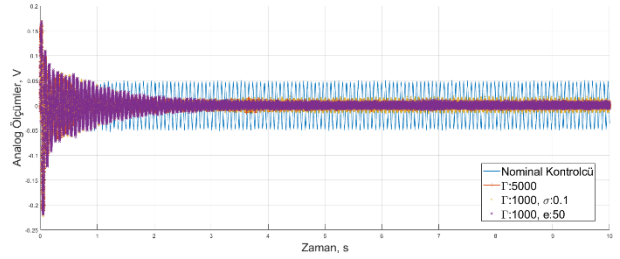
Şekil 9: Nominal kontrolcü performansı

Sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcü ve nominal kontrolcü etkilerinin birbirlerine göre karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Adaptif kontrolcünün piezo-kiriş yapısının ilk bükülme modundaki bozucu kaynaklı titreşim genliğini, etkili bir şekilde azalttığı ve nominal kontrolcünün sağladığı sönümlenmenin beş katı performans gösterdiği Şekil 10'da görülmektedir. Sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün birinci bükülme modundaki bozulmayı daha etkili bir şekilde bastırmasının temel nedeni ilgili frekans içeriğindeki periyodik elemanların büyüklüklerini adaptif olarak elde edebilme yeteneğidir. Sistemi etkileyen bozucunun karakteriyle uyumlu olacak şekilde periyodik seri elemanlarının büyüklüklerinin adaptif olarak ayarlanmasıyla daha verimli bir kontrol yaklaşımı gerçekleştirilmiştir.

Şekil 11'de sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcü için üç alternatif ağırlık güncelleme kuralının karşılaştırmalı performansı gösterilmektedir. Bu alternatiflerden biri olan σ modifikasyonu sabit sönümleme ögesini içerirken, diğer alternatif olan e modifikasyonu hata büyüklüğüne bağlı olarak değişken sönümleme yapısı getirmektedir. σ modifikasyonunun ağırlık güncelleme kuralı Denklem 15'te, e modifikasyonununki ise Denklem 15'de verilmektedir.



Şekil 10: Nominal ve sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün performans karşılaştırması



Şekil 11: Nominal kontrolcü ve farklı ağırlık güncelleme kurallarına sahip adaptif kontrolcülerin performans kıyası

Şekil 11'deki mavi eğri nominal kontrolcünün performansını temsil ederken; turuncu, sarı ve mor eğriler sırasıyla adaptif kontrolcünün temel ağırlık güncelleme, sigma modifikasyonu ve e modifikasyonu sonuçlarını temsil etmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde sabit sönümleme özelliğinin sigma modifikasyonu aracılığıyla dahil edilmesinin sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün performansında önemli bir iyileşme sağlamadığı görülmektedir. Bunun aksine hata büyüklüğüne bağlı olarak değişken sönümleme getiren e modifikasyonu, kararlı durum bölgesinde %20 mertebesinde daha iyi bir titreşim bastırma yeteneği göstermektedir. Buna rağmen e modifikasyonu geçiş bölgesinde göreceli olarak daha zayıf bir performans sergilemektedir. Bu performans farkı, e modifikasyonu tarafından kullanılan sönümleme davranışının adaptif kontrolcünün öğrenme karakteristiklerini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Ancak kararlı durum koşullarında e modifikasyonu adaptif kontrolcünün bozucu dinamiklerini daha iyi elde etmesine belli bir ölçüde katkıda bulunmaktadır. Deneysel test sonuçları incelendiğinde sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün piezo-kiriş yapısı üzerinde aktif titreşim kontrolü açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

6. Sonuç

Bu makalede akıllı bir kirişin aktif titreşim kontrolünde, sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün yeteneklerini değerlendirmek amacıyla bir test düzeneği sunulmaktadır. Düzenek PZT yamalarla donatılmış bir akıllı kiriş, veri toplama ve sinyal işleme için bir gerçek zamanlı hedef makine, bir amplifikasyon sistemi ve bir algılayıcı sistemi olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Akıllı kirişin dinamik özelliklerinin elde edilebilmesi için sistem tanımlama çalışması tarama sinyallerinin eyleyici girdisi olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Toplanan verilerin frekans uzayı analizi kirişin belirli frekanslara, özellikle rezonans moduna yakın olan frekanslara hassasiyetini ortaya koymaktadır. Sistem tanımlama sonuçları akıllı kirişin transfer fonksiyonunu elde etmek için kullanılmaktadır. Tanımlanan transfer fonksiyona dayanarak bir sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcü tasarlanmıştır. Deneysel testler önerilen sonlu seri tabanlı adaptif kontrolcünün bir bozucu yama tarafından oluşturulan titreşimleri azaltma konusundaki etkinliğini göstermektedir. Nominal kontrolcü titreşim genliklerini belirli bir seviyede azaltırken, adaptif kontrolcü kalan titreşimleri daha etkin şekilde azaltmaktadır. Bu kontrol yaklaşımlarının entegrasyonu ile piezo-kiriş yapısında titreşimleri etkin bir şekilde yöneten ve bastıran bir kontrol sistemi oluşturulabilmektedir. Genel olarak, sunulan bu yaklaşım ile pratik titreşim kontrol uygulamalarında sonlu seri tabanlı adaptif kontrolün potansiyeli sergilenmektedir.

Kaynakça

- [1] Turan, A., Onat, C., and Sahin, M., “Active vibration suppression of a smart beam via PID controller designed through weighted geometric center method,” *Ankara International Aerospace Conference*, 2019.
- [2] Onat, C., Sahin, M., and Yaman, Y., “Active vibration suppression of a smart beam by using a Fractional Control,” *2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II)*, Vol. 22, 2011, p. 24.
- [3] Onat, C., Sahin, M., Yaman, Y., Prasad, S., and Nemana, S., “Design of an LPV based fractional controller for the vibration suppression of a smart beam,” *International Workshop Smart Materials, Structures & NDT In Aerospace Conference NDT in Canada, Montreal, Quebec, Canada*, 2011.
- [4] Şenöz, E. R., and Şahin, M., “Kiriş benzeri bir yapının farklı sayıda kural içeren bulanık mantık kontrolcüsü kullanarak ve pizeoelektrik uyarıcılar ile aktif titreşim kontrolünün performans kıyaslaması,” 2016.
- [5] Şenöz, E. R., and Şahin, M., “Experimental Study on Active Vibration Control of a Piezo-beam Structure with Fuzzy Logic Controller,” *Ankara International Aerospace Conference*, 2017.
- [6] Şenöz, E. R., “Evaluation of the robustness performance of a fuzzy logic controller for active vibration control of a piezo-beam via tip mass location variation,” Master’s thesis, Middle East Technical University, 2019.
- [7] Cem, O., and Şahin, M., “Değişken parametrelili bir akıllı kiriş için düşük dereceli H infinity kontrolcü tasarımı,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Vol. 11, No. 2, 2020, pp. 457–469.
- [8] Cem, O., and Şahin, M., “PZT Eyleyici ve Algılayıcı İçeren Esnek Bir Konsol Kiriş İçin Robust Kontrolcü Tasarımı ve Simülasyonu,” *Mühendis ve Makina*, Vol. 57, No. 683, 2016, pp. 48–56.
- [9] Onat, C., Sahin, M., and Yaman, Y., “Gain scheduling H infinity control of a smart beam with parameter varying,” *VIII ECCOMAS thematic conference on smart structures and materials SMART*, 2017, pp. 5–8.
- [10] Turan, A., Şahin, M., and Onat, C., “Vibration control of a smart piezo beam via gain scheduling H-infinity controller based on LPV model,” *Smart Structures and Systems*, Vol. 27, No. 1, 2021.
- [11] Akın, O., and Şahin, M., “Akıllı Bir Kirişin Titreşimlerinin Doğrusal Karesel Düzenleyici (LQR) ile Aktif Denetimi,” 2015.
- [12] Akın, O., “Active neuro-adaptive control of a smart beam having uncertainties in structural dynamics,” Master’s thesis, Middle East Technical University, 2015.
- [13] “Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control,” *Automatica*, Vol. 20, No. 5, 1984, pp. 583–594.
- [14] Chowdhary, G. V., and Johnson, E. N., “Theory and flight-test validation of a concurrent-learning adaptive controller,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 2, 2011, pp. 592–607.
- [15] Ali, K., Chowdhary, G., Calise, A., and Johnson, E., “A Comparison of Two Novel Direct Adaptive Control Methods under Actuator Failure Accommodation,” *AIAA GNC*, 2009.
- [16] Calise, A. J., and Yucelen, T., “Adaptive loop transfer recovery,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 3, 2012, pp. 807–815.
- [17] Yucelen, T., and Calise, A. J., “Kalman filter modification in adaptive control,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 33, No. 2, 2010, pp. 426–439.
- [18] Kim, K., Yucelen, T., and Calise, A., “K-modification in Adaptive Control,” *AIAA Infotech@ Aerospace 2010*, 2010, p. 3321.

- [19] Lavretsky, E., Gadiant, R., and Gregory, I. M., "Predictor-based model reference adaptive control," *Journal of guidance, control, and dynamics*, Vol. 33, No. 4, 2010, pp. 1195–1201.
- [20] Kutay, A. T., Calise, A. J., and Hovakimyan, N., "Adaptive output feedback control with reduced sensitivity to sensor noise," *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, Vol. 6, IEEE, 2003, pp. 5141–5146.
- [21] Kutay, A., Fowler, J., Calise, A., and D'Andrea, R., "Distributed adaptive output feedback control design and application to a formation flight experiment," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2005, p. 6368.
- [22] Kutay, A. T., Calise, A. J., Idan, M., and Hovakimyan, N., "Experimental results on adaptive output feedback control using a laboratory model helicopter," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 13, No. 2, 2005, pp. 196–202.
- [23] Kutay, A., Calise, A., and Muse, J., "A 1-DOF wind tunnel experiment in adaptive flow control," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006, p. 6430.
- [24] Kutay, A., Culp, J., Muse, J., Brzozowski, D., Glezer, A., and Calise, A., "A closed-loop flight control experiment using active flow control actuators," *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007, p. 114.
- [25] Yayla, M., and Kutay, A. T., "Guaranteed exponential convergence without persistent excitation in adaptive control," *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [26] Yayla, M., and Kutay, A. T., "A Modification to Adaptive Control with Time-varying Learning Rate for Improved Transient Performance," *AIAA SCITECH 2022 Forum*, 2022, p. 2210.
- [27] Gezer, R. B., "Fourier series based model reference adaptive control," Master's thesis, Middle East Technical University, 2014.
- [28] Gezer, R. B., and Kutay, A. T., "Finite Series Based Model Reference Adaptive Control," *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 2015, p. 2554.
- [29] Gezer, B. R., and Kutay, A. T., "Single hidden layer neural network based model reference adaptive controller for estimation of periodic disturbances," *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, p. 2185.
- [30] Zhu, C., and Paul, F. W., "Nonlinear system identification with Fourier series neural networks," *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 30, No. 6, 1997, pp. 1611–1616.
- [31] Cai, L., and Huang, W., "Fourier series based learning control and application to positioning table," *Robotics and Autonomous systems*, Vol. 32, No. 2-3, 2000, pp. 89–100.
- [32] Tang, X., Cai, L., and Huang, W., "A learning controller for robot manipulators using Fourier series," *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 16, No. 1, 2000, pp. 36–45.
- [33] Zuo, W., and Cai, L., "Adaptive-fourier-neural-network-based control for a class of uncertain nonlinear systems," *IEEE transactions on neural networks*, Vol. 19, No. 10, 2008, pp. 1689–1701.
- [34] Benrabah, M., Kara, K., AitSahed, O., and Hadjili, M. L., "Adaptive fourier series neural network PID controller," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 19, 2021, pp. 3388–3399.
- [35] Guibas, J., Mardani, M., Li, Z., Tao, A., Anandkumar, A., and Catanzaro, B., "Adaptive fourier neural operators: Efficient tokenmixers for transformers," *arXiv preprint arXiv:2111.13587*, 2021.