HAVA KÖRÜKLÜ PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ VE MEKANİK ASKI SİSTEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Hakan BAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2006
ANKARA

Hakan BAL tarafından hazırlanan HAVA KÖRÜKLÜ PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ VE MEKANİK ASKI SİSTEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Y. Doç. Dr. Metin Uymaz SALAMCI
Tez Yöneticisi

Prof. Dr. Yücel ERCAN
Tez Yöneticisi

14.04.2006

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Yaşar Turhan HONDUR

Üye : Prof. Dr. Tuna BALKAN

Üye : Prof. Dr. Kemal ÖZGÖREN

Üye : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

Üye : Y. Doç. Dr. Metin Uymaz SALAMCI (Danışman)

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

HAVA KÖRÜKLÜ PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ VE MEKANİK ASKI SİSTEMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan BAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2006

ÖZET

Bu çalışmada, iki serbestlik dereceli sabit sönüm katsayılı ve hava körüklü, pasif ve yarı aktif askı sistemine sahip iki farklı ¼ taşıt modeli ele alınmıştır. Pasif ve yarı-aktif sistemler için uygun durum değişkenleri tanımlanarak durum denklemleri elde edilmiştir. Pasif sistemde yalnız hava körüğü için, yarı-aktif sistemde ise hava körüğüne eklenmiş sabit hacimlerin bulunduğu durum için iki ayrı matematiksel modelleme yapılarak yay karakteristiklerini tanımlayan matematiksel ifadeler elde edilmiştir. Sisteme kapalı çevrim optimum kontrol uygulamak için, asılı kütlenin ivmesi ile askı sistemindeki esnemelerin karelerinin ortalamalarını ağırlıklı olarak içeren bir performans kriteri tanımlanmış ve Pontryagin prensibi uygulanarak kapalı çevrim optimum kontrol elde edilmiştir. Pasif ve kapalı çevrim kontrol uygulanan yarı-aktif sistemlerin basamak girişe, sinüzoidal girişe ve daha önce ölçülmüş yol girişlerine karşı dinamik davranışı MATLAB'da yazılan simülasyon programları yardımıyla incelenmiştir. Daha sonra hava körüklü pasif ve optimum yarı-aktif askı sistemlerinin performansları ile mekanik pasif ve yarı-aktif sistemin performansları karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar; i- hava körüklü yarı-aktif askı sisteminin performansında aynı hava hacmine sahip pasif sistemin performansına göre çok sınırlı bir

iyileşme olduğunu; ii- hava körüklü pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde esnemelerin mekanik yayın kullanıldığı mekanik pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin esnemelerinden daha büyük olsa da kabul edilebilir seviyelerde kaldığını, iii- hava körüklü askı sistemlerinde ivmelerin mekanik askı sistemlerininkinden çok daha düşük değerlerde olduğunu göstermiştir.

Bilim Kodu : 914.1.091
Anahtar Kelimeler : Yarı-aktif askı sistemleri, değişken yay sabitli askı sistemleri, bilineer sistemler, optimum kontrol
Sayfa Adedi : 109
Tez Yöneticileri : Y. Doç. Dr. Metin Uymaz SALAMCI, Prof. Dr. Yücel ERCAN

THEORETICAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCES OF THE PASSIVE AND SEMI-ACTIVE SUSPENSION SYSTEMS WITH AIR SPRINGS AND COMPARISION WITH MECHANICAL SUSPENSIONS

(M.Sc. Thesis)

Hakan BAL

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
April 2006

ABSTRACT

In this study, two different quarter vehicle models, one with a passive and the other with a semi-active suspension system, both with air springs were considered. A suitable set of state variables was defined and state equations were obtained for each system. Mathematical expressions describing the spring characteristics of the air spring with and without auxiliary chambers were obtained. An integral performance index involving a weighted combination of mean square sprung mass acceleration and mean square suspension deflections was defined, and closed loop optimum control was obtained by using Pontryagin principle. Performances of the passive and optimally controlled semi-active systems subjected to initial conditions, measured road profile and sinusoidal inputs were investigated, and performance of the optimally controlled system was compared to that of the passive system.

Results show that, i-performance of the semi-active suspension system with air spring is hardly better than that of passive suspension system with air spring, ii- suspension deflections in suspension systems with air springs are acceptable, but bigger than

those of mechanical suspension systems, and are in allowable reagon, iii- accelerations in suspension systems with air springs are much smaller than those of mechanical suspension systems.

Science Code : **914.1.091**
Key Words : **Semi-active suspensions, variable stiffness suspensions, bilinear systems, optimum control**
Page Number : **109**
Adviser : **Asst. Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI, Prof. Dr. Yücel ERCAN**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında değerli yardım ve engin hoşgörüsünü benden esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Yücel ERCAN'a, yine çok değerli bilgi ve deneyimleriyle katkıda bulunan hocam Yrd. Doç. Dr. Metin U. SALAMCI'ya, manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim Kimya Yüksek Mühendisi çok değerli arkadaşım Hakan EKİNCİ'ye ve en önemlisi de bitmek tükenmek bilmeyen sabır ve desteğiyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iii

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER viii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİ İLE HAVA KÖRÜĞÜNÜN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ 7

2.1. Pasif Askı Sisteminin Matematiksel Modeli 7

2.2. Yarı-Aktif Sistemin Matematiksel Modeli 10

2.3. Hava Körüğünün Matematiksel Modeli 10

3. PONTRYAGIN PRENSİBİNİN UYGULANMASI VE OPTİMUM KONTROLÜN BULUNMASI 14

4. HAVA KÖRÜKLÜ PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİMESİ 23

4.1. Matematiksel Hesaplamalarda Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi 23

4.2. Hava Körüklü Pasif ve Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Ölçülmüş Yol Girişlerine Cevapları 25

4.2.1. Pasif askı sisteminin performansının incelenmesi 25

4.2.2. Yarı-aktif askı sisteminin performansının incelenmesi 32

Sayfa

4.3. Hava Körüklü Pasif ve Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Başlangıç Koşullarına Cevaplarının Karşılaştırılması 39

4.4. Hava Körüklü Pasif ve Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Frekans Cevaplarının Karşılaştırılması 42

5.SONUÇ VE ÖNERİLER 46

KAYNAKLAR 51

EKLER 53
EK-1 Riccati denkleminin çözümü için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı 54
EK-2 Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 55
EK-3 Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 64
EK-4 Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 75
EK-5 Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 82
EK-6 Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 91
EK-7 Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı (fonksiyon dosyası- işletim dosyası) 99

ÖZGEÇMİŞ 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Değişik ρ_1 değerleri için Riccati matrisi elemanları 32

Çizelge 4.2. Değişik ρ_1 değerleri için asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerleri 35

Çizelge 4.3. Yarı-aktif askı sisteminde ivme, askı sistemi ve asılı olmayan kütlenin konumu değerleri.....36

Çizelge 5.1. Hava körüklü pasif ve yarı-aktif sistemlerinde minimum ivme ve askı sistemi esnemelerinin rms değerleri 47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. ¼ pasif askı sistemi modeli 2

Şekil 1.2. ¼ Araç modeline uygulanmış düşük bant genişlikli iki aktif askı sistemi modeli....3

Şekil 1.3. ¼ Araç modeline uygulanmış yüksek bant genişlikli aktif askı sistemi modeli 4

Şekil 2.1. Pasif askı sistemli ¼-taşıt modeli 7

Şekil 2.2. Radyal esnemesi olmayan hava körükleri....11

Şekil 2.3. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde kullanılan ek hacimli hava körüğünün modeli....11

Şekil 4.1. Hava körüğünün yay sabitinin, değişik ek hacim sayısı n_{ac} için körük esnemesine göre değişimi 24

Şekil 4.2. Pasif askı sisteminde ivmenin rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi....26

Şekil 4.3. Pasif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi....27

Şekil 4.4. Pasif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi....27

Şekil 4.5. Pasif askı sisteminde ivmeye karşı askı sistemi esnemesinin rms değerlerinin ek hacim sayısıyla değişimi 28

Şekil 4.6. Pasif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi (8 ek hacimli)....29

Şekil 4.7. Pasif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi (8 ek hacimli) 30

Şekil 4.8. Pasif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi (8 ek hacimli)....30

Şekil 4.9. Pasif askı sisteminde askı sistemi esneme hızının zamanla değişimi (8 ek hacimli)....31

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.10. Pasif askı sisteminde hava körüğünün yay sabiti değerinin zamanla değişimi (8 ek hacimli) 31

Şekil 4.11. Riccati matrisinin elemanlarının çözümü (ρ_1=10) 33

Şekil 4.12. Yarı-aktif askı sisteminde asılı kütle ivmesinin rms değerine karşı askı sistemi esnemesinin rms değerinin ρ_1 ile değişimi 34

Şekil 4.13. Yarı-aktif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi 36

Şekil 4.14. Yarı-aktif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi 37

Şekil 4.15. Yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi 37

Şekil 4.16. Yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esneme hızının zamanla değişimi 38

Şekil 4.17. Yarı-aktif askı sisteminde hava körüğünün yay sabiti değerinin zamanla değişimi.....38

Şekil 4.18. Pasif askı sisteminde hava körüğü yay sabiti değerinin zamanla değişimi 39

Şekil 4.19. Yarı-aktif askı sisteminde, hava körüğü yay sabiti değerinin zamanla değişimi 40

Şekil 4.20. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi 40

Şekil 4.21. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi.....41

Şekil 4.22. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi 41

Şekil 4.23. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esneme genliğinin frekansla değişimi 43

Şekil 4.24. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde asılı kütle ivme genliğinin frekansla değişimi 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.25. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esneme genliğinin frekansla değişimi 44

Şekil 4.26. Sinüzoidal yol girişlerine zorlanmış 8 ek hacimli pasif askı sisteminde hava körüğü yay sabitinin zamanla değişimi (f =1 Hz).....45

Şekil 4.27. Sinüzoidal yol girişlerine zorlanmış yarı-aktif askı sisteminde hava körüğü yay sabitinin zamanla değişimi (f =1 Hz).....45

Şekil 5.1. Yarı-aktif askı sisteminde ivmeye karşı askı sistemi esnemesinin ρ_1 değeriyle değişimi ile pasif askı sistemi minimum rms ivmesi 46

Şekil 5.2. Hava körüklü ve mekanik yaylı pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde ivmenin rms değerinin taşıt hızıyla değişimi.....48

Şekil 5.3. Hava körüklü ve mekanik yaylı pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esnemesinin rms değerinin taşıt hızıyla değişimi.....49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{A_{ac}}$	Ek hacim efektif alanı, m^2
$\mathbf{A_{as}}$	Hava körüğü efektif alanı, m^2
$\mathbf{b_1}$	Asılı olmayan kütle ve yol arasındaki sönüm oranı, N.s/m
$\mathbf{b_2}$	Asılı ve asılı olmayan kütleler arasındaki sönüm oranı, N.s/m
$\mathbf{d_{ac}}$	Ek hacim çapı, m
$\mathbf{d_{as}}$	Hava körüğü çapı, m
$\mathbf{F}$	Kuvvet, N
$\mathbf{f}$	Frekans, Hz
$\mathbf{g}$	Yerçekimi ivmesi, m/s^2
$\mathbf{H}$	Hamilton fonksiyonu
$\mathbf{h_{ac}}$	Ek hacim yüksekliği, m
$\mathbf{h_{as}}$	Hava körüğü yüksekliği, m
$\mathbf{k}$	Yay karakteristiği denklemi
$\mathbf{k_1}$	Asılı olmayan kütle ve yol arasındaki yay sabiti, N/m
$\mathbf{k_2}$	Asılı ve asılı olmayan kütleler arasındaki yay sabiti, N/m

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{k}_{opt}$	Hava körüğünün, optimum kontrolün çözümünden elde edilen değere en yakın olan yay sabiti değeri, N/m
$\mathbf{m}_1$	Asılı olmayan kütle, kg
$\mathbf{m}_2$	Asılı kütle, kg
$\mathbf{n}$	adyabatik sabit
$\mathbf{n}_{ac}$	Ek hacim sayısı
$\mathbf{p}$	Basınç, N/m^2
$\mathbf{P}$	Performans kriteri
$\mathbf{R}$	Riccati matrisi
$\mathbf{r}$	Riccati matrisi elemanları
$\mathbf{t}$	Zaman, s
$\mathbf{t}_i$	Başlangıç zamanı, s
$\mathbf{t}_f$	Son zaman, s
$\mathbf{U}$	Kontrol girişi
$\mathbf{V}$	Taşıt hızı, m/s
$\mathbf{v}$	Hacim, m^3
$\mathbf{x}$	Durum değişkeni vektörü
$\mathbf{x}_1$	Asılı ve asılı olmayan kütleler arasındaki uzaklığın dinamik değişimi, m
$\mathbf{x}_2$	Asılı ve asılı olmayan kütleler arasındaki hızın dinamik değişimi, m/s
$\mathbf{x}_3$	Asılı olmayan kütle ve yol arasındaki uzaklığın dinamik değişimi, m

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{x}_4$	Asılı olmayan kütle ve yol arasındaki hızın dinamik değişimi, m/s
$\mathbf{y}_1$	Asılı olmayan kütlenin konumu, m
$\mathbf{y}_2$	Asılı kütlenin konumu, m
$\mathbf{z}$	yol yükseltisi, m
λ	Yardımcı durum değişkeni vektörü
λ_i	i'inci yardımcı durum değişkeni
ρ	Ağırlık katsayısı
$\boldsymbol{\Phi}$	Güç spektral yoğunluğu, dB/Hz
ω	Dairesel hız, rad/s

Kısaltmalar	Açıklama
LDR	Lineer durum regülatörü
LKG	Lineer karesel Gauss
rms	Root mean square (Karelerinin ortalamalarının kare kökü)

1. GİRİŞ

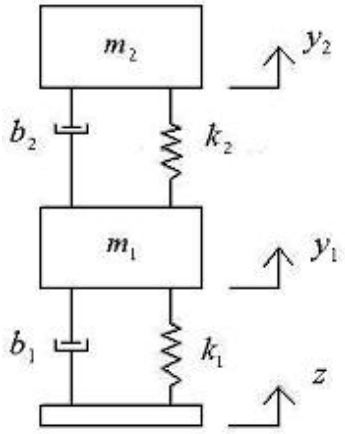
Yol profillerindeki düzensizlikten kaynaklanan yükseklik farklılıklarının oluşturduğu girişler, taşıt gövdesinde titreşimlere yol açarak yol tutuşunu ve sürüş konforunu olumsuz etkilemektedir. Yoldan gelen bu girişler, taşıt ana gövdesinde ivmelere yol açarken, askı sisteminde ise esnemelere yol açmaktadır. Askı sisteminden beklenen en temel görevin esnemeleri makul seviyelerde tutarak ve en güvenli şekilde taşıt yol tutuşunu sağlayarak, taşıt ana gövdesinde oluşan ivmeleri en aza indirmesi olduğu göz önünde bulundurulduğunda, askı sistemi tasarımının birden çok değişken arasında bir optimizasyonla yapıldığı söylenebilir. Zira ivmeleri minimuma indirmek aynı zamanda askı sistemi esnemelerinde artışa ve yol tutuşunda bir azalmaya yol açabilmektedir.

Taşıt askı sistemleri tasarımı, gerek sürüş konforunun sağlanması gerekse taşıt yol tutuşunu sağlayarak sürüş güvenliğinin sağlanması için önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Taşıt askı sistemlerinde son yüz yılda çok önemli gelişmeler kaydedilmiş olup, önceleri pasif elemanların kullanıldığı pasif askı sistemleri mevcutken, günümüzde eyleyicilerin, kuvvet servomekanizmalarının ve mikro işlemcilerin kullanıldığı aktif ve yarı-aktif askı sistemleri de mevcuttur.

Bir taşıt askı sistemi temel olarak; asılı kütle, m_2 (taşıt gövdesinin kütlesi), asılı olmayan kütle, m_1 (tekerlek, fren, bağlantı elemanları vb.) ve bunlar arasına yerleştirilmiş olan bir yay k_1 ve bir sönümleyiciden b_1 oluşmaktadır. Şekildeki k_2 ve b_2 ise sırasıyla teker lastiğinin yay ve sönüm sabitleridir (Bkz. Şekil 1.1).

Pasif bir askı sistemi tamamen pasif elemanlardan oluşmaktadır. Sönümleyici ve yay sabiti değerleri, askı sistemi esnemelerini makul seviyelerde tutacak ve taşıt üzerinde oluşacak ivmelerin minimum yapacak

şekilde önceden tasarlanmaktadır. Daha sonra ne sönümleyicinin ne de yayın sertlikleri değiştirilmemektedir. Ancak kullanılan elemanların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer etken ise, askı sisteminin taşıtı ve taşıt üzerinde bulunan yükleri de taşıyacak değerlerde olmasıdır. Bu ise askı sistemi tasarımını zorlaştıran bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.1. ¼ pasif askı sistemi modeli

Pasif askı sistemleri, performansı açısından değerlendirildiğinde diğer askı sistemleri içerisinde en kötüsü olmasına karşılık, gerek ilk maliyetleri ve gerekse bakım maliyetleri açısından en uygun olanıdır.

İçerisinde hidrolik sistemlerin, algılayıcıların, eyleyicilerin ve kuvvet servomekanizmasının bulunduğu ve bu elemanlar sayesinde, sürüş esnasında taşıtta oluşabilecek ivme ve esnemeleri optimum değerlerde tutmaya çalışan bir kuvvetin oluşturulduğu aktif askı sistemleri, performansı açısından değerlendirildiğinde en iyisi olmasına karşılık, gerek ilk yatırım maliyetleri ve gerekse bakım maliyetleri açısından en pahalı olanıdır.

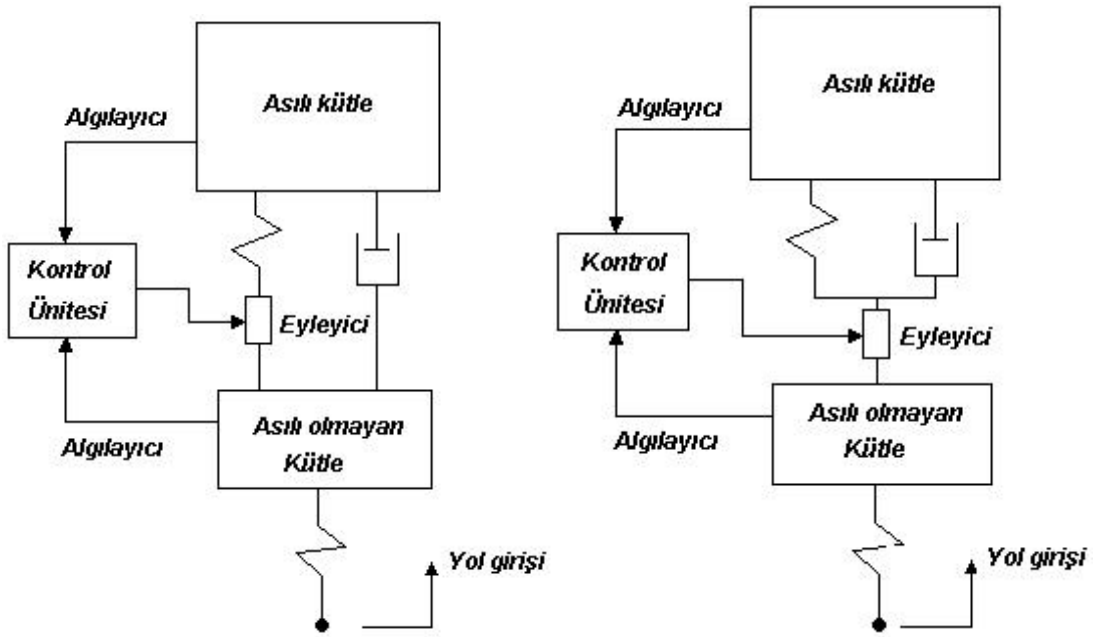
Aktif askı sistemlerinde temel mantık; sürüş esnasında algılayıcılar tarafından sürekli olarak ölçülen ivme ve esneme değerlerinin bir kontrol ünitesinde değerlendirildikten sonra, asılı ve asılı olmayan kütleler arasına yerleştirilmiş

eyleyiciler vasıtasıyla ölçülen ivme ve esnemeleri minimize edecek biçimde geri besleme kuvveti oluşturmaktır.

Aktif askı sistemleri, bir kuvvet servomekanizması tarafından üretilen kuvvetin sönümleyici ve/veya yayın üzerinden asılı kütleye uygulandığı düşük bant genişlikli sistemler ve üretilen kuvvetin doğrudan sisteme verilmesi mantığına dayanan yüksek bant genişlikli sistemler olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir [1].

Şekil 1.2 'de görülen, sadece yay üzerinden yada sönümleyici ile birlikte yay üzerinden geri besleme kuvvetinin oluşturulduğu sistemler düşük bant genişlikli sistemlerdir.

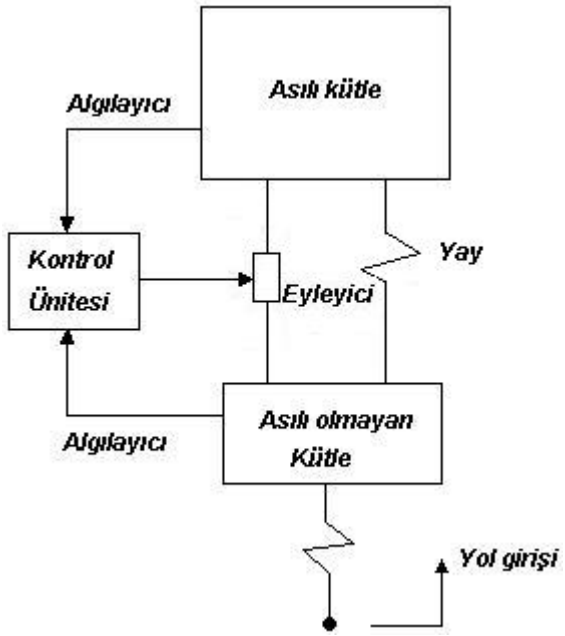
Düşük bant genişlikli sistemlerde, eyleyici sadece asılı kütle ile asılı olmayan kütleler arasındaki sönümlemeyi sağlamaya çalışmaktadır.



Şekil 1.2. ¼ Araç modeline uygulanmış düşük bant genişlikli iki aktif askı sistemi modeli

Yüksek bant genişlikli askı sistemlerinde ise, eyleyici asılı ve asılı olmayan kütleler arasına doğrudan yerleştirilmiş olduğu için, asılı kütle ile asılı olmayan kütle arasındaki sönümlemeyi sağladığı gibi, asılı olmayan kütle ile yer arasındaki sönümlemeyi de sağlamak zorundadır.

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi sadece asılı ve asılı olmayan kütleler arasına yerleştirilmiş bir eyleyici tarafından geri besleme kuvvetinin oluşturulduğu sistemler yüksek bant genişlikli sistemlerdir.



Şekil 1.3. ¼ Araç modeline uygulanmış yüksek bant genişlikli aktif askı sistemi modeli

Pasif askı sistemlerinin, diğerlerine göre en basit yapıda ve en ucuz olmasına rağmen istenen performansı sergileyemiyor olması; aktif askı sistemlerinin performans açısından oldukça iyi olmasına karşılık maliyetinin çok yüksek olması, yarı-aktif askı sistemlerini daha cazip hale getirmiştir.

Yarı-aktif askı sistemlerinde, sürüş sırasında sönüm yada yay sabiti değerinden birisi uygun şekilde değiştirilerek taşıt ana gövdesinde oluşacak ivmeleri ve askı sistemi esnemeleri minimum yapılmaya çalışılır.

Yarı-aktif askı sistemleriyle ilgili çalışmalar ilk olarak 1970'li yılların başlarında Crosby ve Karnopp [2] ve Karnopp ve Crosby [3] tarafından değişken sönümleyeci kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmadan sonra, sönüm oranın değiştirilmesi esasına dayanan yarı-aktif askı sistemleri trenlerden [4] traktör ve arazi taşıtlarına [5] birçok uygulama alanı bulmuştur.

Biraz daha gelişmiş olan ve *"aç-kapa"* mantığının kullanıldığı çalışma, Margolis [6] tarafından yapılmıştır. Asılı ve asılı olmayan kütleler aynı yöne doğru hareket ederken ve asılı olmayan kütlenin hızı asılı kütlenin hızından büyükken sönümleyici *"kapalı"* konumda olup sıfıra yakın bir kuvvet yaratırken, diğer durumlarda sönümleyici *"açık"* konumda olup daha büyük kuvvetler yaratmaktadır. Bu çalışmanın temel mantığı olan ivmenin ve hareketlerin azaltılması, 1980'lerin başında Margolis ve Hrovat [7], Hrovat ve Margolis [8] ve Krasnicki [9] tarafından simülasyon ve deneylerle gösterilmiştir.

1980'li yılların sonlarına gelindiğinde Hrovat v.d. [10] tarafından ¼ bir taşıt modeli için yapılan bir çalışmada, yol girişleri beyaz gürültü kabul edilmiş, Lineer Karesel Gauss (LKG) optimum kontrol uygulanarak değişken sönümleyicili bir askı sisteminin optimizasyonu yapılmıştır.

Hac ve Youn [11, 12] tarafından yapılan çalışmalarda da yol girişleri beyaz gürültü kabul edilerek yarı-aktif askı sistemi optimize edilmiştir. Tseng ve Hedrick [14] ve Karnopp [15] yapılan çalışmalarda yarı-aktif askı sistemlerinin optimizasyonu incelenmiştir.

Hrovat'ın tarama makalesinden askı sistemlerinin optimizasyonu ile ilgili geniş bir özete ulaşılabilir [15].

Hava körüğü ile taşıt gövdesinin statik yükü taşınabilmekte, öte yandan asılı ve asılı olmayan kütleler birbirlerine çok yumuşak yay vasıtasıyla bağlanabilmektedirler. Yumuşak yay ise yüksek frekanslı yol girişlerini asılı

kütleden etkin bir biçimde izole etmektedir. Bu çalışmanın amacı; hava körüğü kullanılan pasif ve yarı- aktif askı sistemlerinin performanslarının incelenmesi ve karşılaştırılmasıdır.

Bu kapsamda, eklenen ek hacimlerle yay sabiti değiştirilen hava körüğüne ve sabit bir sönümleyiciye sahip olan bir ¼ -taşıt modeli ele alınmıştır.

Bölüm 2'de, bu modelin matematiksel tanımı yapılmış ve sistemin dinamik davranışını veren durum denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler bilineer türde olup, durum değişkenleri ve kontrol değişkenlerinin çarpım halinde olduğu terimler içermektedir.

Bölüm 3'de, ivmenin yanı sıra esnemelerin de dahil olduğu bir performans kriteri tanımlanmış, Pontryagin'in Minimum Prensibi kullanılarak durum değişkenleri cinsinden ifade edilebilen bir optimum kontrol kanunu elde edilmiştir.

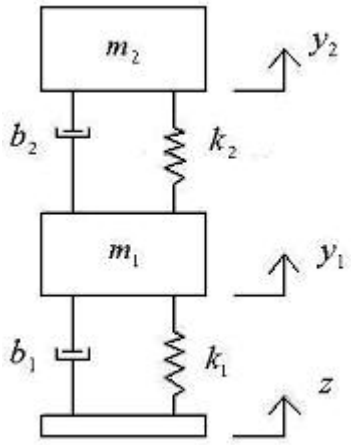
Bölüm 4'de, örnek bir sistem için parametreler belirlenmiş, yarı-aktif kontrol ve ölçülmüş yol girişleri uygulanan bu sistemin davranışı, ivme ve esnemelerin değişik ağırlıkları için uzlaşma eğrileri elde edilerek bir optimizasyon yapılmıştır. İvmenin en küçük değeri için askı sistemi esnemelerinin makul seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu nedenle yarı-aktif askı sisteminin performansı değerlendirilirken en küçük ivmenin elde edildiği parametreler kullanılmıştır. Daha sonra ise yarı-aktif askı sisteminin performansı, sertliği değişken olmayan hava körüğüne ve sabit sönümleyiciye sahip bir pasif askı sisteminin performansı ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise hava körüklü pasif ve yarı aktif askı sistemleri ile mekanik yaylı mekanik pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin performansları karşılaştırılmış, sonuçlar özetlenmiş ve sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

2.1. Pasif Askı Sisteminin Matematiksel Modeli

Bu çalışmada incelenen pasif askı sistemli, ¼-taşıt modeli Şekil 2.1 ‘de gösterilmiştir. Şekil 2.1’deki m_2 kütlesi taşıtın asılı kütlesini, m_1 ise asılı olmayan kütleyi göstermektedir. Teker lastiklerinin yay ve sönüm sabitleri sırasıyla k_1 ve b_1; asılı ve asılı olmayan kütleler arasındaki yay ve sönümleyici sabitleri sırasıyla k_2 ve b_2 ile ifade edilmiştir. y_1, asılı olmayan kütlenin statik denge konumundan sapması; y_2, asılı kütlenin statik denge konumundan sapması ve z ise sisteme yol tarafından uygulanan bozucu giriştir.



Şekil 2.1. Pasif askı sistemli ¼-taşıt modeli

Sistemin hareketini tanımlayan diferansiyel denklemler, Eş.2.1 ve Eş.2.2’de verilmiştir.

$$m_2\ddot{y}_2 + b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) = 0 \quad (2.1)$$

$$m_1\ddot{y}_1 - b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_2(y_2 - y_1) + b_1(\dot{y}_1 - \dot{z}) + k_1(y_1 - z) = 0 \quad (2.2)$$

Durum denklemlerinin elde edilmesi için, askı sistemi esnemesini, asılı olamayan kütlenin konumunu ve bunların türevlerini içeren aşağıdaki durum değişkenleri tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} x_1 &= y_2 - y_1 \\ x_2 &= \dot{y}_2 - \dot{y}_1 \\ x_3 &= y_1 \\ x_4 &= \dot{y}_1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Eş. 2.3'de verilen durum değişkenleri, Eş. 2.1 ve Eş.2.2'de yerlerine yazılarak Eş. 2.4 ve Eş.2.5 elde edilmiştir.

$$m_2\ddot{y}_2 + b_2x_2 + k_2x_1 = 0 \tag{2.4}$$

$$m_1\ddot{y}_1 - b_2x_2 - k_2x_1 + b_1x_4 + k_1x_3 - b_1\dot{z} - k_1z = 0 \tag{2.5}$$

Eş. 2.4 ve Eş.2.5'den $\ddot{y}_1$ ve $\ddot{y}_2$ aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\ddot{y}_2 = -\left(\frac{b_2}{m_2}\right)x_2 - \left(\frac{k_2}{m_2}\right)x_1 \tag{2.6}$$

$$\ddot{y}_1 = \left(\frac{b_2}{m_1}\right)x_2 + \left(\frac{k_2}{m_1}\right)x_1 - \left(\frac{b_1}{m_1}\right)x_4 - \left(\frac{k_1}{m_1}\right)x_3 + \left(\frac{b_1}{m_1}\right)\dot{z} + \left(\frac{k_1}{m_1}\right)z \tag{2.7}$$

Buradan,

$$\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1 = -b_2\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)x_2 - k_2\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)x_1 + \left(\frac{b_1}{m_1}\right)x_4 + \left(\frac{k_1}{m_1}\right)x_3 - \left(\frac{b_1}{m_1}\right)\dot{z} - \left(\frac{k_1}{m_1}\right)z \tag{2.8}$$

elde edilir.

Eş. 2.3'de ifade edilen durum değişkenleri ile Eş. 2.4, Eş.2.5 ve Eş.2.8 kullanılarak, Eş. 2.9'daki durum denklemleri elde edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -b_2\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)x_2 - k_2\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)x_1 + \left(\frac{b_1}{m_1}\right)x_4 + \left(\frac{k_1}{m_1}\right)x_3 - \left(\frac{b_1}{m_1}\right)\dot{z} - \left(\frac{k_1}{m_1}\right)z \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= \left(\frac{b_2}{m_1}\right)x_2 + \left(\frac{k_2}{m_1}\right)x_1 - \left(\frac{b_1}{m_1}\right)x_4 - \left(\frac{k_1}{m_1}\right)x_3 + \left(\frac{b_1}{m_1}\right)\dot{z} + \left(\frac{k_1}{m_1}\right)z
\end{aligned}
\tag{2.9}
$$

Eş. 2.9'daki ifadeleri sadeleştirmek için aşağıdaki tanımlamalar yapılarak,

$$
a = \left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right),\ b = b_2\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right),\ c = \left(\frac{k_1}{m_1}\right),
$$

$$
d = \left(\frac{b_1}{m_1}\right),\ e = \left(\frac{1}{m_1}\right),\ f = \left(\frac{b_2}{m_1}\right)
\tag{2.10}
$$

aşağıdaki durum denklemleri elde edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -ak_2x_1 - bx_2 + cx_3 + dx_4 - d\dot{z} - cz \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= ek_2x_1 + fx_2 - cx_3 - dx_4 + d\dot{z} + cz
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

Eş. 2.11'de geçen k_2 parametresi, mekanik pasif askı sistemlerinde asılı ve asılı olmayan kütleler asarındaki yayın sabitidir ve değişmez. Hava körüklü pasif askı sistemlerinde ise k_2, hava körüğünün yay sabitinin ölçütü olup, körükteki havanın sıcaklığı, körüğün esneme hızı, yani işlemin adyabatik veya izotermal olması gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Hava körüğü için k_2'nin nasıl belirleneceği, Bölüm 2.3'de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2. Yarı-Aktif Sistemin Matematiksel Modeli

Pasif sistem için elde edilen Eş. 2.11'deki durum denklemlerinde, $k_2 = U$ dönüşümü yapılarak, yarı-aktif sistemin için aşağıdaki durum denklemleri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -aUx_1 - bx_2 + cx_3 + dx_4 - d\dot{z} - cz \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= eUx_1 + fx_2 - cx_3 - dx_4 + d\dot{z} + cz
\end{aligned} \tag{2.12}$$

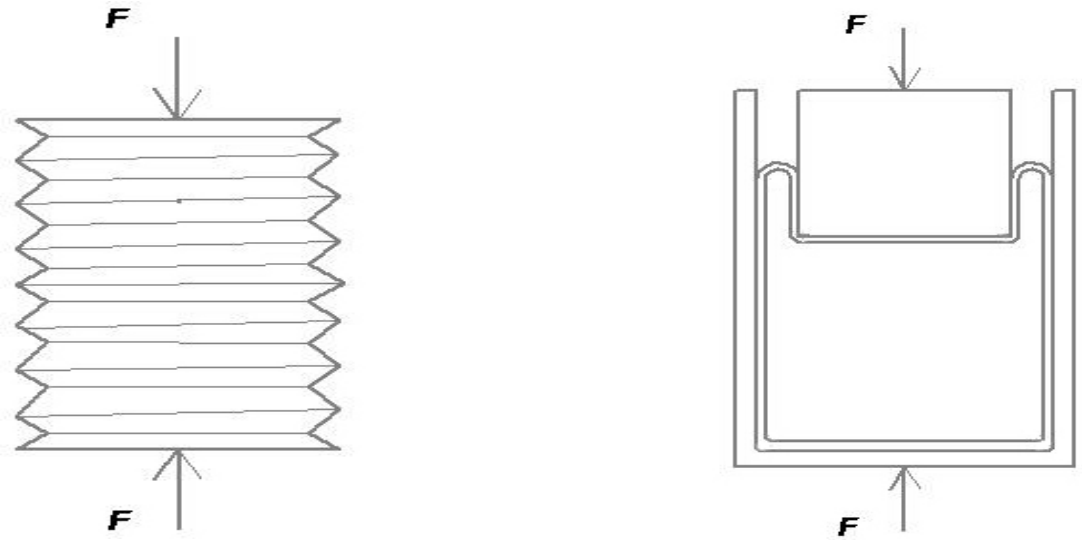
Bu denklemlerde U kontrol girişidir. Denklemlerden görüldüğü gibi kontrol girişi U ile, durum değişkeni x_1 çarpım durumundadır. Durum denklemlerinde kontrol girişi ile durum değişkenlerinin çarpanlar halinde yer aldığı bu tür sistemlere *"bilineer sistemler"* denir.

Bu çalışmada incelenen yarı-aktif askı sistemli ¼-taşıt modelinde, askı sistemi yay sabiti k_2'nin sistem davranışını iyileştirmek için değiştirildiği kabul edilmektedir. Yani, k_2 parametresi sistemin kontrol girişidir. Sistemin çalışması sırasında etken körük hacmi,, aç-kapa mantığı ile çalışan valflar vasıtasıyla bazı ek hacimlerin körük hacmine eklenmeleri veya körükten izole edilmeleri ile değiştirilmekte ve bunun sonucu olarak ta k_2'nin değeri değişmektedir.

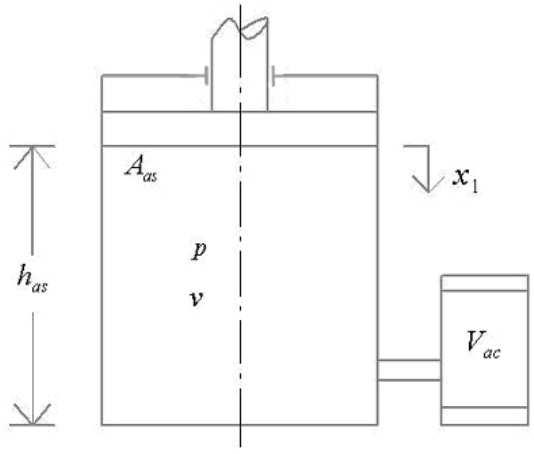
2.3. Hava Körüğünün Matematiksel Modeli

Hava körüğünün yay karakteristiğinin belirlenmesi için, körüklü pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin her ikisi için de kullanılabilecek genel bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Modelleme yapılırken, hava körüğünün sıkışması veya genleşmesi sırasında gerçekleşen proseslerin politropik olduğu varsayımı yapılmıştır.

Bu çalışmada, körükte meydana gelebilecek radyal esnemeler ihmal edilmiştir. Yani körük yapısı metal körük yada yuvarlanan diyafram biçimindedir (Bkz. Şekil 2.2). Ayrıca optimum kontrol algoritmasından elde edilen yay sabitlerine yakın değerler elde edilebilmesi için, körük hacmine eklenen yada körük hacminden ayrılacak ek hacimler de kullanılmıştır. Dolayısıyla, sabit hacimlerle birlikte hava körüğünün modeli Şekil 2.3'deki gibidir.



Şekil 2.2. Radyal esnemesi olmayan hava körükleri a) Metal körük
b) Yuvarlanan diyafram



Şekil 2.3. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde kullanılan ek hacimli hava körüğünün modeli

Burada; p, her hangi bir t anındaki basınç; v, herhangi bir t anındaki körük hacmi; A_{as}: hava körüğünün kesit alanı; V_{ac}: sabit hacmi ve h_{as}: hava körüğünün yüksekliğini ifade etmektedir.

Başlangıç şartlarında;

$$\begin{aligned} p &= p_0 \\ v &= v_0 \end{aligned} \tag{2.13}$$

olduğu ve ilk basıncın taşıtın ağırlığını dengelediği kabul edildiğinde;

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{m_2 g}{A_{as}} \\ v_0 &= h_{as} A_{as} + n_{ac} V_{ac} \end{aligned} \tag{2.14}$$

olacaktır. n_{ac} hava körüğüne eklenen sabit hacim sayısını ifade etmektedir. Körüğün sıkışması veya genleşmesi sırasında hacmin hesaplanmasında;

$$v = \left(h_{as} - x_1\right) A_{as} + n_{ac} V_{ac} = v_0 - A_{as} x_1 \tag{2.15}$$

ifadesi kullanılmıştır.

Hava körüğünün içerisinde politropik olarak gerçekleştiği kabul edilen proses için basıncın hesaplanmasında Eş. 2.16 kullanılmıştır.

$$p = p_0 v_0{}^{n} v^{-n} \tag{2.16}$$

Körüğün içindeki basınçtan kaynaklanan kuvveti tanımlayan ifade, Eş. 2.17 deki gibi elde edilmiştir.

$$F = pA_{as} = \left(p_0 {v_0}^n v^{-n}\right)A_{as} = \left[p_0 {v_0}^n \left(v_0 - A_{as}x_1\right)^{-n}\right]A_{as} \tag{2.17}$$

Hava körüğünün yay karakteristiğini tanımlayan ifadenin belirlenmesi için

$$k_2 = \frac{dF}{dx_1} \tag{2.18}$$

eşitliği kullanılarak;

$$k_2 = \frac{dF}{dx_1} = \frac{d\left[p_0 {v_0}^n \left(v_0 - A_{as}x_1\right)^{-n}\right]A_{as}}{dx_1} = p_0 {v_0}^n A_{as} \frac{d\left[\left(v_0 - A_{as}x_1\right)^{-n}\right]}{dx_1} \tag{2.19}$$

$$k_2 = np_0 {v_0}^n {A_{as}}^2 \left(v_0 - A_{as}x_1\right)^{-(n+1)} \tag{2.20}$$

elde edilmiştir.

Eş. 2.14 ve Eş.2.15'deki p_0, v_0 ve v değerleri Eş. 2.20'de yerlerine yazılarak, hava körüğünün yay karakteristiğini tanımlayan ifade aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$k_2 = nm_2 gA_{as}\left(h_{as}A_{as} + n_{ac}h_{ac}A_{ac}\right)^n \left[\left(h_{as}A_{as} + n_{ac}V_{ac}\right) - A_{as}x_1\right]^{-(n+1)} \tag{2.21}$$

3. PONTRYAGIN PRENSİBİNİN UYGULANMASI VE OPTİMUM KONTROLUN BULUNMASI

Lineer sistemlerde sistem girişi beyaz gürültü ise, optimum kontrolü veren Lineer Kuadratik Gauss (LKG) çözümü ile Lineer Durum Regülatörü (LDR) çözümü aynıdır [16]. Bu çözüm Pontryagin prensibini uygulayarak Riccati denkleminden elde edilebilir. Diğer yandan bilineer sistemler için LDR çözümünün, yine Riccati denkleminden bulunabileceği de gösterilmiştir [16]. Bu hususlar dikkate alınarak, bu çalışmada Eş. 3.1 ile tanımlanan bilineer sisteme Pontryagin prensibi uygulanarak LDR çözümü bulunmuş; bulunan optimum sistemin ölçülmüş yol girişlerine karşılık sergilediği davranış değerlendirilmiştir.

Durum regülatörü problemine esas olacak denklemler, Eş. 2.12'de yol girişi, $z = 0$ alınarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= -aUx_1 - bx_2 + cx_3 + dx_4 \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= eUx_1 + fx_2 - cx_3 - dx_4
\end{aligned} \tag{3.1}$$

yada matris formunda

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{U}) \tag{3.2}$$

Taşıt askı sistemlerinden beklenen; taşıt ana gövdesinde oluşan ivmelerle askı sistemindeki esnemelerin minimum düzeylerde tutulmasıdır. Ancak, asılı kütlede (taşıt ana gövdesi) oluşabilecek ivmeler ile askı sistemi esnemelerini aynı anda minimum yapmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, asılı kütle ivmesi ile askı sistemi esnemelerini ağırlıklı katsayılarıyla birlikte içeren bir performans kriteri tanımlamak gerekmektedir. Böylece, performans kriterindeki asılı kütle ivmesi, askı sistemi esnemesi ve asılı

olmayan kütlenin konumunun ağırlık katsayılarının değerlerine bağlı olarak, farklı optimum çözümler ve uzlaşma eğrileri elde edilir.

Bu çalışmada asılı kütle ivmesi, askı sistemi esnemesi ve asılı olmayan kütlenin konumunun karelerini ağırlıklı olarak içeren, aşağıdaki performans kriteri tanımlanmıştır.

$$PI = \int_0^{t_f} \left(\ddot{y}_2{}^2 + \rho_1 x_1{}^2 + \rho_2 x_3{}^2 \right) dt \tag{3.3}$$

Eş. 2.6'daki $\ddot{y}_2$ ifadesi, Eş. 3.3'de yerine yazılarak, Eş. 3.4 elde edilmiştir.

$$PI = \int_0^{t_f} \left[\left(-\left(\frac{b_2}{m_2} \right) x_2 - \left(\frac{U}{m_2} \right) x_1 \right)^2 + \rho_1 x_1{}^2 + \rho_2 x_3{}^2 \right] .dt \tag{3.4}$$

Bu problem için Hamilton Fonksiyonu,

$$\mathbf{H} = \mathbf{L} + \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \mathbf{f} \tag{3.5}$$

gibi yazılabilir.

Burada $\boldsymbol{\lambda}$, yardımcı durum değişkenleri vektörü yada Lagrange çarpanları fonksiyonu olmak üzere,

$$L = \left[\left(\left(\frac{b_2}{m_2} \right) x_2 + \left(\frac{U}{m_2} \right) x_1 \right)^2 + \rho_1 x_1{}^2 + \rho_2 x_3{}^2 \right] \tag{3.6}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

$\mathbf{f}$ ise Eş. 3.1'in sağ tarafının oluşturduğu vektördür.

Hamilton fonksiyonu, Eş. 3.2 ve Eş.3.6'nın, Eş. 3.5'de yerlerine yazılmasıyla aşağıdaki hali alır.

$$H=\left[\left(-\left(\frac{b_2}{m_2}\right)x_2-\left(\frac{U}{m_2}\right)x_1\right)^2+\rho_1 x_1^{\,2}+\rho_2 x_3^{\,2}\right]+\lambda_1 x_2+\lambda_2\left(-aUx_1-bx_2+cx_3+dx_4\right)$$

(3.7)

$$+\lambda_3 x_4+\lambda_4\left(eUx_1+fx_2-cx_3-dx_4\right)$$

Pontryagin prensibine göre optimum kontrol Hamilton fonksiyonunu minimum yapar ve aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$\frac{\partial H}{\partial U}=0 \tag{3.8}$$

Eş.3.8'in çözümünden, optimum U'yu veren ifade aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$U_o=\frac{m_2^{\,2}\lambda_2 a-m_2^{\,2}\lambda_4 e-2b_2x_2}{2x_1} \tag{3.9}$$

Eş.3.9'daki U_o ifadesi, Eş.3.7'deki U yerine yazılarak, optimum H aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$H_o=\left[\left(-\left(\frac{b_2}{m_2}\right)x_2-\left(\frac{k_2}{m_2}\right)x_1\right)^2+\rho_1 x_1^{\,2}+\rho_2 x_3^{\,2}\right]+\lambda_1 x_2$$

$$+\lambda_2\left[-a\left(\frac{m_2^{\,2}\lambda_2 a-m_2^{\,2}\lambda_4 e-2b_2x_2}{2x_1}\right)x_1-bx_2+cx_3+dx_4\right] \tag{3.10}$$

$$+\lambda_3 x_4+\lambda_4\left[e\left(\frac{m_2^{\,2}\lambda_2 a-m_2^{\,2}\lambda_4 e-2b_2x_2}{2x_1}\right)x_1+fx_2-cx_3-dx_4\right]$$

Yardımcı durum denklemleri,

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \mathbf{H}_o}{\partial \mathbf{x}} \tag{3.11}$$

eşitliğinin çözümünden aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_1 &= -\rho_1 x_1 \\
\dot{\lambda}_2 &= -\lambda_1 \\
\dot{\lambda}_3 &= \lambda_4 c - \lambda_2 c - 2\rho x_3 \\
\dot{\lambda}_4 &= \lambda_4 d - \lambda_2 d - \lambda_3
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Eş.3.12'deki yardımcı durum denklemleri aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir.

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{T_1}\mathbf{x} + \mathbf{T_2}\boldsymbol{\lambda} \tag{3.13}$$

Burada, katsayı matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{T_1} = \begin{bmatrix} -2\rho_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\rho_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

$$\mathbf{T_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & c \\ 0 & -d & -1 & d \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

Eş. 3.9'daki U_o, Eş. 3.1'de yerine koyulursa durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= cx_3 + dx_4 - \frac{a^2 m_2{}^2 \lambda_2}{2} + \frac{aem_2{}^2 \lambda_4}{2} \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
\dot{x}_4 &= -cx_3 - dx_4 + \frac{aem_2{}^2 \lambda_2}{2} + \frac{e^2 m_2{}^2 \lambda_4}{2}
\end{aligned}
\tag{3.16}
$$

Eş. 3.16'daki durum denklemleri aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{H_1}\mathbf{x} + \mathbf{H_2}\boldsymbol{\lambda} \tag{3.17}$$

Burada katsayı matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{H_1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -c & -d \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$\mathbf{H_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & q \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 & -w \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Eş. 3.19'daki $\mathbf{H_2}$ matrisinin elemanları için,

$$p = \frac{a^2 m_2{}^2}{2},\ q = \frac{aem_2{}^2}{2},\ w = \frac{e^2 m_2{}^2}{2} \tag{3.20}$$

tanımlamaları yapılmıştır.

Eş. 3.13 ve Eş.3.17'den $\boldsymbol{\lambda}$ ve $\mathbf{x}$'i çözmek amacıyla, $\mathbf{R}$ kesin pozitif simetrik matris olmak üzere,

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{R}\mathbf{x} \tag{3.21}$$

kabulü yapılırsa,

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = \dot{\mathbf{R}}\mathbf{x} + \mathbf{R}\dot{\mathbf{x}} \tag{3.22}$$

bulunur.

Eş. 3.13 ve Eş.3.17'deki ifadeler, Eş. 3.22'de yerlerine yazılırsa,

$$\mathbf{T}_1\mathbf{x} + \mathbf{T}_2\boldsymbol{\lambda} = \dot{\mathbf{R}}\mathbf{x} + \mathbf{R}\left(\mathbf{H}_1\mathbf{x} + \mathbf{H}_2\boldsymbol{\lambda}\right) \tag{3.23}$$

elde edilir. Eş. 3.23'deki $\boldsymbol{\lambda}$ terimi yerine Eş. 3.21'den $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{R}\mathbf{x}$ yazılırsa;

$$\mathbf{T}_1\mathbf{x} + \mathbf{T}_2\boldsymbol{\lambda} = \dot{\mathbf{R}}\mathbf{x} + \mathbf{R}\left(\mathbf{H}_1\mathbf{x} + \mathbf{H}_2\mathbf{R}\mathbf{x}\right) \tag{3.24}$$

elde edilir. Eş. 3.24 düzenlenirse, Riccati denklemi Eş. 3.25'deki gibi elde edilir.

$$\dot{\mathbf{R}} + \mathbf{R}\mathbf{H}_2\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{H}_1 - \mathbf{T}_2\mathbf{R} - \mathbf{T}_1 = \mathbf{0} \tag{3.25}$$

Burada $\mathbf{T}_2 = -\mathbf{H}_1^{\,T}$ şartı sağlanmaktadır. Böylece, Eş. 3.25 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{\mathbf{R}} + \mathbf{R}\mathbf{H}_2\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_1^{\,T}\mathbf{R} - \mathbf{T}_1 = \mathbf{0}$$

Eş. 3.25 ile birlikte kullanılacak sınır şartı aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{R}(t_f) = 0 \tag{3.26}$$

$\mathbf{R}$ matrisi 4×4 boyutlu simetrik bir matris olup, elemanları cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_5 & r_6 & r_7 \\ r_3 & r_6 & r_8 & r_9 \\ r_4 & r_7 & r_9 & r_{10} \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

Eş. 3.14, Eş.3.15, Eş.3.18, Eş.3.19 ve Eş.3.27'deki $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$, $\mathbf{H_1}$, $\mathbf{H_2}$ ve $\mathbf{R}$ ifadeleri, Eş. 3.25'de yerlerine yazılırsa, Riccati denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\dot{\mathbf{R}} = -\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_5 & r_6 & r_7 \\ r_3 & r_6 & r_8 & r_9 \\ r_4 & r_7 & r_9 & r_{10} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & q \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 & -w \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_5 & r_6 & r_7 \\ r_3 & r_6 & r_8 & r_9 \\ r_4 & r_7 & r_9 & r_{10} \end{bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_5 & r_6 & r_7 \\ r_3 & r_6 & r_8 & r_9 \\ r_4 & r_7 & r_9 & r_{10} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -c & -d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & c \\ 0 & -d & -1 & d \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \\ r_2 & r_5 & r_6 & r_7 \\ r_3 & r_6 & r_8 & r_9 \\ r_4 & r_7 & r_9 & r_{10} \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$+\begin{bmatrix} -2\rho_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\rho_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Eş. 3.28'in açılımından, $\mathbf{R}$'nin elemanları cinsinden aşağıdaki eşitlikler takımı elde edilir.

$$
\begin{aligned}
\dot{r}_1 &= (-r_2 p + r_4 q) r_2 + (r_2 q - r_4 w) r_4 + 2\rho_1 \\
\dot{r}_2 &= (-r_2 p + r_4 q) r_5 + (r_2 q - r_4 w) r_7 + r_1 \\
\dot{r}_3 &= (-r_2 p + r_4 q) r_6 + (r_2 q - r_4 w) r_9 + r_2 c - r_4 c \\
\dot{r}_4 &= (-r_2 p + r_4 q) r_7 + (r_2 q - r_4 w) r_{10} + r_2 d + r_3 - r_4 d \\
\dot{r}_5 &= (-r_5 p + r_7 q) r_5 + (r_5 q - r_7 w) r_7 + 2 r_2 \\
\dot{r}_6 &= (-r_5 p + r_7 q) r_6 + (r_5 q - r_7 w) r_9 + r_5 c - r_7 c + r_3 \\
\dot{r}_7 &= (-r_5 p + r_7 q) r_7 + (r_5 q - r_7 w) r_{10} + r_5 d + r_6 - r_7 d + r_4 \\
\dot{r}_8 &= (-r_6 p + r_9 q) r_6 + (r_6 q - r_9 w) r_9 + 2 r_6 c - 2 r_9 c + 2\rho_2 \\
\dot{r}_9 &= (-r_6 p + r_9 q) r_7 + (r_6 q - r_9 w) r_{10} + r_6 d + r_8 - r_9 d + r_7 c - r_{10} c \\
\dot{r}_{10} &= (-r_6 p + r_9 q) r_7 + (r_6 q - r_9 w) r_{10} + 2 r_7 d + 2 r_9 - 2 r_{10} d
\end{aligned}
\tag{3.29}
$$

t_f sonsuza giderken, matris Riccati denklemindeki $\mathbf{R}$, Eş. 3.25'in durağan çözümüdür ve sabit bir $\mathbf{R}_0$'a gider. Dolayısıyla $t_f = \infty$ ise $\mathbf{R}$'nin elemanları, Eş. 3.25 veya Eş. 3.29'daki türevli terimleri sıfır alarak elde edilen cebirsel denklemlerle çözülebilir. Ancak yüksek mertebeden cebirsel denklemlerin köklerinin nümerik yöntemlerle bulunması, beraberinde çözümde karasızlıkları veya yeterli derecede doğruluğun olmaması gibi problemleri getirebilmektedir. Bu nedenle $\mathbf{R}_0$'ın bulunması için yine Eş. 3.25 veya Eş. 3.29 kullanılır. Bu eşitlikler $\mathbf{R}(t_f) = 0$ sınır şartından geriye doğru negatif zaman yönünde durağan çözüm elde edilinceye kadar entegre edilir. Yada alternatif olarak Eş. 3.25'den zaman yönünü değiştirerek elde edilen

$$
\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\mathbf{H}_2\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{H}_1 - \mathbf{T}_2\mathbf{R} - \mathbf{T}_1 \tag{3.30}
$$

eşitliği $\mathbf{R}(0) = 0$'dan başlayarak durağan çözüm elde edilinceye kadar pozitif zaman yönünde entegre edilir.

Eş. 3.30'un çözümü için, MATLAB ortamında hazırlanan bir program kullanılmıştır (Bkz. EK-1).

Eş. 3.30'un çözümünden elde edilen $\mathbf{R}_0$ matrisinin elemanları Eş. 3.21'de yerine koyularak, $\boldsymbol{\lambda}$ vektörünün elemanları

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= r_1x_1 + r_2x_2 + r_3x_3 + r_4x_4\\ \lambda_2 &= r_2x_1 + r_5x_2 + r_6x_3 + r_7x_4\\ \lambda_3 &= r_3x_1 + r_6x_2 + r_8x_3 + r_9x_4\\ \lambda_4 &= r_4x_1 + r_7x_2 + r_9x_3 + r_{10}x_4\end{aligned} \tag{3.31}$$

şeklinde elde edilmiştir. Eş.3.31'deki λ_2 ve λ_4 değerleri, Eş.3.9'daki yerlerine yazılarak optimum kontrol girişi,

$$U_o = \frac{m_2{}^2\left(r_2x_1 + r_5x_2 + r_6x_3 + r_7x_4\right)a - m_2{}^2\left(r_4x_1 + r_7x_2 + r_9x_3 + r_{10}x_4\right)e - 2b_2x_2}{2x_1} \tag{3.32}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Pratikte, optimum kontrolün çözümünden elde edilen değerlere ulaşmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, hava körüğünün yay sabiti değerinin, optimum kontrolün çözümünden elde edilen değerlere yakın değerler alabilmesi için hava körüğüne ek olarak, aç-kapa mantığı ile çalışan valflar vasıtasıyla 8 adet özdeş sabit hacim eklenmiştir. Bundan dolayı, optimum olarak kontrol edilen sistem için yay sabiti değerleri, hava körüğünün tek başına kullanıldığı durumdaki üst sınır değer ile sekiz adet ek hacimle birlikte kullanıldığı durumdaki alt sınır değer arasında değişmektedir.

Optimum olarak kontrol edilen sistemin davranışını veren eşitlikler, optimum kontrolün çözümünden elde edilen U_o yerine, hava körüğünün U_o 'ya en yakın olan yay sabiti değeri olarak tanımlanan k_{opt} yazılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2\\ \dot{x}_2 &= -ak_{opt}x_1 - bx_2 + cx_3 + dx_4\\ \dot{x}_3 &= x_4\\ \dot{x}_4 &= ek_{opt}x_1 + fx_2 - cx_3 - dx_4\end{aligned} \tag{3.33}$$

4. HAVA KÖRÜKLÜ PASİF VE YARI-AKTİF ASKI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİMESİ

4.1. Matematiksel Hesaplamalarda Kullanılacak Parametrelerin Belirlenmesi

Hava körüğü yay sabitini tanımlayan ifadedeki parametrelerin belirlenmesi: Hava körüğünün çevreyle bir miktar ısı alış-verişinde olacağı ve içerisindeki havanın sıcaklığında değişimler olacağı göz önüne alındığında, hava körüğünün genleşmesi ve sıkışması esnasında gerçekleşen prosesin politropik proses olduğu söylenebilir.

Yalıtılmamış metal konstrüksiyonlu tanklarda genelde $n = 1.2$ olarak alınır. Diğer yandan, farklı n değerleri için hesaplanan körük yay sabitleri arasındaki farkların çözümü etkileyecek seviyelerde olmaması nedeniyle, bu çalışmada hava körüğünün yay sabitinin hesaplanması için kullanılan Eş. 2.21'deki politropik sabitin değeri $n = 1.2$ olarak kullanılmıştır. Hava körüğü yay sabiti ifadesinde yer alan diğer parametreler için ise aşağıdaki değerler kullanılmıştır.

d_{as} = 0.2 m,

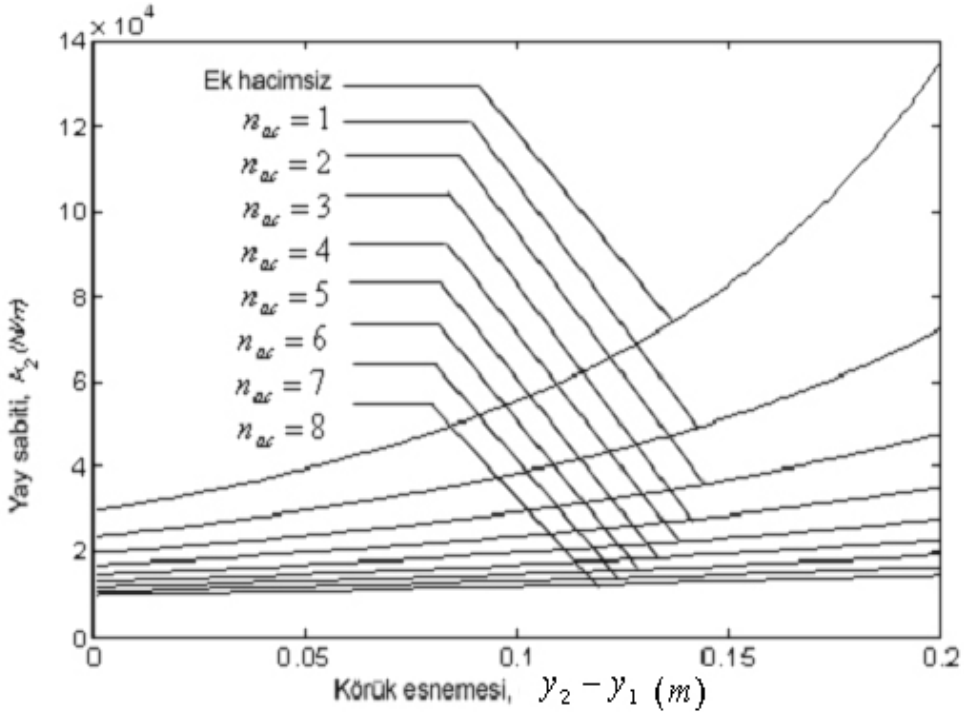
h_{as} = 0.4 m,

V_{ac} = 0.0031416 m^3.

Pratikte, optimum kontrol çözümünün gerektirdiği yay sabiti değerinin aynen elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, aç-kapa mantığı ile çalışan valflar vasıtasıyla, gerektiğinde devreye girerek yada devreden çıkarak, körüğün yay sabitinin, optimum kontrolun çözümünden elde edilen optimum yay sabiti değerine en yakın olan değere ulaşması amacıyla, hava körüğüne sekiz adet özdeş sabit hacim eklenmiştir. Bunun için; körüğün yay karakteristiği hem körüğün tek başına olduğu durum için hem de sabit

hacimlerin devrede olduğu her bir durum için ayrı ayrı hesaplanmış, hesaplanan değerler içinde optimum yay sabitine en yakın olan değerdeki yay sabiti olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.1'de hava körüğün hem tek başına kullanıldığı durum için, hem de sırasıyla birden sekize kadar ek hacimlerin hava körüğüne eklendiği durumlar için elde edilen hava körüğü yay karakteristik eğrileri görülmektedir. Körüğün tek başına kullanıldığı durum için yay sabiti değerlerinin en büyük değerleri aldığı, körüğe eklenen her bir ek hacmin ise hava körüğü sabitini azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.1. Hava körüğünün yay sabitinin, değişik ek hacim sayısı, n_{ac} için körük esnemesine göre değişimi

Askı sistemi parametreleri: Askı sisteminde bulunan kütle, yay ve sönümleyici gibi pasif elemanlarının değerleri ise, sonuçların karşılaştırılması amacıyla, daha önce Ercan (2005) tarafından yapılan bir çalışmada kullanılan aşağıdaki değerlerle aynı alınmıştır [16].

$m_1 = 100$ kg

$m_2 = 1000$ kg

$k_1 = 500000$ N/m

$b_1 = 7000$ N.s/m

$b_2 = 7000$ N.s/m

4.2. Hava Körüklü Pasif ve Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Ölçülmüş Yol Girişlerine Cevapları

Çalışmanın bu bölümünde sistem girişi belirlenirken, Michigan Üniversitesinin Ulaşım Bölümü web sitesindeki *TX90030602* kod numaralı yol profili kullanılmıştır [17]. Bu profil gerçek ölçümlerden elde edilmiştir.

Yol profilinden sistem girişi zaman fonksiyonu olarak elde edilirken, taşıt hızının *V*=90 km/h olduğu kabul edilmiştir. Yol boyunca her bir ölçüm noktası arasındaki yatay uzunluk 0,1524 m'dir. Burada sunulan simülasyonlarda iki ölçüm noktası arasındaki yol profili ise lineer interpolasyon yapılarak bulunmuştur.

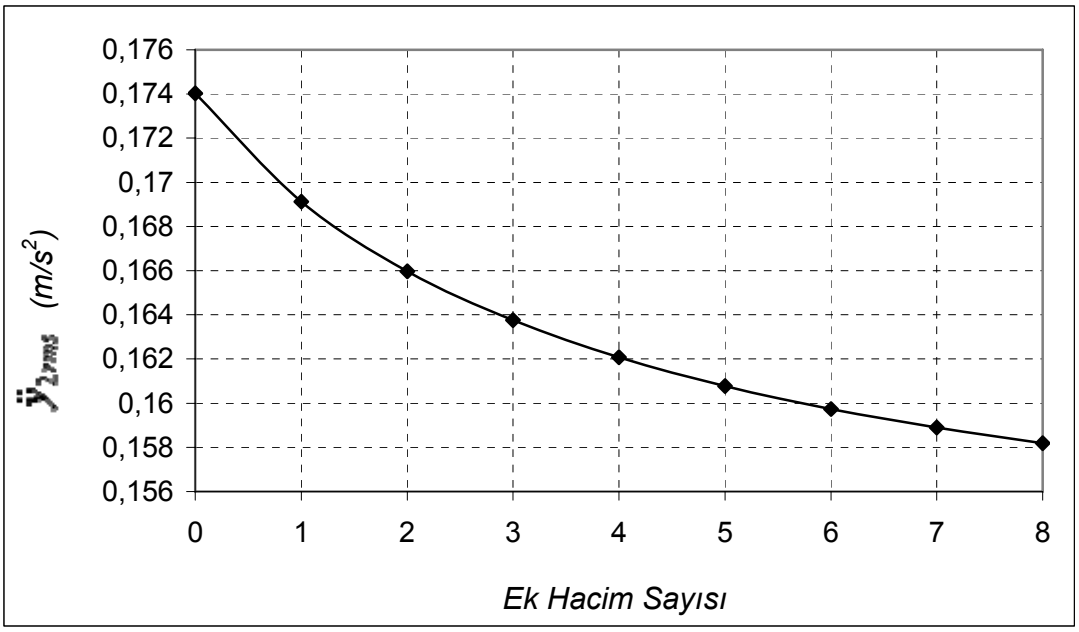
4.2.1. Pasif askı sisteminin performansının incelenmesi

Hava körüğü hacminin pasif sistemin performansına etkisi

Pasif hava körüklü sistemin ölçülmüş yol girişleri etkisi altında sergilediği performansı belirlemek için EK-2'deki MATLAB simülasyon programı kullanılmıştır.

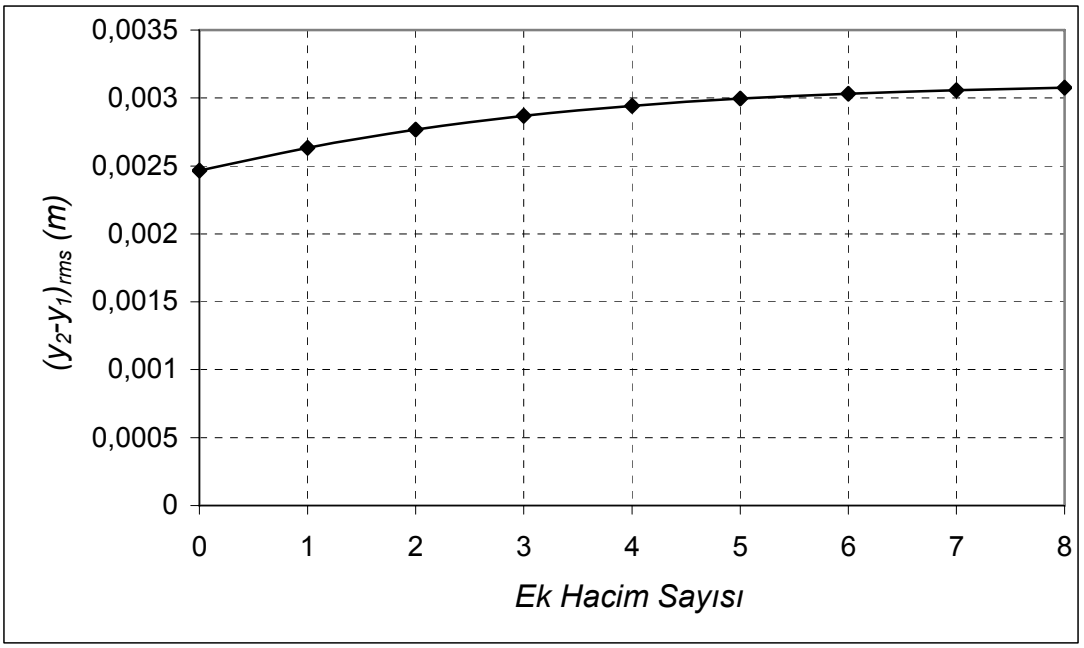
Askı sisteminde kullanılan körüğe sırasıyla birden sekize kadar hacimler eklenmiş ve ek hacimlerin sayısıyla asılı kütle rms ivmesi ve askı sistemi rms esnemelerinin değişimi gözlenmiştir.

Şekil 4.2'de asılı kütle ivmesinin rms değerlerinin körüğe eklenen hacimlerin sayısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Eklenen hacim sayısı arttıkça ivmenin rms değerinde de azalma gözlenmektedir. Bir başka ifade ile hava körüğü yay sertliği azaldıkça asılı kütle ivmesi de azalmaktadır.

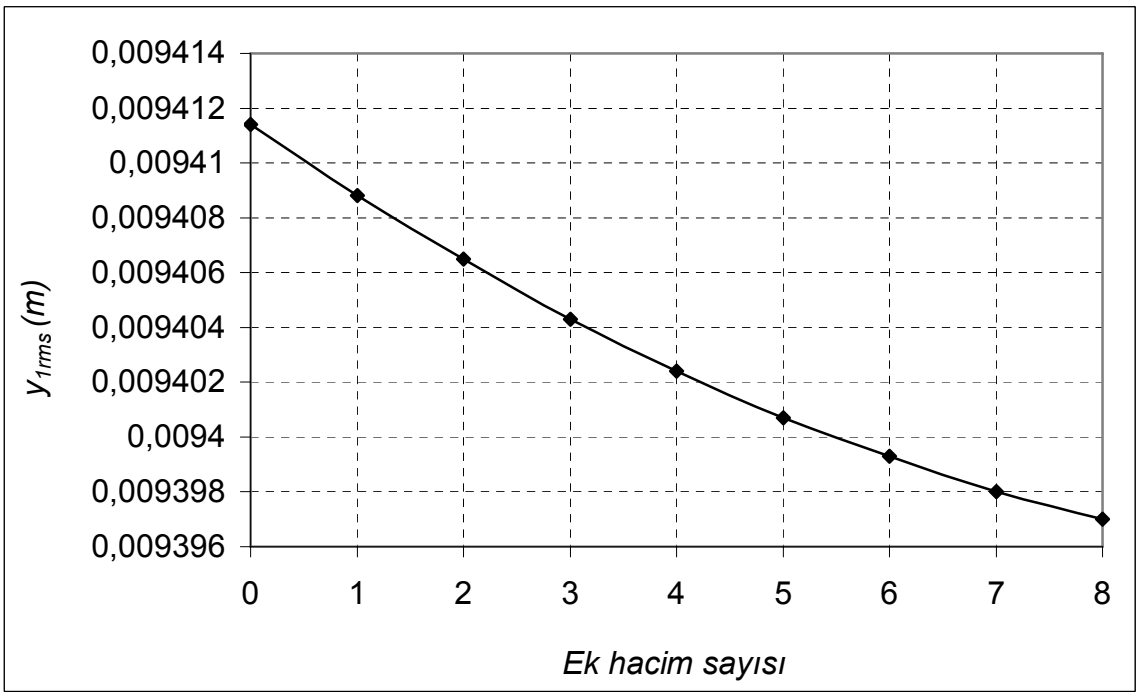


Şekil 4.2. Pasif askı sisteminde ivmenin rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi

Şekil 4.3'de ise körüğe eklenen hacimlerin sayısı arttıkça, yani körüğün yay sertliği azaldıkça askı sistemi esnemesinin rms değerlerinin arttığı görülmektedir.



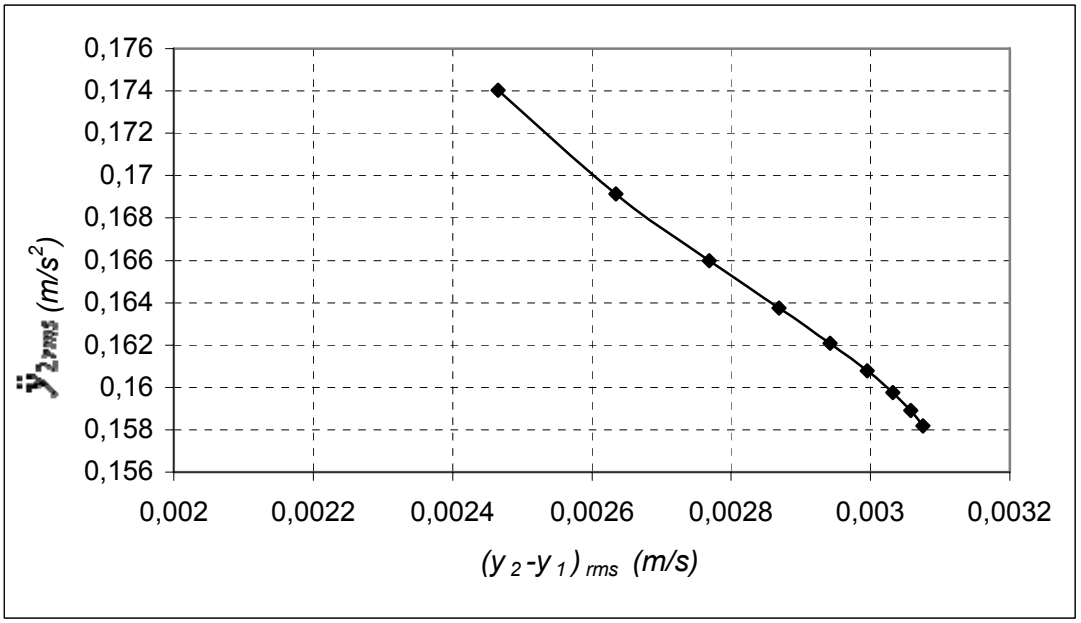
Şekil 4.3. Pasif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi



Şekil 4.4. Pasif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerinin ek hacim sayısıyla değişimi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'den, hava körüğü tek başına kullanıldığında ivmenin rms değeri 0,174 m/s^2 iken askı sistemi esnemesinin rms değerinin 0,0247 m olduğu; hava körüğü ile birlikte sekiz adet ek hacmin kullanıldığı durumda ise ivmenin rms değeri 0,158 m/s^2 iken askı sistemi esnemesi rms değerinin ise 0,0308 m olduğu görülmektedir.

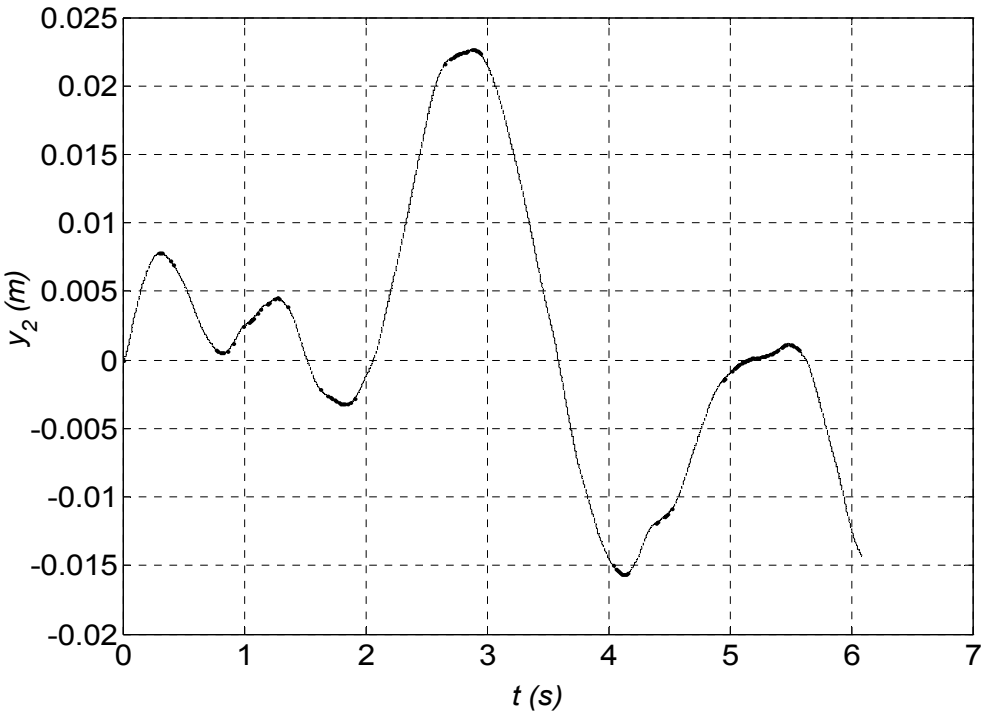
Yani, hava körüğünün hacmindeki artışla birlikte ivmenin rms değerinde % 10,02 azalma olurken, askı sistemi esnemesinin rms değerinde ise % 19,8 artış olmuştur. Buradan hava körüklü askı sistemi tasarımında körüğün yay sabitinin büyük değerlerde seçilmesi halinde askı sistemi esnemelerinin büyük olacağı, küçük değerlerde seçilmesi halinde ise ivmelerin büyük olacağı yani ivmelerle askı sistemi esnemelerin aynı anda minimum değerlere indirilemediği sonucuna varılabilir. Bu iki performans parametresi arasında Şekil 4.5'de görüldüğü gibi uzlaşma eğrisi söz konusudur. Bu eğriye göre ivmenin rms değeri azaltılmak istendiğinde, askı sistemi esnemesinin rms değeri artmakta, yada askı sistemi esnemesinin rms değeri azaltılmak istendiğinde, ivmenin rms değeri artmaktadır.



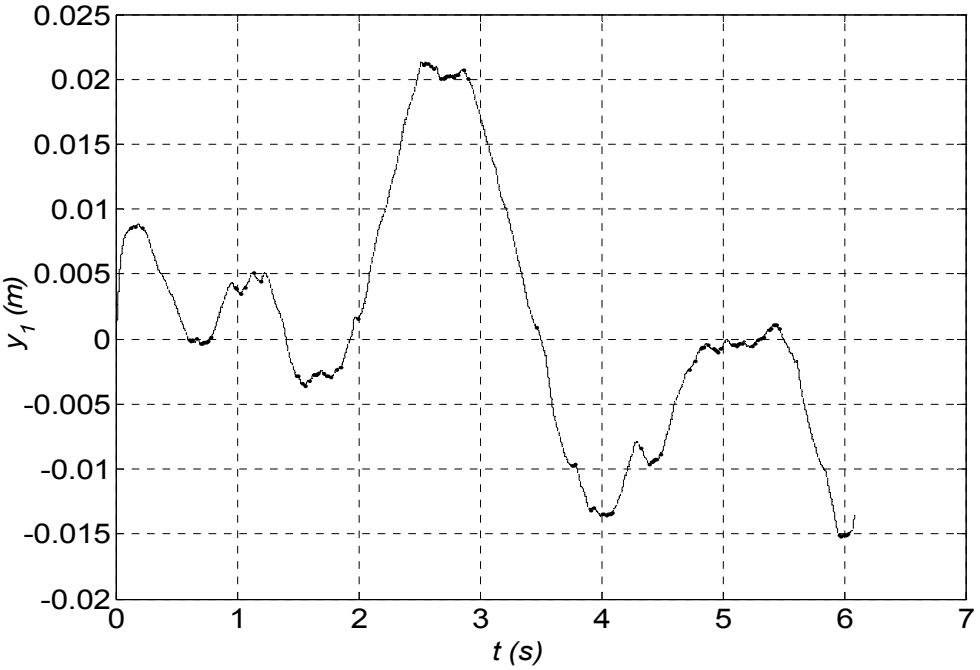
Şekil 4.5. Pasif askı sisteminde ivmeye karşı askı sistemi esnemesinin rms değerlerinin ek hacim sayısıyla değişimi

Hava körüğünün sekiz adet ek hacimle kullanıldığı durumda ivmenin rms değerinin minimum olması ve buna karşılık gelen askı sistemi esnemesinin makul seviyede olması nedeniyle yarı-aktif askı sistemiyle karşılaştırılacak olan pasif sistemde hava körüğü sekiz adet ek hacimle birlikte kullanılmıştır.

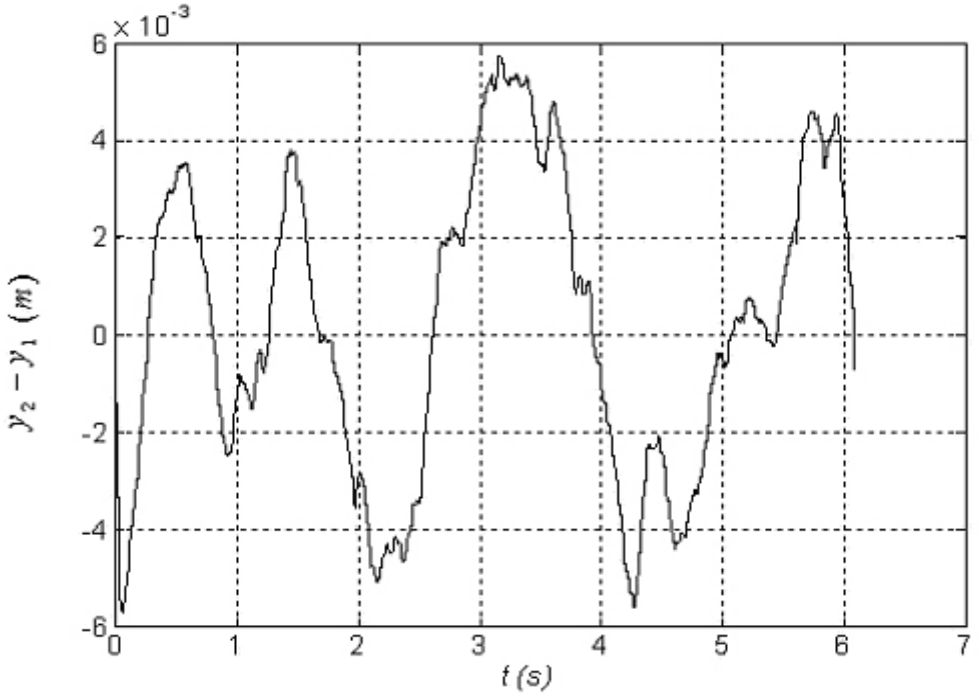
Taşıt sözü edilen yol profilinde 90 km/h hızla giderken, pasif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun, asılı olmayan kütlenin konumunun, askı sistemi esnemesinin, askı sistemi esneme hızının ve körük yay sabitinin zamanla değişme biçimi Şekil 4.6–Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



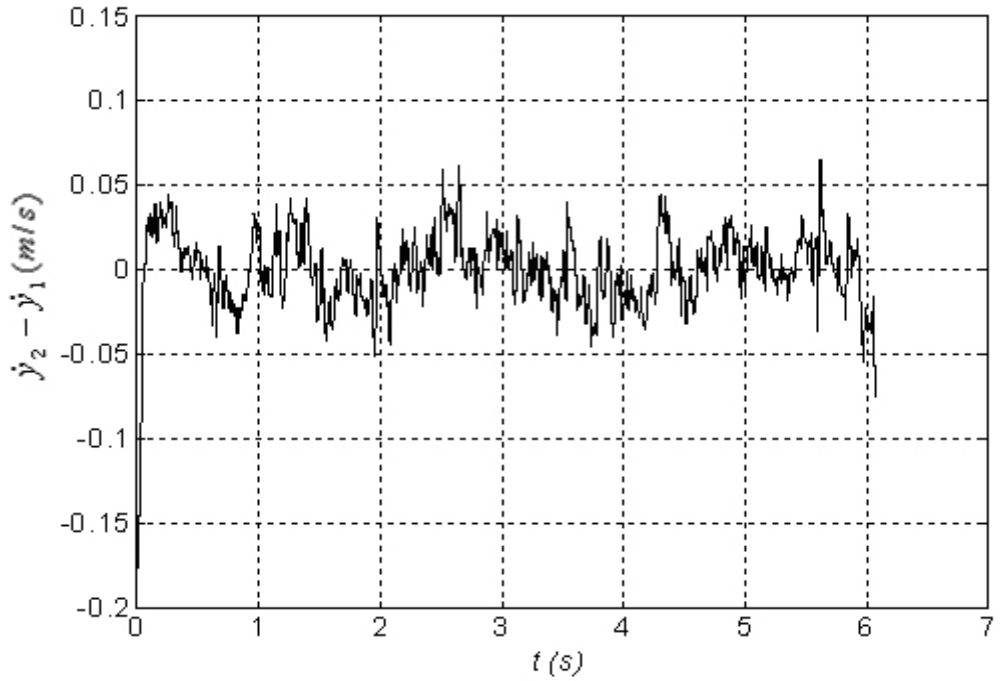
Şekil 4.6. Pasif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi (8 ek hacimli)



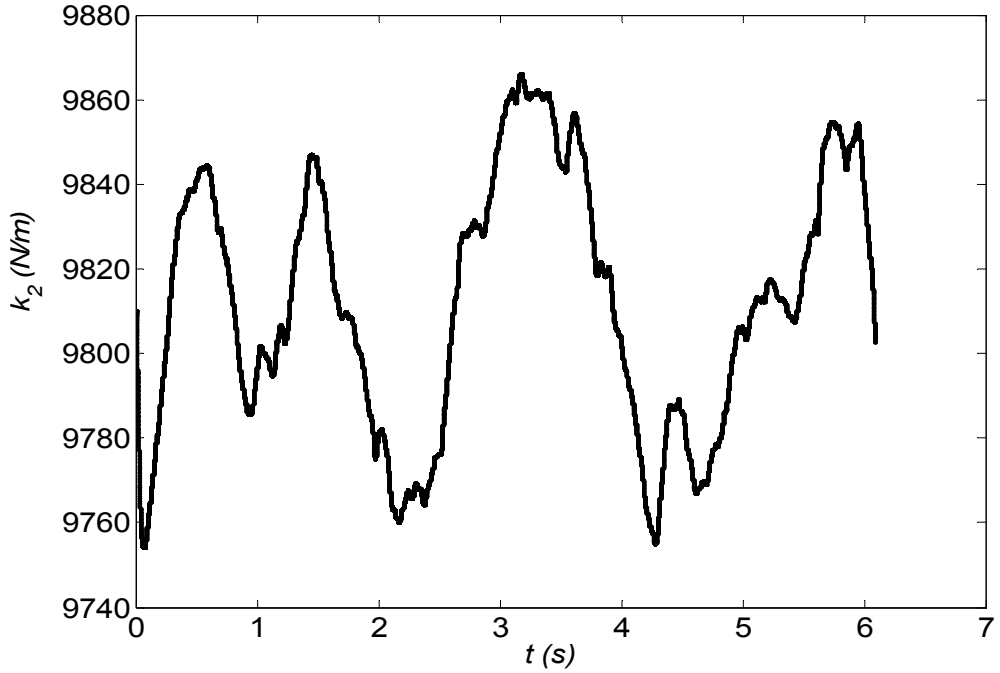
Şekil 4.7. Pasif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi (8 ek hacimli)



Şekil 4.8. Pasif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi (8 ek hacimli)



Şekil 4.9. Pasif askı sisteminde askı sistemi esneme hızının zamanla değişimi (8 ek hacimli)



Şekil 4.10. Pasif askı sisteminde hava körüğünün yay sabitinin zamanla değişimi (8 ek hacimli)

4.2.2. Yarı-aktif askı sisteminin ölçülmüş yol girişlerine cevabı

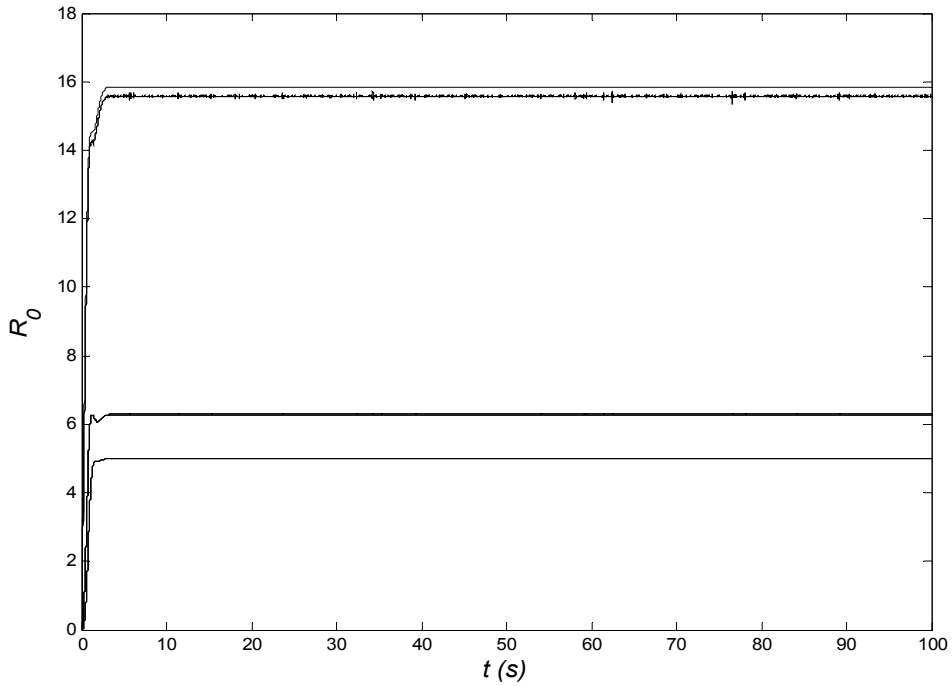
Yarı-aktif sistemde optimum kontrol algoritmasını bulmak için öncelikle Riccati matrisinin elemanları, MATLAB ortamında hazırlanan bir simülasyon programı tarafından çözülmüştür (Bkz. EK-1). Farklı ρ_1 değerleri ve $\rho_2 = 0$ için elde edilen Riccati matrisi elemanları Çizelge 4.1 ve Şekil 4.11'de örnek olarak verilmiştir. Çizelge 4.1'de verilen değerler, Riccati denkleminin çözümünün durağan durumundaki değerlerdir. Elde edilen bu değerler optimum olarak kontrol edilen sistemin dinamik davranışını ifade eden Eş. 3.34'de yerlerine konularak optimum kontrol bulunmuştur.

Hava körüğünün yay sabiti, sınırlı sayıda sabit hacmi körük hacmine ekleyerek değiştirilebileceğinden, optimum kontrolun çözümünden elde edilen değere ulaşmak fiziksel olarak her zaman mümkün değildir. Bu yüzden istenen değere en yakın olan yay sabiti değerini veren ek hacim sayısının seçilmesi için bir algoritma geliştirilmiş ve optimum kontrolun çözümünden elde edilen değere en yakın olan değer yarı-aktif sistemin dinamik davranışını belirleyen Eş. 2.11'de yay sabiti olarak kullanılmıştır.

Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişleri etkisi altındaki performansını belirleyen MATLAB programı EK-3'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Değişik ρ_1 değerleri için Riccati matrisi elemanları (Bkz. Eş. 3.27)

ρ_1	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
1	4	4	9	5	9	15	10	22409	140	12
10^1	24	14	40	15	17	33	18	22456	159	20
10^2	133	44	185	46	30	79	31	22661	207	34
10^3	737	136	896	143	52	200	55	23532	334	59
10^4	3993	399	4366	418	88	514	93	27467	665	99
10^5	20131	1013	19782	1051	142	1217	149	44041	1399	159
10^6	83671	1750	68817	1725	211	2117	224	94868	2316	239



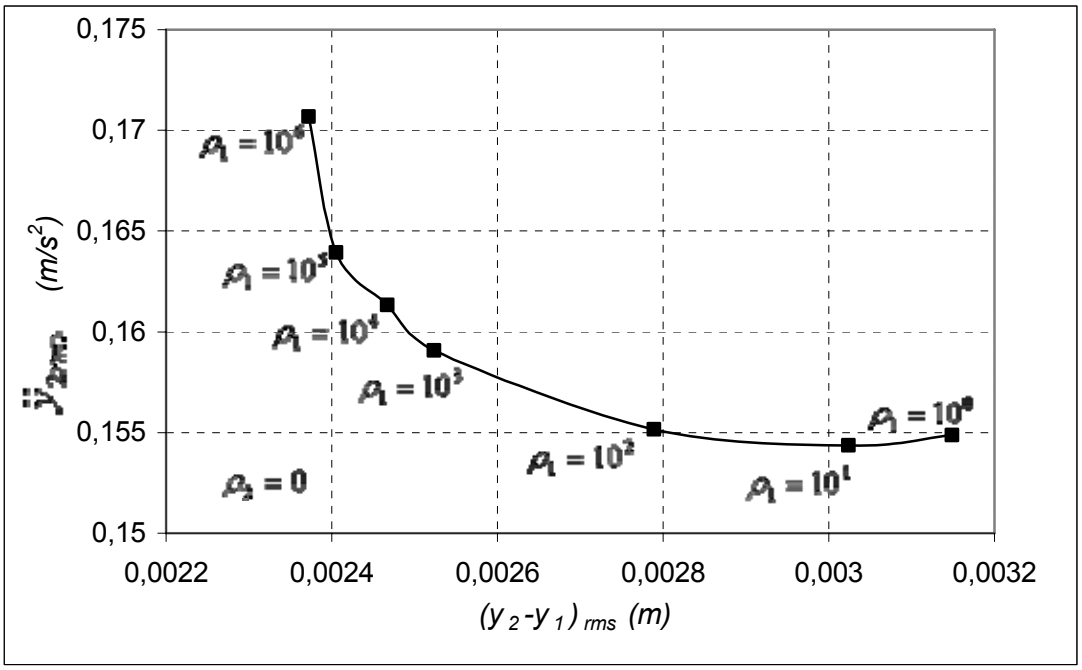
Şekil 4.11. Riccati matrisinin elemanlarının çözümü (ρ_1=10)

Askı sistemi esnemesini sınırlayan ağırlık katsayısı ρ_1' in yarı-aktif askı sisteminin performansına etkisi

EK-3'deki MATLAB programı kullanılarak elde edilen asılı kütle ivmesinin rms değerleri ve bu değerlere karşılık gelen askı sistemi esnemesi rms değerleri, Şekil 4.12'de uzlaşma eğrisi biçiminde sunulmuştur. Lineer sistemler için elde edilen tipik uzlaşma eğrilerinden farklı olarak, bu eğrinin $\rho_1 = 10$ dolayında bir minimum noktası olduğu görülmektedir. Bu özellik bilineer sistemlerde karşılaşılan bir durumdur. Yani uzlaşma eğrisi olarak, eğrinin sadece minimumunun sol tarafında kalan kısmı kullanılmalıdır.

Şekil 4.12 incelendiğinde, askı sistemi esnemesini sınırlayan ağırlık katsayısı ρ_1'in farklı değerleri için elde edilen çözümlerde, ρ_1'in artışıyla birlikte asılı kütle ivmesinin rms değerinde ciddi artışların olduğu buna karşılık askı

sistemi esnemesinin rms değerlerinde ise ciddi azalmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Yarı-aktif askı sisteminde asılı kütle ivmesinin rms değerine karşı askı sistemi esnemesinin rms değerinin ρ_1 ile değişimi

Örneğin, ivmenin rms değeri ρ_1=10 iken 0,15436 m/s^2 olduğu halde, ρ_1=10^6 iken 0,17069 m/s^2 olmuş; askı sistemi esnemesinin rms değeri ise, ρ_1=10 iken 0,00302 m olduğu halde, ρ_1=*10*^{6} iken 0,00237 m olmuştur. İvmenin rms değerinde % 9,57'lik bir artış olurken askı sistemi esnemesinin rms değerinde % 27,47'lik bir azalma olmuştur.

Asılı olmayan kütle ile yol arasındaki uzaklığın dinamik değişimi y_1 teker lastiğinin esnemesidir. Çizelge 4.2'de değişik ρ_1 değerleri ve $\rho_2 = 0$ için bulunan asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi asılı olmayan kütlenin konumunun rms değeri ρ_1'in değerlerinden çok az etkilenmektedir. Minimum rms ivme veren ρ_1=10 için

asılı olmayan kütlenin konumunun rms değeri kabul edilebilir bir düzeyde ve 0,009397 m'dir.

Çizelge 4.2. Değişik ρ_1 değerleri için asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerleri

ρ_1	ρ_2	y_{1rms} (m)
1	0	0,0093978
10^1	0	0,0093966
10^2	0	0,0093981
10^3	0	0,0094001
10^4	0	0,0094018
10^5	0	0,0094042
10^6	0	0,0094089

Sürüş konforu açısından, askı sistemlerinden beklenen en temel görev; askı sistemi esnemelerini kabul edilebilir seviyelerde tutarak ivmeleri minimum yapmasıdır. Şekil 4.12'de ivmenin minimum olduğu ρ_1 değeri için askı sistemi esnemesinin de kabul edilebilir düzeyde olmasından dolayı yarı-aktif askı sisteminin performansı diğer askı sistemlerininkiyle karşılaştırılırken minimum rms ivme değerini veren ρ_1=*10* değeri kullanılmıştır.

Asılı olmayan kütlenin konumunu sınırlayan ağırlık katsayısı ρ_2 nin yarı-aktif askı sisteminin performansına etkisi

Yarı-aktif askı sisteminde ivme ve askı sistemi esnemelerini kabul edilebilir seviyelerde tutarken, asılı olmayan kütlenin konumunun da kabul edilebilir seviyelerde tutulması amacıyla performans indisi içerisine asılı olmayan kütlenin konumunu sınırlayan ağırlık katsayısı ρ_2 de dâhil edilmiştir.

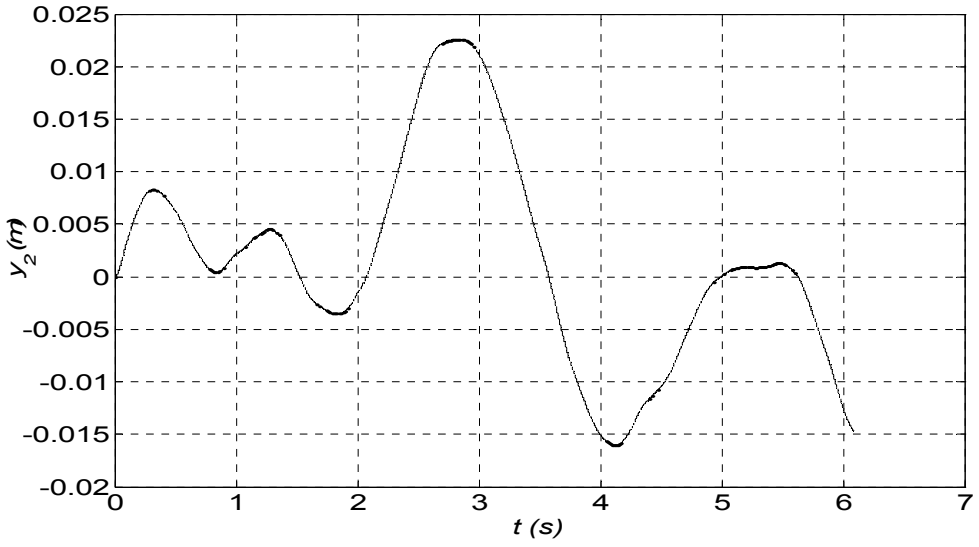
Rms ivmeyi minimum yapan ρ_1=10 için, farklı ρ_2 değerlerine karşılık gelen asılı olmayan kütlenin konumunun rms değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelgedeki değerlerden ρ_2'nin artmasının asılı olmayan kütlenin konumunun değişimini etkilemediği ve asılı olmayan kütlenin konumunun değişiminin ρ_2'nin her değeri için kabul edilebilir düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, yarı-aktif askı sisteminin performansı diğer askı sistemlerininkiyle karşılaştırılırken, ivmenin rms değerini minimum yapan ρ_1=10 değeri ile birlikte ρ_2=0 değeri kullanılmıştır.

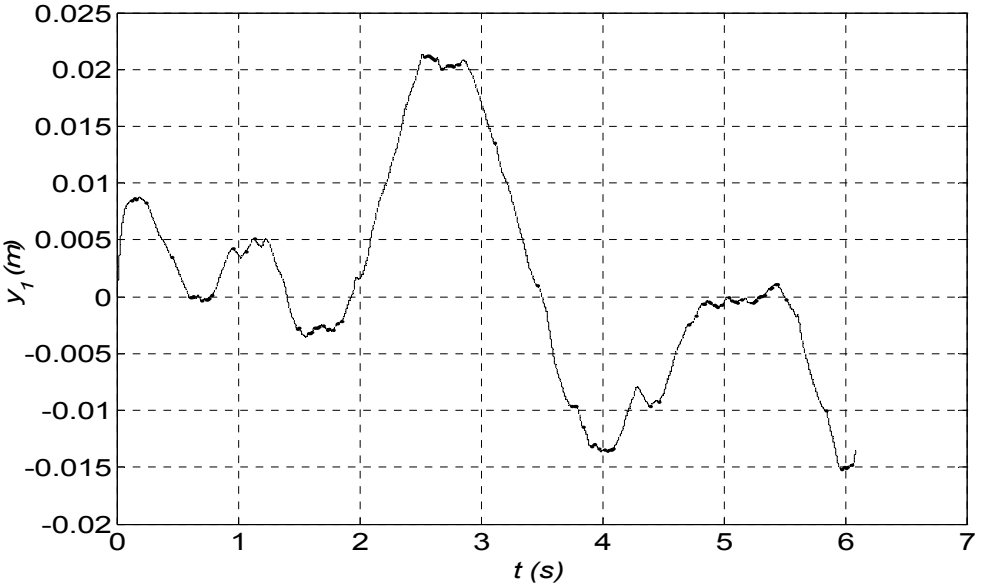
Çizelge 4.3. Yarı-aktif askı sisteminde ivme, askı sistemi esnemesi ve asılı olmayan kütlenin konumu değerleri

ρ_1	ρ_2	$\ddot{y}_{2rms}$ (m/s^2)	$(y_2-y_1)_{rms}$ (m)	y_{1rms} (m)
10	0	0,15436	0,00302	0,0093966
10	10^2	0,15437	0,00303	0,0093966
10	10^4	0,15645	0,00332	0,0093989
10	10^6	0,16945	0,00357	0,0094083

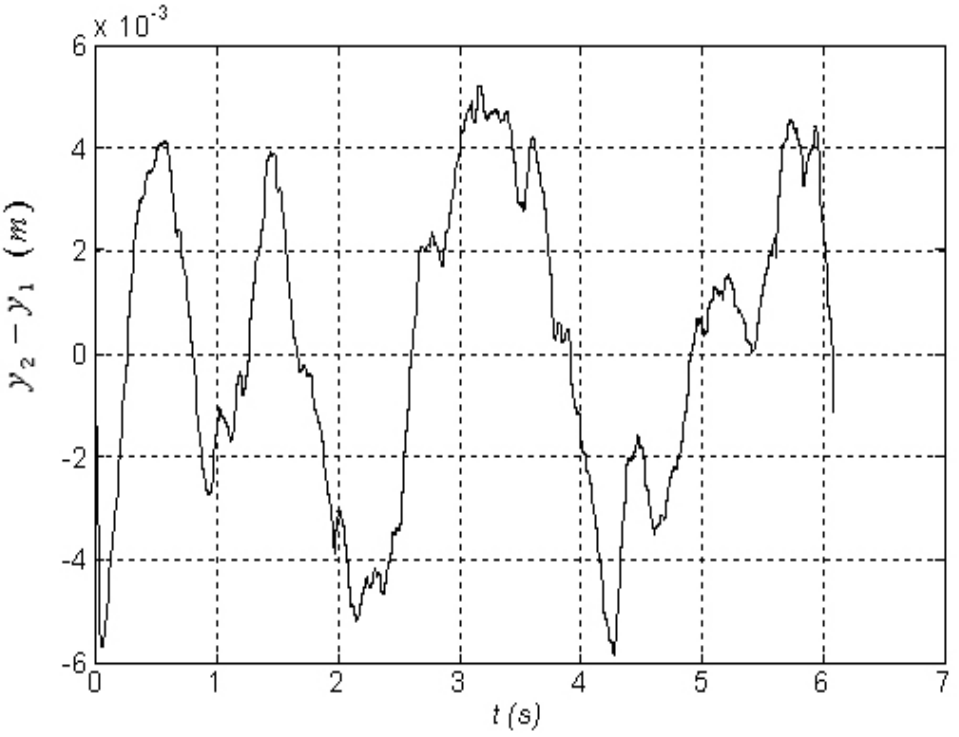
Taşıt 90 km/h hızla yol profili üzerinde giderken, optimum yarı-aktif sistemde asılı kütlenin konumunun, asılı olmayan kütlenin konumunun, askı sistemi esnemesinin, esneme hızının ve körük yay sabitinin zamanla değişimleri Şekil 4.13–Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



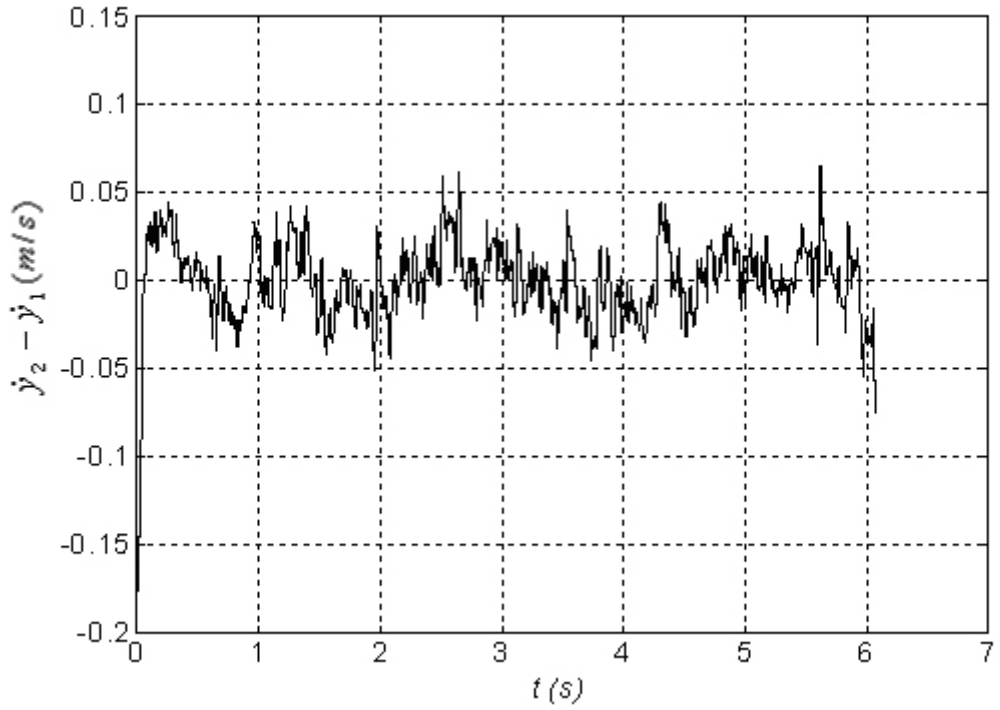
Şekil 4.13. Yarı-aktif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi



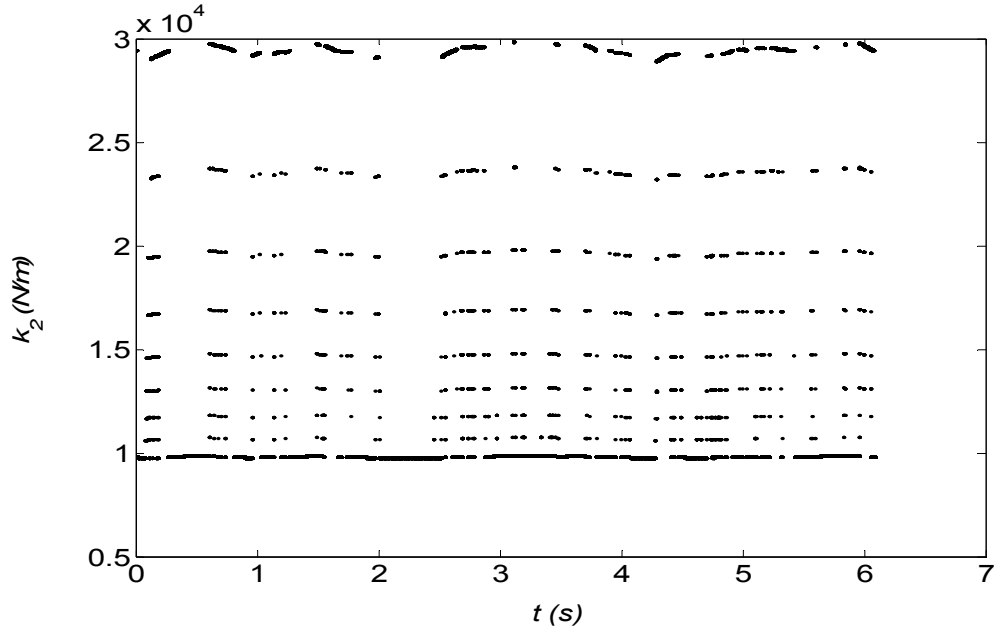
Şekil 4.14. Yarı-aktif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi



Şekil 4.15. Yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi



Şekil 4.16. Yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esneme hızının zamanla değişimi



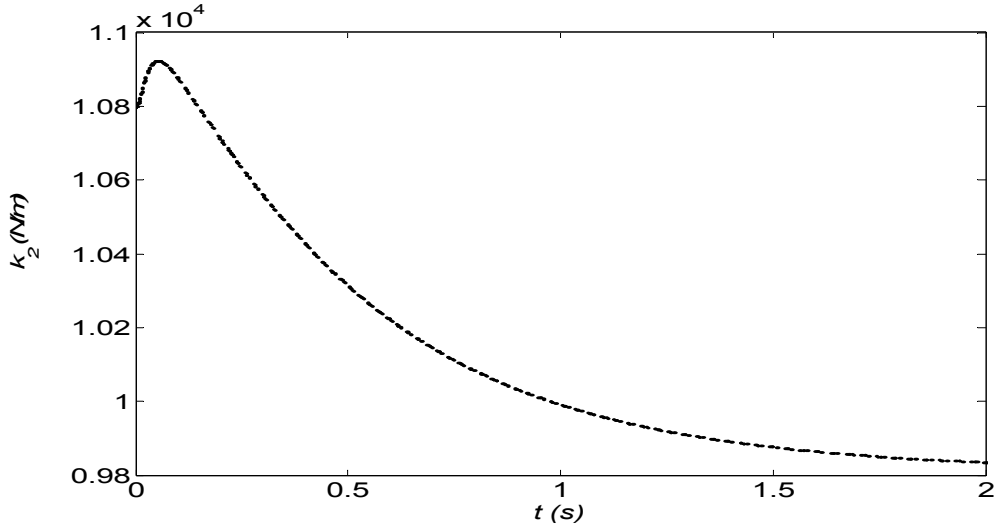
Şekil 4.17. Yarı-aktif sistemde hava körüğünün yay sabiti değerinin zamanla değişimi

4.3. Hava Körüklü Pasif ve Optimum Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Başlangıç Koşullarına Cevaplarının Karşılaştırılması

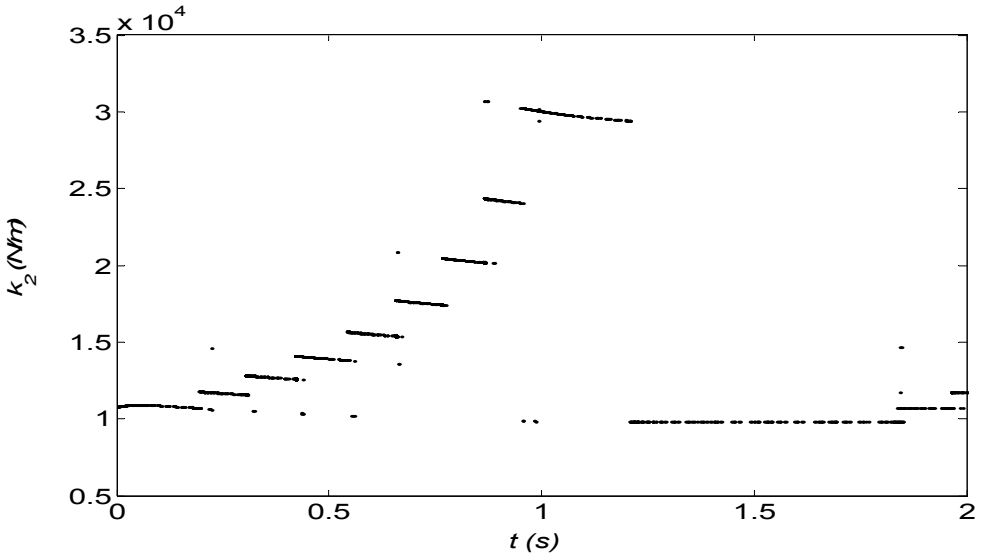
Pasif ve yarı-aktif sistemlerin başlangıç koşullarına karşı davranışı incelenirken, başlangıç koşulu vektörü olarak, $\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$ kullanılmıştır.

Çözümün elde edilmesi için MATLAB'de ODE 45 fonksiyonu kullanılarak bir simülasyon programı hazırlanmış olup, çözüm süresi olarak *t*=2 s alınmıştır (Bkz. EK-4 ve EK-5).

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da pasif ve yarı-aktif sistemlerin körük yay sabitlerinin zamanla değişimleri görülmektedir. Şekillerdeki eğriler incelendiğinde, pasif sistemde hava körüğü yay sabiti değerinin askı sistemi esnemesine bağlı olarak yaklaşık 11000 N/m'den 10000 N/m'ye kadar düşüş gösterdiği; yarı aktif sistemde ise optimum kontrolun çözümünden elde edilen değerlere yakın değerlerde yay sabitleri kullanılmakta olduğu ve yay sabiti değerinin çözüm boyunca değişik sayıda ek hacmin kullanılması ile yaklaşık olarak 11 000 N/m ile 35 000 N/m arasında değiştiği görülmektedir.

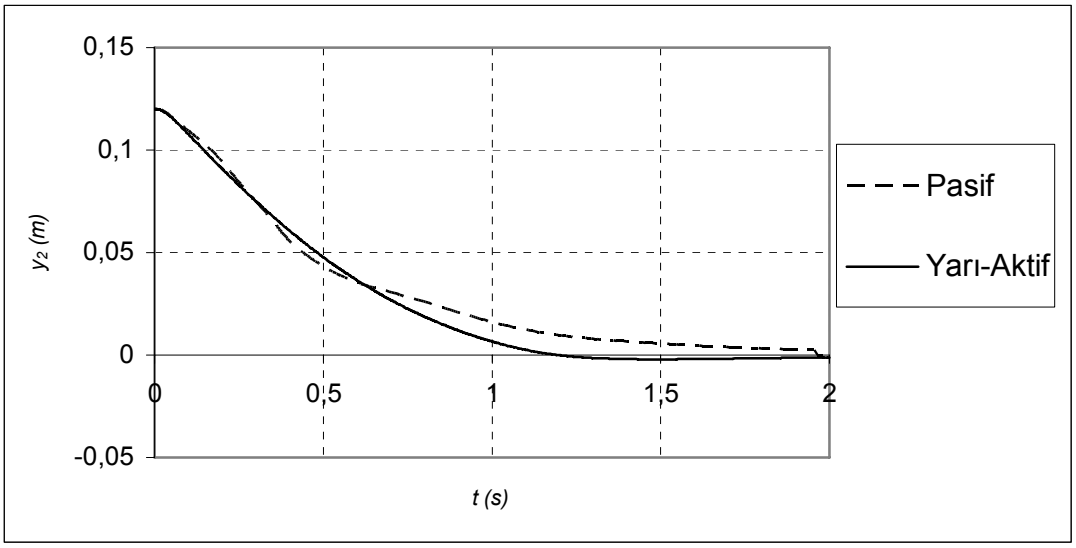


Şekil 4.18. Pasif askı sisteminde hava körüğünün yay sabiti değerinin zamanla değişimi

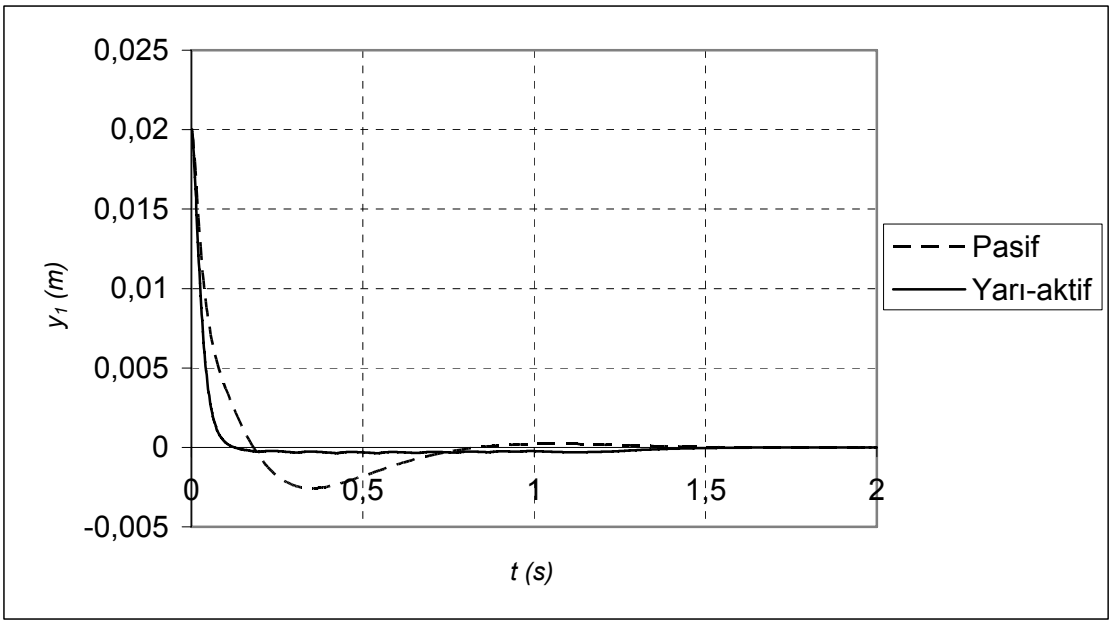


Şekil 4.19. Yarı-aktif askı sisteminde hava körüğünün yay sabiti değerinin zamanla değişimi

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de pasif ve yarı-aktif askı sistemi kullanılan sistemlerde asılı kütlenin ve asılı olmayan kütlenin konumlarının zamanla değişimleri görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi yarı-aktif sistemde asılı ve asılı olmayan kütlelerin salınımları, pasif sistemdekilere göre daha azdır.

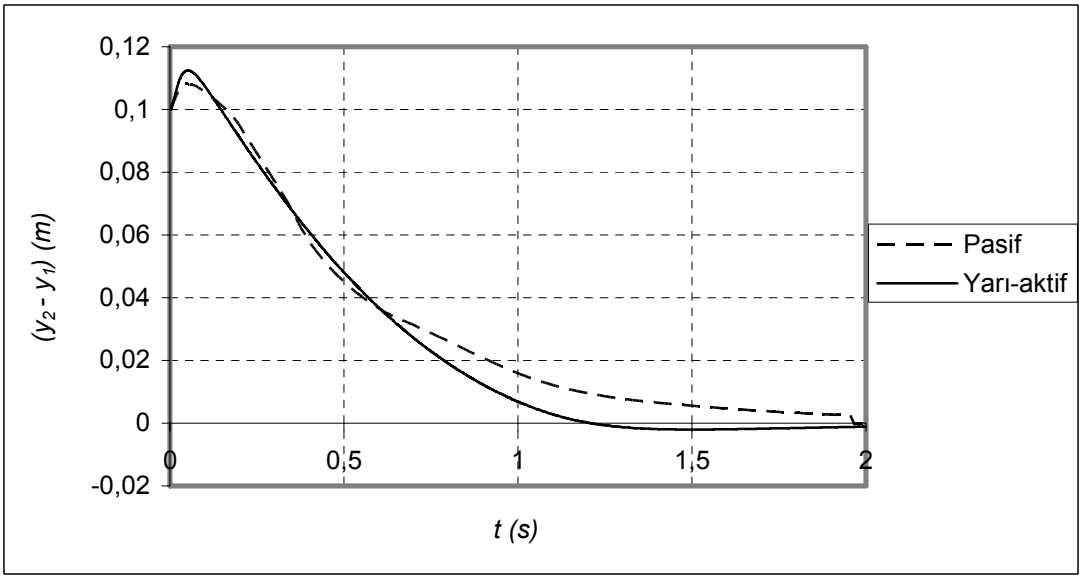


Şekil 4.20. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde asılı kütlenin konumunun zamanla değişimi



Şekil 4.21. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde asılı olmayan kütlenin konumunun zamanla değişimi

Şekil 4.22'de pasif ve yarı-aktif sistemlerin askı sistemi esnemeleri verilmiştir. Yarı-aktif sistemin esnemesinde daha az salınımlar görülmektedir. Yarı-aktif askı sisteminin esnemesi son değerine daha erken varmaktadır.



Şekil 4.22. Pasif ve yarı-aktif askı sisteminde askı sistemi esnemesinin zamanla değişimi

Sonuç olarak, hava körüğü yay sabiti değerlerinin yarı-aktif olarak kontrol edilmesinin sistemin geçici cevabında kısmi iyileşmelere yol açtığı söylenebilir.

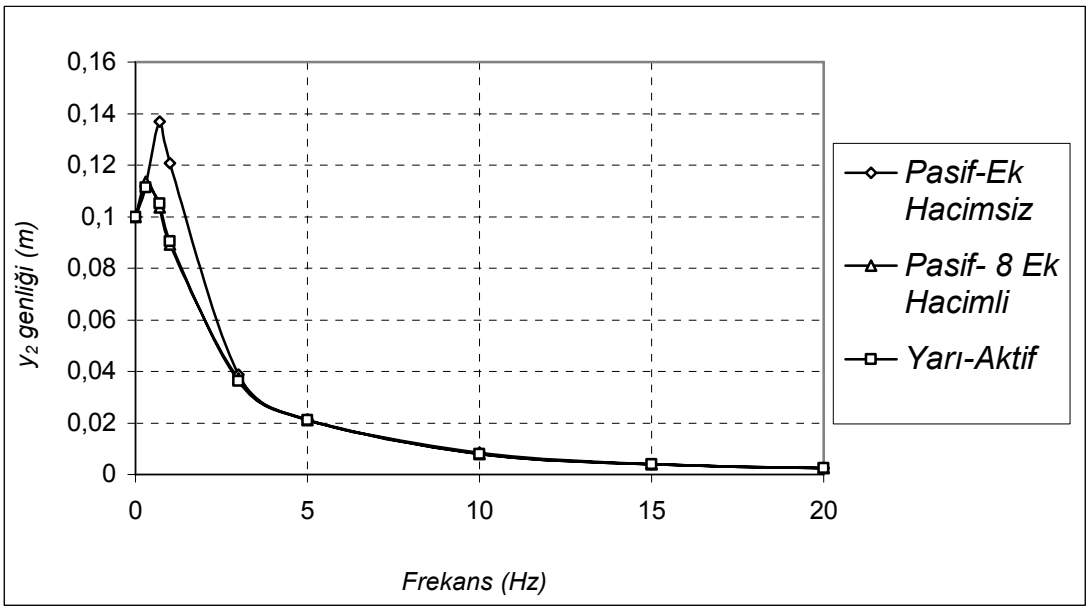
4.4. Hava Körüklü Pasif ve Yarı-Aktif Askı Sistemlerinin Frekans Cevaplarının Karşılaştırılması

Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin frekans cevapları incelenirken, sisteme 0,1 m genlikli ve 0-20 Hz değerleri arasındaki değişik frekanslarda sinüzoidal girişler uygulanmış ve bu frekanslara karşı ivme, askı sistemi esnemesi ve asılı kütle yer değiştirmesi genliklerinin frekansla değişimleri incelenmiştir.

Çözümün elde edilmesinde MATLAB'da bir simülasyon programı hazırlanmıştır (Bkz. EK-6 ve EK-7).

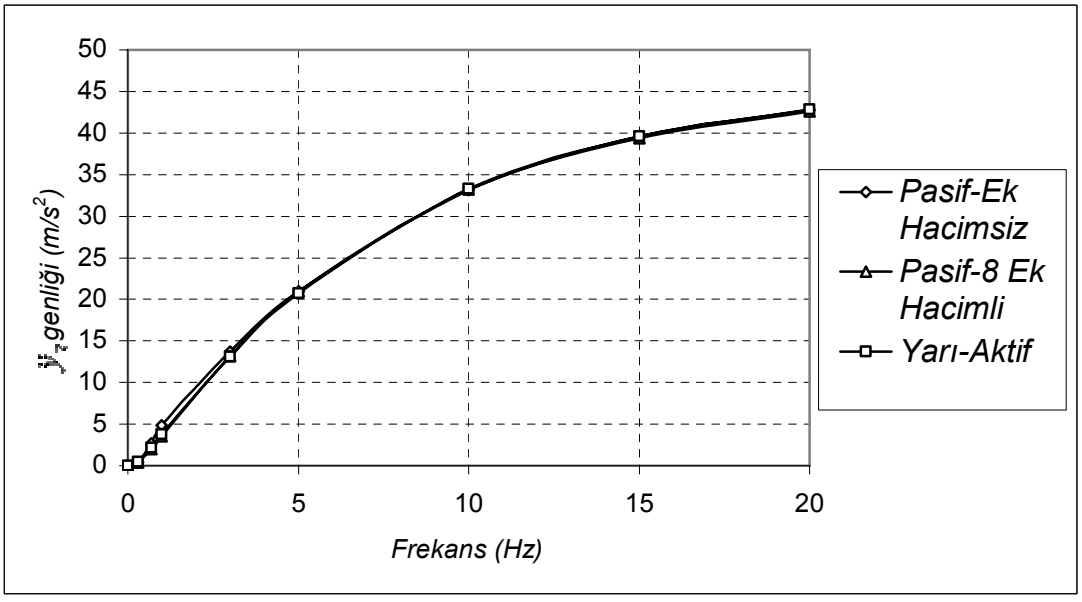
Şekil 4.23-Şekil 4.25'de yarı-aktif askı sistemi için, hava körüğünün ek hacim olmadan ve hava körüğünün sekiz adet ek hacimle kullanıldığı durum için olmak üzere; asılı kütle konumu, asılı kütle ivmesi ve askı sistemi esneme genliklerinin frekansla değişimi görülmektedir.

Şekil 4.23'de hava körüğüne sekiz adet ek hacim eklendiği durumda askı sistemi esneme genliklerinin yarı-aktif askı sistemi esneme genliklerininki ile hemen hemen aynı olduğu, buna karşılık hava körüğünün tek başına kullanıldığı durumda esneme genliklerinin 3 Hz'nin altındaki frekanslar için daha büyük değerler aldığı görülmektedir.



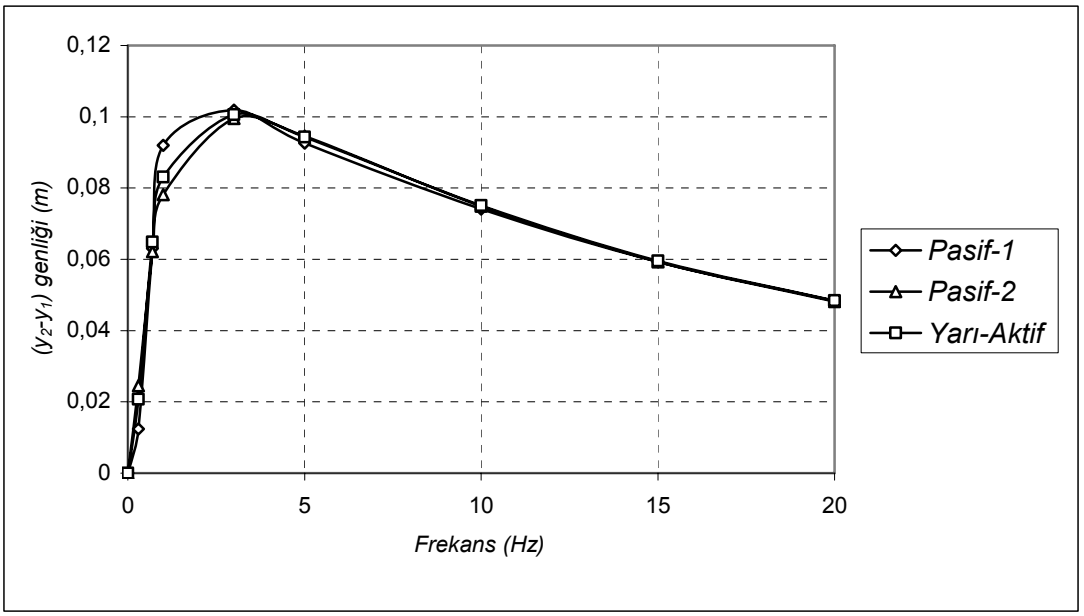
Şekil 4.23. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde asılı kütle konum genliğinin frekansla değişimi

Asılı kütlenin konum genliği azalmaları düşük frekanslarda olduğu için pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin ivme genlikleri arasındaki farklar daha azdır (Bkz. Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde asılı kütle ivme genliğinin frekansla değişimi

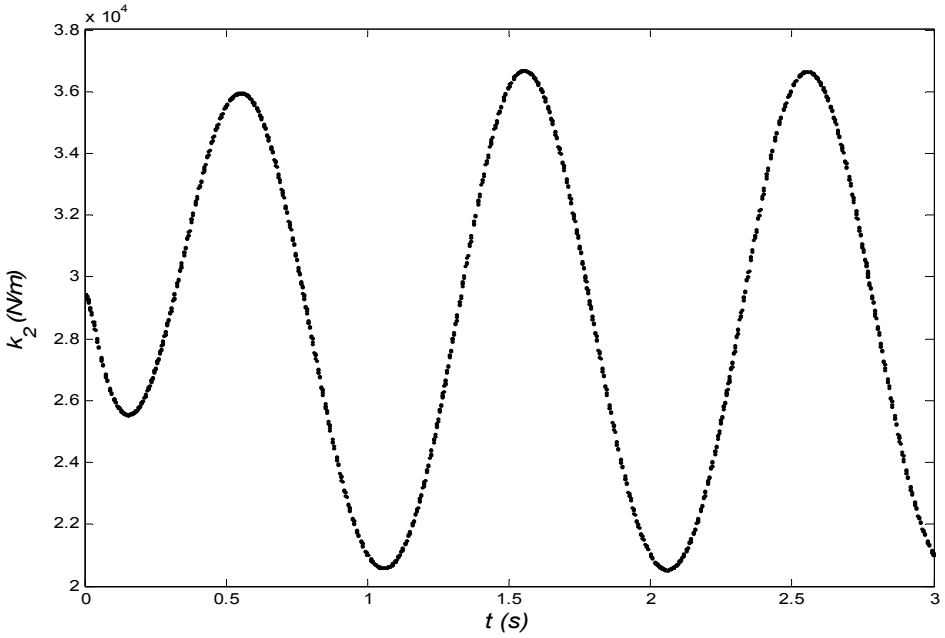
Şekil 4.25 incelendiğinde ise, yarı-aktif ve 8 ek hacimli pasif sistemin düşük frekanslarda daha düşük askı sistemi esneme genlikleri verdikleri, yüksek frekanslarda ise genliklerin ek hacimsiz pasif sisteminkilerle aynı olduğu söylenebilir.



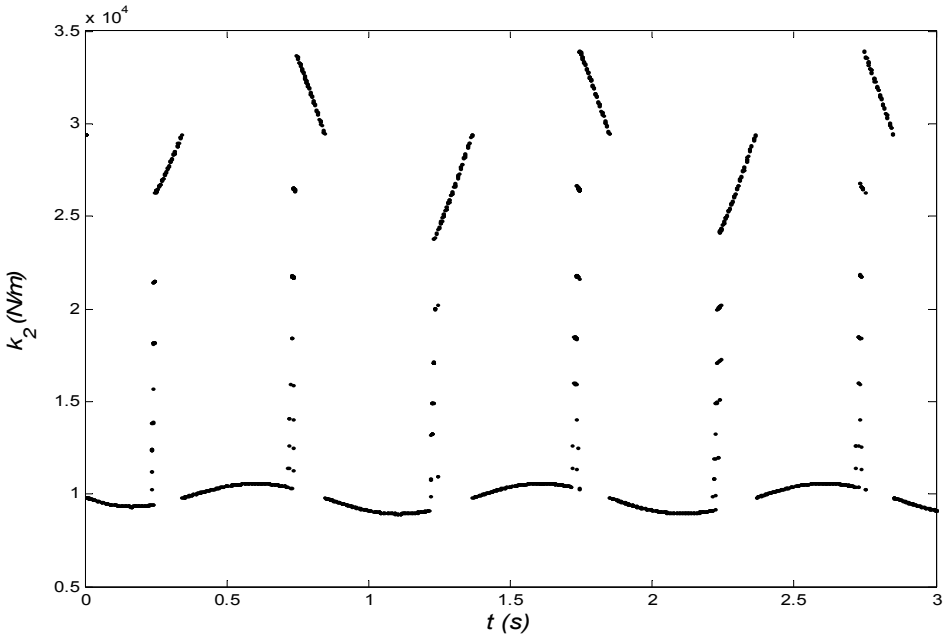
Şekil 4.25. Pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esneme genliğinin frekansla değişimi

Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, pasif askı sisteminde hava körüğü hacminin yeterince büyük seçilmesi durumunda askı sistemi frekans cevabının yarı-aktif askı sistemi frekans cevabına oldukça yakın olduğu söylenebilir.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de 1 Hz zorlama frekansı için 8 ek hacimli pasif ve yarı-aktif sistemlerde hava körüğü yay sabitinin zamanla değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.26. Sinüzoidal yol girişlerine zorlanmış 8 ek hacimli pasif askı sisteminde hava körüğü yay sabitinin zamanla değişimi (f =1 Hz)



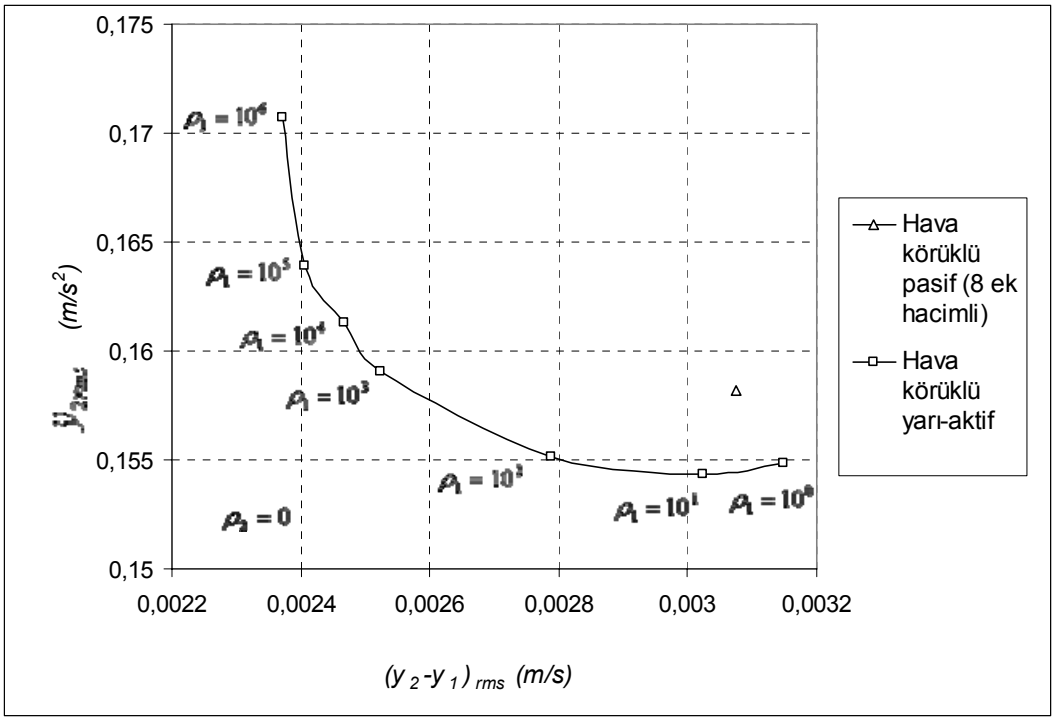
Şekil 4.27. Sinüzoidal yol girişlerine zorlanmış yarı-aktif askı sisteminde hava körüğü yay sabitinin zamanla değişimi (f =1 Hz)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hava körüklü pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinin performansları incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Hava körüklü pasif ve yarı-aktif sistemin performansları karşılaştırılırken taşıt hızı olarak *V=90* km/h ile yarı-aktif sistemde ivmenin rms değerinin minimum olduğu ρ_1=10 ve ρ_2=0 değerleri ve pasif askı sisteminde ise ek hacim sayısı olarak ivmenin minimum rms değerini veren $n_{ac} = 8$ kullanılmıştır.

Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1'de hava körüklü pasif ve optimum yarı-aktif askı sistemleri için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Yarı-aktif askı sisteminin yol profili girişine cevabında, en düşük rms ivme değerinde pasif sisteminkine göre yaklaşık olarak % 2,42'lik bir iyileşme gözlenirken, askı sistemi esnememelerinin rms değerinde %1,50'lik bir iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 5.1. Yarı-aktif askı sisteminde ivmeye karşı askı sistemi esnemesinin ρ_1 değeriyle değişimi ile pasif askı sistemi minimum rms ivmesi

Çizelge 5.1. Hava körüklü pasif ve yarı-aktif sistemlerinde minimum ivme ve askı sistemi esnemelerinin rms değerleri

	RMS $\ddot{y}_2$ (m/s^2)	RMS (y_2-y_1) (m)
Pasif sistem	*0,15818*	*0,00307*
Optimum yarı-aktif sistem	*0,15436*	*0,00302*
Performans iyileşmesi (%)	*2,41*	*1,50*

Yarı-aktif askı sisteminin performansındaki iyileşmenin sınırlı kalmasının nedeni Şekil 4.10 ve Şekil 4.17 incelendiğinde de görülmektedir. Zira Şekil 4.10'da, pasif sistemde hava körüğü yay sabiti değerlerinin 9760–9860 (N/m) değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Buna karşılık Şekil 4.17'de, optimum yarı-aktif sistemde kullanılan yay sabiti değerlerinin, zaman zaman ara ve üst sınır değerlerini alsa da, genelde alt sınır değerleri, yani pasif sistemde kullanılan değerleri aldığı görülmektedir.

Pasif sistemde kullanılan körüğün hacmi ek hacimler kullanılarak yeterince büyültüldüğü takdirde, pasif ve yarı-aktif sistemler arasındaki performans farkı çok azdır. Bu kadar az bir performans iyileştirmesi, yarı-aktif sistemin getireceği sistem karmaşıklığı ve ek maliyetleri haklı kılamaz.

Asılı kütle ile asılı olmayan kütle arasında yeterince yumuşak bir olduğu takdirde yüksek frekanslı girişler asılı kütleden yeterince izole edilebilmektedir. Körük ise esas olarak enerjiyi depolayan bir yay özelliği gösterdiğinden, enerjiyi ısıya dönüştürme özelliği ise içindeki gazın ısınarak çevreye bir miktar ısı yaymasıyla sınırlı kaldığından salınımların sönümlenebilmesine fazla bir katkıda bulunamamaktadır.

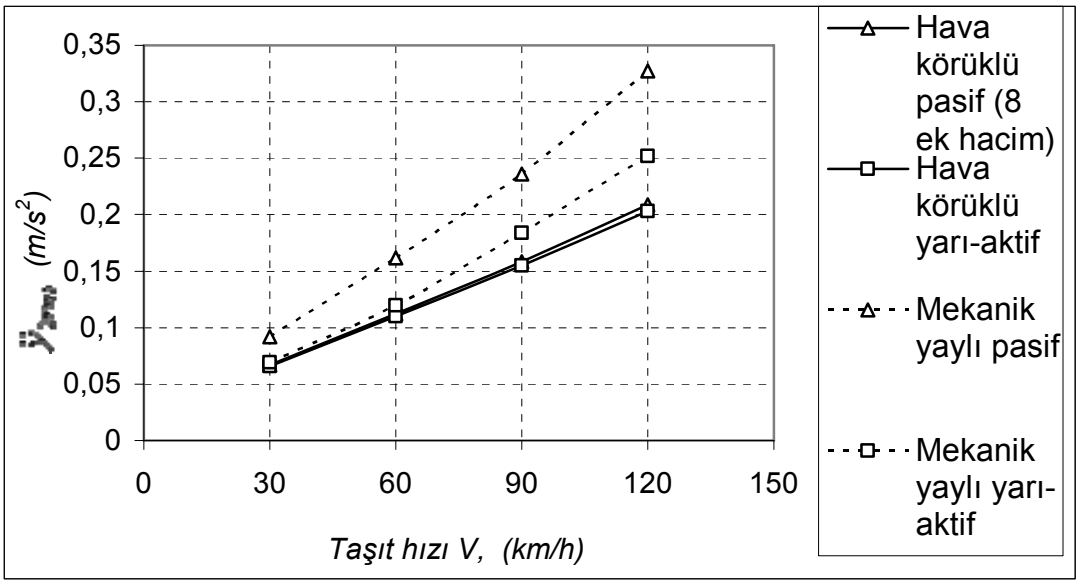
Bu tezdeki hesaplamalarda kullanılan kütle, sönümleyici, lastik esnekliğini modelleyen yayın sabiti ve yol girişleri daha önce Ercan (2005) tarafından ¼ taşıt modeli kullanılarak yapılan bir çalışmadaki değerlerle bire bir aynıdır

[16]. Bu yüzden bu tezde hava körüklü pasif ve yarı-aktif sistemler için elde edilen sonuçlar, Ercan (2005) tarafından kullanılan mekanik yaylı pasif ve mekanik yaylı, değişken sönümlü yarı-aktif askı sistemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılabilir [16].

Yukarıda sözü edilen dört sistem için asılı kütle ivmesi ve askı sistemi esnemeleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de hıza bağlı olarak grafik halinde sunulmuştur.

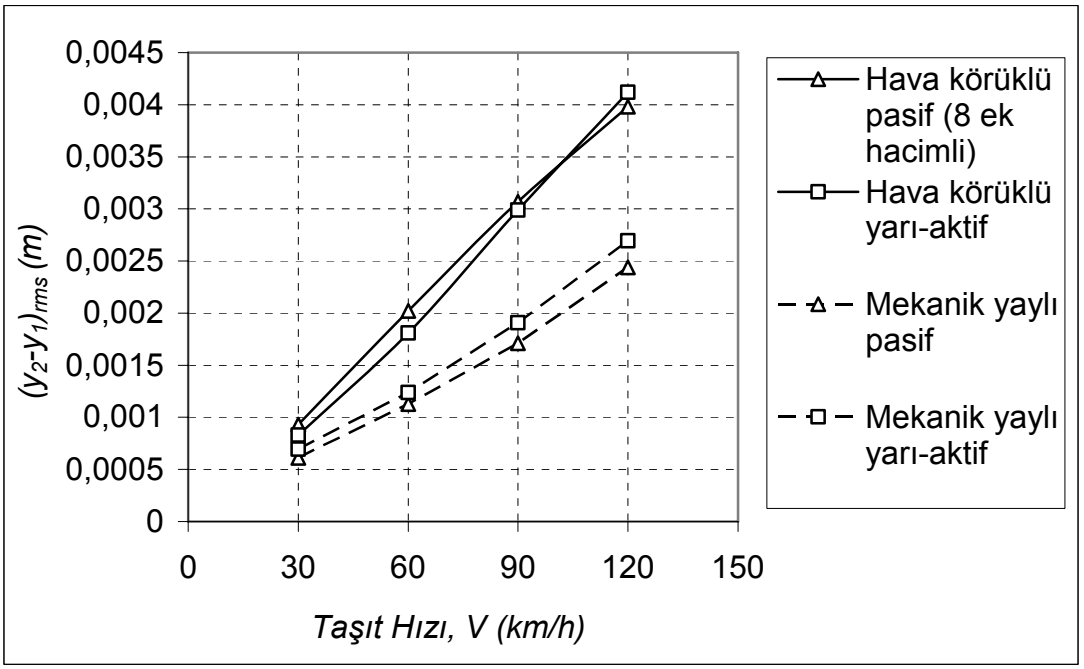
Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'deki eğriler incelendiğinde bütün sistemler için hem ivme, hem de askı sistemi esnemesinin taşıt hızıyla arttığı görülmektedir.

Şekil 5.2'den görüldüğü gibi, mekanik yaylı pasif ve yarı-aktif askı sistemlerindeki ivmeler, hava körüklü pasif ve yarı-aktif askı sistemlerindeki ivmelere göre daha yüksektir. Diğer taraftan, hava körüklü askı sistemlerinde yarı-aktif sistemin pasif askı sistemine göre iyileşmesi çok sınırlı kalırken, mekanik yaylı ve değişken sönümlü yarı-aktif sistemde mekanik yaylı pasif sisteme göre iyileşmenin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. Hava körüklü ve mekanik yaylı pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde ivmenin rms değerinin taşıt hızıyla değişimi

Şekil 5.3'deki eğriler incelendiğinde, hava körüklü pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esnemelerinin, mekanik yay kullanan askı sistemlerininkine göre daha büyük değerlerde, fakat kabul edilebilir seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bunların yanı sıra, hem hava körüklü hem de fiziksel yaylı askı sistemlerinde yarı-aktif sistemlerin esnemelerinde pasif sistemlerinkine göre azalmanın sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.3. Hava körüklü ve mekanik yaylı pasif ve yarı-aktif askı sistemlerinde askı sistemi esnemesinin rms değerinin taşıt hızıyla değişimi

Yarı-aktif askı sisteminin uygulanması yukarıdaki sebepler dolayısıyla önerilmemekle birlikte, iki soruna daha burada deyinmekte yarar vardır. Bu iki sorun yarı-aktif sistemin uygulanmasını yine negatif yönde etkileyen unsurlardır.

Bunlardan birincisi, ek hacimleri devreye alıp devreden çıkaracak selenoid valfların cevap sürelerinin getirdiği gecikme ve valf direncidir. Günümüzde her ne kadar, 4-5 m.s açma/kapama süresine sahip valfları temin etmek mümkün ise de, kontrol çevrimi sırasında optimum kontrolün hesabı için

gerekecek süre de dikkate alınırsa, 20-30 m.s bir gecikme olması söz konusudur [16]. Bu gecikme yarı-aktif sistemin performansını olumsuz etkileyecektir.

İkinci sorun ise asılı olmayan kütle ile yol arasındaki uzaklığın ve bunların değişme hızının ölçülmesinde yaşanacak zorluktur. Pratik zorluklar nedeniyle bu ölçümler yapılamadığı takdirde, durum değişkenlerinin Kalman Filtresi ile belirlenmesi gerekecektir. Bu durumda hem filtre kullanılması ve dolayısıyla, hem de filtrenin getireceği ek hesapların sebep olacağı ilave gecikmeler nedeniyle sistem performansı daha da kötüleşecektir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'deki mekanik yaylı askı sistemlerine ait eğriler incelendiğinde, asılı ve asılı olmayan yay sabiti aynıyken, buna paralel konumdaki sönümleyicinin sabitinin kontrol edilmesiyle önemli performans iyileşmesi sağlandığı görülmektedir. Dolayısıyla bundan sonraki bir çalışmada, yeterince büyük hacimli fakat pasif bir körüğü olan bir askı sisteminde, yarı-aktif olarak sönümün değiştirilmesi incelenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Williams, R, .A, “Automotive Active Suspension”, **Engineering Centre, Jaguar Cars, Coventry**, 211: 415-444, (1997).

2. Crosby, M., Karnopp, D.C., “The Active Damper - a New Concept for Shock and Vibration Control”, ***Shock Vib. Bull***., ***Part H***, Washington DC (1973).

3. Karnopp. D.C., Crosby. M.C. , Harwood. R.A., “Vibration Control Using Semi-active Force Generator”, ***ASME. J. Eng. Industry*** (1974).

4. Klinger, D.L., Cooperrider, N.K., Hedrick, J.K., White, R.C., Cilzado A., Sayers. M. and Wormley. D., “Guideway vehicle cost reduction”, ***National Technical Information Service Reports*** (1976).

5. Roley, D.G., “Tractor cab suspension performance modelling”, Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Engineering, ***University of California***, Davis (1975)

6. Margolis, D.L., Tylee. J.L., Hrovat. D., “Heave Mode Dynamics of a Tracked Air Cushion Vehicle with Semi-active Airbag Secondary Suspension”,, ***ASME J. Dynamics Systems, Measurement and Control*** (1975).

7. Margolis. D.L., Tylee. J.L., Hrovat. D., “Semi-active Heave and Pitch Control of a High Speed Tracked Air Cushion Vehicle”, ***Intersociety Transportation Conf.*** (1976).

8. Hrovat. D., Margolis. D.L. “An Experimental Comparision Between Semi-active and Passive for Air Cusion Vehicle”, ***Int. J. Vehicle Design*** (1981).

9. Krasnicki, E.J., “The Experimental Performance of an ON-OFF Active Damper”, ***Shock and Vibration Bull***. (1981).

10. Hrovat, D. Margolis, D.L. ve Hubbard, M., “An Approach Toward the Optimal Semi-Active Suspension”, ***ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*** (1988).

11. Hac, A. ve Youn, I., “Optimal Design of Active and Semi-Active Suspensions Including Time Delays and Preview”, ***ASME Journal Of Vibration and Acoustics*** (1993).

12. Hac, A. ve Youn, I., “Optimal Semi-Active with Preview Based on a Quarter Car Model”, ***Journal Of Vibration, Acoustics Stres and Reliability*** (1992).

13. Tseng, H.E. ve Hedrick, J.K., “Semi-Active Control Laws-Optimal and Sub Optimal”, ***Vehicle System Dynamics*** (1994).

14. Karnopp, D., “Design Principles for Vibration Control Systems Using – Semi Active Dampers”, ***ASME Journal Of Dynamic Systems, Measurement and Control*** (1990).

15. Hrovat, D., “Survey of Advanced Suspension Developments and Related Optimal Control Applications”, ***Automatica,*** 33:1781-1817, (1997).

16. Ercan, Y., “Değişken Sönümlü ve Yarı-Aktif Bir Taşıt Askı Sisteminin Optimum Kontrolünün Teorik Olarak İncelenmesi”, ***12. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu***, Bildiri Kitabı, (2005).

17. İnternet: Ölçülmüş yol profili, *TX90030602*, www.umtri.umich.edu, (2005).

EKLER

EK-1 Riccati denkleminin çözümü için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function rdot=riccatifun(t,r,rho1,rho2,c,d,q,p,w);
r1dot=-(r(2)*p-r(4)*q)*r(2)-(-r(2)*q+r(4)*w)*r(4)+2*rho1;
r2dot=-(r(2)*p-r(4)*q)*r(5)-(-r(2)*q+r(4)*w)*r(7)+r(1);
r3dot=-(r(2)*p-r(4)*q)*r(6)-(-r(2)*q+r(4)*w)*r(9)+r(2)*c-r(4)*c;
r4dot=-(r(2)*p-r(4)*q)*r(7)-(-r(2)*q+r(4)*w)*r(10)+r(2)*d+r(3)-r(4)*d;
r5dot=-(r(5)*p-r(7)*q)*r(5)-(-r(5)*q+r(7)*w)*r(7)+2*r(2);
r6dot=-(r(5)*p-r(7)*q)*r(6)-(-r(5)*q+r(7)*w)*r(9)+r(5)*c-r(7)*c+r(3);
r7dot=-(r(5)*p-r(7)*q)*r(7)-(-r(5)*q+r(7)*w)*r(10)+r(5)*d+r(6)-r(7)*d+r(4);
r8dot=-(r(6)*p-r(9)*q)*r(6)-(-r(6)*q+r(9)*w)*r(9)+2*r(6)*c-2*r(9)*c+2*rho2;
r9dot=-(r(6)*p-r(9)*q)*r(7)-(-r(6)*q+r(9)*w)*r(10)+r(6)*d+r(8)-r(9)*d+r(7)*c-
r(10)*c;
r10dot=-(r(7)*p-r(10)*q)*r(7)-(-r(7)*q+r(10)*w)*r(10)+2*r(7)*d+2*r(9)-2*r(10)*d;

rdot=[r1dot; r2dot; r3dot; r4dot; r5dot; r6dot; r7dot; r8dot; r9dot; r10dot];
```

EK-2 Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = pasyolfun(t,x,hac,a,b,c,d,e,f,zdot,t1t2,zn,zne1,b2,m2)
%
z=zne1+((zn-zne1)*(t-t1t2(1))/(t1t2(2)-t1t2(1)));
%
%%%%%      Havali Koruk ve Sabit Hacimleri Icin       %%%%%
%%%%%        Gerekli Olan Parametreler                %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x(1);     %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;            % (-)
% Yay Karakteristik Egrisi
v0=vas+vac;
k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
koptimum=k01*k02;
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%
figure(6),plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on
%

x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4)-c*z-d*zdot;
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4)+c*z+d*zdot;

xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
% Sabit Hacim Yuksekligi
h=0.1        % (m)
% Sabit Hacim Sayisi
nac=0
%
hac=nac*h
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari     %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
% Olculmus Yol Girislerini Iceren Dosyanin Acilmasi
fid=fopen('TX90030602.dat');
%
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
% Sol ve Sag Tekerler Icin Olculmus Girislerin
% zmeas Matrisine Tasinmasi
[zmeasor,count] = fscanf(fid,'%g %g',[2 inf]);
%
steps=count/2;
fclose(fid);
% zmeas in 0(mm) den (m) ye Cevrilmesi.
zmeas=zmeasor./1000;
%
% Adim Suresi delta nin Hesaplanmasi
%
% Tasit Hizi (km/h)
velocity=90;
%
% Hizin (m/s) ye Cevrilmesi
velms=velocity*1000/3600;
%
% Yol Girisleri Olcum Mesafesi (m)
delx=0.1524;
delta=delx/velms;
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Cozumu          %%%%%
% Baslangic Kosullari
x0=[0.000001 ;0 ;0 ;0];
t1t2=[0, delta];
delt=[delta, delta];
nst=1;
% Herbir Olculmus Yol Girisi Noktasi Icin Cozum
while nst<steps
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
zn=zmeas(1,(nst+1));
zne1=zmeas(1,nst);
zdot=(zn-zne1)/delta;
[t,x]=ode45(@pasyolfun, t1t2,
x0,[],hac,a,b,c,d,e,f,zdot,t1t2,zn,zne1,b2,m2);
u2=[t x];
cc=rot90(u2,2);
dd=fliplr(cc);
x0=[dd(1,2); dd(1,3); dd(1,4); dd(1,5)];
%
save u2.dat u2 -ascii
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
difu2=diff(u2);
difu2c1=difu2(:,1);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
hold on
%
y2def=x1+x3;
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin       %%%%%
%%%%%        Gerekli Olan Parametreler                %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x1;       %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatic sabit
n=1.2;            % (-)
%
[num11 num22]=size(x);
%
for j=1:num11
   v0(j,1)=vas(j,1)+vac;
   k01(j,1)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,1))^n);
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
    k02(j,1)=(v0(j,1)-aas*x(j,1))^(-(n+1));
    ka(j,1)=k01(j,1)*k02(j,1);
    koptimuma(j,1)=ka(j,1);
end
koptimumb=koptimuma(1:num11,1);
%%%%%      Asili Kutlenin Yere Gore Ivmesinin        %%%%%
%%%%%        RMS degerinin Hesaplanmasi              %%%%%
y2doubdot=-(b2/m2)*x(:,2)-((1/m2)*x1).*koptimumb(:,1);
%
[sx1 sy1]=size(y2doubdot);
y2doubdote=zeros(sx1-1,1);
nc1=1;
while nc1<sx1
    y2doubdote(nc1)=y2doubdot(nc1+1);
    nc1=nc1+1;
end
waccsqr=(y2doubdote.*y2doubdote).*difu2c1;
mnsqracc(nst)=sum(waccsqr)/delta;
%%%%%    Asili Kutlenin Asili Olmayan Kutleye Gore    %%%%%
%%%%%     Esnemesinin RMS degerinin Hesaplanmasi      %%%%%
deltadef=x1;
[sx2 sy2]=size(deltadef);
deltadefe=zeros(sx2-1,1);
nc2=1;
while nc2<sx2
    deltadefe(nc2)=deltadef(nc2+1);
    nc2=nc2+1;
end
wdefsqr=(deltadefe.*deltadefe).*difu2c1;
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
    mnsqrdef(nst)=sum(wdefsqr)/delta;
    %%%%%   Asili Olmayan Kutlenin Yere Gore Ivmesinin    %%%%%
    %%%%%         RMS degerinin Hesaplanmasi              %%%%%
    delta2def=x3;
    %
    [sx3 sy3]=size(delta2def);
    delta2defe=zeros(sx3-1,1);
    nc3=1;
    while nc3<sx3
        delta2defe(nc3)=delta2def(nc3+1);
        nc3=nc3+1;
    end
    wdef2sqr=(delta2defe.*delta2defe).*difu2c1;
    mnsqrdef2(nst)=sum(wdef2sqr)/delta;
    %
    t1t2=t1t2+delt;
    nst=nst+1;
end
nst=nst
steps=steps
rmsacc=(sum(mnsqracc)/(nst-1))^0.5
rmsdef=(sum(mnsqrdef)/(nst-1))^0.5
rmsdef2=(sum(mnsqrdef2)/(nst-1))^0.5
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
```

EK-2 (Devam) Pasif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%
figure(6)
%title('Yay Karakteristik Egrisi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)
```

EK-3 Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = aktyolfun(t,x,ro,a,b,c,d,e,f,zdot,t1t2,zn,zne1,b2,m2)
%
z=zne1+((zn-zne1)*(t-t1t2(1))/(t1t2(2)-t1t2(1)));
%
lambda2=ro(2)*x(1)+ro(5)*x(2)+ro(6)*x(3)+ro(7)*x(4);
lambda4=ro(4)*x(1)+ro(7)*x(2)+ro(9)*x(3)+ro(10)*x(4);
% u optimum
uoptimum=(m2^2*(lambda2*a-lambda4*e)-2*b2*x(2))/(2*x(1));
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;        %(m)
has=0.4+x(1);    %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;     %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;         %(m)
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;     %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;         %(N)
p0=f1/aas;       %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;           % (-)
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%
[num1 num2]=size(hac);
%
for i=1:num1
   v0=vas+vac(i,1);
   k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
   k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
   k(i,1)=k01*k02;
   fark(i,1)=k(i,1)-uoptimum ;
end
   absfark=abs(fark);
   bb=min(absfark);
for i=1:num1
   if bb==absfark(i,1)
      koptimum=fark(i,1)+uoptimum;
   end
end
%
figure(6), plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on;
%
x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4)-c*z-d*zdot;
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4)+c*z+d*zdot;

xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
%%%%%    Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan    %%%%%
%%%%%      Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari      %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
%%%%% Ro Matrisinin Hesaplanmasi Icin Riccati Denkleminin Cozumu
%%%%%
% Riccati Denklemindeki (H1, H2, T1 and T2)Matrislerindeki Katsayilar
q=(m2^2*a*e)/2;
w=(m2^2*e^2)/2;
p=(m2^2*a^2)/2;
%
rho1=15
rho2=0;
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
% Baslangic Kosulu Vektoru
r0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
% Integrasyon Suresi
t1t2=[0, 100]
[t,r]=ode45(@riccatifun, t1t2, r0,[],rho1,rho2,c,d,q,p,w);
cc1=[t r];
cc=rot90(cc1,2);
gg=fliplr(cc);
save cc1.dat cc1 -ascii;
% Ro Matrisinin Elemanlari
ro(1)=gg(1,2);
ro(2)=gg(1,3);
ro(3)=gg(1,4);
ro(4)=gg(1,5);
ro(5)=gg(1,6);
ro(6)=gg(1,7);
ro(7)=gg(1,8);
ro(8)=gg(1,9);
ro(9)=gg(1,10);
ro(10)=gg(1,11);
%
figure(7), plot(t,r,'color','black','LineWidth',1)
hold on
% Olculmus Yol Girislerini Iceren Dosyanin Acilmasi
fid=fopen('TX90030602.dat');
%
% Sol ve Sag Tekerler Icin Olculmus Girislerin
% zmeas Matrisine Tasinmasi
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
[zmeasor,count] = fscanf(fid,'%g %g',[2 inf]);
%
steps=count/2;
fclose(fid);
% zmeas in 0(mm) den (m) ye Cevrilmesi.
zmeas=zmeasor./1000;
%
% Adim Suresi delta nin Hesaplanmasi
%
% Tasit Hizi (km/h)
velocity=90;
%
% Hizin (m/s) ye Cevrilmesi
velms=velocity*1000/3600;
%
% Yol Girisleri Olcum Mesafesi (m)
delx=0.1524;
delta=delx/velms;
%%%%%   Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan     %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Cozumu          %%%%%
% Baslangic Kosullari
x0=[0.000001 ;0 ;0 ;0]
t1t2=[0, delta];
delt=[delta, delta];
nst=1;
% Herbir Olculmus Yol Girisi Noktasi Icin Cozum
while nst<steps
    zn=zmeas(1,(nst+1));
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
zne1=zmeas(1,nst);
zdot=(zn-zne1)/delta;
[t,x]=ode45(@aktyolfun, t1t2, x0,[],ro,a,b,c,d,e,f,zdot,t1t2,zn,zne1,b2,m2);
u2=[t x];
cc=rot90(u2,2);
dd=fliplr(cc);
x0=[dd(1,2); dd(1,3); dd(1,4); dd(1,5)];
%
save u2.dat u2 -ascii
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
difu2=diff(u2);
difu2c1=difu2(:,1);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%
y2def=x1+x3;
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
% Yardimci Durum Degiskenleri
lambda2a=ro(2)*x1+ro(5)*x2+ro(6)*x3+ro(7)*x4;
lambda4a=ro(4)*x1+ro(7)*x2+ro(9)*x3+ro(10)*x4;
lambda2aa=lambda2a*a;
lambda4aa=lambda4a*e;
u1a=-2*b2*x2;
u2a=2*x1;
% U Optimum Degerinin Bulunmasi
uoptimuma=((lambda2aa-lambda4aa).*m2^2+u1a)./u2a;
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;        %(m)
has=0.4+x1;      %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;     %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.20;
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4;
vac=hac*aac;
% Baslangic basinci
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
f1=m2*g;
p0=f1/aas;
n=1.2;
%
[num11 num22]=size(x);
[num1 num2]=size(hac);
%
   for j=1:num11
   for i=1:num1
      v0(j,i)=vas(j,1)+vac(i,1);
      k01(j,i)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,i))^n);
      k02(j,i)=(v0(j,i)-aas*x(j,1))^(-(n+1));
      ka(j,i)=k01(j,i)*k02(j,i);
      farka(j,i)=ka(j,i)-uoptimuma(j,1);
      absfarka(j,i)=abs(farka(j,i));
   end
   ba(j)=min(absfarka(j,:));
   for i=1:num1
      if ba(j)==absfarka(j,i)
        koptimuma(j)=farka(j,i)+uoptimuma(j,1);
      end
   end
end
koptimuma=koptimuma(1,1:num11);
koptimuma2=koptimuma';
%%%%%      Asili Kutlenin Yere Gore Ivmesinin        %%%%%
%%%%%        RMS degerinin Hesaplanmasi              %%%%%
y2doubdot=-(b2/m2)*x2-((1/m2)*x1).*koptimuma2(:,1);
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
[sx1 sy1]=size(y2doubdot);
y2doubdote=zeros(sx1-1,1);
nc1=1;
while nc1<sx1
    y2doubdote(nc1)=y2doubdot(nc1+1);
    nc1=nc1+1;
end
waccsqr=(y2doubdote.*y2doubdote).*difu2c1;
mnsqracc(nst)=sum(waccsqr)/delta;
%%%%%   Asili Kutlenin Asili Olmayan Kutleye Gore   %%%%%
%%%%%    Esnemesinin RMS degerinin Hesaplanmasi     %%%%%
deltadef=x1;
[sx2 sy2]=size(deltadef);
deltadefe=zeros(sx2-1,1);
nc2=1;
while nc2<sx2
    deltadefe(nc2)=deltadef(nc2+1);
    nc2=nc2+1;
end
wdefsqr=(deltadefe.*deltadefe).*difu2c1;
mnsqrdef(nst)=sum(wdefsqr)/delta;
%%%%%   Asili Olmayan Kutlenin Yere Gore Ivmesinin   %%%%%
%%%%%        RMS degerinin Hesaplanmasi              %%%%%
delta2def=x3;
[sx3 sy3]=size(delta2def);
delta2defe=zeros(sx3-1,1);
nc3=1;
while nc3<sx3
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
        delta2defe(nc3)=delta2def(nc3+1);
        nc3=nc3+1;
    end
    wdef2sqr=(delta2defe.*delta2defe).*difu2c1;
    mnsqrdef2(nst)=sum(wdef2sqr)/delta;
    %
    t1t2=t1t2+delt;
    nst=nst+1;
end
%rms acceleration
nst=nst
steps=steps
rmsacc=(sum(mnsqracc)/(nst-1))^0.5
rmsdef=(sum(mnsqrdef)/(nst-1))^0.5
rmsdef2=(sum(mnsqrdef2)/(nst-1))^0.5
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
```

EK-3 (Devam) Yarı-aktif sistemin ölçülmüş yol girişlerine cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%
figure(6)
%title('Optimum Degere En Yakin Olan Yay Sertlik Degerleri Egrisi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)
%
figure (7)
%title('Ro Matris Elemanlari');
xlabel('\itt (s)','fontsize',14);
ylabel('\itR_0','fontsize',14);
hold on
```

EK-4 Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = pasbkfun(t,x,hac,a,b,c,d,e,f,b2,m2)
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%        Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
g=9.81;
% Havali Koruk
das=0.20;
has=0.4+x(1);
aas=pi*(das^2)/4;
vas=has*aas;
% Sabit Hacim
dac=0.2;
aac=pi*(dac^2)/4;
vac=hac*aac;
% Baslangic Basinci
f1=m2*g;
p0=f1/aas;
% Adyabatik Sabit
n=1.2;
% Yay Karakteristik Egrisi
v0=vas+vac;
k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
koptimum=k01*k02;
%
figure(6), plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on;
%
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4);
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4);
xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
% Sabit Hacim Yuksekligi
h=0.1        % (m)
% Sabit Hacim Sayisi
nac=0
%
hac=nac*h
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari     %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
%
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Cozumu          %%%%%
% Baslangic Kosullari
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
x0=[0.10 ;0 ;0.02 ;0]

% Cozum Suresi
t1t2=[0, 2.0]
% Fonksiyon Dosyasi Isletimi
[t,x]=ode45(@pasbkfun, t1t2, x0,[],hac,a,b,c,d,e,f,b2,m2);
u2=[t x];
cc=rot90(u2,2);
dd=fliplr(cc);
save u2.dat u2 -ascii
%
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
difu2=diff(u2);
difu2c1=difu2(:,1);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
hold on
%

y2def=x1+x3;
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;        %(m)
has=0.4+x1;      %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;     %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;         %(m)
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;     %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;         %(N)
p0=f1/aas;       %(N/m^2)
% Adyabatic sabit
n=1.2;           % (-)
%
%%%%%           Yay Sertliginin Bulunmasi          %%%%%
[num11 num22]=size(x);
for j=1:num11
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
    v0(j,1)=vas(j,1)+vac;
    k01(j,1)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,1))^n);
    k02(j,1)=(v0(j,1)-aas*x(j,1))^(-(n+1));

    ka(j,1)=k01(j,1)*k02(j,1);
    koptimuma(j,1)=ka(j,1);
end
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
```

EK-4 (Devam) Pasif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%

figure(6)
%title('Yay Karakteristik Egrisi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)
```

EK-5 Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = aktbkfun(t,x,ro,a,b,c,d,e,f,b2,m2)
% Yardimci Durum Degiskenleri
lambda2=ro(2)*x(1)+ro(5)*x(2)+ro(6)*x(3)+ro(7)*x(4);
lambda4=ro(4)*x(1)+ro(7)*x(2)+ro(9)*x(3)+ro(10)*x(4);
% u optimum
uoptimum=(m2^2*(lambda2*a-lambda4*e)-2*b2*x(2))/(2*x(1));
%%%%%      Havali Koruk ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x(1);     %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;            % (-)
[num1 num2]=size(hac);
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%%%%% Optimum Yay Sabitine En Yakın Yay Sertliginin Bulunmasi
%%%%%
[num1 num2]=size(hac);
for i=1:num1
   v0=vas+vac(i,1);
   k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
   k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
   k(i,1)=k01*k02;
   fark(i,1)=k(i,1)-uoptimum ;
end
   absfark=abs(fark);
   bb=min(absfark);
for i=1:num1
   if bb==absfark(i,1)
      koptimum=fark(i,1)+uoptimum;
   end
end
%
figure(6), plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on;
%
x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4);
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4);
xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari     %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
%
%%%%% Ro Matrisinin Hesaplanmasi Icin Riccati Denkleminin Cozumu
%%%%%
% Riccati Denklemindeki (H1, H2, T1 and T2) Matrislerindeki Katsayilar
q=(m2^2*a*e)/2;
w=(m2^2*e^2)/2;
p=(m2^2*a^2)/2;
%
rho1=15
rho2=0;
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
% Baslangic Kosulu Vektoru
r0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
% Integrasyon Suresi
t1t2=[0, 100];
%
[t,r]=ode45(@riccatifun, t1t2, r0,[],rho1,rho2,c,d,q,p,w);
cc1=[t r];
cc=rot90(cc1,2);
gg=fliplr(cc);
save cc1.dat cc1 -ascii;
% Ro Matrisinin Elemanlari
ro(1)=gg(1,2);
ro(2)=gg(1,3);
ro(3)=gg(1,4);
ro(4)=gg(1,5);
ro(5)=gg(1,6);
ro(6)=gg(1,7);
ro(7)=gg(1,8);
ro(8)=gg(1,9);
ro(9)=gg(1,10);
ro(10)=gg(1,11);
ro=ro;
%
figure(7), plot(t,r,'color','black','LineWidth',1)
%
%%%%%   Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan     %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Cozumu          %%%%%
% Baslangic Kosullari
x0=[0.10 ;0 ;0.02 ;0]
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
% Cozum Suresi
t1t2=[0, 2.0]
[t,x]=ode45(@aktbkfun, t1t2, x0,[],ro,a,b,c,d,e,f,b2,m2);
u2=[t x];
cc=rot90(u2,2);
dd=fliplr(cc);
save u2.dat u2 -ascii
%
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
difu2=diff(u2);
difu2c1=difu2(:,1);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
y2def=x1+x3;
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
% Yardimci Durum Degiskenleri
lambda2a=ro(2)*x1+ro(5)*x2+ro(6)*x3+ro(7)*x4;
lambda4a=ro(4)*x1+ro(7)*x2+ro(9)*x3+ro(10)*x4;
%
lambda2aa=lambda2a*a;
lambda4aa=lambda4a*e;
u1a=-2*b2*x2;
u2a=2*x1;

% U Optimum Degerinin Bulunmasi
uoptimuma=((lambda2aa-lambda4aa).*m2^2+u1a)./u2a;
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x1;       %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6; 0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;            % (-)
%
%%%%% Optimum Yay Sabitine En Yakın Yay Sertliginin Bulunmasi
%%%%%
[num11 num22]=size(x);
[num1 num2]=size(hac);
%
for j=1:num11
   for i=1:num1
      v0(j,i)=vas(j,1)+vac(i,1);
      k01(j,i)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,i))^n);
      k02(j,i)=(v0(j,i)-aas*x(j,1))^(-(n+1));
      ka(j,i)=k01(j,i)*k02(j,i);
      farka(j,i)=ka(j,i)-uoptimuma(j,1);
      absfarka(j,i)=abs(farka(j,i));
   end
   ba(j)=min(absfarka(j,:));
   for i=1:num1
      if ba(j)==absfarka(j,i)
         koptimuma(j)=farka(j,i)+uoptimuma(j,1);
      end
   end
end
koptimuma=koptimuma(1,1:num11);
koptimuma2=koptimuma';
%
y2doubdot=-(b2/m2)*x2-((1/m2)*x1).*koptimuma2(:,1);
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%

figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%
figure(6)
%title('Optimum Degere En Yakin Olan Yay Sertlik Degerleri Egrisi')
```

EK-5 (Devam) Yarı-aktif sistemin başlangıç koşullarına cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)
%
figure (7)
%title('Ro Matris Elemanlari');
xlabel('\itt (s)','fontsize',14);
ylabel('\itR_0','fontsize',14);
hold on
```

EK-6 Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = pasfrekfun(t,x,hac,a,b,c,d,e,f,b2,m2,freq,zmax)
% Sinusoidal Giris
omega=2*pi*freq;
z=zmax*sin(omega*t);
zdot=zmax*omega*cos(omega*t);
%%%%%      Havali Koruk ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler                %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x(1);     %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;            % (-)
% Yay Karakteristik Egrisi
v0=vas+vac;
k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
koptimum=k01*k02;
%
figure(6), plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on
%
x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4)-c*z-d*zdot;
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4)+c*z+d*zdot;

xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
% Sabit Hacim Yuksekligi
h=0.1;        % (m)
% Sabit Hacim Sayisi
nac=0;
%
hac=nac*h;
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari     %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
%
% Kuvvet Frekansi (Hz)ve Genligi (m).
freq=1
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
zmax=0.1;
%%%%% Pasif Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Cozumu          %%%%%
% Baslangic Kosullari
x0=[0.000001; 0; 0; 0];
% Cozum Suresi
t1t2=[0, 3*(1/freq)];
[t,x]=ode45(@pasfrekfun, t1t2, x0,[],hac,a,b,c,d,e,f,b2,m2,freq,zmax);
u2=[t x];
%
save u2.dat u2 -ascii
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
y2def=x1+x3;
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
cx=rot90(u2,2);
mx=fliplr(cx);
% Duragan Durum Sinusoidal Cevabin Bulunmasi
period=1/freq;
% Go back in time by one period
tminus=t1t2(2)-period;
% Son Cevrimde Kullanilan Degiskenlerin Degerlerinin Bulunmasi
nc=1;
while mx(nc,1)>tminus
  mss(nc,:)=mx(nc,:);
  nc=nc+1;
end
mxy2y1ss=max(mss(:,2));
mxy2ss=max(mss(:,2)+mss(:,4));
%
ncss=1;
while nc>ncss
  tss(ncss,1)=ncss;
  ncss=ncss+1;
end
%
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin       %%%%%
%%%%%        Gerekli Olan Parametreler                %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
das=0.20;        %(m)
has=0.4+x1;      %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;     %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;         %(m)
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;     %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;         %(N)
p0=f1/aas;       %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;           % (-)
%
[num11 num22]=size(tss);
[num1 num2]=size(hac);
%%%%%    Duragan Durumda Yay Sertliginin Bulunmasi   %%%%%
for j=1:num11
   v0(j,1)=vas(j,1)+vac;
   k01(j,1)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,1))^n);
   k02(j,1)=(v0(j,1)-aas*x(j,1))^(-(n+1));
   ka(j,1)=k01(j,1)*k02(j,1);
   koptimuma(j,1)=ka(j,1);
end
koptimuma=koptimuma(1:num11,1);
koptimuma=koptimuma';
%
y2doubdot=-(b2/m2)*mss(:,3)-((1/m2)*mss(:,2)).*koptimuma(:,1);
figure(7), plot(tss,y2doubdot,'color','black','LineWidth',1)
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
hold on
%
mxy2doubdotss=max(y2doubdot(:,1));
mxy2y1dotss=max(mss(:,3));
mxy1ss=max(mss(:,4));
mxy1dotss=max(mss(:,5));
%
mnxy2y1ss=min(mss(:,2));
mny2ss=min(mss(:,2)+mss(:,4));
mny2doubdotss=min(y2doubdot(:,1));
mny2y1dotss=min(mss(:,3));
mny1ss=min(mss(:,4));
mny1dotss=min(mss(:,5));
%
ampy2y1ss=(mxy2y1ss-mnxy2y1ss)/2
ampy2ss=(mxy2ss-mny2ss)/2
ampy2doubdotss=(mxy2doubdotss-mny2doubdotss)/2
ampy2y1dotss=(mxy2y1dotss-mny2y1dotss)/2;
ampy1ss=(mxy1ss-mny1ss)/2;
ampy1dotss=(mxy1dotss-mny1dotss)/2;
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
```

EK-6 (Devam) Pasif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%
figure(6)
%title('Duragan Durumda Yay Karakteristik Egrisi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)
%
figure(7)
%title('Asili Kutlenin Duragan Durum Ivmesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 Ivmesi (m/s^2)','fontsize',14)
```

EK-7 Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

FONKSİYON DOSYASI

```
function xdot = aktfrekfun(t,x,ro,a,b,c,d,e,f,b2,m2,freq,zmax)
% Sinusoidal Giris
omega=2*pi*freq;
z=zmax*sin(omega*t);
zdot=zmax*omega*cos(omega*t);
% Yardimci Durum Degiskenleri
lambda2=ro(2)*x(1)+ro(5)*x(2)+ro(6)*x(3)+ro(7)*x(4);
lambda4=ro(4)*x(1)+ro(7)*x(2)+ro(9)*x(3)+ro(10)*x(4);
% u optimum
uoptimum=(m2^2*(lambda2*a-lambda4*e)-2*b2*x(2))/(2*x(1));
%%%%%      Havali Koruk ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
das=0.20;        %(m)
has=0.4+x(1);    %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;     %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;         %(m)
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;     %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;         %(N)
p0=f1/aas;       %(N/m^2)
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
% Adyabatik sabit
n=1.2;          % (-)
[num1 num2]=size(hac);
% Yay Karakteristik Egrisi

for i=1:num1
   v0=vas+vac(i,1);
   k01=n*p0*(aas^2)*(v0^n) ;
   k02=(v0-aas*x(1))^(-(n+1));
   k(i,1)=k01*k02;
   fark(i,1)=k(i,1)-uoptimum ;
end
   absfark=abs(fark);
   bb=min(absfark);
for i=1:num1
   if bb==absfark(i,1)
      koptimum=fark(i,1)+uoptimum;
   end
end
figure(6), plot(t,koptimum,'color','black','LineWidth',1)
hold on;
%
x1dot=x(2);
x2dot=-a*koptimum*x(1)-b*x(2)+c*x(3)+d*x(4)-c*z-d*zdot;
x3dot=x(4);
x4dot=e*koptimum*x(1)+f*x(2)-c*x(3)-d*x(4)+c*z+d*zdot;

xdot=[x1dot; x2dot; x3dot; x4dot];
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

İŞLETİM DOSYASI

```
clc
clear
close all
%%%%%       Kutle, Sonum ve Yay Sabiti Degerleri      %%%%%
m1=100;    % (kg)
m2=1000;   % (kg)
b1=7000;   % (N.s/m)
b2=7000;   % (N.s/m)
k1=500000; % (N/m)
%%%%%    Sistemin Hareket Denklemlerini Tanimlayan    %%%%%
%%%%%       Diferansiyel Denklemlerin Katsayilari     %%%%%
a=(1/m1)+(1/m2);
b=b2*((1/m1)+(1/m2));
c=k1/m1;
d=b1/m1;
e=1/m1;
f=b2/m1;
%Elements of coeff. matricies of riccati
q=(m2^2*a*e)/2;
w=(m2^2*e^2)/2;
p=(m2^2*a^2)/2;
%
rho1=15;
rho2=0;
% Solving Ro Matrix
r0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
t1t2=[0, 100];
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
[t,r]=ode45(@riccatifun, t1t2, r0,[],rho1,rho2,c,d,q,p,w);
cc1=[t r];
cc=rot90(cc1,2);
gg=fliplr(cc);
save cc1.dat cc1 -ascii;
%Elements of Ro Matrix
ro(1)=gg(1,2);
ro(2)=gg(1,3);
ro(3)=gg(1,4);
ro(4)=gg(1,5);
ro(5)=gg(1,6);
ro(6)=gg(1,7);
ro(7)=gg(1,8);
ro(8)=gg(1,9);
ro(9)=gg(1,10);
ro(10)=gg(1,11);
%
figure(8), plot(t,r,'color','black','LineWidth',1)
hold on
%Frekas  (Hz) ve  genlik (m).
freq=1
zmax=0.1;
%
x0=[0.000001; 0; 0; 0];
%
t1t2=[0, 3*(1/freq)];
[t,x]=ode45(@aktfrekfun, t1t2, x0,[],ro,a,b,c,d,e,f,b2,m2,freq,zmax);
u2=[t x];
%
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
save u2.dat u2 -ascii
x1=x(:,1);
x2=x(:,2);
x3=x(:,3);
x4=x(:,4);
%
figure(1), plot(t,x1,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(2), plot(t,x2,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(3), plot(t,x3,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
figure(4), plot(t,x4,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
y2def=x1+x3;
figure(5), plot(t,y2def,'color','black','LineWidth',1),grid on
hold on
%
cx=rot90(u2,2);
mx=fliplr(cx);
% Find the steady state sinusoidal response properties
period=1/freq;
% Go back in time by one period
tminus=t1t2(2)-period;
% Obtain the values of variables for the last cycle.
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
nc=1;
while mx(nc,1)>tminus
  mss(nc,:)=mx(nc,:);
  nc=nc+1;
end
mxy2y1ss=max(mss(:,2));
mxy2ss=max(mss(:,2)+mss(:,4));
%
lambda2a=ro(2)*mss(:,2)+ro(5)*mss(:,3)+ro(6)*mss(:,4)+ro(7)*mss(:,5);
lambda4a=ro(4)*mss(:,2)+ro(7)*mss(:,3)+ro(9)*mss(:,4)+ro(10)*mss(:,5);
lambda2aa=lambda2a*a;
lambda4aa=lambda4a*e;
u1a=-2*b2*mss(:,3);
u2a=2*mss(:,2);
% U Optimum Degerinin Bulunmasi
uoptimuma=((lambda2aa-lambda4aa).*m2^2+u1a)./u2a;
%
ncss=1;
while nc>ncss
  tss(ncss,1)=ncss;
  ncss=ncss+1;
end
%
%
%%%%%      Havali Koruk Ve Sabit Hacimleri Icin      %%%%%
%%%%%       Gerekli Olan Parametreler               %%%%%
% Yer cekimi ivmesi
g=9.81;
% Koruk Efektif Capi, Yuksekligi, Alani ve Hacmi
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
das=0.20;         %(m)
has=0.4+x1;       %(m)
aas=pi*(das^2)/4; %(m^2)
vas=has*aas;      %(m^3)
% Ek Hacim Yuksekligi, Alani ve Hacmi
dac=0.2;          %(m)
hac=[0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6; 0.7;0.8];
aac=pi*(dac^2)/4; %(m^2)
vac=hac*aac;      %(m^3)
% Baslangic basinci
f1=m2*g;          %(N)
p0=f1/aas;        %(N/m^2)
% Adyabatik sabit
n=1.2;            % (-)
%
%%%%%       Duragan Durumda Optimum Yay Sabitine      %%%%%
%%%%%        En Yakın Yay Sertliginin Bulunmasi       %%%%%
[num11 num22]=size(tss);
[num1 num2]=size(hac);
%
for j=1:num11
   for i=1:num1
      v0(j,i)=vas(j,1)+vac(i,1);
      k01(j,i)=n*p0*(aas^2)*((v0(j,i))^n);
      k02(j,i)=(v0(j,i)-aas*x(j,1))^(-(n+1));
      ka(j,i)=k01(j,i)*k02(j,i);
      farka(j,i)=ka(j,i)-uoptimuma(j,1);
      absfarka(j,i)=abs(farka(j,i));
   end
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
    ba(j)=min(absfarka(j,:));
    for i=1:num1
        if ba(j)==absfarka(j,i)
            koptimuma(j)=farka(j,i)+uoptimuma(j,1);
        end
    end
end
koptimuma=koptimuma(1,1:num11);
koptimuma2=koptimuma';
%
y2doubdot=-(b2/m2)*mss(:,3)-((1/m2)*mss(:,2)).*koptimuma2(:,1);
figure(7), plot(tss,y2doubdot,'color','black','LineWidth',1), grid on
hold on
%
mxy2doubdotss=max(y2doubdot(:,1));
mxy2y1dotss=max(mss(:,3));
mxy1ss=max(mss(:,4));
mxy1dotss=max(mss(:,5));
%
mnxy2y1ss=min(mss(:,2));
mny2ss=min(mss(:,2)+mss(:,4));
mny2doubdotss=min(y2doubdot(:,1));
mny2y1dotss=min(mss(:,3));
mny1ss=min(mss(:,4));
mny1dotss=min(mss(:,5));
%
ampy2y1ss=(mxy2y1ss-mnxy2y1ss)/2
ampy2ss=(mxy2ss-mny2ss)/2
ampy2doubdotss=(mxy2doubdotss-mny2doubdotss)/2
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
ampy2y1dotss=(mxy2y1dotss-mny2y1dotss)/2;
ampy1ss=(mxy1ss-mny1ss)/2;
ampy1dotss=(mxy1dotss-mny1dotss)/2;
%
figure(1)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Esnemesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(2)
%title('Asili Kutle-Asili Olmayan Kutle Bagil Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_2 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(3)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_1 (m)','fontsize',14)
%
figure(4)
%title('Asili Olmayan Kutlenin Hizi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itx_4 (m/s)','fontsize',14)
%
figure(5)
%title('Asili Kutlenin Deplasmani')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 (m)','fontsize',14)
%
```

EK-7 (Devam) Yarı-aktif sistemin frekans cevabının bulunması için MATLAB ortamında hazırlanan simülasyon programı

```
figure(6)
%title('Duragan Durumda Yay Karakteristik Egrisi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\itk_2 (N/m)','fontsize',14)%
figure(7)
%title('Asili Kutlenin Duragan Durum Ivmesi')
xlabel('\itt (s)','fontsize',14)
ylabel('\ity_2 Ivmesi (m/s^2)','fontsize',14)
% %
figure (8)
%title('Ro Matris Elemanlari');
xlabel('\itt (s)','fontsize',14);
ylabel('\itR_0','fontsize',14);
hold on
```

ÖZGEÇMİŞ

Hakan BAL Ocak 1978'de Ankara'da doğdu, 1994 yılında Ankara Gazi Lisesi'nden mezun oldu. İngilizce hazırlık eğitimini Haziran 1997 ve lisans eğitimini Haziran 2002'de Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Şubat 2003'de Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. Aralık 2004'de Milli Prodüktivite Merkezi'nde uzman yardımcısı olarak göre başladı ve halen aynı görevini sürdürmektedir.