

SÜRÜCÜ VE SÜRÜCÜ KOLTUĞU İLE BİRLİKTE MODELLENMİŞ BİR ÇEYREK TAŞIT MODELİ İÇİN H_{∞} KONTROLÇÜ TASARIMI

Mustafa Çay

Altınay Robot Teknolojileri San. ve Tic. A. Ş.,
İstanbul

mucay67@hotmail.com

ÖZ

Bu çalışmada, sürücü ve sürücü koltuğu ile beraber modellenmiş çeyrek taşıt modeli için optimum bir durum geri beslemeli H_{∞} kontrolcü tasarımı araştırılmıştır. Kontrolör olarak H_{∞} seçilmesinin nedeni, modern bir kontrol yöntemi olmasıdır. Öncelikle, sürücü koltuğu ve temel insan uzuvlarının modellediği bir dinamik çeyrek taşıt modeli geliştirilmiştir. Modelin hareket diferansiyel denklemleri türetilmiş ve durum uzayı formatında gösterilmiştir. Doğrusal matris eşitsizliği (DME) tabanlı durum geri beslemeli H_{∞} kontrolcü sentezi ve buna bağlı olarak kontrolörün tasarımı yapılmıştır. Yol durumunun benzetimi için sisteme, bozucu yol girişi olarak bant-sınırlı beyaz gürültü uygulanmıştır. Ayrıca sistemin birim basamak cevabı incelenmiştir. Önerilen H_{∞} kontrolörün pasif durum ile karşılaştırılması neticesinde, bozucu girişi olan tümsek, çukur vb. yol şartlarının, sürücü gövdesi üzerindeki etkilerinin azaltılmasında başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: H_{∞} kontrolcü, yalmip, sedumi, çeyrek taşıt

H_{∞} CONTROLLER DESIGN FOR A QUARTER VEHICLE MODEL THAT MODELLED WITH DRIVER AND DRIVER SEAT

ABSTRACT

In this study, an optimal state feedback H_{∞} controller design researched for a quarter vehicle that is modelled with driver and driver seat. According to modern control methods, H_{∞} selected as a controller. Firstly, a dynamic quarter vehicle model which is modelled with driver seat and basic human limbs developed. Motion differential equations was derived and showed in the form of state-space. Linear matrix inequality (LMI) based state feedback H_{∞} controller synthesis was derived and according to this synthesis, designed a controller. For road roughness simulation, band-limited white noise vibration was applied to the system. Also, the response of unit step input was investigated. When we compare the passive and controlled vehicle, it is observed that the recommended H_{∞} controller gives successful results for reducing the vibration effects from road conditions like pothole, bump shocks etc. on driver body.

Keywords: H_{∞} controller, yalmip, sedumi, quarter vehicle

Geliş tarihi : 17.01.2016

Kabul tarihi : 13.04.2016

1. GİRİŞ

Taşıtlarda sürüş konforunun, yoldan gelen bozucu etkiler nedeniyle değişkenlik göstermesi kaçınılmaz bir sonuçtur. Gerek günümüzdeki rekabet ortamı, gerekse de bu etkilerin sürücü sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle taşıt süspansiyon sistemlerinin iyileştirilmesi her zaman güncelliğini koruyan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Taşıtlarda aktif titreşim kontrolü için PID, LQR, LQG, H_∞ , H_2 , bulanık mantık (fuzzy logic), μ -sentez vb. kontrolörler kullanılabilirler.

H_∞ kontrolcü, 1981 yılından sonra ilerleme kaydeden bir alan olmuştur. Literatürde, sisteme gelen bozucuların sistem cevabı üzerindeki etkisini azaltmanın optimal bir yolu olarak, bozuculardan kontrol edilme istenen çıkışlara transfer fonksiyonları matrisinin, H_∞ normunu minimum yapma işlemi "standart H_∞ optimal kontrol problemi" olarak tanımlanmaktadır. H_∞ normunu minimum yapan kontrolör algoritmalarının çözümünün yapılabilmesi için yeni sayısal yöntemler ve paket yazılımların geliştirilmesi zorunlu olmuştur [1]. Bu çalışmada da modern bir kontrol yöntemi olması sebebiyle H_∞ kontrolcü üzerine araştırma yapılmıştır.

Onat ve arkadaşları [2], bir çeyrek taşıt modeli geliştirip, bozucu etkilere karşı ayrı ayrı LQR ve H_∞ kontrolcü tasarlamışlardır. Her iki kontrolöründe pasif duruma göre daha üstün olduğunu göstermişlerdir. Ancak taşıta öngörülenden daha fazla yolcu binmesi durumu gibi ağırlıkta artışa neden olabilecek durumlarda, LQR kontrolcünün performansının düştüğünü; ancak H_∞ kontrolcü performansının neredeyse aynı kaldığını ve bu nedenle bu problem için en uygun kontrolörün H_∞ kontrolcü olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada, sadece taşıt ve tekerlek gövdesi modellenmiş olup, bozucu yol girişinin sürücü üzerindeki etkileri incelenmemiştir.

Özdemir ve Maden [3], bir çeyrek taşıt modeli geliştirip, bozucu etkilere karşı durum geri beslemeli ve sistemin tüm durumlarının ölçülebildiği kabulü ile gözleyicili bir LQR kontrolör tasarlamışlardır. Kontrolcüsüz sistemin oldukça fazla aşım yapması ve sönümleme zamanının uzun olması sebebiyle, kontrolcü tasarımı araştırılmış olup, kontrolcülü durumun kontrolcüsüz duruma göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Bu çalışmada, bozucu yol girişinin sürücü üzerindeki etkileri incelenmemiştir.

Zhao ve arkadaşları [4], bozucu etkileri altında bir sistem için insan vücuduna etki eden titreşimlerin etkilerinin azaltılabilmesi amacıyla, robust kontrollü, saturasyon ve eyleyicili bir durum geri beslemeli kontrolör tasarımı yapmışlardır.

Azeloğlu ve Sağır [5], krenlerde deprem kaynaklı yapısal titreşimlerin azaltılması için H_2 ve H_∞ kontrolörlerin beraber kullanıldığı bir aktif titreşim kontrolü yapmışlardır. Etkisi önceden bilinmeyen deprem olayında H_∞ kontrolörün ilk etkiyi

sönümleme açısından oldukça başarılı olduğunu göstermişlerdir. Ancak, kontrolcü kuvvetlerinin uygulanabilir olmasına rağmen, yüksek olduğunu ve bunun düşürülmesi için çalışma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada incelenen konteyner vincinin, yukarıdan kabin içersinden operatör kontrollü olarak çalışması yüksek ihtimalli olup, oluşturulan model, bu kabin ve içersindeki operatöre bozucu etkilerini içerecek şekilde değildir.

Du ve arkadaşları [6], sürücü ve sürücü koltuğunun tam olarak modellendiği bir çeyrek taşıt modeli geliştirmişlerdir. Bozucu yol girişi olarak, gerçeğe yakın bir yaklaşımla, ISO2631' de verilen yol pürüzlülüğünü kullanmışlardır. Buna karşılık, durum geri beslemeli saturasyonlu bir H_∞ kontrolcü ve çıkış geri beslemeli bir statik H_∞ kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu koşullar altında tasarlanmış çıkış geri beslemeli H_∞ kontrolcünün işlevini çok iyi bir şekilde yerine getirdiğini göstermişlerdir.

Çakan [7], karayolu taşıtlarında sürüş konforu ve güvenliğinin artırılabilmesi için yoldan gelen bozucuların neden olduğu titreşimlerin aktif kontrolü için doğrusal eyleyicili bir yöntem sunmuştur. Bunun için bir çeyrek taşıt modeli oluşturmuş ve kontrolör olarak PID ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık Kontrol (YSABM) seçilmiştir. Yoldan gelen farklı fonksiyonlarda bozucuların etkisi altında, bu kontrolcülerin karşılaştırmasını yapmıştır. MATLAB ve ADAMS yazılımları kullanılarak yapılan analizler neticesinde, genel olarak Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık kontrolcünün, PID kontrolcüye göre daha üstün olduğunu göstermiştir. Çalışma, yoldan gelen titreşimlerin sürücü üzerindeki etkilerini incelememektedir.

Gündüz [8], bir çeyrek taşıt modeli geliştirip, aktif süspansiyon sistemine ait üç farklı parametre kümesine sahip durum geri beslemeli LQR kontrolcü tasarlamış ve performans çıktılarını pasif durum çıktıları ile karşılaştırmıştır. Benzer analizleri basit Sky-Hook yöntemini kullanarak da yapmıştır. Çalışmada incelenen farklı değerlerde üç performans kriterinin hepsinin geniş bant frekans aralığında iyileştirilmesinin mümkün olmadığını görmüştür. Geniş bant frekans aralığında en fazla iki parametrenin iyileştirilebildiğini; ancak, dar bant frekans aralıklarında üç performans çıktısının da iyileştirilebildiği sonucuna ulaşmıştır. Sonuç olarak, lineer bir kontrolcü yerine, farklı bant aralıklarında farklı davranabilen non-lineer kontrolcü tasarımı yapılmasıyla çok daha yüksek performanslı sistemler oluşturulabileceğini belirtmiştir.

Arslan ve Uygurlu [9], iki serbestlik dereceli bir çeyrek taşıt modeli geliştirip, kontrolör ile yoldan gelen bozucuları bastırma hedeflemişlerdir. H_∞ ve μ -sentez kontrolör tasarlayarak pasif durum ile beraber, frekans ve zaman alanı cevaplarını karşılaştırmışlardır. μ -sentez tabanlı sistemin performansının, H_∞ kontrolörlü veya pasif sistemlere göre daha iyi olduğu so-

nucuna varmışlardır. Yoldan gelen bozucuların, sürücü üzerinde etkileri incelenmemiştir.

Karadeniz ve arkadaşları [10], otonom bir helikopterin bozucu etkiler altında, askıda kalma halini koruyabilmesi için doyumlu eyleyiciye sahip durum geri beslemeli H_∞ kontrolör tasarlamışlardır. Tasarlanan kontrolörün, en kötü durum senaryolarında, bozucu bastırma performansının yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Onat ve arkadaşları [11], bir çeyrek taşıt modeli için süspansiyon parametrelerine bağlı olarak H_∞ kontrol temeline dayalı lineer kazançlı bir kontrolcü tasarlamışlardır. Süspansiyon sapsması ve taşıt gövdesinin hızını geri beslemişlerdir. Ayrıca, hem frekans hem de zaman alanında bir non-lineer kontrolcünün tasarlanmasıyla birden fazla performans kriterinin aynı anda iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Frekans cevaplarını incelediklerinde, süspansiyon sapsması yerine ivme odaklı kontrolcünün yol tutuş performansı açısından daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çok kötü yol şartlarında ise süspansiyon sapsmasını minimize ederek sürücü konfor kayıplarının engellenebileceğini gözlemlemişlerdir.

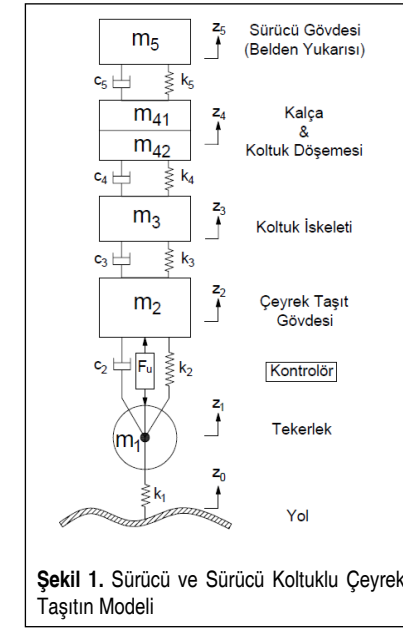
Literatürde birçok çeyrek taşıt modeli incelemesi olmasına rağmen, bu çalışmada genellikle taşıt gövdesi incelenmiş olup, bozucu yol etkisinin sürücü üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar daha azdır. Bu durum, yazarı bu konuda inceleme yapmaya motive etmiştir.

Bu çalışmada, ticari amaçlı bir taşıt (örneğin bir kamyonet) çeyrek modeli, sisteme sürücü ve sürücü koltuğu ilave edilmesi ile biraz daha geliştirilmiş ve yolun bozucu etkilerinin bastırılması için uygun bir durum geri beslemeli H_∞ kontrolör tasarlanmıştır. Sistemin frekans alanı, zaman alanı ve birim basamak cevapları incelenmiştir. Tasarlanan kontrolcünün, amacına uygun olarak, yoldan gelen bozucuların sürücü üzerindeki etkilerini azalttığı ve pasif duruma göre çok daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

2. MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada, Şekil 1'de görüldüğü üzere, sürücü koltuğu ve sürücüyü de içeren beş serbestlik dereceli bir çeyrek taşıtın titreşim modeli geliştirilmiştir.

Şekil 1'de, model üzerinde görülen m_1 , m_2 , m_3 , m_4 ve m_5 kütleleri sırasıyla, tekerlek, çeyrek taşıt gövdesi, koltuk iskeleti, kalça ve koltuk döşemesi ve sürücü gövdesini (belden yukarı) belirtmektedir. Burada m_4 kütle, kalça ve koltuk döşemesi kütlelerinin toplamına eşittir. Yani $m_4 = m_{41} + m_{42}$ 'dir. k ve c sabitlerinin her biri sırasıyla görülen kısma ait yay sabitleri ve sönüm katsayılarıdır. Tekerleğin sönüm etkisi ihmal edilmiştir. Tüm kütlelere ait yerdeğiştirmeler sırasıyla z_i indisi



Şekil 1. Sürücü ve Sürücü Koltuklu Çeyrek Taşıtın Modeli

ile gösterilmiştir. F_u , kontrolcü kuvvetini göstermektedir. Özel olarak z_0 parametresi, bozucu yol girişini temsil etmektedir. Problemin çözümünün kolaylaştırılması açısından modelde, titreşimin yatay etkileri ihmal edilmiş ve tekerleğe yalnızca dik doğrultuda titreşimler etki ettiği kabul edilmiştir.

Sistemin hareketinin diferansiyel denklemleri Lagrange Yöntemi kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_1 z_1 - k_2 (z_2 - z_1) - c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = k_1 z_0 - F_u \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + k_2 (z_2 - z_1) - k_3 (z_3 - z_2) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) = F_u \quad (3)$$

$$m_3 \ddot{z}_3 + k_3 (z_3 - z_2) - k_4 (z_4 - z_3) + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - c_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) = 0 \quad (4)$$

$$m_4 \ddot{z}_4 + k_4 (z_4 - z_3) - k_5 (z_5 - z_4) + c_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) - c_5 (\dot{z}_5 - \dot{z}_4) = 0 \quad (5)$$

$$m_5 \ddot{z}_5 + k_5 (z_5 - z_4) + c_5 (\dot{z}_5 - \dot{z}_4) = 0 \quad (6)$$

Ek'te hareket denklemlerinin türetildiği, sistemin toplam kinetik, toplam potansiyel ve toplam sönüm enerjisi denklemleri mevcuttur. Sistemi durum-uzay formatında gösterebilmek için durum değişkenleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$X_1 = z_1$$

$$X_2 = z_2$$

$$X_3 = z_3$$

$$X_4 = z_4$$

$$X_5 = z_5$$

$$X_6 = \dot{z}_1 = \dot{X}_1$$

$$X_7 = \dot{z}_2 = \dot{X}_2$$

$$X_8 = \dot{z}_3 = \dot{X}_3$$

$$X_9 = \dot{z}_4 = \dot{X}_4$$

$$X_{10} = \dot{z}_5 = \dot{X}_5$$

Tablo 1. Sistem Parametrelerinin Sayısal Değerleri

Kütle Parametreleri	Sönüm Parametreleri	Rijitlik Parametreleri
$m_1=55$ kg	-	$k_1=160000$ N/m
$m_2=625$ kg	$c_2=2350$ Ns/m	$k_2=16000$ N/m
$m_3=15$ kg	$c_3=830$ Ns/m	$k_3=31000$ N/m
$m_4=8.8$ kg	$c_4=200$ Ns/m	$k_4=18000$ N/m
$m_5=43.4$ kg	$c_5=1485$ Ns/m	$k_5=44130$ N/m

problem kısıtlarımız, (26) DME'si ve $X>0$ şartı olacaktır. Kodun çözdürülmesi ile kapalı çevrim kontrol kazancı ve γ aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

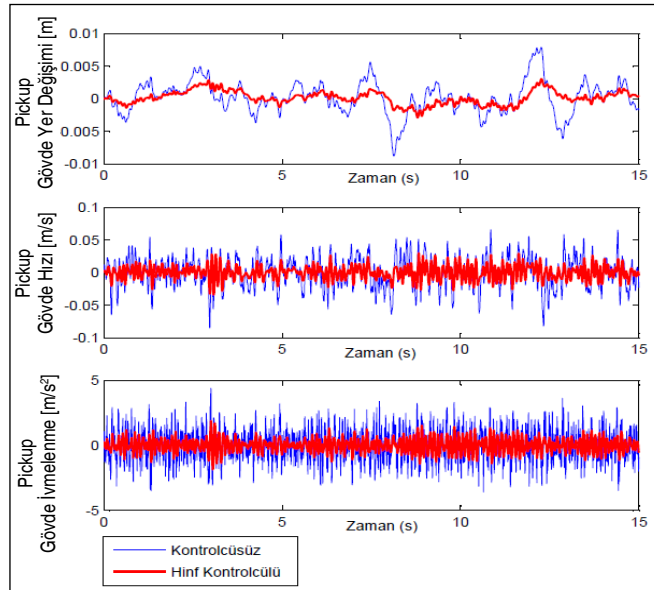
$$\gamma = 11.6808$$

$$K = 1 \times 10^4 \begin{bmatrix} 0.1473 & -2.8769 & 0.2943 & -0.5718 & 3.0339 \\ -0.2064 & -0.4847 & -0.1859 & -0.1713 & -0.0185 \end{bmatrix}_{1 \times 10}$$

Şekil 2'de, kamyonet gövdesine ait yer değiştirme, hız ve ivme cevaplarının zaman alanında grafikleri H_{∞} kontrolcülü ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir.

Şekil 2'de, kontrolcünün, araç gövdesi yer değişimi, hızı ve ivmelenmesi üzerindeki bastırıcı etkisi görülebilmektedir. Özellikle gövde yer değişimi ve ivmelenme açısından kontrolcü, bozucuları etkin şekilde bastırabilmektedir.

Araç süspansiyon sistemlerinin tasarımında güvenlik kadar sürüş konforu da çok önemli bir parametredir. Şekil 3'te, sürücü gövdesi yer değiştirme, hız ve ivme cevaplarının zaman alanında grafikleri H_{∞} kontrolcülü ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir. Taşıt tasarımında, süspansiyon sisteminin sü-



Şekil 2. Pickup Gövdesi Yer Değiştirme, Hız ve İvmenin Zaman Alanı Cevabı

rücü konforunu da üst seviyelere taşıması, bu çalışmada incelediğimiz optimizasyon probleminde istenen önemli çıktılardan biridir.

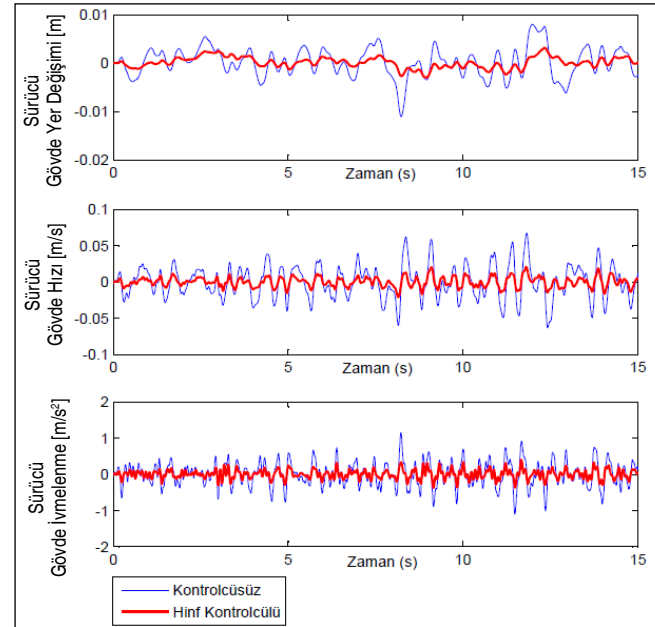
Şekil 3'te görüldüğü gibi, bu problem için tasarladığımız H_{∞} kontrolör, sürücü üzerine etkiyen titreşimleri bastırmakta oldukça etkilidir. Bozucunun, yer değiştirme, hız ve ivme üzerinde neden olduğu tepe noktaların bastırılmasında kontrolcünün verimli çalıştığı görülmektedir.

Şekil 4'te, kontrol kuvvetinin zaman alanı cevabı görülmektedir.

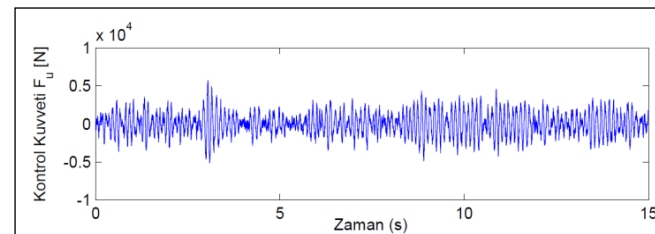
Şekil 4'te görülen kontrol kuvvetlerinin, ele aldığımız problemde incelediğimiz kamyonet cinsi bir taşıtın bozucu titreşimlerinin bastırılabilmesi için uygun büyüklükte kuvvetler olduğunu söylemek mümkündür.

Şekil 5'te ise sürücü gövdesi yer değişimi ve ivmelenmesine ait frekans cevapları gösterilmiştir.

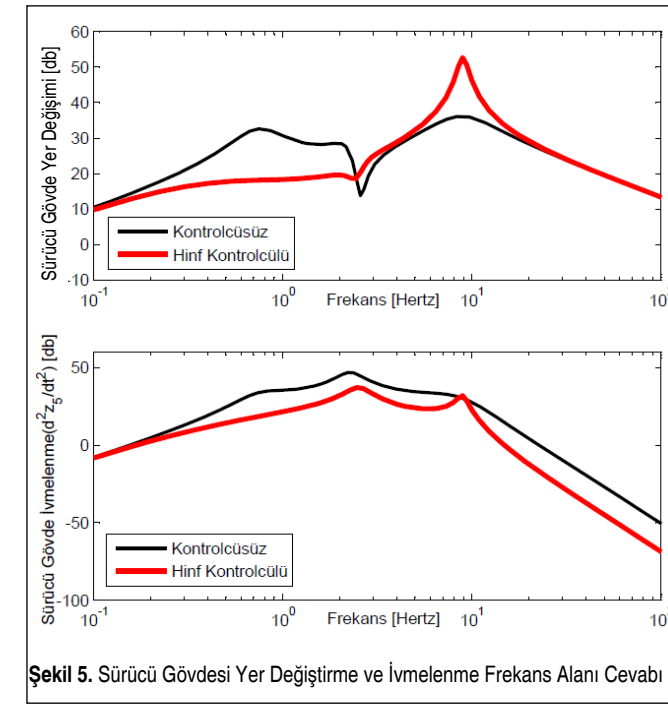
" H_{∞} kontrolör tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir. Kapalı-çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti



Şekil 3. Sürücü Gövdesi Yer Değiştirme, Hız ve İvmenin Zaman Alanı Cevabı

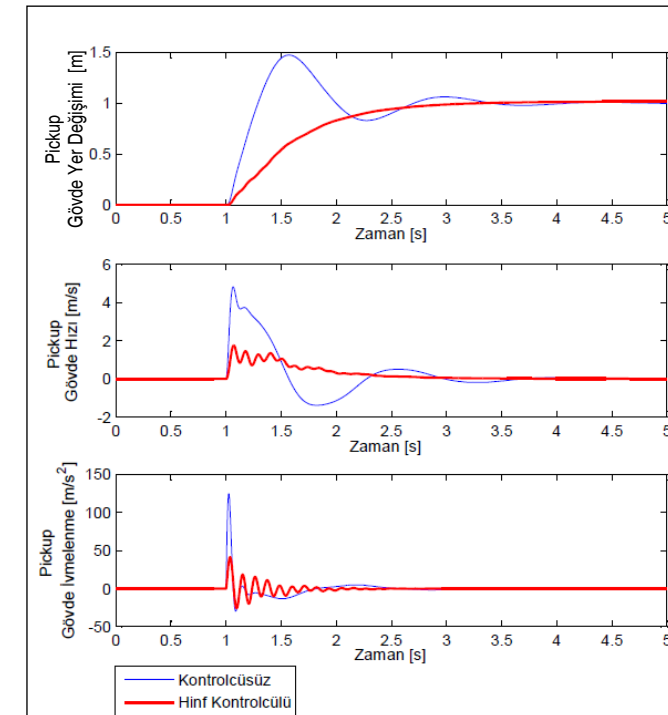


Şekil 4. Kontrol Kuvvetinin Zaman Alanı Cevabı

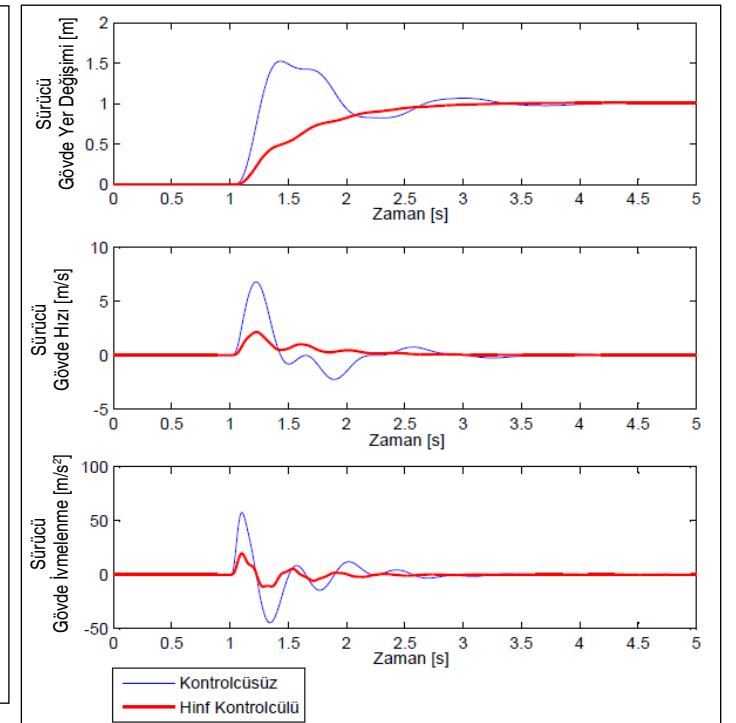


Şekil 5. Sürücü Gövdesi Yer Değiştirme ve İvmelenme Frekans Alanı Cevabı

edemez" [5]. Şekil 5'ten görüldüğü üzere, tasarlanan H_{∞} kontrolcünün, hem yerdeğiştirme hem de ivmelenme üzerinde ilk bozucu etkisinin bastırılmasında başarılı olduğu görülmektedir. Genel itibarıyla mod I ve rezonans tepelerinin başarılı şekilde bastırıldığını söyleyebiliriz. Ancak, geniş bir aralıkta tüm frekans yanıtına baktığımızda, geçici rejim cevapların-



Şekil 6. Pickup Gövdesi Yer Değiştirme, Hız ve İvmenin Zaman Alanında Birim Basamak Girişe Cevabı



Şekil 7. Sürücü Gövdesi Yer Değiştirme, Hız ve İvmenin Zaman Alanında Birim Basamak Girişe Cevabı

da daha başarılı olan H_2 kontrolör ile birlikte kullanılmak üzere karma bir H_2/H_{∞} kontrolcü tasarımı bu problem için daha iyi sonuçlar verebilir. Karma kontrolcü, burada elde ettiğimiz sonuçların biraz daha iyileşmesini sağlayabilir.

Son olarak, tasarımı yapılan durum geri beslemeli H_{∞} kontrolörün bozucular üzerindeki etkinliğini ve verimliliğini farklı bir açıdan görebilmek amacıyla, Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla, araç ve sürücü gövdesi için sistemin zaman alanında birim basamak girişe cevabı gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kamyonet cinsi bir ticari aracın, sürücü ve sürücü koltuğu ile beraber bazı biyodinamik parametrelerin de referans alınmasıyla çeyrek taşıt modeli oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan modelde, yoldan gelen bozucuların sürücü üzerindeki etkilerini bastırabilmek için modern kontrol teknikleri kullanılarak bir durum geri beslemeli H_{∞} kontrolcü tasarlanmıştır. Ölçülebilirlik, geri besleme ve maliyet açısından daha uygun olması sebebiyle, çıkış geri beslemeli kontrolcü yerine durum geri beslemeli kontrolcü tercih edilmiştir. Bozucu yol girişi olarak sisteme bant-sınırlı beyaz gürültü uygulanmıştır.

Tasarlanan durum geri beslemeli H_{∞} kontrolörün zaman alanında oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Araç gövdesinin yer değiştirmesinin ve hızının bozucu etkilere kar-

şı başarılı şekilde kontrolü sağlanmıştır. Sürücü gövdesinde yer değiştirme, hız ve ivmelenmeye bakıldığında, tüm bozucu etkilerinin etkin bir şekilde bastırıldığı görülmüştür. Frekans alanı cevaplarına bakıldığında, kontrolcünün rezonans tepelerinin bastırılmasında da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Geniş bir bant aralığında frekans alanı cevapları incelendiğinde, kontrolcünün sürücü ivmelenmesinin bastırılabilmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ancak, sürücü gövde yer değiştirmesinin kontrolünde belirli frekans aralığında başarılı olurken daha geniş bant aralığında kontrolcünün performansı azalmaktadır. Böyle bir sonucun ortaya çıkması, H_∞ kontrolörün iyi bir geçici rejim cevabını garanti etmemesine bağlanmıştır. İncelenen bozucu yol girişi koşullarında, ihtiyaç duyulan kontrol kuvvetlerinin uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İhtiyaç duyulan maksimum kontrol kuvveti F_u , ± 5000 N mertebelerindedir. Birim basamak giriş cevaplarına bakıldığında ise kontrolcünün kısa sürede bozucu etkilerini bastırdığı ve sistemin kararlı hal koşullarını sağlayarak stabil hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla bir karşılaştırma yapabilmek için bundan sonraki çalışmalarda, aynı problemin çıkış geri beslemeli bir H_∞ kontrolcü veya H_2/H_∞ karma kontrolcü tasarlanarak incelenmesi önerilmektedir. Böylece, belirli frekans aralıklarında durum geri beslemeli H_∞ kontrolcünün düşen performansının, diğer kontrolcüler kullanıldığında nasıl bir hal alacağı daha iyi anlaşılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük payı olan, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren saygıdeğer Hocam, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol A.B.D. öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI'ya ve katkılarından dolayı makina mühendisi Ercan TOKTAY'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

1. **Akın, M.** 2003. " H_∞ Model Eşleme Probleminin Lineer Matris Eşitsizlikleri Yaklaşımı ile Çözümü," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
2. **Onat, C., Sivrioğlu, S., Yüksek, İ.** 2005. "Bir Çeyrek Taşıt Modeli İçin H_∞ Kontrolcü Tasarımı," Mühendis ve Makina, cilt 46, sayı 545, s. 40-46.
3. **Özdemir, A., Maden, D.** 2013. "Aktif Süspansiyon Sistemli Çeyrek Araç Modelinin Gözlemleyiciyle Optimal Kontrolü," SAÜ. Fen Bil. Der., cilt 17, sayı 2, s. 181-187.
4. **Zhao, Y., Sun, W., Gao, H.** 2010. "Robust Control Synthesis for Seat Suspension Systems with Actuator Saturation and Time-Varying Input Delay," Journal of Sound and Vibration, vol. 329, p. 4335-4353.

5. **Azeloğlu, C. O., Sağırılı, A.** 2012. "DME Tabanlı Durum Geri-Beslemeli Karma H_2/H_∞ Kontrolörle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Kontrolü," Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma, cilt 30, s. 281-291.
6. **Du, H., Li, W., Zhang, N.** 2012. "Integrated Seat and Suspension Control for a Quarter Car with Driver Model," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 9, November 2012, p. 3893-3908.
7. **Çakan, A.** 2013. "Karayolu Taşıtları Süspansiyon Sisteminde Aktif Titreşim Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
8. **Gündüz, S.** 2010. "Taşıtlarda Aktif Süspansiyon Sistemi Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
9. **Arslan, Ş., Uygurlu, S.** 2013. "Bir Aktif Süspansiyon Sisteminin μ -Sentez Tabanlı Dayanıklı Kontrolü," Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 26-28 Eylül 2013, Malatya.
10. **Karadeniz, O., Yazıcı, H., Küçükdemiral, İ. B.** 2013. "Doymumlu Eyleyiciye Sahip Durum Geri-Beslemeli H_∞ Kontrolör İle Otonom Bir Helikopterin Askıda Kalma Kontrolü," Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 26-28 Eylül 2013, Malatya.
11. **Onat, C., Yüksek, İ., Sivrioğlu, S.** 2006. "Bir Aktif Süspansiyon Sistemi İçin H_∞ Kontrol Temeline Dayalı Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı," Mühendis ve Makina, cilt 47, sayı 552, s. 36-43.
12. **Peet, M. M.** "Introduction to Optimal Control via LMIs," http://control.asu.edu/Classes/MiniCourse/L01_MINI.pdf, son erişim tarihi: 17.1.2016.
13. **Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V.** 1994. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, ISBN: 0-89871-334-X, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

EK

Modele ait Lagrange Denklemi'nden türetilmiş toplam kinetik, toplam potansiyel ve toplam sönüm enerjileri:

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{z}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \dot{z}_4^2 + \frac{1}{2} m_5 \dot{z}_5^2$$

$$E_p = \frac{1}{2} k_1 (z_1 - z_0)^2 + \frac{1}{2} k_2 (z_2 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (z_3 - z_2)^2 + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{2} k_4 (z_4 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_5 (z_5 - z_4)^2$$

$$E_d = \frac{1}{2} c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)^2 + \frac{1}{2} c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2)^2 + \frac{1}{2} c_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_3)^2 + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{2} c_5 (\dot{z}_5 - \dot{z}_4)^2$$