



Aktif süspansiyon sistemli çeyrek araç modelinin gözlemleyiciyle optimal kontrolü

Ayhan Özdemir^{1*}, Dinçer Maden²

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce

16.05.2012 Geliş/Received, 13.12.2013 Kabul/Accepted

ÖZET

Otomotiv sektöründeki teknolojik gelişim ve karayolu inşaat tekniklerindeki ilerleme ulaşımı oldukça hızlandırarak yeni konfor ve güvenlik problemlerini mühendislik konusu haline getirmiştir. Seyir halinde aracın iç dinamiği ve dış etkenlerden kaynaklı konfor ve güvenliği olumsuz etkileyen birçok titreşim hareketi oluşmaktadır. Bu titreşimlerin bastırılması için karmaşık yapılarından dolayı kontrolör gerektiren aktif süspansiyonlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada aktif süspansiyon içeren ¼ araç modeli durum değişkenlerinin tam olarak ölçülemediği alanlarda kullanılan Luenberger gözlemleyicisiyle modellenmiştir. Daha sonra sistem belirli performans kriterlerine göre optimal geribesleme kontrolör ile birleştirilmiştir. Bu yeni kontrolör MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanmış; çeşitli yol bozucu girişleri uygulanarak sistemin cevabı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: aktif süspansiyon sistemi, durum geri besleme, luenberger gözlemleyici, optimal control

Optimal observer control of quarter car model with active suspension

ABSTRACT

As technological advances in automotive industry and roads construction techniques have made transportation faster, new comfort and safety matters have become the subject of engineering. Many vibrations caused by internal and external factors affect comfort and safety in negative ways. To damp these vibrations, active suspensions requiring controllers because of their complex structures are widely used. In this study, firstly ¼ car model having active suspension has been modeled with Luenberger observer, used on the occasions state variables cannot be determined efficiently. Then, the system has been combined with optimal feedback controller according to certain performance criteria. This new controller has been designed in MATLAB / SIMULINK environment, and the system response has been evaluated after applying roads disturbance inputs.

Keywords: active suspension system, state feedback, Luenberger observer, optimal control

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayolu ile ulaşımın başladığı dönemlerden beri, gerek içten yanmalı veya elektrik tahrikiyle çalışan; gerekse bir canlılık kas gücüyle hareket ettirilen araçlarda iki önemli sorun ortaya çıkmıştır. Bunlar sürüş konforu ve güvenliği olarak tanımlanmaktadır. Marka rekabetinin yoğun bir şekilde yaşandığı otomotiv piyasasında konfor ve güvenlik unsurları pazarlama ve yatırım için oldukça önemli bir unsurlardır [1-2].

Seyir halindeki bir taşıt motor, şaft, vites kutusu gibi kendinden kaynaklı titreşimlere ek olarak rüzgâr ve bozuk yol zemini şartlarından oluşan titreşimlere maruz kalmaktadır[3-4]. Araç içi dinamiklerden oluşan titreşim frekansının 1 Hz civarında olduğu tespit edilmiştir[5].

Diğerlerine oranla en büyük problem kaynağı yol kusurlarından dolayı oluşan mekanik salınımlardır[6]. Bu titreşimler zaman içerisinde yürüyen aksam aşınmalarına, araç lastiğinin yola temasının kesilebileceği durumlarda savrulmalara ve aracın kararlı bir frenleme yapamama durumlarına sebep olabileceği gibi günümüzde önemli bir müşteri talebi olan konfor konusunda önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Uzun seyahat süreleri göz önüne alındığında insan sağlığını olumsuz etkileyebilecek yol kökenli bu titreşimlerin kısa sürede güvenli bir biçimde sönümlenmesi gerekmektedir. Bu işlevi yerine getirecek olan donanımların sistematik olarak bir araya getirilmiş; tekerlek, aks ve gövdeyi sırasıyla birbirine bağlayan yapıya süspansiyon denilmektedir[5-10]

Süspansiyon sistemlerinin daha iyi bir sönümleme yapabilmeleri için çeşitli kontrol stratejileri kullanılmıştır. Literatürde yapılan incelemeler bu alanda PID kontrolör, Skyhook kontrol, Bulanık Mantık Kontrolü, H_{∞} Kontrol, Adaptif gibi kontrol sistemlerinin uygulandığını göstermiştir[1].

Dinamik taşıt hareketlerinin etkilerinin en iyi şekilde kontrol altına alınması; helezon yayların yolu doğru okumasının sağlanması, tekerleklerin yola tam temasının sağlanması, araç gövdesinin devrilmesinin önüne geçilebilmesi, doğru ve verimli bir şekilde frenleme yapılması, gövdenin ağırlık dağılımının sağlanabilmesi süspansiyonların başlıca görevleridir[5].

Mekanik ve kontrol düzeneğine göre süspansiyonlar, pasif, yarı aktif ve tam aktif süspansiyonlar olarak üçe ayrılırlar da amaçları aynıdır. Bu çalışmada tam aktif süspansiyon sistemleri modellenmiştir[2].

2. SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ (SUSPENSION SYSTEMS)

Yol titreşimlerini ve gürültülerini sürüş güvenliğinden ödün vermeden bastırmak için aks ile araç gövdesine yerleştirilmiş damper, helezon yay, bazı sistemlerde bir kuvvet üretici gibi mekanik parçalar bütünü olarak tanımlanırlar.

Dinamik taşıt hareketlerinin etkilerinin en iyi şekilde kontrol altına alınması; helezon yayların yolu doğru okumasının sağlanması, tekerleklerin yola tam temasının sağlanması, araç gövdesinin devrilmesinin önüne geçilebilmesi, doğru ve verimli bir şekilde frenleme yapılması, gövdenin ağırlık dağılımının sağlanabilmesi süspansiyonların başlıca görevleridir.

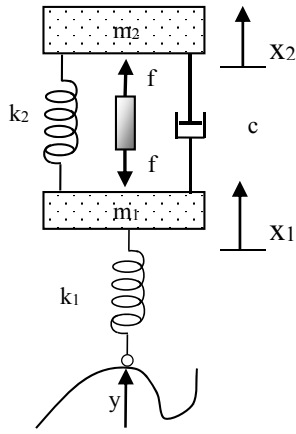
Mekanik ve kontrol düzeneğine göre süspansiyonlar, pasif, yarı aktif ve tam aktif süspansiyonlar olarak üçe ayrılırlar da amaçları aynıdır. Bu çalışmada tam aktif süspansiyon sistemleri modellenmiştir[6].

2.1. Tam Aktif Süspansiyon Sistemleri (Full-Active Suspension Systems)

Gelişen malzeme bilimi ve taşıtlarda harici bir kuvvet uygulayıcısının kullanılması, pasif ve yarı aktif süspansiyon sistemlerinden daha iyi sürüş ve konfor parametrelerine sahip tam aktif süspansiyon sistemlerinin kullanılmasını sağlamıştır[10].

Şekil 1. de görüleceği üzere $\frac{1}{4}$ araç modelinde pasif süspansiyonlardaki yay ve dampere ek olarak bir harici kuvvet üreticisini de içinde barındırmaktadır. Diğerlerine göre daha karmaşık yapılı olmaları ileri kontrol stratejilerini kullanmalarını gerektirir. Virajlarda içteki tekerleğin dıştakine oranla daha fazla yana yatmasını sağlayarak savrulmanın önlenmesi; yüksek süratte rüzgar direncini azaltabilecek şekilde aracın alçalabilmesi ve bozuk yollarda aracın yükseltilecek altının sürtünmesinin önüne geçilmesi gibi avantajlara sahiptir.

Bütün bu kontrol kuvveti hidrolik bir sıvı ya da otobüslerde yaygın bir şekilde kullanılan pnömatik hava basıncı kullanılmaktadır.



Şekil 1. Çeyrek araç modelinde tam aktif süspansiyon şeması (Fully active suspension scheme of quarter car model)

3. SİSTEMİN MODELLENMESİ (MODELING SYSTEM)

Bir çeyrek araç modeli, üzerine yüklenen dörtte birlik kütle, aks kütlesi, matematiksel modelleme için sertlik derecelerini sabit kabul ettiğimiz yaylar ve aktif ya da pasif sönümleyicilerden oluşmaktadır. Aktif süspansiyonlu sistemlerde şasi ile aks arasına yerleştirilmiş bir elektrohidrolik aktuatörün her iki yönde üreteceği kuvvet kontrol edilecek şekilde durum denklemleri yazılabilir. Bu bağlamda serbest cisim diyagramı olarak düşündüğümüz modele Newton'un ikinci kanunu uygulanarak diferansiyel hareket denklemleri elde edilebilir[8].

Çeyrek taşıt modeli üzerinden mimarisi verilen modelde k_1 lastiğin rijitliğini, k_2 yayın rijitlik katsayısını, c süspansiyon sönüm katsayısını, m_2 ¼ araç gövdesinin ağırlığını, m_1 ise aks ağırlığını temsil etmektedir. Bu çalışmada kullandığımız sistem parametreleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Çeyrek Araç Modelinin Parametreleri (Quarter-Car Model Parameters)

m_1	Aks Kütlesi	36 kg
m_2	¼ Gövde Kütlesi	240 kg
k_1	Tekerlek Sertlik Katsayısı	$1,6 \times 10^5$ N/m
k_2	Süspansiyon ve Aks Arası Yayın Sertlik Katsayısı	8000N/m

$$\sum F = m \cdot a \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_1(y - x_1) - k_2(x_1 - x_2) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - f \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f \quad (3)$$

Durum değişkenlerini aşağıdaki gibi seçecek olursak,

$$z_1 = x_1, \quad z_2 = \dot{x}_1, \quad z_3 = x_2, \quad \text{ve} \quad z_4 = \dot{x}_2$$

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (4)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_1} [k_1 y - (k_1 + k_2)z_1 - cz_2 + k_2 z_3 + cz_4 - f] \quad (5)$$

$$\dot{z}_3 = z_4 \quad (6)$$

$$\dot{z}_4 = \frac{1}{m_2} [k_2 z_1 + cz_2 - k_2 z_3 - cz_4 + f] \quad (7)$$

(4), (5), (6) ve (7) denklemlerine göre durum uzayı matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1 + k_2}{m_1} & -\frac{c}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{c}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c}{m_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \quad (10)$$

olur

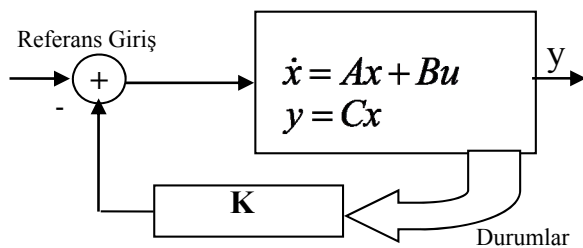
4. SİSTEMİN KONTROLÜ (CONTROL SYSTEM)

Aracın zemindeki pürüzlülüğten izole edilmesi için yumuşak süspansiyonlar tercih edilebilirler. Ancak yüksek hızlarda virajlarda savrulmanın önlenmesi ve hakim bir yol tutuş için sert süspansiyonlar gereklidir. Bu iki durumu en iyi şekilde kararlı kılacak süspansiyon sistemleri için duruma göre karar verebilen otomatik kontrol sistemleri gerekmektedir. Bunun için aşağıda değinilecek olan modern kontrol sistemleri kullanılmıştır.

Aracın zemindeki pürüzlülüğten izole edilmesi için yumuşak süspansiyonlar tercih edilebilirler. Ancak yüksek hızlarda virajlarda savrulmanın önlenmesi ve hakim bir yol tutuş için sert süspansiyonlar gereklidir. Bu iki durumu en iyi şekilde kararlı kılacak süspansiyon sistemleri için duruma göre karar verebilen otomatik kontrol sistemleri gerekmektedir. Bunun için aşağıda değinilecek olan modern kontrol sistemleri kullanılmıştır.

4.1. Durum Geri Besleme Kontrol (Status Feedback Control)

En genel haliyle Şekil 2. de gösterilen durum geribesleme kontrolü lineer zamanla değişmeyen bir sistem için sistemin tüm durumlarının ölçülebildiği hallerde sistemin öz değerleri istenilen kutup değerlerine uygun kazanç değerleri ile çarpılıp geri besleme yapılarak getirilebilir[9]. Bunun için sistemin durum kontrol edilebilir bir sistem olması şarttır. Bu şekilde kontrolü yapılan sistemin sistemin dinamik davranışına müdahale edilebilir; eğer sistem kararsızsa kararlı hale getirilebilir[11].



Şekil 2. Durum Geri Beslemeli Kontrol Şeması (Under state feedback Control Scheme)

Kazanç matrisi K 'nın elde edilmesi için literatürde kullanılan en yaygın yöntemler Bass-Gura ve Ackerman yöntemleridir[7]. Bu çalışma için önce sistemin açık-çevrim kutupları elde edilmiş ardından aşağıda verilen kapalı-çevrim kutupları için Optimal kontrolör tasarlanmıştır.

$$p = [-20 \ -20 \ -40+40i \ -40-40i];$$

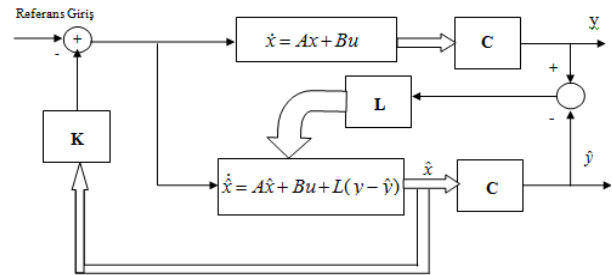
Bu seçilen kapalı-çevrim karakteristik denklem kökleri için K geribesleme kazanç matrisi aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$K = \begin{bmatrix} -427257,983578324 & 508,106475733075 \\ 1103304,38359681 & 51249,8885101637 \end{bmatrix};$$

4.2. Durum Gözleyiciler (Status Watchers)

Bir sistemin durum uzayı matrisleri (A,B) durum denetlenebilir olmak üzere geri besleme ile özdeğerler normal bir şekilde yerleştirilebilmektedir. Ancak durum geribesleme için sistemin durum değişkenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulamalarda sistemlerin durum değişkenleri her zaman ölçülemeyebileceğinden; giriş ile çıkış değişkenlerinin ölçümü dahilinde durum değişkenleri hesaplanabilir.

Şekil 3'te gösterilen durum gözleyici sistem için gerçek sistemin modeli bilinerek dijital bir ortama aktarılmış olması gerekmektedir. Böylelikle hesap edilmiş olan kontrol işareti ve ölçülebilen sistem cevabından diğer tüm durum değişkenleri hesap edilebilir.



Şekil 3. Durum Gözleyici Sistem (Status Observer System)

Gözleyici cevap hızı durum değişkenleri kestirilecek sistem cevap hızından 3 ile 10 kat daha hızlı olacak şekilde seçilmesi tavsiye edilir.

Gözleyici kazanç matrisi L'nin elde edilmesi için literatürde sıkça rastlanan Bass-Gura ve Ackerman yöntemleri oldukça kullanışlıdır[9]. Bu çalışmada amaçlanan araç gövdesi yer değişiminin gözlenebilmesi ve giriş baz alınarak uygun çıkışın doğru kestirilebileceğinin gösterilmesidir. Ayrıca uygun K geri besleme kazanç katsayıları doğrultusunda sistemin kontrol edilirliliği test edilmiştir.

4.3. Optimal Kazançlı Gözleyici Kontrol (Optimal Observer Gain Control)

LQR problemlerinde sistemin K geri besleme kazanç matrisi performans ölçütüne bağlı olarak bulunur. Durum geri besleme kontrolünde anlatılan lineer durum geri besleme kavramında bahsedilen K geri besleme kazanç matrislerinin önceden seçilen köklere rastgele yerleşimi

kontrolörün performansı açısından her zaman iyi sonuçlar vermeyebilir. Bu yüzden sistem giriş ve çıkışına bağlı J performans ölçütü minimize edilecek şekilde Q ve R matrisleri belirlenir[12].

Tipik karesel performans fonksiyon formu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_0^{T_k} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (11)$$

- Q matrisi $Q \geq 0$ ise kesin yarı artı matris
- R matrisi $R > 0$ ise kesin artı matris
- A, B (sistemin durum matrisleri) çifti denetlenebilir.

Ağırlıklandırma matrisleri olan R ve Q kontrol sistem tasarımcısı tarafından seçilir; fakat bu matrisler yukarıdaki durumları karşılamak zorundadır. Q matrisi diagonal elemanlarının sıfır veya pozitif olmalıdır. Bazı pozitif bileşenler ($|R| \neq 0$) kontrol tarafından seçilir; aksi takdirde çözüm sonsuz kontrol kazancı içine girebilir.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (12)$$

Olmak üzere

$$U = -Kx(t) \quad (13)$$

Denklem 11'de bahsedilen performans indeksini minimize edecek yöntem literatürde bahsi geçen Hamilton optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemle göre aşağıdaki Riccati denklemi çözülebilmeli ve bu denklemdeki kesin pozitif hermityen ya da reel simetrik matris olan P matrisi bulunmalıdır.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (14)$$

Denklem 14 doğrultusunda geri besleme kazanç matrisi K aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K = R^{-1}B^T P \quad (15)$$

Bu şekilde R ve Q değerleri aşağıdaki gibi belirlendikten sonra optimum geri besleme kazanç katsayıları matrisi hesaplanabilir.

$$R = [0, 1],$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

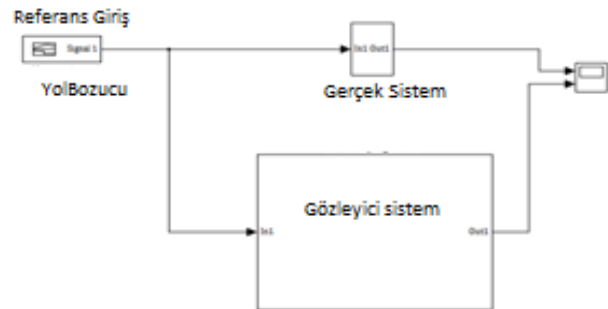
$$K = \begin{bmatrix} 1248,32782045862 & 131,506808767706 \\ 992031,999483018 & 22226,4791751419 \end{bmatrix}$$

Optimal olarak elde ettiğimiz kazanç katsayılarını Şekil 3' te gösterilen gözlemleyiciye yerleştirerek sistemin kontrol edilmesi amaçlanmıştır.

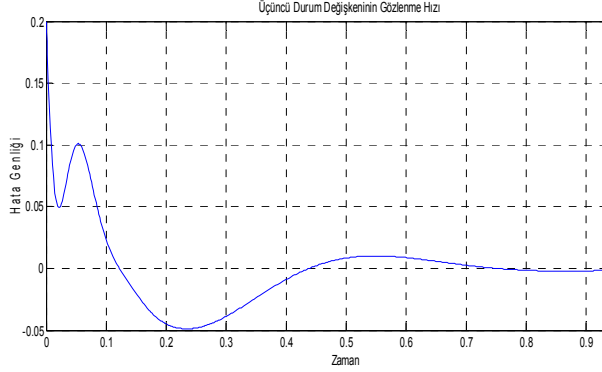
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Bir çeyrek taşıt modelinde aktif süspansiyon kullanılarak araç ¼ araç gövdesinin değişimi 3. Durum değişkeni olarak seçilmiş ve değişimi yol bozucu girişine karşı simüle edilmiştir.

Öncelikle Şekil 4' de gösterilen simülasyon diyagramında tasarlanan gözleyicinin performansını test etmek üzere gerçek sistemin durum değişkeniyle hesaplanan arasındaki farkın ne kadar kısa sürede sıfırlandığı araştırılmıştır. Bunun için Z1=0, Z2=0, Z3=0,2 ve Z4=0 başlangıç değerleri verilerek sıfır giriş için Z3 yani araç gövdesinin konumunun durumu Şekil 5'te incelenmiştir.



Şekil 4. Simülasyon Diyagramı (Diagram Simulation)

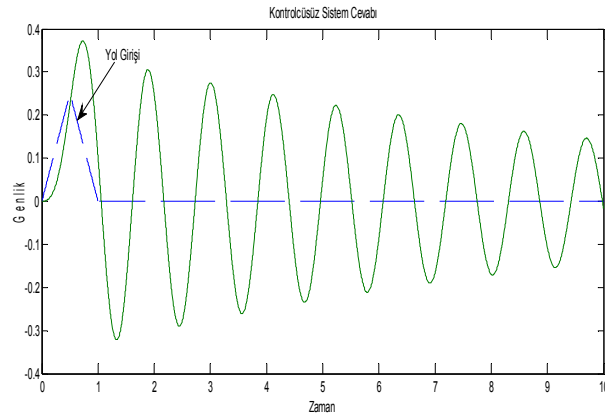


Şekil 5. Gözlemleyici Hata Grafiği (Observer error graph)

Yukarıdaki grafikte görülen hata dinamiği gözleyicinin iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Aşım ve yerleşme zamanı öngörülen sınırlar içindedir.

5.1. Kontrolcüsüz Sistem Davranışı (Uncontrolled System Behavior)

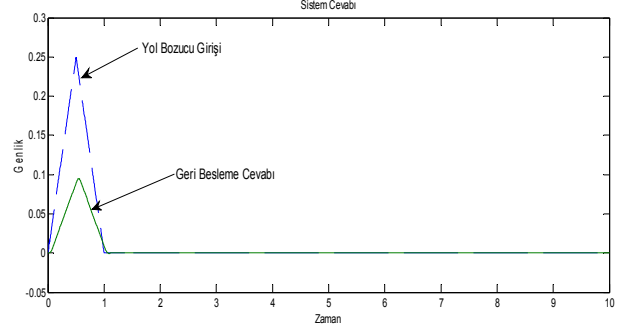
Simülasyon için sisteme sıfır referans giriş değeri ve yaklaşık 25 cm yüksekliğinde tümseğe benzer bir bozucu uygulanarak sistemin kontrolcüsüz cevabı Şekil 6' da incelenmiştir.



Şekil 6. Kontrolcüsüz Sistem Cevabı (Uncontrolled System Response)

5.2. Durum Geri Besleme Kontrollü Sistem (System with Status Feedback Control)

Yukarıda ele alınan durum geri besleme kontrolü için hesaplanan K değerleri ile 25cm yüksekliğinde bir tümsek yol bozucu girişi sisteme uygulanarak Şekil 7'de verilen sonuç grafiği elde edilmiştir.

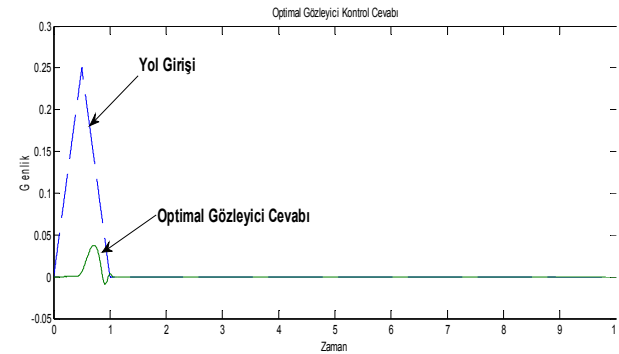


Şekil 7. Geri Besleme Kontrollü Sistem Cevabı (Feedback Control System Response)

Yukarıdaki grafikten görüleceği üzere bozucu girişe karşı sistem cevabı genliği azaltılarak hızlı bir şekilde denge noktasına gelmiştir.

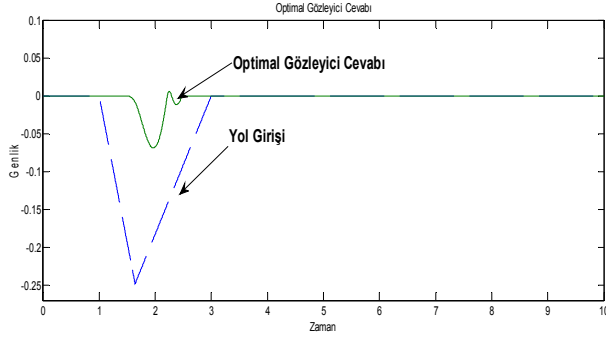
5.3. Gözleyici ile Optimal Kontrollü Sistem (Optimal Control System with Observer)

Tasarımı hakkında daha önce detaylı bilgi verilen optimal gözleyici kontrolörlü sistemin simülasyonu hesaplanan geri besleme kazanç değerlerine göre gerçekleştirilmiş ve Şekil 8 deki sonuç grafiğine ulaşılmıştır.



Şekil 8. Gözleyici İle Optimal Kontrol Cevabı (Optimal Control reply with Observer)

Yukarıdaki simülasyon sonucu tümsek şekilli yol bozucu girişine karşı aşımı oldukça az ve çabuk sönmüş bir kontrol cevabı elde edilmiştir. Aynı durum bir kez de 25cm derinliğindeki çukur şeklinde bir yol bozucu girişi için test edilerek Şekil 9'daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 9. Çukur Şekilli Yol Girişi İçin Optimal Kontrol Cevabı
(Optimal Control Response For Pit Shaped Road Access)

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Çeyrek araç gövdesiyle aks kütlesi arasına yerleştirildiği varsayılan bir aktif kuvvet üreticisine modern kontrol teknikleri uygulanarak bu kontrol kuvvetinin etkisine dair bir simülasyon çalışması yürütülmüştür. Simülasyon sonuçları incelendiğinde kontrolcüsüz sistemin oldukça fazla bir aşım yaptığı ve sönümleme zamanının olması gerektiğinden daha uzun sürdüğü görülmüştür.

Bu durum bir kontrolcü kullanımını zorunlu kılmıştır. Sistemin tüm durumları ölçülebilir kabul edilerek belirlenen öz-değerlere getirilecek şekilde durum geri besleme kontrolü yapılmış ve iyi bir sonuç elde edilmiştir. Ancak durum değişkenlerinin belirlenemeyeceği haller için gözleyici ile optimal kontrol yapılmış ve optimal kazanç katsayılarının belirlenmesiyle durum geri besleme cevabına göre aşım %80 daha azdır. Aynı şekilde referans değerine oturma süresi %60 daha düşüktür. Gözleyici ile optimal kontrolü yapılan aktif süspansiyonlu çeyrek taşıt modelinin sadece tümsekli yollarda değil aynı zamanda çukur şartlarında da araç gövdesi yer değişiminin referans değerden fazla uzaklaşmadığı belirlendi.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bilgiç, B., Yüksek Lisans Tezi, Taşıt Süspansiyon Sistemlerinin Mr Sönümleyici Kullanarak Kontrolü, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [2] Yağız, N., Yüksek, İ., Robust Control Of Active Suspensions Using Sliding Modes., Turk J. Engin Environ Sci – Tübitak., 25, Sayfa 79-87, 2001.
- [3] Janeway, R.N., Human Vibration Tolerance Criteria And Applications To Ride Evaluation., Sae Technical Papers, Warrendale, Pa, Usa, Pp:750166. 1975.
- [4] Griffin, M.J., Whole-Body Vibration. In: S. Braun, D. Ewins, S.S. Rao (Editors),

- Encyclopedia Of Vibration (2002). Academic Press, San Diego, Usa. Vol.3, P.1570-1578, 2001
- [5] Ekrem, D., Doktora Tezi, Taşıtlar İçin Aktif Süspansiyonların İyileştirilmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
- [6] Okan, A., Yüksek Lisans Tezi, Mr Damperli Süspansiyon Sisteminin Skyhook Kontrolü, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009
- [7] Dorf, R., Bishop, R., Modern Control Systems, Tenth Edition, Prentice Hall, Pp: 881, New Jersey, Usa, 2005
- [8] Palm, W., J., System Dynamics Second Edition, Mcgraw-Hill, Newyork, Usa, Pp: 807, 2010
- [9] Özdemir, A., Otomatik Kontrol Sistemleri Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, 2011
- [10] Eski, İ., Doktora Tezi, Yapay Sinir Ağı Denetim Organi Kullanarak, Taşıtlarda Aktif Süspansiyon Sistemi Kontrolü, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
- [11] Ogata, K., Modern Control Engineering, Fourth Edition, Prentice Hall, Pp: 964, New Jersey, Usa, 2002.
- [12] Yazıcı, İ., Özdemir, A., Optimal Kazanç Tablolamalı Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı, Saü Fen Bilimleri Inst. Dergisi, Vol:12 Pp:38-44, 2008

