



Araştırma Makalesi /Research Article

Zaman Gecikmeli Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemi için Luenberger Gözleyicili PI+LQR Kontrolcü Tasarımı

Design of a PI+LQR Controller with a Luenberger Observer for a Time-Delayed Quarter-Wheel Suspension System

Muhammed Furkan MARAŞ^{1*}, Cem ONAT²

¹ Adıyaman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, m.furkanmaras@outlook.com, Orcid No: 0009-0008-9749-9835

² Adıyaman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, conat@adiyaman.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-4295-4860

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 11.06.2026
Revizyon 22.07.2026
Kabul 27.07.2026
Online 17.10.2026

Anahtar Kelimeler:

Pasif süspansiyon, Zaman gecikmesi PI-LQR kontrolcü, Luenberger gözleyici

ÖZ

Bu çalışmada, zaman gecikmesi içeren çeyrek taşıt pasif süspansiyon sistemi için Luenberger gözleyici tabanlı hibrit PI+LQR kontrolcü tasarımı ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı, sürüş konforu ve yol tutuş performansını iyileştirirken sistem kararlılığını koruyan etkili bir kontrol yapısı geliştirmektir. Öncelikle, sistemin durum uzayı modeli elde edilmiş ve optimal kontrol için Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) tasarlanmıştır. Daha sonra, kalıcı durum hatasını azaltmak amacıyla kontrol yapısına PI kontrolcü entegre edilerek sistemin kalıcı durum hatası azaltılmıştır. Ölçülemeyen durum değişkenlerinin tahmini için Luenberger gözleyici tasarlanmış ve kontrol yapısına dahil edilmiştir. Ayrıca, sensör ve aktüatör kaynaklı zaman gecikmesi modele doğrudan dahil edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçlarına göre, önerilen kontrol yapısı pasif süspansiyon sistemine kıyasla maksimum gövde yer değiştirmesini önemli ölçüde azaltmış ve sistemin performansını iyileştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin zaman gecikmeli sistemlerde etkin ve kararlı bir kontrol performans sunduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11.06.2026
Received in revised form 22.07.2026
Accepted 27.07.2026
Available online 17.10.2026

Keywords:

Passive suspension, Time delay PI-LQR control, Luenberger observer

ABSTRACT

This study addresses the design of a Luenberger observer-based hybrid PI+LQR controller for a quarter-vehicle passive suspension system with time delay. The primary objective of this study is to develop an effective control architecture that maintains system stability while improving ride comfort and road-holding performance. First, the state-space model of the system was derived, and a Linear Quadratic Regulator (LQR) was designed for optimal control. Subsequently, a PI controller was integrated into the control architecture to reduce steady-state error. A Luenberger observer was designed to estimate unmeasured state variables and incorporated into the control architecture. Additionally, sensor and actuator-induced time delays were directly incorporated into the model. Simulation results obtained in the MATLAB/Simulink environment demonstrate that the proposed control strategy significantly reduces the maximum vehicle body displacement and improves the overall dynamic performance of the suspension system compared with the passive suspension system. The results demonstrate that the proposed method provides effective and stable control performance in time-delay systems.

Doi: 10.24012/dumf.1969250

*Sorumlu Yazar

Giriş

Süspansiyon sistemleri, taşıt dinamiği açısından sürüş konforu, yol tutuş performansı ve güvenlik kriterlerinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Yol yüzeyindeki düzensizliklerden kaynaklanan titreşimlerin araç gövdesine iletimini azaltmak ve lastik-yol temasını sürekli kılmak, süspansiyon sistemlerinin temel amaçları arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, süspansiyon sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü, otomotiv mühendisliğinde uzun yıllardır yoğun olarak çalışılan bir araştırma alanıdır [1],[2],[3]. Taşıt dinamiğinin analizi için yaygın olarak kullanılan çeyrek taşıt modeli, sistem davranışını temsil eden iki serbestlik dereceli sadeleştirilmiş bir yapı sunmaktadır [4],[5]. Bu model hesaplama kolaylığı sağlaması ve kontrolcü tasarımı uygunluğu nedeniyle literatürde sıklıkla tercih edilmektedir. Süspansiyon sistemleri genel olarak pasif, yarı aktif ve aktif süspansiyon olarak üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Pasif süspansiyon sistemleri sabit parametrelili yapıları nedeniyle sınırlı performans sunarken, yarı aktif süspansiyon sistemleri ise sönümleme katsayısının ayarlanabilmesine imkân sunmaktadır. Aktif süspansiyon sistemleri ise harici enerji kaynağı kullanan aktüatörler sayesinde süspansiyon kuvvetlerini dinamik olarak kontrol edebilirler. Bu yetenekleri sebebiyle üstün performans sunarlar. Aktif süspansiyon sistemlerinin kontrolüne yönelik literatürde çok sayıda yöntem önerilmektedir. Klasik kontrol yaklaşımları arasında yer alan PID tabanlı denetleyiciler, basit yapıları ve uygulama kolaylıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [6],[7]. Bununla birlikte, durum geri beslemeli kontrol yöntemleri, özellikle optimal performans kriterlerini sağlayabilmeleri açısından ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) yöntemi, sistem enerjisini minimize eden optimal kontrol sinyali üretme yeteneği sayesinde aktif süspansiyon uygulamalarında etkili bir kontrol tasarım aracı sunmaktadır [8],[9],[10]. Bunun yanı sıra, doğrusal olmayan sistem davranışlarını ele alabilmek amacıyla bulanık mantık kontrolü, kayan kipli kontrol ve adaptif kontrol yöntemleri de literatürde geniş yer bulmuştur. Örneğin bulanık mantık tabanlı kontrol yaklaşımlarının sürüş konforunu artırmada etkili olduğu gösterilmişken [11], kayan kipli kontrol yöntemlerinin sistem belirsizliklerine karşı yüksek dayanıklılık sağladığı rapor edilmektedir [12]. Son yıllarda ise yapay zekâ ve optimizasyon tabanlı yöntemler, süspansiyon sistemlerinin performansını iyileştirmek amacıyla kullanılmakta olup, genetik algoritma ve yapay sinir ağları tabanlı kontrolcülerin yerleşme süresini azalttığı ve titreşim bastırma performansını artırdığı rapor edilmektedir [13],[14],[15],[16]. Ancak, mevcut çalışmaların önemli bir kısmında sistem performansını doğrudan etkileyen zaman gecikmesi ihmal edilmekte veya yaklaşık yöntemlerle modele dahil edilmektedir. Zaman gecikmesi, sensör ölçümleri, veri işleme süreçleri ve aktüatör dinamiklerinden kaynaklanan kaçınılmaz bir etki olup, özellikle yüksek performans gerektiren aktif süspansiyon sistemlerinde kararlılığı önemli ölçüde etkileyebilmektedir [17],[18],[19]. Literatürde zaman gecikmesi genellikle Padé yaklaşımı ile lineerleştirilerek modele dahil edilmekte, ancak bu durum model derecesinin artmasına ve sistem doğruluğunun azalmasına neden olmaktadır [20].

Bu çalışmada, literatürdeki bu boşluğu gidermek amacıyla zaman gecikmesi doğrudan dikkate alınarak çeyrek taşıt modeli için Luenberger gözleyici tabanlı PI+LQR kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemde, öncelikle LQR tabanlı optimal kontrolcü tasarlanmış, ardından sistemin durum değişkenlerinin tahmini için Luenberger gözleyici kullanılarak tam durum geri beslemesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, kontrol sisteminde kullanılan sensör sayısını azaltarak yapıyı daha basit hale getirmektedir. Bu çalışmanın literatüre katkıları şu şekildedir:

- Zaman gecikmesinin süspansiyon modeline (herhangi bir doğrusallaştırma işlemi yapmadan) doğrudan dahil edilmesi
- LQR ve PI kontrol yapılarının hibrit olarak kullanımı
- Luenberger gözleyici ile durum tahmini
- Farklı kontrol yapıları ile karşılaştırmalı analiz

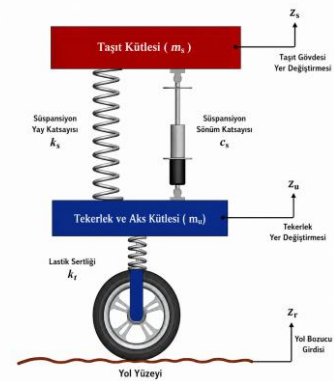
Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde çeyrek taşıt modelinin matematiksel yapısı sunulmaktadır. Üçüncü bölümde önerilen kontrolcü tasarımı detaylandırılmaktadır. Dördüncü bölümde simülasyon sonuçları verilmekte ve performans sonuçları karşılaştırılmaktadır. Son bölümde ise elde edilen veriler doğrultusunda genel değerlendirmeler sunulmaktadır.

Taşıt Modeli

Bu makalede iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır. Şekil 1’de verilen çeyrek taşıt modelinin matematiksel modeli Newton’un II. Kanunu kullanılarak elde edilmiştir. Sistem matematiksel modeli Denklem 1 ve 2’de verilmiştir. Burada z_s taşıt gövdesi yer değiştirmesini, z_u tekerleğin yer değiştirmesini göstermektedir.

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + u(t - \tau) \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_t(z_u - z_r) + u(t - \tau) \quad (2)$$



Şekil 1. Çeyrek taşıt süspansiyon modeli.

Hareket denklemlerinde m_s araç kütlelerinin $1/4$ 'ünü m_u tekerlek ve aks kütlelerini, k_s ve k_t yay katsayılarını, c_s viskoz damperin sönüm katsayısını, z_r yol pürüzlülük fonksiyonunu ve τ ise zaman gecikmesini göstermektedir. Sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem parametreleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
m_s	250 kg	c_s	1500 N.s/m
m_u	40 kg	k_t	190000 N/m
k_s	16000 N/m		

Bu makalede önerilen çift döngülü kontrol yapısının iç döngü kontrolcüsü bir lineer regülatör olduğu için modelin durum değişkeni uzayı formunda ortaya konulması gerekmektedir. Sistemin matematik modeli birbirine bağlı ikinci mertebeden iki adet diferansiyel denklemden oluştuğu için durum değişkeni sayısı dördür. Durum değişkenlerinin karşılık geldiği fiziksel değişkenler Denklem 3'te verilmektedir.

$$x_1 = z_s, \quad x_2 = \dot{z}_s, \quad x_3 = z_u, \quad x_4 = \dot{z}_u \quad (3)$$

Durum değişkeni uzayı formunun genel görünüşü Denklem 4 ve 5'te verilmektedir. Burada x durum değişkeni vektörünü, u kontrol girişini, w yol girişini, A sistem matrisini, B_u kontrol giriş matrisini, B_w yol giriş matrisini, C ölçüm matrisini, D_u ölçümler için kontrol giriş matrisini ve D_w ölçümler için yol giriş matrisini ifade etmektedir. Bu matrisler sırasıyla Denklem 6-9'da verilmektedir.

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w \quad (4)$$

$$y = Cx + D_u u + D_w w \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & -\frac{k_t}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_u} & -\frac{(k_s + k_t)}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{m_u} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kontrolcü Tasarımı

Bu çalışmada önerilen kontrolcü bir iç ve bir dış döngü olmak üzere iki döngüden oluşmaktadır. Kontrolcü tasarımı üç adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda, zaman gecikmesi hesaba katılmadan iç döngü için LQR kontrolcü tasarlanmıştır. İkinci adımda, tam durum değişkeni geri beslemeli LQR kontrolcüyü sadece süspansiyon sapması değişkeni giriş olacak şekilde yapılandırmak için Luenberger gözleyicisi tasarlanmıştır. Üçüncü adımda, sistemde zaman

gecikmesi de hesaba katılarak dış döngü için PI kontrolcü tasarlanmıştır. PI kontrolcü tasarımı sistemi kararlı kılan kontrolcü parametreleri bölgesinin hesaplanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

İç Döngü LQR Tasarımı

Tasarımın I. evresinde iç döngü için tam durum geri beslemeli LQR kontrolcü tasarlanmıştır. Bunun için kullanılan Q ve R matrisleri sırasıyla Denklem 10-11'de verilmiştir. Q ve R matrislerinin seçimi, sistem performans kriterlerine göre ayarlanmıştır. Bu seçimde gövde yer değiştirmesi ve hız değişkenleriyle sürüş konforunun iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Denklem 10'da verilen Q matrisi değerleri konfor odaklı seçilmiş olup R değeri ile birlikte sistemi cezalandırmaktadır.

$$Q = \begin{bmatrix} 100000 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R = 0.0001 \quad (11)$$

Sistemden elde edilen durum uzayı modeli temel alınarak, Denklem 12'de verilen amaç fonksiyonunu minimize eden optimum geri besleme kazanç matrisi K , Denklem 13'te sunulan cebirsel Riccati denkleminin çözümü olan S matrisi yardımıyla hesaplanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde sistemin durumlarını minimum hata ile referans noktası etrafında toplarken, sistemin aşırı kontrol sinyali üretmesinin de önüne geçmektedir.

$$J(u) = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (12)$$

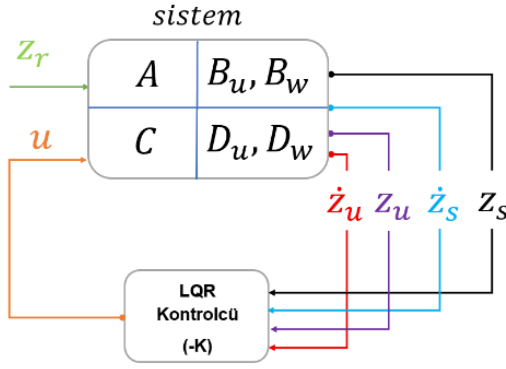
$$A^T S + SA - [SB]R^{-1}[B^T S] + Q = 0 \quad (13)$$

$u = -Kx$ olmak üzere, tam durum geri beslemeli kontrolcünün kazançlarından oluşan K matrisini veren ifade Denklem 14'te verilmektedir. Elde edilen durum geri beslemeli LQR iç döngü kontrolcünün kazanç K matrisi Denklem 15'te verilmiştir.

$$K = R^{-1}B_u^T S \quad (14)$$

$$K = [1.9440 \quad 0.2426 \quad -1.7388 \quad -0.0258] \quad (15)$$

Tasarımın bu evresinde kontrol mimarisi Şekil 2'de verildiği gibidir. Burada LQR kontrolcüyü tüm durum değişkenleri giriş olarak uygulanmaktadır. Bir başka ifade ile tasarımın bu evresinde iç döngü kontrolcüsü tam durum değişkeni geri beslemelidir.



Şekil 2. İç döngü LQR kontrolcü tasarımı.

Luenberger Gözleyici Tasarımı

Teorik çalışmalarda optimal tasarım, genellikle sistemin tüm durumlarının ölçülebilir olduğu varsayılarak elde edilir. Ancak gerçek fiziksel sistemlerde tüm durumlar ölçülebilir olmayabilir ve bu nedenle bazı durumların tahmin edilmesi gerekir. Bu aşamada, ölçülmesi kolay olan süspansiyon sapmasından durum değişkenlerinin tümünü tahmin eden Luenberger gözleyici tasarımı yapılmıştır. Şekil 3'te verilen Luenberger gözleyicili LQR süspansiyon sapması ölçümünden diğer tüm durum değişkenlerini tahmin etmektedir. Önerilen kontrol yapısında elde edilen düşük gövde yerdeğiştirmesi, durum geri besleme mekanizmasının sistem enerjisini daha etkin sönmülmesinden kaynaklanmaktadır. İntegral aksiyon kalıcı durum hatasını azaltırken, Luenberger gözleyici ölçülemeyen durum değişkenlerini tahmin ederek kontrol performansını iyileştirmiştir. Luenberger gözleyici matematiksel modeli çeyrek taşıt modelinin matematiksel modeli üzerinden elde edilmiştir. Luenberger gözleyicisinin matematiksel ifadeleri Denklem 21-26'da verilmiştir. Durum geri beslemeli kontrol tasarımında seçilmiş olan kutuplar (*kutuplar*), kapalı çevrim sistemin dinamik davranışı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu çalışmada kapalı çevrim kutupları Denklem 21'de verilmiştir. Seçilen kutupların negatif reel ekseninde bulunuyor olması sistemin asimptotik olarak kararlı olduğunu göstermiştir. Gözleyici sisteminde $A_o = A$ gözleyicinin sistem dinamiklerini doğrudan ana sistemden aldığını, L gözleyici kazanç matrisini, '*kutuplar*' gözleyici için seçilen kapalı çevrim kutupları, C_o çıkış matrisini, B_o genişletilmiş giriş matrisini, D_o observerın D matrisini göstermektedir.

$$kutuplar = [-20 - 25 - 30 - 35] \quad (21)$$

$$L = yer(A', C', kutuplar)' \quad (22)$$

$$A = A_o \quad (23)$$

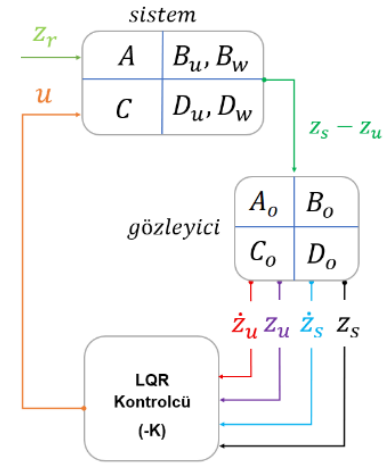
$$B_o = [Bu \ L] \quad (24)$$

$$C_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$D = D_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Tasarlanan Luenberger gözleyicisinin durum değişkeni uzay modeli Denklem 27'de verilmiştir. Bu denklemde $A\hat{x}$ sistem model tabanlı tahmini, $B_u u$ kontrol giriş etkisini, $L(y - C\hat{x})$ ise gözleyici hata düzeltme mekanizmasını göstermektedir. Luenberger durum gözleyicisi ölçülemeyen durumları çıkış hatasına göre düzelterek tüm sistem durumlarını tahmin etmeye çalışılmaktadır. Denklem 27'de verilen gözleyici çıkışı ile tahmin edilen durumlar üzerinden sistem çıktısını hesaplayarak gerçek ölçüm ile karşılaştırma yapılmaktadır. Burada $\hat{x}$ tahmin edilen durum vektörünü göstermektedir.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B_u u + L(y - C\hat{x}), \quad \hat{y} = C\hat{x} \quad (27)$$



Şekil 3. Luenberger gözleyicili LQR yapısı.

Dış Döngü PI Kontrolcü Tasarımı

Tasarımın son aşamasında dış döngü PI kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarımın bu evresinde kontrol yapısı Şekil 4'te verildiği gibi bir iç döngü ve bir dış döngüden oluşmaktadır. Dış döngü kontrolcüsü olan PI kontrolcünün tasarımı için ilk olarak u_d 'den süspansiyon sapması ($z_s - z_u$) metriğine olan transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Transfer fonksiyonu Denklem 28'de verilmektedir.

$$F(s) = \frac{0.004s^6 + 0.5046s^5 + 43.25s^4 + 2862s^3 + 1.218e05s^2 + 2.212e06s + 3.146e07}{s^6 + 169.7s^5 + 1.676e04s^4 + 1.051e06s^3 + 3.979e07s^2 + 8.958e08s^2 + 1.197e10s^2 + 9.286e10s + 3.535e11} \quad (28)$$

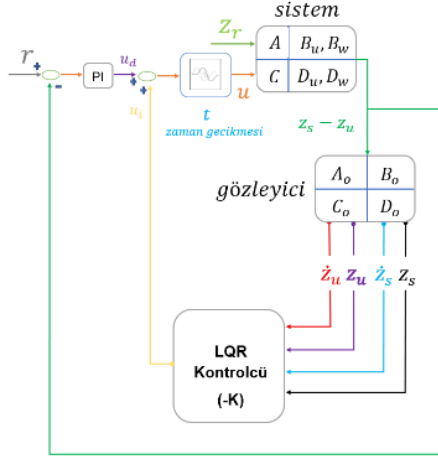
Bu aşamada aktüatör gecikmesi t' 'de hesaba katılır. Bunun sonucunda u_d girişinden süspansiyon sapmasına olan zaman gecikmeli model Denklem 29'da verildiği hale gelir.

$$F(s) = \frac{A(s)}{B(s)} e^{-zs} \quad (29)$$

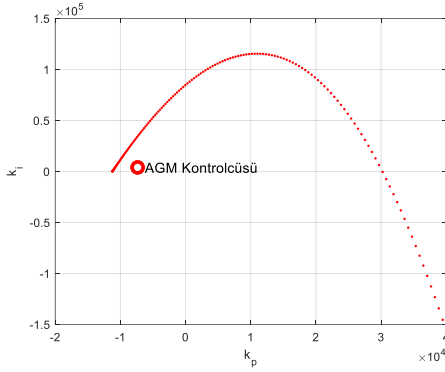
Burada $A(s)$ pay polinomu, $B(s)$ ise karakteristik polinomu göstermektedir. PI tasarımı için kararlı kılan kontrolcü parametreleri bölgesi Sınır Kök Yer Eğrisi metoduyla hesaplanmıştır. Kontrolcü parametreleri bölgesi Şekil 5'te verilmektedir. Detaylar için [21],[22] çalışmalarına bakınız. Ağırlıklı Geometrik Merkez metodu, zaman gecikmeli

sistemlerin PI kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılan bir nümerik kontrolcü hesaplama metodudur [23],[24],[25]. Kontrol sistemlerinde özellikle (k_p) ve (k_i) parametrelerinin seçiminde, hızlı ve kararlı sistem cevabı elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Dış döngü PI kontrolcüsünün oransal kazanç parametresi Ağırlıklı Geometrik Merkez (AGM) metoduyla hesaplanmıştır. Dış döngü kontrolcüsünün AGM parametreleri Denklem 30'da verilmektedir.

$$k_p = -7359.83, k_i = 4052.95 \quad (30)$$



Şekil 4. Dış döngü PI kontrolcü.



Şekil 5. Sınır kök eğrisinde AGM metoduyla hesaplanan $k_p - k_i$ noktası.

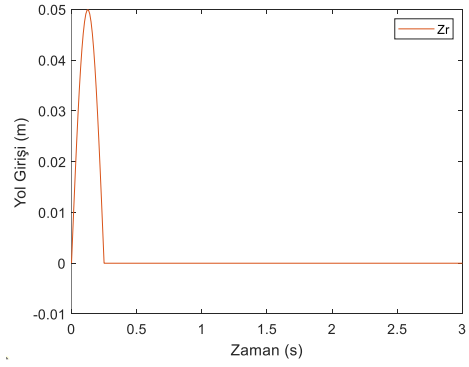
Simülasyon Sonuçları ve Tartışma

Sistem dinamiklerini değerlendirmek amacıyla, temel sinüzoidal yol girdisinin zaman gecikmesinin bir kopyasının süperpozisyonundan oluşturulan bir yol profili kullanılmıştır. Yol girdisi Denklem 31'de verilmiştir. Burada A yol girdisi genliği (0.05m), w açısal frekans ($4\pi \text{ rad/s}$), τ zaman gecikmesini göstermektedir.

$$z_r(t) = A \sin(wt) + A \sin(w(t - \tau)) \quad (31)$$

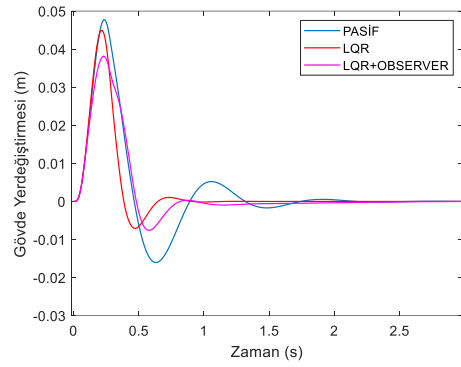
Bu yaklaşım, zaman gecikmesinin yol girdisi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla oluşturulmuş olup, klasik tek sinüzoidal yol profilinden farklı bir giriş sinyali üretmektedir. Seçilen bu yol profili Şekil 6'daki gibidir. Bu

giriş, süspansiyon sisteminin ani yol bozukluklarına verdiği tepkiyi analiz etmek açısından tercih edilmiştir.

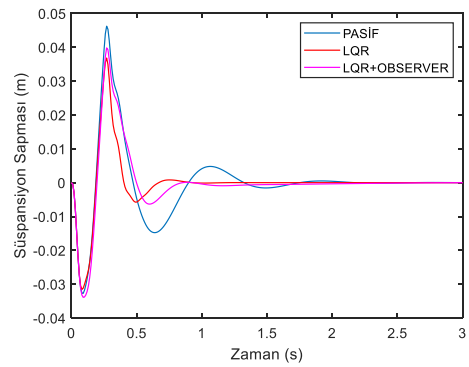


Şekil 6. Yol girişi.

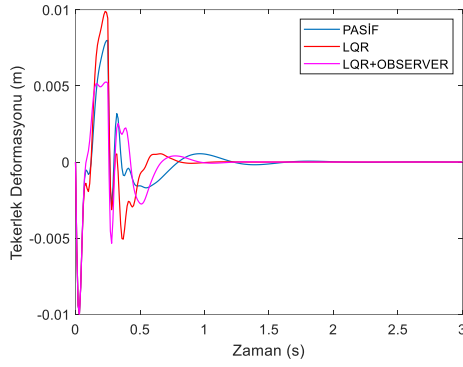
Zaman gecikmesinin etkisini incelemek amacıyla gecikmeli ve gecikmesiz sistem tepkileri karşılaştırılmıştır. Zaman gecikmesiz durum için Pasif, LQR ve LQR+Observer süspansiyon performans grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de a) gövde yer değiştirmesi b) süspansiyon sapması, c) tekerlek deformasyonunu göstermektedir.



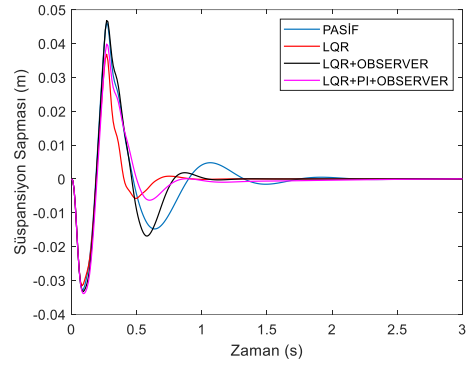
a)



b)



c)



b)

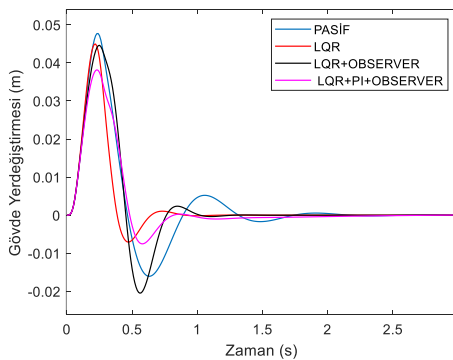
Şekil 7. Zaman gecikmesiz pasif durum için süspansiyon performans sonuçları.

Çeyrek taşıt modelinde zaman gecikmesinin $t = 0$ için maksimum gövde yer değiştirmesi, süspansiyon sapması, tekerlek deformasyon değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

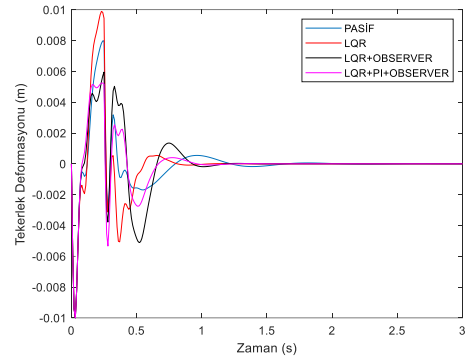
Tablo 2. $t = 0$ için kontrolcü sonuçları.

Kontrolcü	Max gövde yer değiştirmesi (m)	Max süspansiyon sapması (m)	Max tekerlek deformasyonu (m)
Pasif	0.047	0.046	0.008
LQR	0.045	0.036	0.009
LQR+Observer	0.044	0.046	0.006

Tablo 2’deki sonuçlar incelendiğinde, LQR kontrolcüsünün süspansiyon sapması pasif ve LQR+Observer’a göre daha iyi bir sönümlere sağlamıştır. Gövde yer değiştirmelerini karşılaştırdığımızda LQR+Observer en iyi yer değiştirme sonucunu vermiştir. Fakat LQR+Observer titreşim sönümlere süresi bakımından LQR kontrolcüsüne göre kötü sonuç vermiştir. Şekil 8’de $t=0.035$ için Pasif, LQR, LQR+PI+Observer için süspansiyon performans grafikleri verilmiştir. Şekil 8’de a) gövde yerdeğiştirmesi b) süspansiyon sapması, c) tekerlek deformasyonunu göstermektedir.



a)



c)

Şekil 8. Zaman gecikmeli durum için pasif süspansiyon performans sonuçları.

Tablo 3’te $t = 0.035$ zaman gecikmesi için kontrolcü sonuçları verilmiştir. Tablodaki kontrolcüler karşılaştırıldığında önerilen LQR+PI+Observer kontrolcüsü diğerlerine göre daha iyi bir sönümlere ve performans sergilemiştir.

Tablo 3. $t = 0.035$ için kontrolcü sonuçları.

Kontrolcü	Max gövde yer değiştirmesi (m)	Max süspansiyon sapması (m)	Max tekerlek deformasyonu (m)
Pasif	0.047	0.046	0.008
LQR	0.045	0.036	0.009
LQR+Observer	0.044	0.046	0.006
LQR+PI+Observer	0.038	0.039	0.005

Tablo 3’te verilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen LQR+PI+Luenberger gözleyici tabanlı kontrol yapısının zaman gecikmesi altında en başarılı genel performansı sergilediği görülmektedir. Özellikle maksimum gövde yer değiştirmesi pasif süspansiyon sisteminde 0.047 m iken önerilen kontrol yapısında 0.038 m’ye düşmüş ve yaklaşık %19.1 oranında iyileşme sağlanmıştır. Gövde titreşimlerinin azaltılması, sürüş konforunun artırılması açısından aktif süspansiyon sistemlerinde temel performans ölçütlerinden biridir. Elde edilen bu iyileşme, LQR kontrolcüsünün durum

geri beslemesi yoluyla sistem enerjisini etkin biçimde sönümlemesi, PI kontrolcüsünün kalıcı durum hatasını azaltması ve Luenberger gözleyicinin ölçülemeyen durum değişkenlerini güvenilir biçimde tahmin ederek kontrol kuvvetinin daha doğru hesaplanmasını sağlamasından kaynaklanmaktadır. Maksimum süspansiyon sapması açısından değerlendirildiğinde, en düşük değer yalnızca LQR kontrolcüsünde elde edilmiştir (0.036 m). Bununla birlikte önerilen kontrol yapısında bu değer 0.039 m olarak gerçekleşmiştir. Süspansiyon sapmasındaki bu küçük artışa rağmen gövde yer değiştirmesindeki belirgin azalma dikkate alındığında, önerilen yöntemin sürüş konforu ile süspansiyon çalışma aralığı arasında daha dengeli bir performans sunduğu söylenebilir. Başka bir ifadeyle, önerilen kontrolcü yalnızca tek bir performans kriterini optimize etmek yerine, sistemin farklı dinamik gereksinimleri arasında uygun bir uzlaşma sağlamaktadır. Tekerlek deformasyonu açısından değerlendirildiğinde ise önerilen kontrol yapısı pasif sisteme göre 0.008 m'den 0.005 m'ye düşüş sağlayarak yaklaşık %37.5 oranında iyileşme elde etmiştir. Tekerlek deformasyonunun azalması, lastik-yol temasının daha kararlı korunmasına katkı sağlamakta ve böylece aracın yol tutuş kabiliyetini artırmaktadır. Bu sonuç, aktif süspansiyon sistemlerinde sürüş güvenliği açısından önemli bir kazanım olarak değerlendirilebilir. Genel olarak değerlendirildiğinde, yalnızca maksimum değerlerin küçülmesi değil, kontrol yapısının sistem enerjisini daha etkin biçimde sönümlemesi ve zaman gecikmesine rağmen kararlı bir dinamik davranış sergilemesi önerilen yöntemin temel üstünlüğünü oluşturmaktadır. Luenberger gözleyici tarafından tahmin edilen durum değişkenleri sayesinde geri besleme doğruluğu artırılmış, PI kontrolcüsü ile kalıcı durum hatası azaltılmış ve LQR kontrolcüsünün optimal kontrol yeteneği korunmuştur. Böylece önerilen kontrol yapısı hem sürüş konforu hem de yol tutuş performansı bakımından dengeli ve başarılı bir çözüm sunmuştur.

Sonuç

Bu çalışmada, zaman gecikmesi içeren pasif süspansiyonlu çeyrek taşıt sistemi için farklı kontrol stratejileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sistem performansı sürüş konforu, yol tutuşu ve kararlılık kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında pasif sistem, PI kontrolcü, LQR kontrolcü, Luenberger gözleyici tabanlı LQR kontrolcü ve hibrit LQR+Observer+PI kontrol yapıları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda pasif süspansiyon sisteminde yol bozucularına karşı yeterli titreşim sönümleme performansı sağlayamadığını göstermiştir. Pasif sistemde özellikle gövde ivmesi ve süspansiyonda yüksek genlikli salınımlar meydana gelmiş, bu durum sürüş konforu ve taşıt kararlılığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmıştır. LQR kontrolcü 4 sensör ile çeyrek taşıt modeline yol yüzeyinden gelen düzensizliklere karşı iyi bir titreşim sönümlemesi göstermiş ve titreşim genliklerini azaltmıştır. Özellikle zaman gecikmesinin neden olduğu olumsuz etkilerin azaltıldığı, sistem salınımlarının daha kısa sürede bastırıldığı ve geçici rejim performansının iyileştirildiği tespit edilmiştir. Önerilen hibrit LQR+Observer+PI kontrol yapısının ise diğer yöntemlere

göre zaman gecikmeli durumda daha üstün performans sağladığı belirlenmiştir. PI kontrolcüsünün sisteme eklenmesiyle birlikte kalıcı durum hatası azaltılmış, sistem cevabı daha dengeli hale getirilmiş ve titreşim sönümleme performansı artırılmıştır. Gövde yer değiştirmesi, süspansiyon sapması ve grafiklerinde daha düşük aşım, daha kısa yerleşme süresi ve daha düşük titreşim genlikleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin sürüş konforu ve yol tutuş performansı açısından önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Ayrıca sınır kök yer eğrisi yöntemi kullanılarak kontrolcü parametrelerinin kararlı çalışma bölgeleri belirlenmiş ve Ağırlıklı Geometrik Merkez metodu ile optimum kontrol parametreleri seçilmiştir. Böylece sistem kararlılığı korunurken performans kriterleri arasında dengeli bir kontrol yapısı elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen gözleyici tabanlı hibrit kontrol yaklaşımının zaman gecikmeli pasif süspansiyon sistemlerinde etkin biçimde uygulanabileceği ve klasik kontrol yöntemlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalarda, doğrusal olmayan taşıt modelleri, parametre belirsizlikleri ve yol koşullarındaki değişimler dikkate alınarak robust ve adaptif kontrol yöntemlerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca önerilen kontrol yapısının gerçek zamanlı deneysel sistemler üzerinde uygulanması, yöntemin pratik uygulanabilirliği açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Katkı Beyanı

Modellerin Kurulması, kontrolcü tasarımları, verilerin analizi ve bulguların yorumlanması: Prof.Dr.Cem Onat
Literatür taraması, simülasyonların yapılması ve verilerin toplanması: Muhammed Furkan Maraş

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları Muhammed Furkan Maraş ve Prof.Dr.Cem Onat herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ulukapı, M. (2005). *Aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemlerinin simülasyon ortamında incelenmesi*
- [2] Altun, Y. (2017). Çeyrek taşıt aktif süspansiyon sistemi için LQR ve LQI denetleyicilerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 61-70.
- [3] Okuturlar, H., & Tıncır, M. (2021). Araç süspansiyon sisteminin nümerik ve deneysel dinamik analizi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 85-105.
- [4] Onat, C., Sahin, M. Ve Yaman, Y. (2013). Optimal control of a smart beam by using a Luenberger observer.

ICEAF III, 3rd International Conference of Engineering Against Failure (s. 28).

[5] Onat, C., Yüksek, İ., & Sivrioğlu, S. (2006). Bir Aktif Süspansiyon Sistemi İçin H_∞ Kontrol Temeline Dayalı Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı. *Mühendis ve Makine*, 47(552), 36-43.

[6] Arpacı, H. (2018). Yapay sinir ağları ile kesir dereceli PID denetleyici katsayılarının ayarlanması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 156-173.

[7] Arpacı, H., Özgüven, Ö. F., & Can, M. S. (2018). Otomatik Ayarlamalı Sinir Hücresi ile Adaptif Kesir Dereceli PID Kontrolör Tasarımı. *Journal of New Results in Engineering and Natural Sciences*, (8), 100-118.

[8] Sever, M., Şendur, H. S., & Arslan, M. S. (2019). Biodinamik sürücü modeli içeren bir taşıt süspansiyon sisteminin durum türevi geri beslemeli LQR ile aktif titreşim kontrolü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1573-1584.

[9] Soliman, A. M. (2011). *Adaptive LQR control strategy for active suspension system* (No. 2011-01-0430). SAE Technical Paper.

[10] Kizir, S. (2019). Denge kontrol sisteminin LQR ile gerçek zamanlı durum geri beslemeli kontrolü. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1023-1030.

[11] Çakan, A., Botsalı, F., Tınkır, M., & Konya, K. K. (2015). Çeyrek araç modelinde PID ve bulanık mantık kontrolcü ile aktif titreşim kontrolü. *Uluslararası Katılımlı*, 17, 14-17.

[12] Flayyih, M. A., Hamzah, M. N., & Hassan, J. M. (2021, February). Integral sliding mode control design for a quarter-car active suspension system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1094, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

[13] Maden, D. (2013). Aktif Süspansiyon Sistemli Çeyrek Araç Modelinin Optimal Gözlemleyiciyle Kontrolü. *Sakarya University Journal of Science*, 17(2), 181-187.

[14] Maden, D. (2012). *Aktif süspansiyonlu bir çeyrek araç modelinin gözlemleyici ile optimal kontrolü* (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

[15] Ulusoy, L., Süngü, S. K., Eksin, İ., & Güzelkaya, M. (2026). *Aktif Süspansiyon Sistemleri Kontrolünde Ters Optimal Kontrol Yaklaşımı*. *EMO Bilimsel Dergi*, 16(1), 73-82.

[16] Toksoy, M. T., & Yıldız, A. (2020). *TEKERLEK İÇİ MOTORLU ELEKTRİKLİ BİR ARACIN AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN PID VE BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLÜ*. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1373-1390.

[17] Ozyetkin, M. M., Onat, C., & Tan, N. (2020). PI-PD controller design for time delay systems via the weighted geometrical center method. *Asian Journal of Control*, 22(5), 1811-1826.

[18] Kaya, I. (2021). Optimal PI-PD controller design for pure integrating processes with time delay. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(3), 563-572.

[19] Kaya, İ., & Çökmez, E. (2018). Kesir dereceli PI denetleyici ile kesir dereceli kararsız zaman gecikmeli sistemler için kararlılık bölgelerinin elde edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 625-636.

[20] Özbek, C. (2013). *Taşıt süspansiyon sistemlerinin uyarlamalı kontrolü* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8-10).

[21] Onat, C. (2019). A new design method for PI-PD control of unstable processes with dead time. *ISA transactions*, 84, 69-81.

[22] Onat, C. (2013). A new concept on PI design for time delay systems: weighted geometrical center. *International Journal of Innovative Computing, information and control*, 9(4), 1539-1556.

[23] Güler, Y., & Kaya, I. (2023). Load frequency control of single-area power system with PI-PD controller design for performance improvement. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(4), 2633-2648.

[24] Daskin, M. (2025). Optimization of Weighted Geometrical Center Method for PI and PI-PD Controllers. *Processes*, 13(3), 749.

[25] Ghous, I., Xiang, Z., & Karimi, H. R. (2015). State feedback H_∞ control for 2-D switched delay systems with actuator saturation in the second FM model. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 34(7), 2167-2192.