

HİDROLİK EKİPMANLI MOTOSİKLET TEST SİSTEMİNDE NONLİNEAR KONUM KONTROL YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Talha Oğuz

ÖZET

Bu çalışmada, motosiklet dayanıklılık testleri için geliştirilen çift hidrolik eyleyicili yol simülatörünün kontrolünde kullanılan iki doğrusal olmayan kontrol algoritması karşılaştırılmıştır. Simülatör, gerçek veya standart yol verilerini motosiklete düşey ekseninde uygulayarak, uzun süreli arazi testlerinin yerine geçebilecek bir laboratuvar ortamı sunmaktadır.

İlk aşamada, klasik bir geri adımlama tabanlı konum kontrol algoritması tasarlanmıştır. Ardından, sistem parametrelerindeki belirsizlikleri çevrim içi tahmin edebilen adaptif bir geri adımlama kontrol algoritması geliştirilmiştir. Her iki yapının kararlılığı sağlanmış; zaman ve frekans alanında izleme başarımı, kontrol sinyali davranışı ve yol uygulama doğruluğu açısından karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen kontrol algoritmaları, yalnızca motosiklet sistemlerine değil, benzer test sistemlerine de kolaylıkla uyarlanabilir. Atölye ortamında gerçekleştirilen testler sayesinde zaman, maliyet ve emisyon gibi açılardan önemli kazanımlar elde edilmektedir. Çalışma, doğrusal olmayan kontrol teorisinin pratik bir test sistemine entegrasyonuna dair özgün ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal Olmayan Kontrol, Backstepping Algoritması, Hidrolik Yol Simülatörü, Motosiklet Dayanıklılık Testi, Uyarlamalı Kontrol.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of two nonlinear control algorithms used in the control of a road simulator developed for motorcycle durability testing. The simulator provides a laboratory environment that can replace long-term field tests by applying real or standard road profiles to the motorcycle in the vertical axis.

In the first stage, a classical backstepping-based position control algorithm was designed. Subsequently, an adaptive backstepping control algorithm capable of estimating system parameter uncertainties online was developed. The stability of both control structures was ensured, and their performances were evaluated through comparative analyses in the time and frequency domains, considering criteria such as tracking accuracy, control signal behavior, and fidelity of road profile application.

The developed control strategies are not limited to motorcycle testing systems and can be adapted to other multi-wheel vehicle test platforms. Laboratory-based testing offers significant advantages in terms of time, cost, and emissions. Overall, the study presents a practical and original approach for integrating nonlinear control theory into real-world test systems.

Key Words: Nonlinear Control, Backstepping Algorithm, Hydraulic Road Simulator, Motorcycle Durability Testing, Adaptive Control.

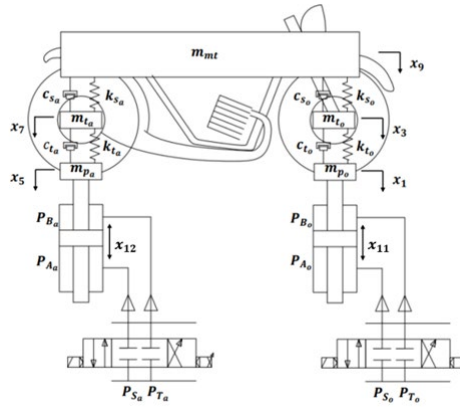
1. GİRİŞ

Hidrolik eyleyicili sistemlerin hassas hareket takibi, özellikle dayanıklılık testleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda, klasik kontrol stratejilerinin sınırlarını zorlamaktadır. Bu nedenle doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Özellikle backstepping algoritmasına dayalı adaptif kontrol stratejileri, karmaşık sistem dinamikleri ve parametre belirsizlikleriyle başa çıkmada etkili olmaktadır [1].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, elektro-hidrolik sistemlerin kontrolünde kullanılan klasik modellerin birçok sınırlamaya sahip olduğu, özellikle valf dinamiklerinin ihmal edilmesinin sistem performansını ciddi şekilde etkilediği gösterilmiştir. Bu bağlamda, valf etkilerini doğrudan modelleyen ve denetleyici tasarımına entegre eden yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmiştir. Örneğin, zaman gecikmesiyle modellenen valf dinamiği sayesinde, sistem mertebesi artırılmadan geniş bantlı frekans cevabına ulaşılabilmektedir. Bu yaklaşım, backstepping tabanlı denetleyici tasarımını sadeleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamiklerle birlikte algebraik döngü problemlerini de ortadan kaldırmıştır [2]. Bununla birlikte, sistemdeki belirsizlikleri ve dış bozucuları doğrudan tahmin edip telafi edebilen adaptif geri-adımlamalı denetleyiciler, özellikle araç süspansiyon sistemleri gibi değişken çalışma koşullarına sahip uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır. Bu tür çalışmalarda, parametre belirsizliklerinin yanı sıra kontrol giridisinin aşırı enerji üretmesini önleyecek performans fonksiyonları da dikkate alınmış ve denetleyici parametreleri için optimizasyon teknikleri (örneğin parçacık sürü optimizasyonu) uygulanmıştır [3]. Yine benzer şekilde, yapısal esnekliğin etkili olduğu durumlarda, esnek dinamiklerin telafisi için özel sönümlenme sinyalleri ve dinamik kompanzasyon mekanizmalarıyla zenginleştirilmiş robust adaptif backstepping denetleyiciler geliştirilmiştir. Bu tür yöntemlerde, klasik PID veya sabit parametrelili denetleyicilere kıyasla çok daha başarılı izleme performansları elde edildiği çeşitli deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır [4]. Ayrıca, yalnızca çıkış bilgisini (örneğin konum) kullanan ve valf dinamiklerini de hesaba katan çıkış geri beslemeli geri-adımlamalı denetleyiciler, gerçek sistemlerdeki uygulamaya geçişte önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu tür denetleyiciler, geniş bir bantta valf davranışını doğru biçimde modelleyip, sistem kararlılığını Lyapunov-Krasovskii fonksiyonelleri ile garanti altına almaktadır. Böylece hem sistem modellemesinde sadelik sağlanmış hem de yüksek hassasiyetli izleme performansı korunmuştur [5].

Bu çalışma, söz konusu literatürde önerilen yöntemleri dikkate alarak, motosiklet yol simülatörü sistemine uygulanabilirliği yüksek olan iki farklı doğrusal olmayan konum kontrol algoritmasının (standart geri-adımlama ve adaptif geri-adımlama) karşılaştırmalı performans analizini sunmaktadır. Böylelikle, hem akademik literatürdeki yöntemlerin pratik mühendislik uygulamalarıyla entegrasyonu mümkün kılınmakta hem de sistemin zaman ve frekans alanındaki davranışı üzerinden kontrol kalitesi değerlendirilmektedir.

2. HİDROLİK EKİPMANLI MOTOSİKLET TEST SİSTEMİ MODELLEMESİ



Şekil 1. Hidrolik Ekipmanlı Motosiklet Test Sistemi

Şekil 1’de verilen sistemde, hidrolik-piston yapısıyla tahrik edilen tam motosiklet taşıtı modeli esas alınarak tasarım sürecine başlanmıştır. Kontrol giriş sinyali olarak uygulanan elektrik akımı, elektrohidrolik servo valfi harekete geçirerek pistonun iki odası arasında basınç farkı oluşturur. Bu fark, x_{11} ve x_{12} ile ifade edilmekte olup, zamana bağlı olarak değişmektedir. Oluşan bu basınç farkı, piston içerisinde kuvvet üretir ve bu kuvvetin etkisiyle piston düşey yönde yer değiştirmektedir. Motosiklet taşıtı modeli, bu hidrolik piston sistemine entegre şekilde konumlandırılmış olup, pistonun oluşturduğu düşey hareketle taşıt üzerinde kontrollü titreşim etkisi meydana getirilmektedir. Bu sayede taşıt sisteminin dinamik tepkileri laboratuvar ortamında gözlemlenebilmekte ve geliştirilen kontrol algoritmalarının etkinliği test edilebilmektedir.

Modelde kullanılan değişkenlerden x_1 ve x_5 ön ve arka piston deplasmanlarını, x_3 ve x_7 ön ve arka tekerlek deplasmanlarını, x_9 ise motosiklet gövdesinin düşey deplasmanını temsil etmektedir. Şekil 1’de fiziksel modeli gösterilen sistemin matematiksel denklemleri, denklem (1) - (8) arasında ifade edilmiştir.

$$m_{mt}\ddot{x}_9 = -k_{sa}(x_9 - x_7) - c_{sa}(\dot{x}_9 - \dot{x}_7) - k_{so}(x_9 - x_3) - c_{so}(\dot{x}_9 - \dot{x}_3) \quad (1)$$

$$m_{t3}\ddot{x}_3 = k_{so}(x_9 - x_3) + c_{so}(\dot{x}_9 - \dot{x}_3) - k_{to}(x_3 - x_1) - c_{to}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) \quad (2)$$

$$m_{t7}\ddot{x}_7 = k_{sa}(x_9 - x_7) + c_{sa}(\dot{x}_9 - \dot{x}_7) - k_{ta}(x_7 - x_5) - c_{ta}(\dot{x}_7 - \dot{x}_5) \quad (3)$$

$$m_{p1}\ddot{x}_1 = k_{to}(x_3 - x_1) + c_{to}(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + A_p x_{11} \quad (4)$$

$$m_{p5}\ddot{x}_5 = k_{ta}(x_7 - x_5) + c_{ta}(\dot{x}_7 - \dot{x}_5) + A_p x_{12} \quad (5)$$

$$\dot{x}_{11} = f_1 \dot{x}_1 + f_2 x_{11} + f_3 \sqrt{P_s - \text{sign}(u_1) \cdot x_{11}} \cdot u_1 \quad (6)$$

$$\dot{x}_{12} = f_1 \dot{x}_5 + f_2 x_{12} + f_3 \sqrt{P_s - \text{sign}(u_2) \cdot x_{12}} \cdot u_2 \quad (7)$$

$$f_1 = -\frac{4BA_p}{V}, \quad f_2 = -\frac{4BC_{tl}}{V}, \quad f_3 = \frac{4BC_{d}wki}{V\sqrt{\rho}} \quad (8)$$

Bu çalışmada, motosikletin tam taşıt modeliyle temsil edilen sistemin kontrolü için durum uzayı yaklaşımı benimsenmiştir. Sistemin tüm dinamikleri, durum değişkenleri ve bu değişkenlerin türevleri cinsinden ifade edilmiştir.

Durum uzayı modeli oluşturulurken, taşıt gövdesi, ön ve arka tekerlekler ile ön ve arka hidrolik pistonların konum ve hızları ayrı ayrı tanımlanmış ve her birine karşılık gelen durum değişkenleri x_1 ile x_{12} arasında tanımlanmıştır. Her pozisyon değişkenine karşılık bir hız değişkeni bulunmakta,

böylece sistemin ikinci dereceden diferansiyel denklemleri birinci dereceden 12 adet diferansiyel denkleme indirgenmiştir. Bu denklemler, Denklem (9) - (20) arasında gösterilmektedir. Ayrıca, pistonlar içindeki basınç farklarının dinamikleri de bu sistemin bir parçası olarak modele dahil edilmiştir. Sistemin kontrol girişleri olan u_1 ve u_2 , bu piston basınç farklarını etkileyerek, taşıtın düşey hareketini yönlendirmektedir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{k_{to}}{m_{po}}(x_3 - x_1) + \frac{c_{to}}{m_{po}}(x_4 - x_2) + \frac{A_p}{m_{po}}x_{11} \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (11)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{k_{so}}{m_{to}}(x_9 - x_3) + \frac{c_{so}}{m_{to}}(x_{10} - x_4) - \frac{k_{to}}{m_{to}}(x_3 - x_1) - \frac{c_{to}}{m_{to}}(x_4 - x_2) \quad (12)$$

$$\dot{x}_5 = x_6 \quad (13)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{k_{ta}}{m_{pa}}(x_7 - x_5) + \frac{c_{ta}}{m_{pa}}(x_8 - x_6) + \frac{A_p}{m_{pa}}x_{12} \quad (14)$$

$$\dot{x}_7 = x_8 \quad (15)$$

$$\dot{x}_8 = \frac{k_{sa}}{m_{ta}}(x_9 - x_7) + \frac{c_{sa}}{m_{ta}}(x_{10} - x_8) - \frac{k_{ta}}{m_{ta}}(x_7 - x_5) - \frac{c_{ta}}{m_{ta}}(x_8 - x_6) \quad (16)$$

$$\dot{x}_9 = x_{10} \quad (17)$$

$$\dot{x}_{10} = -\frac{k_{sa}}{m_{mt}}(x_9 - x_7) - \frac{c_{sa}}{m_{mt}}(x_{10} - x_8) - \frac{k_{so}}{m_{mt}}(x_9 - x_3) - \frac{c_{so}}{m_{mt}}(x_{10} - x_4) \quad (18)$$

$$\dot{x}_{11} = f_1x_2 + f_2x_{11} + f_3\sqrt{P_s - \text{sign}(u_1)x_{11}}u_1 \quad (19)$$

$$\dot{x}_{12} = f_1x_6 + f_2x_{12} + f_3\sqrt{P_s - \text{sign}(u_2)x_{12}}u_2 \quad (20)$$

Bu yapı, sistemin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesini ve kontrol algoritmalarının tasarlanmasını kolaylaştırmıştır. Kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 1 'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Parametre Değerleri

Sembol	Birim	Değer	Sembol	Birim	Değer
m_{mt}	Kg	160	P_s	Bar	210
$m_{to,ta}$	Kg	7.3	β	$\frac{N}{m^2}$	1.4×10^9
$m_{po,pa}$	Kg	4	A_p	m^2	256.4×10^{-5}
c_{so}	$\frac{N \cdot s}{m}$	277.5	C_{tl}	$\frac{m^3}{P_a \cdot s}$	1.332×10^{-16}
c_{sa}	$\frac{N \cdot s}{m}$	540	C_d	-	0.62

$c_{to,ta}$	$\frac{N \cdot s}{m}$	59.9	w	-	0.024
k_{so}	$\frac{N}{m}$	5641.8	k_i	-	3×10^{-4}
k_{sa}	$\frac{N}{m}$	10974	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	850
$k_{to,ta}$	$\frac{N}{m}$	132406	V	m^3	320.5×10^{-6}

3. GERİ ADIMLAMALI DOĞRUSAL OLMAYAN KONTROL TASARIMI

Bu çalışmada, motosiklet gövdesinin düşey yönlü konumunun x_9 hassas kontrolü, hidrolik silindirlerde oluşturulan basınç farkları aracılığıyla sağlanacaktır. Ancak, sistemin dinamikleri incelendiğinde, özellikle Denklem (19) ve (20) doğrultusunda, gövde konumu ile kontrol girdisi olarak kullanılan hidrolik basınç farkları x_{11}, x_{12} arasında doğrudan bir bağıntının bulunmadığı görülmektedir. Bu durum, klasik doğrudan kontrol yöntemlerinin uygulanmasını güçleştirmekte, sistemin geri adımlamalı bir yapı ile ele alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, geri adımlamalı kontrol stratejisi kullanılarak, sistemin alt dinamikleri aracılığıyla kontrol hedefi olan x_9 konumuna etki edecek şekilde yapılandırılmış bir kontrol yasası tasarlanacaktır. Bu yapı sayesinde, kontrol sinyali ile sistemin nihai çıktısı arasında hiyerarşik ve kararlı bir bağlantı kurulması hedeflenmektedir.

Aday Lyapunov fonksiyonu, kontrol tasarımının temeli olarak, motosiklet gövdesinin düşey konumu ile oluşturulmuş referans konum sinyali arasındaki izleme hatası üzerinden tanımlanacaktır. Bu hata sinyali yardımıyla, sistemin kararlılığını garanti altına alacak şekilde geri adımlamalı kontrol yapısı oluşturulacaktır. Denklem (21) 'de hata fonksiyonu gösterilmiştir.

$$e = x_r - x_9 \quad (21)$$

Denklem (21)'de ifade edilen (x_r) ifadesi, referans konum sinyalini belirtmektedir. Takip eden denklemde aday Lyapunov fonksiyonu ve türevi tanımlanmıştır.

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2 \quad (22)$$

$$\dot{V}_1 = e \dot{e} \quad (23)$$

Denklem (23) ' de bulunan aday Lyapunov fonksiyonun türevinin sıfırdan küçük olma şartı sağlanarak, kararlılık garanti altına alınacaktır. Buna bağlı olarak Denklem (21) ' de bulunan hata fonksiyonunu ve türevini Denklem (23) 'de yerine yazarsak, Denklem (24) ' ü elde ederiz.

$$\dot{V}_1 = e(\dot{x}_r - \dot{x}_{10}) \quad (24)$$

Denklem (24) üzerinden sistem kontrolcü giriş sinyallerine u_1, u_2 doğrudan erişim sağlanamadığından, sanal kontrol giriş sinyalleri tanımlanarak z_1 ve z_2 yeni durum değişkenleri oluşturulmuştur. Bu adım, kontrol algoritmasının geri adımlama yapısını teşkil etmektedir. Kontrol giriş sinyallerine erişim sağlayabilmek amacıyla, tanımlanan yeni durum değişkeni z_1 , ilgili sanal kontrol sinyali z_1 ve x_{10} durum değişkeni üzerinden tasarlanmıştır.

$$z_1 = x_{10} - x_{10d} \quad (25)$$

Denklem (25)' deki ifadeden çekilen x_{10} , Denklem (24) de yerine yazılırsa, Denklem (26) elde edilir.

$$\dot{V}_1 = e(\dot{x}_r - \dot{z}_1 - \dot{x}_{10d}) \quad (26)$$

Denklem (26)' da bulunan pozitif terimleri yok etmek adına x_{10d} terimi Denklem (27) deki gibi tasarlanır.

$$x_{10d} = k_{t1}e + \dot{x}_r \quad (27)$$

Buna bağlı olarak yeni aday Lyapunov fonksiyonunun türevi Denklem (28) deki gibi olur.

$$\dot{V}_1 = -k_{t1}e^2 - z_1e \quad (28)$$

Denklem (28) incelendiğinde k_{t1} parametresi pozitif seçildiği takdirde, $-k_{t1}e^2$ ifadesi kesinlikle negatifliği sağlayacaktır. Ancak burada yer alan $-z_1e$ ifadesinin pozitif olma ihtimali bulunmaktadır. Bundan dolayı yeni bir aday Lyapunov fonksiyonu belirleyerek, bu ifadede negatife götürülmelidir.

$$V_2 = V_1 + \frac{z_1^2}{2} \quad (29)$$

Yeni tanımlanan V_2 aday Lyapunov fonksiyonunun ardından, izlenen yöntem benzer şekilde sürdürülecektir. Her bir adımda, sistemin hiyerarşik dinamik yapısına uygun olarak yeni sanal kontrol sinyalleri ve durum değişkenleri tanımlanacak, pozitifliğe sebep olabilecek terimler Lyapunov fonksiyonunun türevinden elimine edilerek sistemin kararlılığı sağlanacaktır. Bu işlem, kontrol algoritmasının temelini oluşturan geri adımlamalı yaklaşım doğrultusunda, kontrol sinyalleri u_1, u_2 'ye doğrudan erişim sağlanana dek devam edecektir. Her aşamada Lyapunov fonksiyonu uygun şekilde genişletilecek, nihai olarak fiziksel kontrol girişlerine ulaşan bir kontrol yasası türetilecektir.

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 = \dot{V}_4 + z_6 \left(f_1x_2 + f_2x_{11} + f_3\sqrt{p_s - \text{sign}(u_1)x_{11}} u_1 - \dot{x}_{11d} \right) \\ + z_7 \left(f_1x_6 + f_2x_{12} + f_3\sqrt{p_s - \text{sign}(u_2)x_{12}} u_2 - \dot{x}_{12d} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

Artık elimizdeki aday Lyapunov fonksiyonu V_5 'in türevi, kontrol sinyalleri u_1 ve u_2 cinsinden ifade edilebilmektedir. Dolayısıyla, önceki adımlarda olduğu gibi yeni bir sanal kontrol değişkeni tanımlamaya gerek kalmaksızın, doğrudan bu kontrol sinyalleri belirlenerek \dot{V}_5 ifadesinin negatif tanımlı olması sağlanabilir. Böylece sistemin kararlılığı garanti altına alınmakta ve nihai kontrol yasaları olan u_1 ve u_2 ifadeleri Denklem (31) ve (32) deki gibi elde edilmektedir.

$$u_1 = \frac{1}{f_3\sqrt{p_s - \text{sign}(u_1)x_{11}}} \left[-f_1x_2 - f_2x_{11} + \dot{x}_{11d} - k_{t7}z_6 - \frac{AP}{m_{p0}}z_4 \right] \quad (31)$$

$$u_2 = \frac{1}{f_3\sqrt{p_s - \text{sign}(u_2)x_{12}}} \left[-f_1x_6 - f_2x_{12} + \dot{x}_{12d} - k_{t8}z_7 - \frac{AP}{m_{p2}}z_5 \right] \quad (32)$$

Denklem (31) ve (32) , Denklem (30) da yerine yazılırsa, aday Lyapunov fonksiyonunun negatifliği kesinleşmiş olur. Buna bağlı olarak da kararlılık garanti altına alınmış olur.

$$\dot{V}_5 = -k_{t1}e^2 - k_{t2}z_1^2 - k_{t3}z_2^2 - k_{t4}z_3^2 - k_{t5}z_4^2 - k_{t6}z_5^2 - k_{t7}z_6^2 - k_{t8}z_7^2 < 0 \quad (33)$$

3.1. Geri Adımlamalı Doğrusal Olmayan Adaptif Kontrol Tasarımı

Gerçek sistemlerde parametrelerin zamanla değişebilmesi veya başlangıçta kesin olarak bilinmemesi, sabit parametrelili kontrol yaklaşımlarının yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Bu tür belirsizlikler altında sistemin kararlılığını garanti altına alabilmek amacıyla, çevrimiçi parametre tahmini gerçekleştirebilen adaptif kontrol yöntemleri tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, önceki bölümde tasarlanan geri adımlamalı doğrusal olmayan kontrolcüye ek olarak, sistem içindeki belirsiz parametrelerin adaptif olarak tahmin edilmesini sağlayacak bir yapı

sunulmaktadır. Tasarlanan adaptif kontrolör, hem sistem performansını iyileştirmek hem de parametre belirsizliklerinden kaynaklanabilecek kontrol hatalarını minimize etmek amacıyla yapılandırılmıştır. Geliştirilen bu adaptif geri adımlamalı kontrolcü, sabit parametrelili kontrolcü ile karşılaştırılarak her iki yapının performansları analiz edilecek ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda adaptif kontrol yaklaşımının sistem üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.

Sistemdeki belirsizlikleri ifade edebilmek amacıyla, gerçek parametreler, bunlara karşılık gelen tahmini değerler ve aralarındaki farkı gösteren tahmin hataları aşağıda tanımlanmıştır.

- Gerçek sistem parametreleri ; f_1, f_2, f_3
- Tahmin edilen parametreler ; $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3$
- Tahmin hataları ; $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{f}_3$

$$\tilde{f}_1 = \hat{f}_1 - f_1 \quad \tilde{f}_2 = \hat{f}_2 - f_2 \quad \tilde{f}_3 = \hat{f}_3 - f_3 \quad (34)$$

Denklem (30) da yer alan aday Lyapunov fonksiyonun türevine , Denklem (34) de yalnız bırakılan, f_1, f_2, f_3 ifadeleri yerleştirilir ise, elde edilen yeni eşitlik, Denklem (35)'de gösterildiği gibidir. Ayrıca f_4, f_5, f_6 ifadeleri $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3$ ifadelerine sırasıyla eşittir.

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 = \dot{V}_4 + z_6 & \left(\hat{f}_1 x_2 + \hat{f}_2 x_{11} + \hat{f}_3 \sqrt{p_s - \text{sign}(u_1) x_{11}} u_1 - \dot{x}_{11d} - \tilde{f}_1 x_2 - \tilde{f}_2 x_{11} \right. \\ & \left. - \tilde{f}_3 \sqrt{p_s - \text{sign}(u_1) x_{11}} u_1 \right) \\ + z_7 & \left(\hat{f}_4 x_6 + \hat{f}_5 x_{12} + \hat{f}_6 \sqrt{p_s - \text{sign}(u_2) x_{12}} u_2 - \dot{x}_{12d} - \tilde{f}_4 x_6 - \tilde{f}_5 x_{12} \right. \\ & \left. - \tilde{f}_6 \sqrt{p_s - \text{sign}(u_2) x_{12}} u_2 \right) \end{aligned} \quad (35)$$

Aday Lyapunov fonksiyonunda, denklemleri pozitifte götürme ihtimali bulunan $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{f}_3, \tilde{f}_4, \tilde{f}_5, \tilde{f}_6$ terimleri ortadan kaldırılmalıdır. Denklem (36) göz önünde bulundurularak $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3, \hat{f}_4, \hat{f}_5, \hat{f}_6$ terimlerine karar verilmeli ve aday Lyapunov fonksiyonunun negatifliği korunmalıdır.

$$\dot{V}_5 = \dot{V}_4 + z_6(\dot{z}_6) + z_7(\dot{z}_7) + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{f}_1 \dot{\hat{f}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{f}_2 \dot{\hat{f}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{f}_3 \dot{\hat{f}}_3 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{f}_4 \dot{\hat{f}}_4 + \frac{1}{\gamma_5} \tilde{f}_5 \dot{\hat{f}}_5 + \frac{1}{\gamma_6} \tilde{f}_6 \dot{\hat{f}}_6 \quad (36)$$

Buna göre belirlenen türev ifadeleri Denklem (37) – (42) arasında ifade edilmiştir.

$$\dot{\hat{f}}_1 = \gamma_1(x_2 z_6) \quad (37)$$

$$\dot{\hat{f}}_2 = \gamma_2(x_{11} z_6) \quad (38)$$

$$\dot{\hat{f}}_3 = \gamma_3 \left(\sqrt{p_s - \text{sign}(u_1) x_{11}} x_{11} u_1 z_6 \right) \quad (39)$$

$$\dot{\hat{f}}_4 = \gamma_4(x_6 z_7) \quad (40)$$

$$\dot{\hat{f}}_5 = \gamma_5(x_{12} z_7) \quad (41)$$

$$\dot{\hat{f}}_6 = \gamma_6 \left(\sqrt{p_s - \text{sign}(u_2) x_{12}} x_{12} u_2 z_7 \right) \quad (42)$$

Bu ifadelerin güncellenebilmesi, Denklem (43) – (48) arasında gösterilen adaptif güncelleme kuralları ile sağlanmaktadır.

$$\hat{f}_1 = \hat{f}_1 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_1 \quad (43)$$

$$\hat{f}_2 = \hat{f}_2 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_2 \quad (44)$$

$$\hat{f}_3 = \hat{f}_3 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_3 \quad (45)$$

$$\hat{f}_4 = \hat{f}_4 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_4 \quad (46)$$

$$\hat{f}_5 = \hat{f}_5 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_5 \quad (47)$$

$$\hat{f}_6 = \hat{f}_6 + \Delta t \cdot \dot{\hat{f}}_6 \quad (48)$$

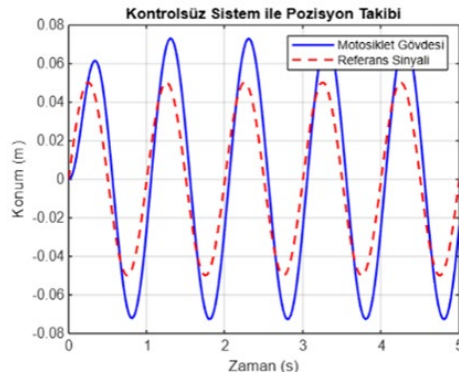
4. SONUÇLAR

Bu kısımda, motosikletin dikey doğrultudaki gövde hareketinin kontrolü amacıyla geliştirilen geri adımlamalı ve adaptif geri adımlamalı kontrol yapılarının performansı; referans izleme başarımı, parametre değişimlerine karşı dayanıklılık ve frekans cevabı (Bode diyagramı) üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

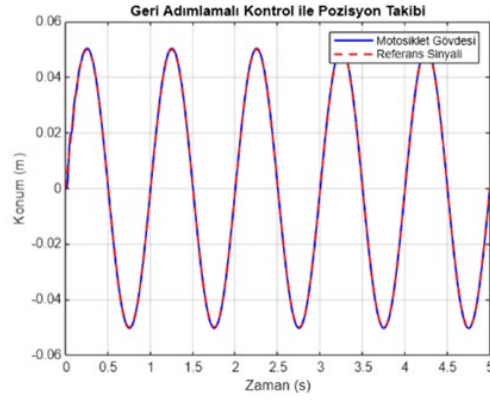
4.1. Gerçek Parametrelerle Kontrol Performansı Karşılaştırması

Gerçek parametreler (nominal değerler) altında, kontrolsüz sistem, geri adımlamalı kontrolcü ve adaptif geri adımlamalı kontrolcü ile aynı referans sinyali uygulanarak sistem cevapları incelenmiştir. Referans sinyali olarak 1 Hz. frekanslı ve 0,05 m genlikli harmonik (sinüs) giriş verilmiştir.

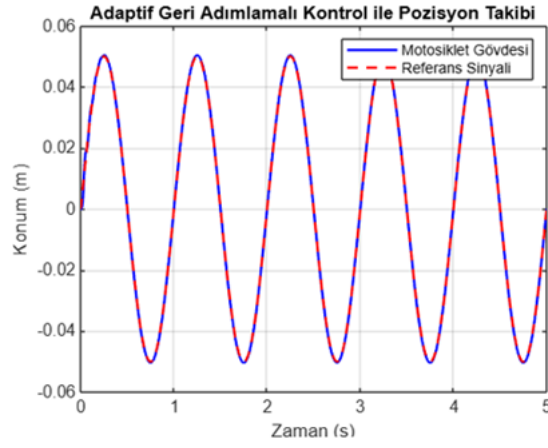
Şekil 2 'de bulunan kontrolsüz sistem cevabı incelendiğinde, motosiklet gövdesinin, referans sinyaliyle benzer frekansta ancak daha yüksek genlikli bir salınım sergilediği görülmekte ve kontrol ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3'teki geri adımlamalı kontrolcü ise, referansı başarılı biçimde takip ederek konum salınımlarını etkin biçimde azaltmıştır. Şekil 4'te sunulan adaptif geri adımlamalı kontrolcüye ait sistem cevabı incelendiğinde, parametre sapması olmayan durumda klasik geri adımlamalı yapıyla oldukça benzer bir performans sergilediği görülmektedir. Bu da sistem parametreleri doğru bilindiğinde adaptif yapının klasik yapıyla örtüşüğünü göstermektedir.



Şekil 2. Kontrolsüz Sistemin Performansı



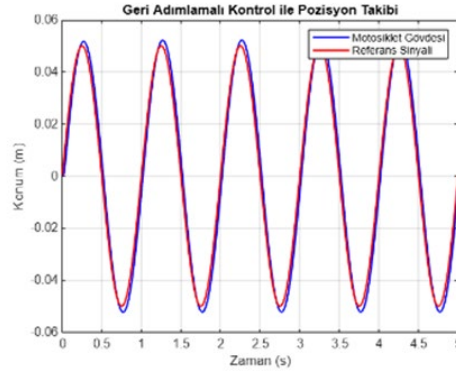
Şekil 3. Geri Adımlamalı Kontrol Performansı



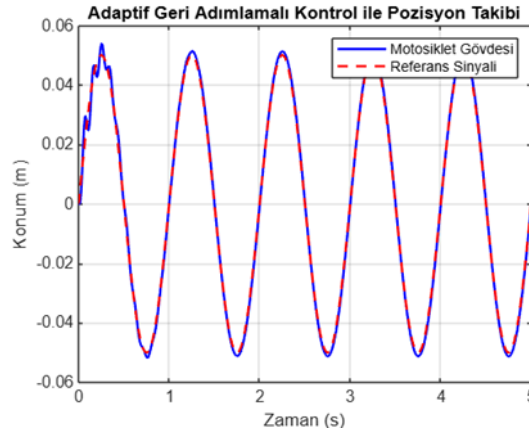
Şekil 4. Adaptif Kontrolcünün Performansı

Parametre Bozulması Durumunda Performans

Sistemin hidrolik özelliklerinden biri olan bulk modülü (β) değeri nominal değerinin %50'sine düşürülerek parametrik bozulma senaryosu oluşturulmuştur. Geri adımlamalı kontrolcü, bu değişim karşısında performans kaybına uğramış, referans izleme başarımı düşmüştür. Adaptif geri adımlamalı kontrolcü, başlangıçta parametre bozulmasından etkilenmiş olsa da zamanla parametreleri tahmin ederek sistemi yeniden dengelemiş ve referansa yakın izleme gerçekleştirmiştir.



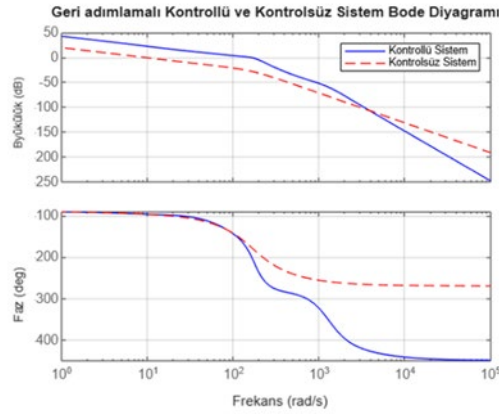
Şekil 5. Parametre Bozulmasında Geri Adımlamalı Kontrol Performansı



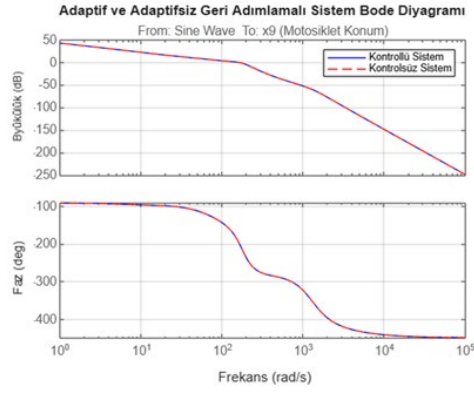
Şekil 6. Parametre Bozulmasında Adaptif Kontrol Performansı

4.2.Frekans Cevabı Üzerinden Karşılaştırmalar

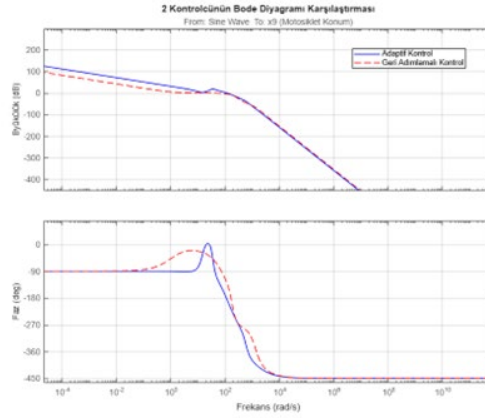
Bu kısımda sistemlerin frekans tepkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Kontrolsüz sistem ile geri adımlamalı kontrol yapısının Bode diyagramında, geri adımlamalı kontrolün genlik cevabının düşük frekanslarda baskılama yaptığı gözlenmiştir. Parametrelerin doğru seçildiği durumda, adaptif ve klasik geri adımlamalı kontrolcülerin Bode diyagramları benzerlik göstermiştir; bu da adaptif yapının, belirsizlik olmadığında klasik kontrolcüyle aynı performansı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Parametre bozulması sonrasında ise, iki kontrol yapısının Bode karşılaştırması, adaptif yapının daha dayanıklı olduğunu ve sistemin kararlılığını frekans uzayında da koruyabildiğini göstermiştir.



Şekil 7. Geri Adımlamalı ve Kontrolsüz Sistemlerin Bode Karşılaştırması



Şekil 8. Adaptif ve Geri Adımlamalı Sistemlerin Bode Karşılaştırması



Şekil 9. Bozulmuş Parametreyle İki Kontrolcünün Bode Karşılaştırması

KAYNAKLAR

- [1] WU, L., ZHAO, D., ZHAO, X., QIN, Y., Nonlinear Adaptive Back-Stepping Optimization Control of the Hydraulic Active Suspension Actuator, *Processes*, Cilt 11, Sayı 7, Sayfa 2020, 2023
- [2] DALLABONA, A., SCHERMANN, P., BLANKE, M., PAPAGEORGIOU, D., Dynamic Input Mapping Inversion for Algebraic Loop-Free Control in Hydraulic Actuators, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Cilt 14, Sayı 8, Sayfa 1–14, 2024
- [3] ZHENG, J., YAO, J., Robust Adaptive Tracking Control of Hydraulic Actuators with Unmodeled Dynamics, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Cilt 41, Sayı 14, Sayfa 3887–3898, 2019
- [4] DENG, W., YAO, J., WANG, Y., YANG, X., CHEN, J., Output Feedback Backstepping Control of Hydraulic Actuators with Valve Dynamics Compensation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Cilt 158, Sayfa 107769, 2021
- [5] LIU, W., XIE, F., Backstepping-Based Adaptive Control for Nonlinear Systems with Actuator Failures and Uncertain Parameters, *Circuits, Systems, and Signal Processing*, Cilt 39, Sayfa

138–153, 2020

ÖZGEÇMİŞ

Talha OĞUZ

1998 yılı İstanbul doğumludur. 2022 yılında Yeditepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2023 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış olup, öğrenimine aktif olarak devam etmektedir.

03.04.2023 tarihinden itibaren Mert Teknik Fabrika Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş. firmasında Ar-Ge Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları arasında sistem dinamiği, kontrol sistemleri ve hidrolik test teknolojileri yer almaktadır.