

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEYREK TAŞIT SİSTEMİNİN MR**  
**SÖNÜMLEYİCİ İLE UYARLAMALI YARI**  
**AKTİF KONTROLÜ**

**ALİ SUAT YILDIZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**

**2013**

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEYREK TAŞIT SİSTEMİNİN MR**  
**SÖNÜMLEYİCİ İLE UYARLAMALI YARI**  
**AKTİF KONTROLÜ**

**ALİ SUAT YILDIZ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. SELİM SİVRİOĞLU**

**GEBZE**  
**2013**



**GEBZE YÜKSEK  
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

## YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~17/07/2013~~.. tarih ve ~~2013./32~~ sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/07/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ali Suat YILDIZ 'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

### ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Bu tezde, manyetoreolojik (MR) sönümleyicili taşıt süspansiyon sisteminin titreşimlerini azaltmaya yönelik doğrusal olmayan uyarlamalı bir kontrolör tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolörün etkinliği laboratuvar ortamında kurulan gerçek ölçekli çeyrek taşıt deney düzeneği üzerinde test edilmiştir. Kontrolör tümsek ve rastgele yol girişi olmak üzere iki farklı senaryo düşünülerek değerlendirilmiştir. İlk durumda tüm sistem parametrelerinin bilindiği kabul edilmiştir. Bu kontrol yaklaşımı EMK (exact model knowledge) kontrol olarak bilinmektedir. Tümsek yol girişi altında kontrolör etkinliği MR sönümleyicinin bağlı olmadığı ‘Serbest’, MR sönümleyicinin bağlı olduğu ancak herhangi bir gerilim uygulanmadığı ‘Pasif (MR)’ ve MR sönümleyiciye sabit bir volt gerilim uygulandığı durumlar ile karşılaştırılmıştır. Ele alınan rastgele giriş durumunda ise çeyrek taşıt modeli ve MR sönümleyici parametrelerinin bilinmediği kabul edilmiştir. Bu belirsizlikler altında kontrolör etkinliği serbest ve pasif (MR) durumlar ile karşılaştırılmıştır. Süspansiyon sistemlerinin kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılan lineer kontrol yaklaşımlarından Skyhook, LQG (linear quadratic gaussian) ve  $H_\infty$  kontrole ait temel bilgiler verilmiş ve bu kontrol yapıları ile uyarlamalı kontrolörün performansı simülasyon ortamında karşılaştırılmıştır. Uyarlamalı kontrolün, sistem ve MR sönümleyici parametrelerindeki belirsizlikler altında sürüş konforu, yol tutuşu ve süspansiyon çalışma aralığı gibi süspansiyon sistemlerini değerlendirmede kullanılan kriterleri karşılaştırıldığı durumlara göre iyileştirdiği görülmüştür. Kontrolcünün belirsiz parametrelerin tahminindeki başarısı da açık şekilde ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Süspansiyon; MR Sönümleyici; Uyarlamalı kontrolör; Çeyrek taşıt.

## SUMMARY

This thesis is concerned with vibration mitigation of a quarter car model using a semiactive magnetorheological (MR) damper. An experimental setup was constructed to test the efficiency of proposed adaptive controller. Adaptive controller is evaluated by considering two case studies which are bump and random road inputs. In the first case, all system parameters are assumed as known. This approach is known as EMK(exact model knowledge) controller. In the bump case, the performance of controllers is evaluated among uncontrolled (without MR damper), passive damper (MR damper is attached but not supplied with electricity) and constant case (supplied with constant one volt). In random case all system parameters are assumed as unknown and efficiency of controller is compared with uncontrolled and passive damper cases under these uncertainties. Also, some fundamental knowledge is given about Skyhook, LQG and  $H_\infty$  controller which are commonly used in the suspension control design. In addition, the effectiveness of the proposed controller has been validated in numerical simulations through comparisons with these controllers. Simulation results show that the adaptive controller scheme is able to achieve good performance in road holding and driving comfort despite the parametric uncertainty.

**Keywords: Suspension; MR damper; Adaptive controller; Quarter car.**

## TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yanına her gittiğimde farklı bir şey öğrenmiş olarak döndüğüm sayın hocam Prof. Dr. Selim Sivrioğu'na bilgi ve tecrübelerini esirgemedikleri için teşekkürü bir borç bilirim. Göstermiş olduğu yakın ilgi ve alaka ile içinden çıkamadığım her problemi aşılır kılan sayın hocam Doç. Dr. Erkan Zergeroğlu'na teşekkür ederim. Mühendisliğe bakış açısı ile örnek aldığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. İlyas Kandemir'e en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamda yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Şaban Çetin'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmama verdikleri manevi destekleri için değerli mesai arkadaşlarım Ramazan Volkan Akkaya'ya, Sinan Başaran'a, Fahrettin Fatih Öngül'e teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
1.2. Literatür Çalışması	5
2. YARI AKTİF SÖNÜMLEYİCİLER	8
2.1. MR Akışkanlar	8
2.2. MR Akışkanlı Sönümleyici	9
2.3. MR Sönümleyici Matematiksel Modelleri	10
2.3.1. Parametrik Modeller	10
2.3.1.1. Bouc-Wen Modeli	10
2.3.1.2. Histerisis Özellikli Model	11
2.3.1.3. LuGre Modeli	12
2.3.2. Parametrik Olmayan Modeller	13
2.3.2.1. Polinomial Model	13
2.3.3. MR Sönümleyici Modellerinin Karşılaştırılması	15
2.4. Yarı Aktif Sönümleyici Akım/Voltaj Sürme Yaklaşımları	16
2.4.1. Heaviside Basamak Fonksiyonu	16
2.4.2. Ters Polinom Yöntemi	17
2.4.3. Ters LuGre Modeli	18
3. TAŞIT MODELLERİ	19
3.1. Tam Taşıt Modeli	19
3.2. Yarı Taşıt Modeli	21
3.3. Çeyrek Taşıt Modeli	22

4. ÇEYREK TAŞIT YARI AKTİF SÜSPANSİYON KONTROL TASARIMLARI	25
4.1. Hibrit Skyhook–Groundhook Kontrol	25
4.2. LQG Kontrolör	27
4.3. $H_{\infty}$ Kontrol Tasarımı	30
5. UYARLAMALI YARI AKTİF KONTROL TASARIMI	33
6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	39
6.1. Simülasyon Çalışması I	39
6.2. Simülasyon Çalışması II	47
6.2.1. Tümsek Yol Girişi	47
6.2.2. Rastgele Yol Girişi	50
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	59
7.1. Test Düzeneginin Tanıtımı	59
7.2. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi	62
7.3. Yol Girdileri	65
7.4. Uyarlamalı Kontrol Deneysel Uygulama	67
7.4.1. Tümsek Yol Girişi Altında Sistem Cevapları	69
7.4.2. Rastgele Yol Girişi Altında Sistem Cevapları	73
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	84
EKLER	85



# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

## Simgeler ve Açıklamalar

### Kısaltmalar

$C_s$	: Çeyrek Taşıt modelinin sönüm matrisi
$d$	: Yol profili
$e$	: Hata sinyali
$f$	: Gerçek MR sönümleyici kuvveti
$f_c$	: Optimal MR sönümleyici kuvveti
$H(.)$	: Heaviside basamak fonksiyonu
$I_x$	: x eksenindeki atalet.
$K$	: Pozitif tanımlı kontrol kazanç matrisi
$K_s$	: Çeyrek Taşıt modelinin rijitlik matrisi
$M_s$	: Çeyrek Taşıt modelinin kütle matrisi
$M_{dx}$	: x yönündeki dış kuvvetten dolayı oluşan moment
$r$	: Filtrelenmiş hata sinyali
$v$	: Sönümleyiciye uygulanan gerilim
$v_{maks}$	: MR sönümleyicide oluşabilecek maksimum gerilim
$W$	: Filtreler
$x(t)$	: Konum vektörü
$\dot{x}(t)$	: Hız vektörü
$\ddot{x}(t)$	: İvme vektörü
$z(t)$	: İç dinamik değişken
$\sigma_0$	: Gerilim ile değişen $z$ 'nin rijitliği
$\sigma_1$	: İç değişkenin sönüm katsayısı
$\sigma_2$	: Viskoz sönüm katsayısı
$\sigma_a$	: İç değişken $z$ 'nin rijitliğini
$\sigma_b$	: Voltaja bağlı viskoz sönüm katsayısı
$a_0$	: Sabit katsayı

- $\alpha_h$  : Hibrit kontrol geçiş katsayısı
- $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  : Yardımcı filtre sinyalleri
- $\Gamma_\phi, \Gamma_2$  : Pozitif tanımlı diyagonal adaptasyon katsayı matrisleri
- $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  : Pozitif adaptasyon kazanç katsayıları
- ISO : International Organization for Standardization
- LQG : Linear quadratic Gaussian
- LVDT : Linear Variable Differential Transformer
- MR : Manyetoreolojik
- NI : National Instruments
- NI-cRIO : National Instruments Real-time embedded industrial controller
- PSD : Power spectral density

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1: Süspansiyon sistemi.	1
1.2: Teker içi aktif süspansiyon yapısı.	3
1.3: Yarı aktif amortisörler.	4
2.1: a) Serbest form, b) Dizilim başlangıcı, c) Dizilimin son hali.	9
2.2: MR sönümleyici yapısı.	9
2.3: Bouc-Wen modelinin grafiksel gösterimi.	11
2.4: Histerisis özellikli modelinin grafiksel gösterimi.	12
2.5: MR sönümleyici polinomial modelinin şematik gösterimi.	14
2.6: a) Deplasman girdisi, b) Kuvvet-Zaman cevapları, c) Kuvvet-Deplasman cevapları, d) Kuvvet-Hız cevapları.	15
2.7: Heaviside basamak fonksiyonu gerilim çıkışı.	16
2.8: Polinomial kontrol uygulaması.	17
3.1: Taşıt hareketleri.	19
3.2: Tam taşıt modeli.	20
3.3: Yarı taşıt modeli.	22
3.4: Çeyrek taşıt modeli.	23
4.1: Hibrit kontrol gösterimi.	26
4.2: Çeyrek taşıt hibrit kontrol uygulaması.	27
4.3: LQR durum değişkenli geri besleme yapısı.	28
4.4: Çeyrek taşıt MR süspansiyon LQG kontrolör yapısı.	30
4.5: Genelleştirilmiş sistem yapısı.	30
4.6: Ağırlık filtrelerinin yerleşimi.	31
4.7: Çeyrek taşıt MR süspansiyon $H_\infty$ kontrolör yapısı.	32
6.1: Taşıt gövdesi düşey yer değişim hareketi.	40
6.2: Tekerlek kütlesi düşey yer değişim hareketi.	41
6.4: MR sönümleyici kuvvet cevapları.	43
6.5: MR sönümleyici kontrol voltajı.	43
6.6: Çeyrek taşıt kütle parametrelerinin yakınsama karakteristiği.	44
6.7: Çeyrek taşıt sönüm değeri yakınsama karakteristiği.	44
6.8: Çeyrek taşıt yay katsayı değerinin yakınsama karakteristiği.	45

<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.9: MR Sönümleyici parametre yakınsama karakteristiği.	45
6.10: MR Sönümleyici rijitlik katsayılarının yakınsama karakteristiği.	46
6.11: MR Sönümleyici parametrelerinin yakınsama karakteristiği.	46
6.12: Taşıt gövde kütlesi düşey yer değişimi.	48
6.13: Taşıt gövdesinin düşey ivme cevabı.	48
6.14: Tekerlek kütesinin düşey yer değişimi.	49
6.15: MR sönümleyici kuvvet cevapları.	50
6.16: Yol Profili	51
6.17: Taşıt gövdesi yer değişimi.	52
6.18: Tekerlek yer değişimi.	53
6.19: Taşıt gövdesi ivme cevabı.	53
6.20: Kontrol çıkış gerilimi.	54
6.21: MR sönümleyici kuvvet-zaman cevabı.	55
6.22: Taşıt kütlelerinin tahmini.	55
6.23: Viskoz sönüm katsayısı yakınsama davranışı.	56
6.24: Yay katsayılarının yakınsama davranışı.	56
6.25: MR sönümleyici parametre yakınsama karakteristiği.	57
6.26: MR sönümleyici katılık parametrelerinin yakınsaması.	57
6.26: MR sönümleyici parametrelerinin yakınsaması.	58
7.1: Deney düzeneği genel görünüşü.	60
7.2: Deney düzeneğinin genel görünüşü.	61
7.3: NI cRIO-9025 genel görünüşü.	61
7.4: Servo motor yataklama bağlantısı.	62
7.5: Yay katsayılarının belirlenmesi.	63
7.6: Sönüm katsayısının belirlenmesi.	64
7.7: Rastgele yol profili Simulink blok gösterimi.	66
7.8: B sınıf rastgele yol profili.	66
7.9: a) Tümsek yol profili, b) Rastgele yol profili.	67
7.10: LABVIEW kontrol arayüzü.	68
7.11: Uyarlamalı kontrol yapısı.	68
7.12: Taşıt gövdesinin konum değişimi.	70
7.13: Taşıt gövdesi ivme cevabı.	71
7.14: Tekerlek(Aks) kütesinin yer değişimi.	72

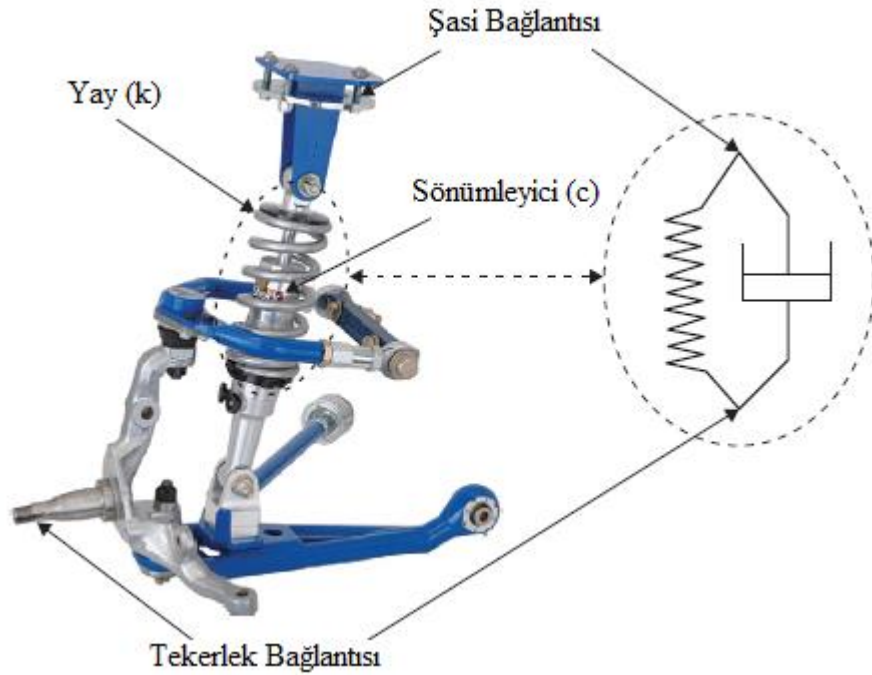
<b><u>Sekil No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
7.15: Kontrolörün gerilim zaman değişimi.	72
7.16: Sönümleyici çalışma aralığı.	73
7.17: Yaylanmalı kütle konum değişimi.	75
7.18: Taşıt gövde ivmelenmesi.	75
7.19: Tekerlek kütesinin yer değişim zaman grafiği.	76
7.20: Kontrolörün gerilim çıkış değişimi.	77
7.21: Gövde ve aks kütlelerinin tahmini.	78
7.22: Süspansiyon ve tekerlek yay sabitlerinin tahmini.	78
7.24: Sönüm katsayısının tahmini.	79
7.24: MR sönümleyici parametre tahmini.	79
7.25: MR sönümleyici parametre yakınsama karakteriřtięi.	80

# TABLolar DİZİNİ

<b><u>Tablo No:</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1: Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici Bouc-Wen model parametreleri.	11
2.2: Lord 1005-3 MR sönümleyici histerisis özellikli model parametreleri.	12
2.3: Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici LuGre model parametreleri.	13
6.1: Çeyrek taşıt model parametreleri.	40
7.1: Çeyrek taşıt deney düzeneği yay parametreleri.	64
7.2: Çeyrek taşıt deney düzeneği sistem parametreleri.	65
7.3: Yol pürüzlülük standart sapması.	65
7.4: Çeyrek taşıt sistem parametreleri.	74
7.5: MR sönümleyici başlangıç değerleri.	74

# 1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü, baş döndürücü bir hızla gelişen teknolojinin en önemli uygulama alanıdır. Birçok yenilik sürekli büyüyen hazır müşteri kitlesi sebebi ile ilk olarak bu alanda kullanılmaktadır. Tüketimin bu kadar yoğun olması, beraberinde üreticiler arasında rekabeti de getirmektedir. Üreticiler, güvenlik için sağlanması gereken birçok kriterin yanında tercih edilmeyi artıran konfor gibi beklentileri de sunmak zorunda kalmaktadırlar. Konfor ve güvenlik ölçütleri araç süspansiyonu ile yakından ilgilidir. Genel bir ifadeyle seyir esnasında aracın iyi bir yol tutuşu sergilemesi güvenlik, yol pürüzlülüğünü sürücüye yansıtması ise konfor olarak düşünülebilir. En alışılmış hali ile taşıt süspansiyonu Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Süspansiyon sistemi.

Süspansiyon sisteminde yer alan elastik elaman sargı, havalı ya da yaprak şeklinde olabilir. Taşıt gövdesinin statik yükü yay üzerindedir ve yol girdisini sertlik değeri ile orantılı olarak taşıt gövdesine iletir. Sönümleme elemanı ise genellikle viskoz tiptedir. İçerisindeki akışkanın deliklerden geçmeye zorlanması ile sönüm gerçekleşir. Oluşturulan sönümleme kuvveti ise akışkanın viskozitesi ve deliklerin geometrisi ile değişim göstermektedir.

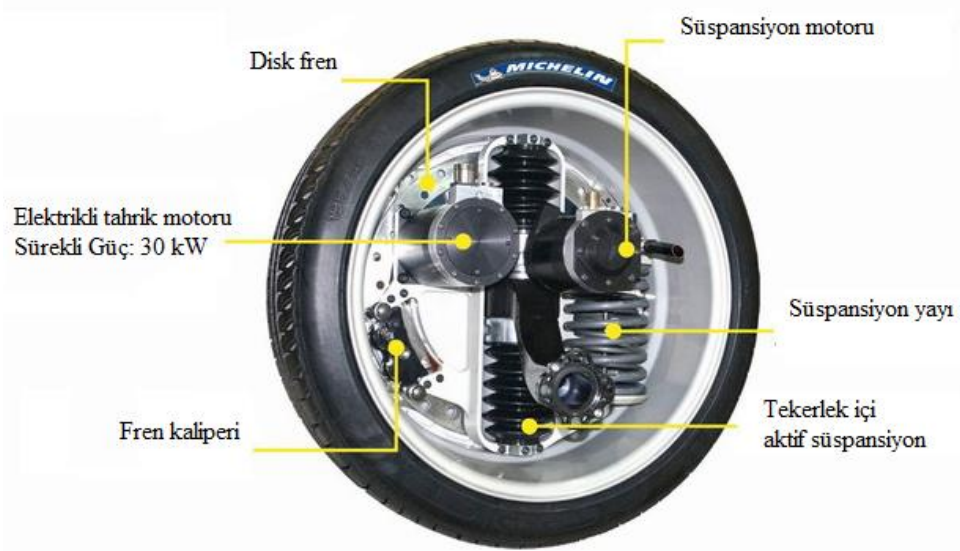
Süspansiyon tasarımı, sönümlenme ve yay elemanının yol tutuş ve konfor kriterlerini süspansiyon çalışma aralığında sağlanmasına dayanmaktadır. Tasarımda iyileştirilmek istenen bu gereksinimler arasında bir ödünleşim mevcuttur. İyi bir yol tutuşu konfor ölçütünde kötüleşmeye, konfor odaklı bir tasarım da yol tutuş kabiliyetinde olumsuz bir etkiye sebep olmaktadır. Bu nedenle gerçekleştirilecek tasarımın seyir güvenliğinden ödün vermeden sürüş konforunu artırmaya yönelik olması gerekmektedir. Şimdiye kadar önerilen süspansiyon tasarımlarını pasif, yarı aktif ve aktif olarak sınıflandırabiliriz.

Viskoz sönümlü pasif süspansiyon sistemi basit tasarım ve maliyetinin düşük olması yönünden öne çıkmaktadır. Fakat pasif süspansiyon sistemlerinde yay ve sönüm elemanlarının karakteristikleri değişken olmaması nedeniyle değişen yol ve taşıt parametrelere değerleriyle odaklanan performans kriterleri arasındaki denge sağlanamamaktadır. Bu nedenle sınırlı bir aralıkta performans sergilemektedirler. Sensör ve aktüatör teknolojilerindeki gelişim ile birlikte değişken yol şartları altında sürüş güvenliği ve konfor gereksinimlerini sağlayacak yeni süspansiyon sistemleri geliştirilmiştir.

Aktif süspansiyon sistemlerinde alışılmış süspansiyon sisteme ek olarak sürüş karakteristiğini geliştirmek için kuvvet üreten ek aktüatörler yer almaktadır. Uygulamalarda hidrolik ve pnömatik silindirler ile lineer motorlar gibi eyleyiciler kullanılmaktadır. Aktif süspansiyon sistemleri virajlarda savrulmayı önlemeleri, yüksek süratte rüzgar direncini azaltıcı yönde aracı alçaltabilmeleri ve engebeli yol şartlarında aracı yükseltebilmeleri gibi avantajlara sahiptirler. Sürüş esnasında sürekli kontrol edilmeleri gerekmektedir.

Pahalı oluşları, bir çok ekipman ile beraber gelmeleri, bakım maliyetlerinin yüksek oluşu bu sistemlerin dezavantajlarıdır. Ayrıca sisteme dışarıdan bir enerji girişi söz konusu olduğu için sistemin kararlılığı üzerinde de olumsuz etkiye neden olabilmektedirler. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilecek son yıllarda kendine giderek artan uygulama alanı bulan bir diğer yapı ise yarı aktif süspansiyon sistemidir. Şekil 1.2'de Michelin firmasına ait içerisinde elektik motoru ve aktif süspansiyon yapısını barındıran yenilikçi bir tekerlek dizaynı görülmektedir.





Şekil 1.2: Teker içi aktif süspansiyon yapısı.

Buradaki yaklaşım sönümleyicinin sönüm katsayısını değiştirerek sistemden istenilen ölçüde enerjiyi absorbe etmektir. Yarı aktif sönümleyicinin arzu edilen performans değerlerini sağlaması için gerekli elektriksel girdinin tespitinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Genel olarak sisteme ait deplasman, hız, ivme gibi dinamik değişkenler kontrolcü içerisinde işlenerek istenen performans değerini sağlayacak kontrol sinyali üretilmektedir. Sisteme herhangi bir enerji girişi söz konusu olmadığı için sistem kararlılığı bozulmamaktadır. Çevrimiçi olarak ayarlanabilmeleri ise farklı kontrol tekniklerinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Çok düşük enerji gereksinimi duyarlar, enerji kesilmesi durumunda pasif süspansiyon karakteristiği sergilemelerinden dolayı güvenilirlerdir.

Giderek yaygınlaşan elektrikli araçlarda enerji tüketimi öncelikli tasarım kriterleri arasındadır. Yarı aktif elemanlar kullanılarak aktif süspansiyonların göstermiş olduğu performansın yakalanabilmesi yarı aktif süspansiyonların bu alanda yaygın bir şekilde kullanılacağına göstergesidir. Yarı aktif süspansiyonların, değişken gözenekli, değişken sürtünmeli ve ayarlanabilir sıvı (elektroreolojik ve magnetoreolojik) içeren çeşitleri mevcuttur. Şekil 1.3'de soldan sağa selenoid valf elektrohidrolik sönümleyici (Sachs), manyetoreolojik sönümleyici (Delphi) ve elektroreolojik sönümleyici (Fludicon) örnekleri görülmektedir



Şekil 1.3:Yarı aktif amortisörler.

## 1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada tam taşıt modelinin birçok özelliğini yansıtan çeyrek taşıt deney düzeneği kurulmuştur. Doğrusal olmayan uyarlamalı bir kontrolcünün tümsek ve rastgele yol girdileri altında hem deney hem de simülasyon ortamında etkinliği doğrulanmıştır. Kurulan deney düzeneği sönümleyici olarak, sağladığı birçok avantajdan dolayı kullanımı giderek yaygınlaşan MR sönümleyici içermektedir. Sönümleyicinin performansını birinci dereceden etkileyen besleme voltajı, [Şaban, 2011] 'de verilen yeni bir Lyapunov esasına dayalı doğrusal olmayan uyarlamalı kontrolör ile doğrudan hesaplanmaktadır.

Kontrolör için gerekli olan düşey yer değişim değerleri sistemden LVDT (doğrusal değişken türevsel dönüştürücü)'ler vasıtası ile ölçülerek ve NI (National Instruments) 9215 analog dijital dönüştürücü (ADC) modülü aracılığı ile gerçek zamanlı kontrolör NI-cRIO 9025 üzerinde toplanmaktadır. LABVIEW ortamında gerçekleştirilen kontrol algoritması ile hesaplanan gerekli MR sönümleyici besleme gerilimi NI-9264 dijital analog dönüştürücü (DAC) vasıtası ile MR sönümleyiciye gönderilmektedir. Kullanılan gerçek zamanlı kontrolör MR sönümleyici için gerekli akımı sağlayamaması sebebiyle ara bir sürücü devresi kullanılmaktadır.

MR sönümleyiciye gönderilen elektriksel girdinin tayininde literatürde yaygın bir şekilde kullanılan yarı aktif sönümleyici kontrol teknikler açıklanmıştır. Ayrıca yarı aktif süspansiyon sistemlerinin kontrolünde kullanılan kontrol yaklaşımlarından, optimal kontrol (LQR, LQG), robust kontrol ( $H_\infty$ ) ve ideal kontrol yaklaşımı Skyhook-Groundhook kontrol metotları açıklanmıştır. MATLAB-Simulink ortamında bu

kontrol metotları ile uyarlamalı kontrolcünün performans karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Deneyisel uygulaması gerçekleştirilen uyarlamalı kontrol yaklaşımı birçok açıdan yenilik sunmaktadır. Kontrolör, taşıt sistemi ve MR sönümleyici dinamik modelini tanımlayan zaman içerisinde değişen parametrelerin tahminini tasarlanan adaptasyon kuralları ile gerçekleştirmektedir.

## 1.2. Literatür Çalışması

MR sönümleyicilerin sağladığı avantajlardan faydalanmak gerçeğe yakın bir şekilde modellenmeleriyle mümkündür. Uygulanacak sistem kontrolörünün performansı seçilen matematiksel model ile yakından alakalıdır. MR sönümleyicinin çok sayıda parametre içeren bir model ile ifade edilmesi uyarlamalı kontrol uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle seçilen matematiksel model hem gerçekçi bir modelleme sunmalı hem de yapı itibari ile basit olmalıdır. MR sönümleyicilerin sergiledikleri doğrusal olmayan histeresis karakteri gerçekçi bir şekilde ifade edebilmek için birçok matematiksel model önerilmiştir.

Wen yapmış olduğu çalışma ile histeresis sistemlerin modellenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan Bouc-Wen modeli ortaya konmuştur [Wen, 1976]. Bu model kuvvet cevabını ifade etmekte başarılı iken kuvvet-hız grafiğini ifade etmekte zayıf kalmıştır.

Spencer ve arkadaşları geliştirilmiş Bouc-Wen modeli adını verdikleri yeni bir MR sönümleyici modeli ortaya koymuşlardır. Model Bouc-Wen modeline ilave edilen paralel bağlı bir yay ve seri bağlı bir sönüm elemanını içermektedir. Ayrıca MR sönümleyicinin sargı dinamiği birinci dereceden bir filtre ile modelin içerisine ilave edilmiştir [Spencer et al., 1997]. Tanımlanması gereken çok sayıda parametre içermesi bu modelin zayıflığıdır.

Choi ve arkadaşları tarafından önerilen polinom modelinde ise deneysel olarak elde edilen MR sönümleyici dinamik davranışı yüksek dereceden polinomlar kullanılarak yakalanmaya çalışılmıştır. Herhangi bir mekanik eleman içermeyen bu model de kuvvet-hız eğrisi negatif ve pozitif ivmelenme olarak iki bölgeye ayrılmıştır. Her iki bölge içinde farklı polinom katsayıları kullanılmıştır [Choi et al., 2000].

Alvarez ve Jimenez tarafından geliştirilen LuGre sürtünme modelini esas alan yöntem az sayıda parametre ile MR sönümleyiciyi farklı yükleme şartları altında başarılı bir şekilde ifade edebilmektedir. Modelde MR akışkandaki değişimle ilgili olan iç değişken için dinamik bir eşitlik tanımlamaktadır [Alvarez and Jimenez, 2002].

Kontrol edilebilen akışkanlı yarı aktif elemanların kullanıldığı sistemlerde diğer önemli bir husus ise uygun kontrol algoritmasının seçilmesidir. Literatürde MR sönümleyici içeren sistemler üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Sammier ve arkadaşları, çeyrek taşıt modeli üzerinde  $H_\infty$  ve Skyhook kontrol yaklaşımlarını süspansiyon sisteminden beklenen endüstriyel kriterleri göz önünde bulundurarak test etmişlerdir. Yapılan çalışmada kontrol odaklı lineer model ve yay ile sönüm elemanının doğrusal olmayan karakteristiklerinin de ele alındığı iki farklı sistem modeli kullanılmıştır. Gerek düşük frekans gerekse yüksek frekans bölgelerinde  $H_\infty$  kontrol yaklaşımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır [Sammier et al., 2003].

Du ve arkadaşları dinamik cevabını polinom model ile ifade ettikleri MR sönümleyiciyi  $H_\infty$  kontrol metodu kullanarak çeyrek taşıt modeli üzerinde test etmişlerdir. Kontrol besleme sinyali olarak süspansiyon açıklığı ve yaylanmalı kütlelerin hızı kabul edilmiştir. Yarı aktif sönümleyici performansı aktif süspansiyon ile karşılaştırılarak benzer performans değerlerinin yakalandığı görülmüştür [Du et al., 2005].

Mori ve arkadaşları, iki serbestlik dereceli bir sistem için MR sönümleyici ve sistem modeline ait parametrelere belirsizliklerini içeren uyarlamalı bir kontrolör uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Kontrol yaklaşımı iki adet uyarlamalı kontrolcü içermektedir. Birinci kontrolör MR sönümleyici belirsizliklerini dengelemektedir. İkinci kontrolcü ise model belirsizlikleri ile baş etmede [Zuo et al., 2004] çalışmasında yer alan model esaslı uyarlamalı kontrol yapısını kullanmaktadır. Elde edilen sonuçlar kontrolcünün hem belirsiz parametrelerin tahminindeki başarısını hem de odaklanan ivmelenme cevaplarındaki başarısını göstermektedir [Mori et al., 2007].

Dong ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Skyhook, Hibrit, LQG, Kayan kipli denetim ve bulanık mantık kontrol yaklaşımları çeyrek taşıt modeli üzerinde hem simülasyon ortamında hem de taşıt üzerinde karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Farklı yol girişleri altında taşıt ve tekerlek kütlelerinin ivme ve deplasman cevapları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, MR süspansiyon sisteminin performansının seçilen kontrol yaklaşımına sıkı bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Diğer

kontrol metotları ile karşılaştırıldığında kayan kipli denetim yaklaşımının daha iyi performans sergilediği görülmektedir [Dong et al., 2010].

Dyke ve arkadaşları MR sönümleyici içeren üç katlı bina modeli üzerinde nümerik benzetim yardımı ile  $H_2/LQG$  temeline dayalı bir kontrol yaklaşımı uygulamışlardır. Bu çalışma MR sönümleyici barındıran sistemler üzerine yapılmış ilk çalışmalardan biridir. Kontrolör tarafından hesaplanan ideal sönümleme kuvveti ve MR sönümleyici tarafından oluşturulan kuvvet değerleri Heaviside fonksiyonu yardımıyla MR sönümleyici gerekli besleme gerilimi oluşturulmaktadır. Bu kontrol yöntemi literatürde kırıpmalı optimal kontrol yöntemi olarak bilinmektedir. Yapılan çalışma ile birlikte uygulanan kontrol yaklaşımının katların deplasmanlarında önemli ölçüde iyileşme sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca pasif durumda yüksek sönümleme kuvveti üreten MR sönümleyicilerin seçimi her zaman etkili sonuç vermediği gösterilmiştir [Dyke et al., 1996].

Çetin ve arkadaşları, MR sönümleyici içeren altı katlı bir bina modelinin deprem etkisi altında ivme ve deplasman cevaplarını uyarlamalı bir kontrol yaklaşımı ile bastırmaya çalışmışlardır. Uygulanan kontrol yaklaşımı hem bina modeline ait sönüm ve katılık parametreleri hem de elde edilmesi zahmetli deneysel çalışma gerektiren MR sönümleyici parametreleri için tahmin sunmaktadır. Uyarlamalı kontrol metodunun performansı ayrıca tasarlanan  $H_\infty$  dayanıklı kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri uygulanan uyarlamalı kontrolörün etkinliğini göstermektedir. Ayrıca yapısal sistemin parametre tahmini açısından oldukça başarılı olduğu görülmektedir [Şaban et al., 2011].

## 2. YARI AKTİF SÖNÜMLEYİCİLER

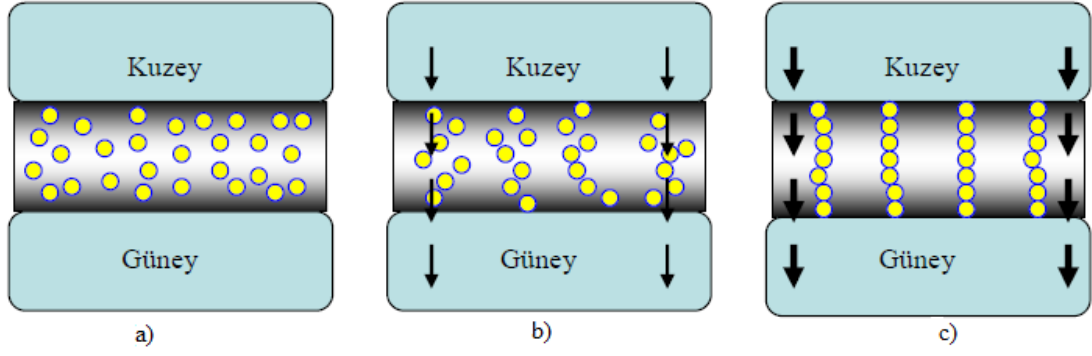
Bu bölümde son yıllarda birçok alanda kendine yer bulan MR akışkan özelliklerine ve MR sönmüleyici içyapısına yer verilmiştir. Ayrıca kontrol tasarımını yakından ilgilendiren MR sönmüleyici matematiksel modelleri açıklanmıştır. Kullanılan modelleme yaklaşımlarının aynı sönmüleyici için dinamik cevapları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### 2.1. MR Akışkanlar

Magnetoreolojik akışkanların keşfi 1940'lı yıllarda gerçekleşse de bu denli popüler olması kontrolör ve sensör teknolojisinin gelişmesi ile birlikte olmuştur. MR akışkanlar; sağlık alanında protez diz ve benzeri uygulamalarda, büyük boyutlu MR sönmüleyiciler yapısal sistemlerde, optik alanında yüksek hassasiyetli parlatmada, askeri alanda silahların geri tepmelerini önlemede, çamaşır makinesi gibi evsel araçlarda kullanılmaktadır.

Magnetoreolojik akışkanlar yapısal olarak, taşıyıcı bir sıvı içerisinde mıknatıslanabilir 3-10 mikron çapında tanecikler içermektedir. Tipik bir MR akışkan hacimsel olarak %20-40 saf demir taneciği barındırır. Taşıyıcı sıvı olarak ise mineral yağ, sentetik yağ, su ya da glikol kullanılır [Carlson, 2000].

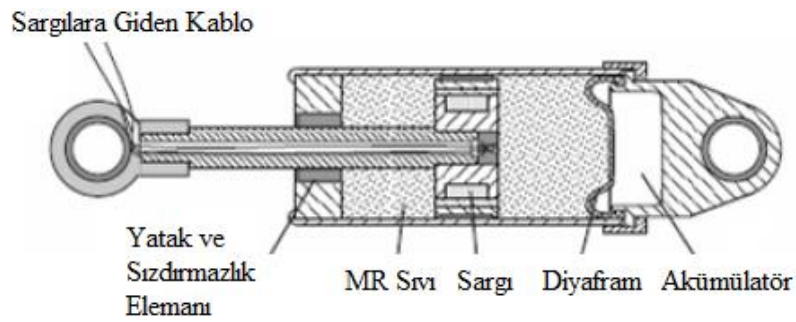
MR akışkanlar manyetik alan etkisi altında sıvı halden yarı katı ya da katı hale geçişi milisaniyeler içerisinde olmaktadır. Bu geçiş mekanizması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Manyetik alan uygulanmadığında Şekil 2.1.a) demir parçacıklar serbest formda, manyetik alanla birlikte parçacıklar akı çizgileri yönünde sıralanmaya başlamakta Şekil 2.1.b), son olarak Şekil 2.1.c) formu almaktadır. Bu yapıyla sıvı akışı zorlaştırılmakta ve viskozitesi ayarlanabilir bir akışkan elde edilmektedir. Parçacıkların dizilim hızı uygulanan manyetik alanın kuvveti ile orantılıdır. MR akışkanın çalışma sıcaklığı -40 ile +150 °C arasında olduğu belirlenmiştir [Carlson and Weiss, 1994]. Ayrıca kirlenmeye karşı dayanıklı olmalarından dolayı ağır şartlar altında performanslarını yitirmeden özelliklerini korumaktadırlar.



Şekil 2.1: a) Serbest form, b) Dizilim başlangıcı, c) Dizilimin son hali.

## 2.2. MR Akışkanlı Sönümleyici

Bir önceki bölümde açıklanan MR sıvıların manyetik alan içerisindeki dizilim şekli aslında alışılmış viskoz sönümleyici yapısındaki gözeneklere benzemektedir. MR sönümleyicilerin farklılaştığı nokta ise gözenek boyutunun, elektro mıknatıslanmayı sağlayacak bir bobin vasıtası ile ayarlanabilir olmasıdır. Bu tez çalışmasının deney kısımlarında da kullanılan Lord RD-1005-3 serisi MR sönümleyiciye ait şematik gösterim Şekil 2.2’de verilmiştir. Yapısal olarak, içerisinde piston, sargı, akümülatör, diyafram ve MR akışkan barındıran hidrolik silindirden oluşmaktadır. Yapı içerisindeki akümülatör, sıcaklık etkisi ile genişleyen sıvı hacmini tolere etmek ve çalışma esnasında sıvı viskozitesini etkileyecek kabarcık oluşumunu önlemektedir.



Şekil 2.2: MR sönümleyici yapısı.

## 2.3. MR Sönümleyici Matematiksel Modelleri

MR sönümleyicilerin sağladığı olanakları en etkili biçimde kullanabilmek, dinamik davranışlarının en gerçekçi şekilde ifade edilmesine bağlıdır. Kontrol uygulamalarında MR sönümleyici matematiksel modelini esas alan kontrol yaklaşımları belirli avantajlar sağlamaktadır.

MR sönümleyiciler nonlineer ve histeresis içeren bir yapıdadırlar. Nonlineer yapıda olmaları sönümleyicinin kuvvet çıktısının, elektriksel girdiler ve mekanik girdilerin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olmasından kaynaklanır. Histeresis içeren bir yapıda olmaları ise kuvvet çıktısının sadece girdilerin o an ki değerlerine bağlı olmayıp çıkışın geçmişine de bağlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Kullanılan matematiksel model ifadesinin bu iki karakteristiği yansıtması, gerçekleştirilecek kontrol tasarımının etkinliğini yakından ilgilendirir. Bu nedenle MR sönümleyicilerin matematiksel modeli birçok çalışmanın konusu olmuştur. Literatürdeki modelleri iki ana başlık altında toplayabiliriz.

### 2.3.1. Parametrik Modeller

Parametrik modellerde MR sönümleyici yay, sönüm elemanı ve diğer fiziksel elemanlar kullanılarak modellenmektedir. Sönümleyiciyi tanımlayan model parametrelerinin tespiti için birçok deneysel çalışma yapılmaktadır. Elde edilen verilerden birtakım optimizasyon teknikleri kullanılarak model parametreleri belirlenmektedir.

#### 2.3.1.1 Bouc-Wen Modeli

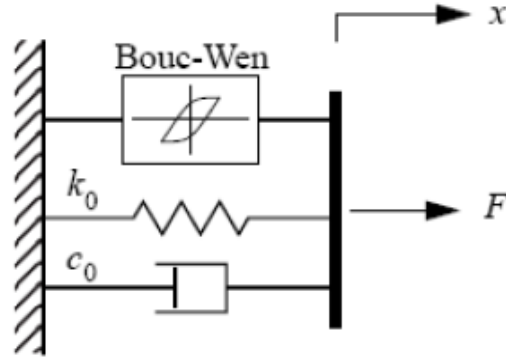
Bouc-Wen modelinde MR sönümleyicinin histeresis kuvvet-hız karakteristiği bir dizi diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Bouc-Wen modeli her ne kadar gerçeğe yakın bir davranış sergilese de belirlenmesi gereken model parametrelerinin fazlalığından dolayı adaptif kontrol uygulamalarında çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. Şematik gösterimi Şekil 2.3’de verilen Bouc-Wen modeli MR sönümleyiciyi aşağıdaki (2.1) eşitliği ile modellemektedir [Spencer et al., 2002].



$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z$$

$$\dot{z} = -\gamma z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + \delta \dot{x} \quad (2.1)$$

Burada (2.1) ifadesinde;  $F$  sönümlenme kuvveti,  $x$  sönümleyici deplasmanı,  $x_0$  kuvvet ofsetine sebep olan başlangıç süspansiyon deplasmanı,  $z$  ise histeresis değişkeni ifade etmektedir. Diğer tüm değişkenler ise genetik algoritma gibi optimizasyon yöntemleri ile deneysel olarak elde edilen sonuçlara yakınsanarak elde edilir.



Şekil 2.3: Bouc-Wen modelinin grafiksel gösterimi.

Tablo 2.1’de tez çalışması kapsamında kurulan çeyrek taşıt modelinde de kullanılan Lord RD 1005-3 serisi MR sönümleyiciye ait genetik algoritma yöntemi ile elde edilen model parametreleri verilmiştir [Kwok et al., 2007].

Tablo 2.1: Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici Bouc-Wen model parametreleri.

Sembol	$x_0$	$c_0$	$k_0$	$n$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Birimi	cm	N.s/cm	N/cm	-	N/cm	N/cm <sup>2</sup>	1/cm <sup>2</sup>	-
Değer	66.0	4.4	4.3	3.9	2480	115	110	1.0

### 2.3.1.2 Histeresis Özellikli Model

MR sönümleyicinin kuvvet çıktısının tahmininde kullanılan başka bir model ise [Kwok et al., 2006] çalışmasında önerilen histeresis özellikli modeldir. Modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki (2.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0$$

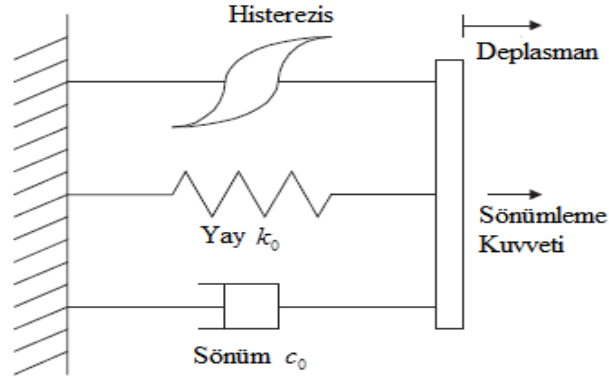
$$z = \tanh(\beta\dot{x} + \delta \text{sign}(x))$$
(2.2)

(2.2) eşitliğinde  $c$  ve  $k$  viskoz ve katılık katsayıları,  $\alpha$  histerisis ölçek çarpanı,  $z$  histerisis değişkeni ifade etmektedir. Şekil 2.4’de şematik gösterimi verilen histerisis özellikli modelin, Lord RD 1005-3 serisi MR sönümleyici için [Kwok et al., 2007] çalışmasında elde edilen parametre değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Lord 1005-3 MR sönümleyici histerisis özellikli model parametreleri.

Sembol	Değer	Sembol	Değer
$c$	$1929I + 1232$	$f_0$	$-18I + 257$
$k$	$-1700I + 5100$	$\delta$	$0.3I + 0.58$
$\alpha$	$-244I^2 + 918$	$\beta$	100

Yukarıdaki Tablo 2.2’de  $I$  terimi MR sönümleyici besleme akımını ifade etmektedir.



Şekil 2.4: Histerisis özellikli modelin grafiksel gösterimi.

### 2.3.1.3 LuGre Modeli

LuGre modeli MR sönümleyicinin doğrusal olmayan histerisis karakterini az sayıda terim ile gerçeğe yakın bir şekilde ifade etmektedir. Tanımlanması gereken az sayıda terim içermesi hem iş yükünü azaltmakta hem de kontrol uygulamasını kolaylaştırmaktadır. Basitleştirilmiş LuGre modeli MR sönümleyicinin ürettiği kuvveti aşağıdaki (2.3) eşitliği ile tanımlamaktadır [Terasawa et al., 2004].

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x} + \sigma_b \dot{x} v$$

$$\dot{z} = \dot{x} - a_0 |\dot{x}| z$$
(2.3)

Buradaki (2.3) eşitliğinde yer alan deneysel olarak hesaplanması gereken model parametreleri Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici için Tablo 2.3’de verilmiştir [Çetin, 2010].

Tablo 2.3 : Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici LuGre model parametreleri.

Sembolü	Anlamı	Değeri	Birimi
$z(t)$	İç dinamik değişken	-	m
$\dot{x}(t)$	MR sönümleyici hızı	-	m/s
$v$	Sönümleyiciye uygulanan gerilim	-	V
$\sigma_0$	Gerilim ile değişen $z$ 'nin rijitliği	320000	N/(m.V)
$\sigma_1$	İç değişkenin sönüm katsayısı	3.2	N.s/m
$\sigma_2$	Viskoz sönüm katsayısı	1153.3	N.s/m
$\sigma_a$	İç değişken $z$ 'nin rijitliğini	76000	N/m
$\sigma_b$	Voltaja bağlı viskoz sönüm katsayısı	315	N.s/(m.V)
$a_0$	Sabit katsayı	1400	1/m

### 2.3.2. Parametrik Olmayan Modeller

Parametrik olmayan modellerde deneysel olarak elde edilen MR sönümleyici davranışı, yüksek dereceden polinomlar ile yakalanmaya çalışılır. Model cevabı seçilen polinom katsayılarıyla keskin bir şekilde değişmektedir. Bu nedenle gerçekçi bir modelleme için doğru katsayıların tespiti önemlidir.

#### 2.3.2.1 Polinomial Model

Sönümleyicinin histeresis özellikli kuvvet-hız eğrisi, yüksek dereceden polinomlar ile elde edilebilir [Choi et al., 2000]. Bu modelde kuvvet-hız eğrisi Şekil 2.5’deki gibi pozitif (alt bölge) ivmelenme ve negatif (üst bölge) ivmelenme olarak iki bölgeye ayrılır. Her iki ivmelenme bölgeleri için ayrı katsayılar tanımlanır. MR sönümleyici kuvvet denklemi ise aşağıdaki (2.4) eşitliği ile ifade edilir.

$$F = \sum_{i=0}^n a_i v^i \quad (2.4)$$

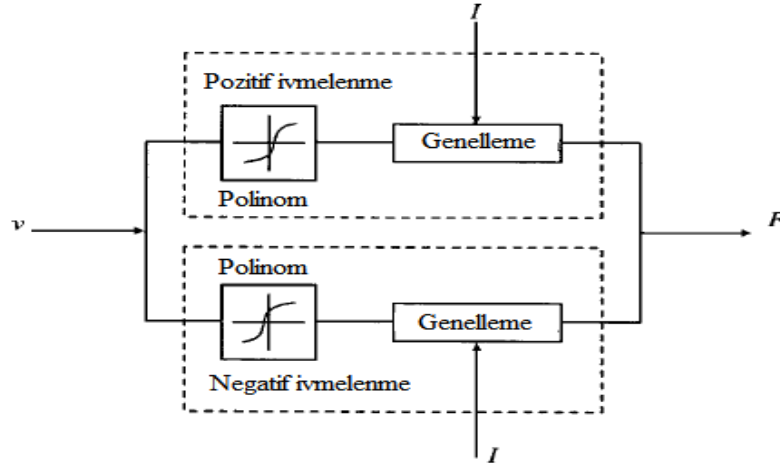
Burada  $a_i$  eğri uydurma ile elde edilen katsayılardır. Bu katsayılar giriş akımına bağlı olarak eşitlik (2.5)'deki gibi birinci dereceden doğru denklemi şeklinde yazılabilir.

$$a_i = b_i + c_i I, \quad i=0,1,\dots,11. \quad (2.5)$$

MR sönümleyici kuvvet denklemi sonuç olarak eşitlik (2.6)'da verildiği gibi elde edilir.

$$F = \sum_{i=0}^n (b_i + c_i I) v^i \quad (2.6)$$

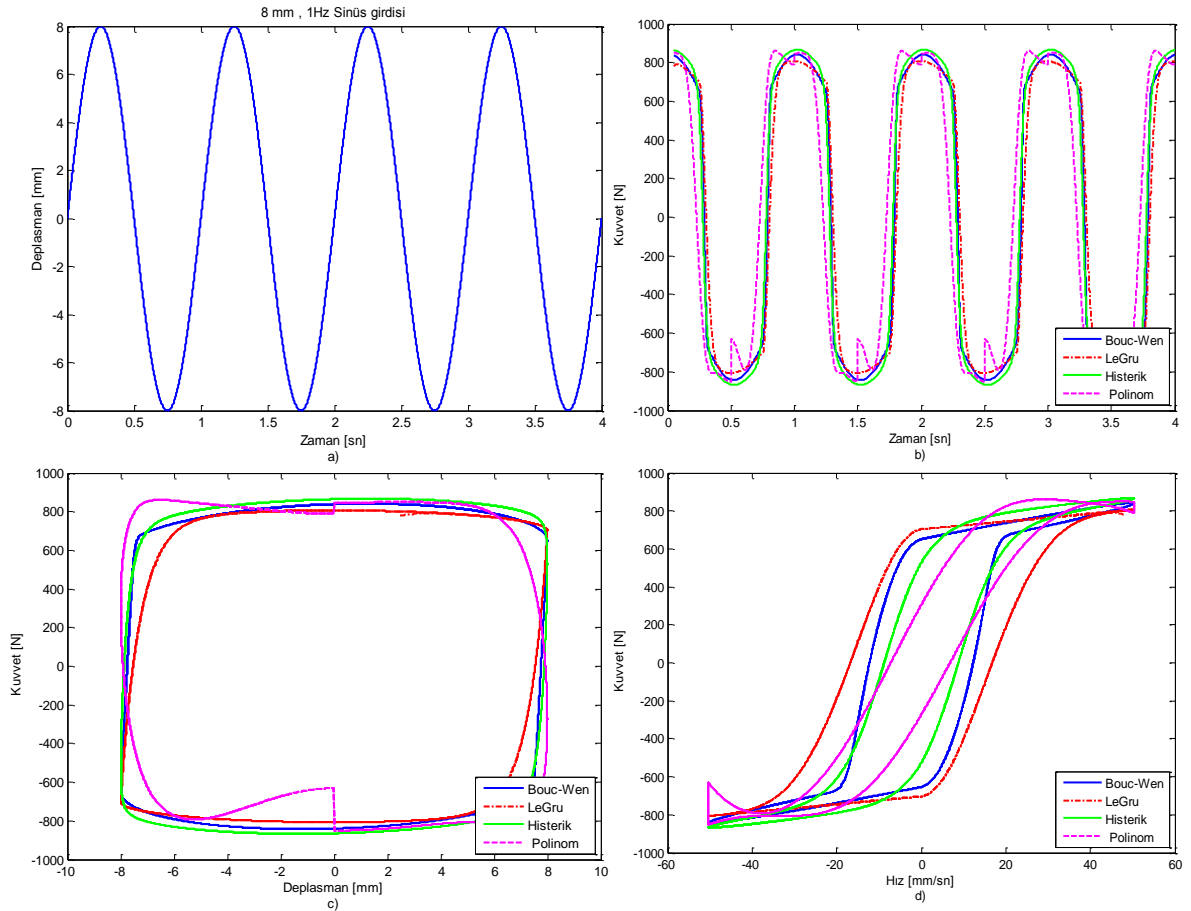
Şematik gösterimi Şekil 2.5'de verilen polinom modelinin Lord RD 1005-3 serisi MR sönümleyici için [Du et al., 2004] çalışmasında elde edilen polinom katsayıları Ek-2'de verilmiştir.



Şekil 2.5: MR sönümleyici polinomial modelinin şematik gösterimi.

### 2.3.3. MR Sönümleyici Modellerinin Karşılaştırılması

MR sönümleyiciler için birçok model geliştirilmiş ve bu alandaki çalışmalar hala devam etmektedir. Farklı yükleme ve elektriksel girdiler altında kuvvet çıktısını doğru tahmin edebilmek gerek sistemi gerçeğe yakın bir şekilde modellemek gerekse kontrol tasarımı açısından önemlidir. Şekil 2.6.b)'de farklı MR sönümleyici matematiksel modellerinin Şekil 2.6.a)'da gösterilen deplasman girdisi sonucunda oluşturduğu kuvvet cevabı görülmektedir. Polinomial model haricindeki modellerin kuvvet çıktısını birbirine yakın bir şekilde tahmin edebildiği görülmekte fakat kontrol tasarımında önem kazanan kuvvet-hız eğrisindeki histeresis etkiyi ifade etmekte modellerin farklılık gösterdiği Şekil 2.6.d)'de görülmektedir. Şekil 2.6.c)' de ise modellere ait doğrusal olmayan kuvvet-deplasman eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.6: a) Deplasman girdisi, b) Kuvvet-Zaman cevapları, c) Kuvvet-Deplasman cevapları, d) Kuvvet-Hız cevapları.

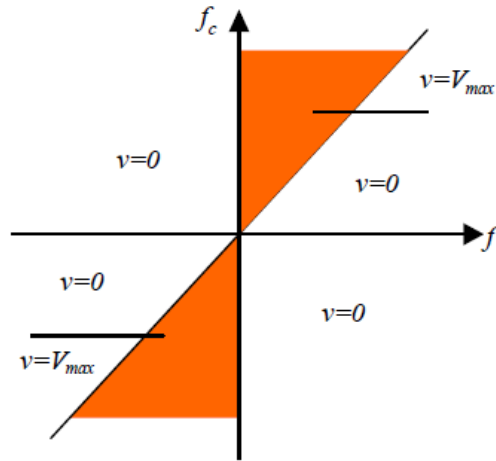
## 2.4. Yarı Aktif Sönümleyici Akım/Voltaj Sürme Yaklaşımları

MR süspansiyonların üstünlüklerinden faydalanma, tasarlanan kontrol sisteminin sönümleyiciye gönderdiği elektriksel girdi ile yakından alakalıdır. Bu nedenle sönümleyiciyi gerçek davranışına yakın bir şekilde modellemenin yanında gönderilen voltaj ya da akımın tespiti de önemlidir.

MR sönümleyiciye sağlanan gerekli elektriksel girdi tespiti için kullanılan birkaç yöntem vardır. Bunlardan bazıları; Heaviside basamak fonksiyon kontrol metodu, Ters polinom yöntemi, Ters LuGre model kontrolü ve bu tez kapsamında deneysel uygulaması yapılan gerekli kontrol voltajının parametre adaptasyonu ile beraber kontrolör içinde hesaplandığı uyarlamalı kontrol yaklaşımıdır.

### 2.4.1. Heaviside Basamak Fonksiyonu

Heaviside basamak fonksiyonu kontrolünde, MR sönümleyicinin ürettiği kuvvet, ideal kontrol kuvvetinden küçük ve aynı işaretli ise maksimum elektriksel çıkış değilse herhangi bir çıkış değeri verilmemektedir. Bu yapı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Heaviside basamak fonksiyonu gerilim çıkışı.

Fonksiyonun matematiksel ifadesi ise eşitlik (2.7)'de verilmiştir.

$$v = V_{maks} H[(f_c - f) f] \quad (2.7)$$

Yukarıdaki (2.7) eşitliğinde,  $f_c$  ideal kontrol kuvvetini,  $f$  MR sönümleyicinin ürettiği kuvveti,  $H(\cdot)$  ise heaviside fonksiyonunu ifade etmektedir. Heaviside fonksiyonunu (2.8)'de daha açık şekilde yazılmıştır. Görüldüğü üzere çıkış değeri olarak maksimum voltaj ( $V_{maks}$ ),  $V_{maks} / 2$  ve sıfır şeklinde üç durum söz konusudur.

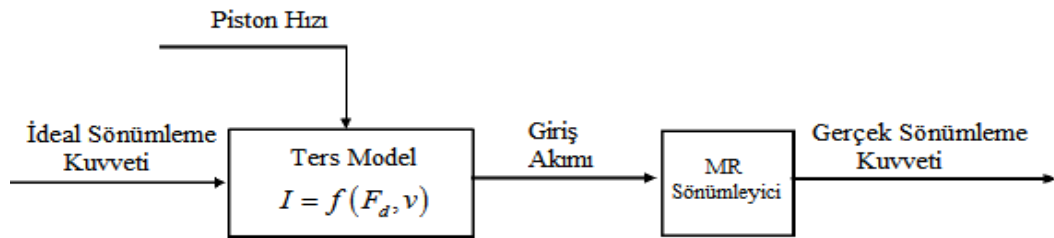
$$\left. \begin{aligned} H(x) &= \frac{1}{2}(1 + \text{sgn}(x)) \\ v &= \frac{V_{maks}}{2} \left(1 + \text{sgn}([(f_c - f) f])\right) \end{aligned} \right\} \rightarrow v = \begin{cases} 0 \\ V_{maks} / 2 \\ V_{maks} \end{cases} \quad (2.8)$$

### 2.4.2. Ters Polinom Yöntemi

Ters polinom kontrolünde ise MR sönümleyiciye olan giriş akımı ikinci bölümde verilmiş olan polinomial MR sönümleyici kuvvet eşitliğinden (2.6) çıkış akımının çekilmesi ile edilir. Gerekli kontrol akımı eşitlik (2.9)'da görülmektedir.

$$F = \sum_{i=0}^n (b_i + c_i I) v^i \quad \rightarrow \quad I = \frac{F_d - \sum_{i=0}^n b_i v^i}{\sum_{i=0}^n c_i v^i} \quad (2.9)$$

Bu kontrol yaklaşımının avantajı ise herhangi bir kuvvet sensörüne ihtiyaç duymadan MR sönümleyici için giriş akımının belirlenebilmesidir. Kontrolün uygulanması ise Şekil 2.8 'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Polinomial kontrol uygulaması.

### 2.4.3. Ters LuGre Modeli

Ters LuGre kontrol modeli daha önce (2.3) eşitliği ile verilmiş olan LuGre sönümleyici modelinden kontrol akımının çekilmesi ile elde edilir. Modelin kontrol çıkış gerilimi ise (2.10) eşitliğinde verilmiştir.

$$v = \frac{f_c - \{\sigma_a z - \sigma_1 a_0 |\dot{x}| z + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x}\}}{\underbrace{\sigma_0 z + \sigma_b \dot{x}}_{\beta}} \quad (2.10)$$

Burada (2.10) eşitliğinin payda kısmı kontrolör çıkışını tanımsız yapmamak için sıfır ve sıfıra yakın değerlerden sanal olarak uzaklaştırılmalıdır. Bu yaklaşımı  $\varepsilon = 0.001$  gibi küçük bir sayı olmak üzere (2.11) eşitliğindeki gibi örneklendirebiliriz.

$$\beta = \begin{cases} \varepsilon & -\varepsilon \leq \beta \leq \varepsilon \\ \beta & \beta < -\varepsilon \text{ ve } \varepsilon < \beta \end{cases} \quad (2.11)$$

Kontrol çıkış geriliminin MR sönümleyiciye gönderilmeden önce (2.12) eşitliğinde verilen kırpma işleminden geçirilmesi gerekmektedir.

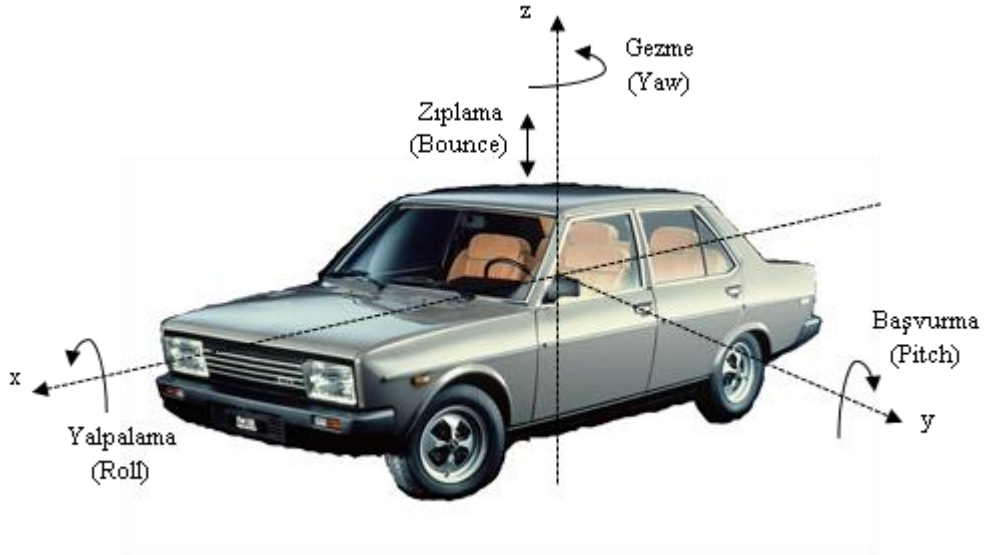
$$v = \begin{cases} 0 & v \leq 0 \\ v & 0 < v < V_{maks} \\ V_{maks} & V_{maks} < v \end{cases} \quad (2.12)$$

Bölüm 7'de verilmiş olan yarı aktif kontrol yaklaşımlarının MATLAB-Simulink ortamında karşılaştırmalı performans incelemesinde Ters LuGre modeli kullanılmıştır.



### 3. TAŞIT MODELLERİ

Taşıt titreşimlerinin analizi ve kontrolünde taşıt gövde ağırlığını bütün olarak temsil eden tek bir üst kütle ve tekerlek ile aks bağlantı elemanlarının ağırlıklarını modelleyen kütleler kullanılması literatürde oldukça sık rastlanan bir yaklaşımdır. Üst ve alt kütleler arasına yerleştirilen yay ve sönüm elemanları kullanılarak oluşturulan süspansiyon sistemi ile taşıtın dinamik hareketleri kontrol edilmektedir. İncelenecek taşıt hareket dinamiğine göre gerekli serbestlik derecesini sağlayan tam taşıt, yarım taşıt veya çeyrek taşıt modeli seçilmelidir. Şekil 3.1’de başlıca dinamik taşıt hareketleri gösterilmektedir.



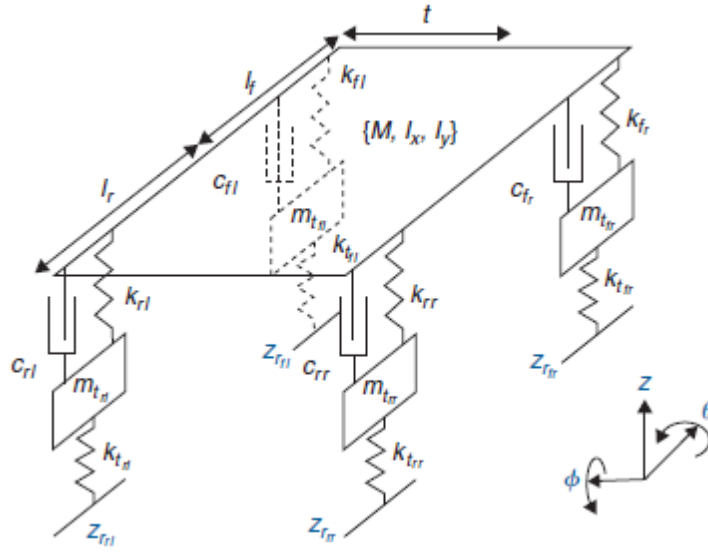
Şekil 3.1: Taşıt hareketleri.

#### 3.1. Tam Taşıt Modeli

Tam taşıt modeli, taşıtın yavaşlama ve ivmelenmedeki başvurma hareketlerinin, viraj alma esnasında ortaya çıkabilen yalpalama hareketinin ve düşey eksendeki zıplama hareketlerinin incelenbildiği detaylı bir modeldir. Ana gövdeye bağlanan dört adet süspansiyon sistemi yer almaktadır. Gerçekçi bir modelleme için her bir süspansiyona farklı yol girişleri etki ettiği düşünülmelidir. Şekil 3.2’de yedi serbestlik derecesine sahip tam taşıt modeli gösterilmektedir.

Tam taşıt modeli aşağıdaki kabulleri içermektedir [Savaresi et al., 2010].

- Süspansiyon geometrisinden kaynaklanan kinematik etkiler ihmal edilmiştir. Süspansiyon sistemi taşıt gövdesine sadece düşey yönde kuvvetleri iletmektedir.
- Viraj denge demiri olmadığı varsayılmıştır. Denge demiri devrilme momentine maruz kalan ağır taşıtlarda önemli bir rol oynamaktadır.
- Taşıt gövde düzlemi yol yüzeyi ile paralel olduğu varsayılmaktadır. Araçlar genellikle aerodinamik direnci azaltacak şekilde öne doğru eğimlidir.



Şekil 3.2: Tam taşıt modeli.

Taşıttın ön ve arka bölümleri i indeksi ile belirtilmekte  $i=\{f, r\}$ , sol ve sağ bölümleri ise j indeksi ile tanımlanmaktadır  $j=\{l, r\}$ . Taşıt gövdesinin ağırlık merkezinin düşey eksenindeki yer değiştirmesi z olmak üzere i ve j indekslerini kullanarak köşe noktalarının yer değişimi aşağıdaki (3.1) eşitliği ile tanımlanır.

$$\begin{aligned}
 z_{fl} &= z + l_f \sin(\phi) - t \sin(\theta) \\
 z_{fr} &= z + l_f \sin(\phi) + t \sin(\theta) \\
 z_{rl} &= z - l_r \sin(\phi) - t \sin(\theta) \\
 z_{rr} &= z - l_r \sin(\phi) + t \sin(\theta)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Tam taşıt modeline ait hareket denklemleri ise (3.2) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
M\ddot{z} &= -F_{sz_{fl}} - F_{sz_{fr}} - F_{sz_{rl}} - F_{sz_{rr}} \\
m_{t_{ij}}\ddot{z}_{t_{ij}} &= F_{sz_{ij}} - F_{tz_{ij}} \\
I_x\ddot{\theta} &= (F_{sz_{rl}} - F_{sz_{rr}})t + (F_{sz_{fl}} - F_{sz_{fr}})t + M_{dx} \\
I_y\ddot{\phi} &= (F_{sz_{rr}} + F_{sz_{rl}})l_r - (F_{sz_{fr}} + F_{sz_{fl}})l_f + M_{dy}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Burada (3.2) eşitliğinde  $M$  ve  $m$  sırasıyla taşıt gövde kütlesi ve tekerlek kütlesini ifade etmektedir. Taşıtın  $x$  ve  $y$  eksenlerindeki ataleti ise sırasıyla  $I_x$  ve  $I_y$  ile ifade edilmektedir.  $M_{dx}$  ve  $M_{dy}$  ise dış kuvvetlerden dolayı oluşan momentlere karşılık gelmektedir. Tekerlek ve süspansiyona etkiyen kuvvet ifadeleri ise (3.3) eşitliği ile verilmektedir.

$$\begin{aligned}
F_{t_{ij}} &= k_t (z_{t_{ij}} - z_{r_{ij}}) \\
F_{s_{ij}} &= k (z_{ij} - z_{t_{ij}}) + c_{ij} (\dot{z}_{ij} - \dot{z}_{t_{ij}})
\end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3.2. Yarım Taşıt Modeli

Yarım taşıt modeli ile düşey yöndeki zıplama hareketinin yanında baş vurma hareketleri ifade edilmektedir. Taşıt gövdesini temsil eden bir üst kütle ve aks ağırlığını temsil eden alt kütleler ile bu kütleler arasında bulunan süspansiyon sisteminden oluşmaktadır. Ayrıca tekerlek modeli için alt kütleler ile yol arasında yer alan yay elemanı içermektedir. Bu modelleme yaklaşımı motosikletlerin dinamik davranışını ifade etmede kullanılabilir. Şekil 3.3’de dört serbestlik dereceli yarım taşıt modeline ait şematik gösterim verilmiştir.

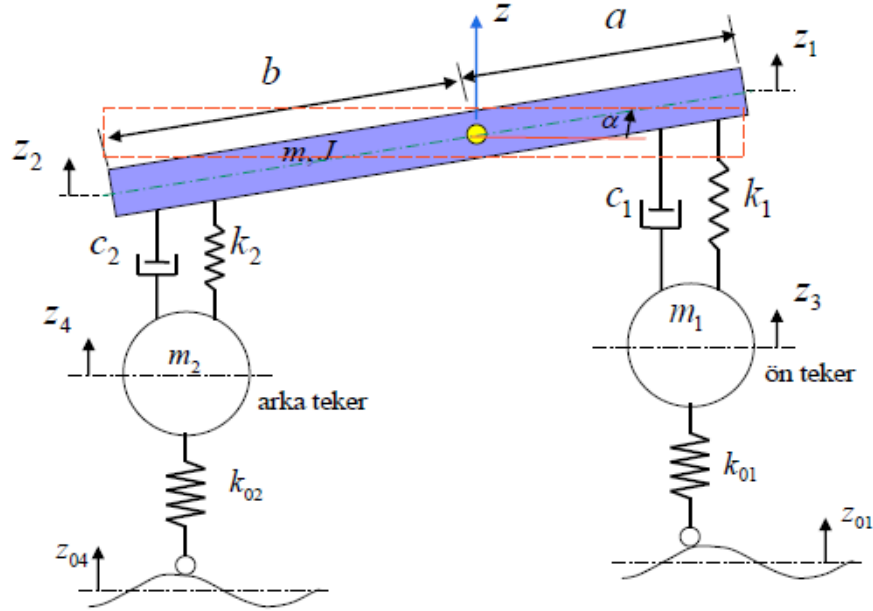
Ağırlık merkezinin düşey yer değişimi  $z$  olmak üzere ön ve arka uçlardaki düşey yer değişim değerleri (3.4) eşitliği ile tanımlanır.

$$\begin{aligned}
z_1 &= z + a \sin \alpha \approx z + a\alpha \\
z_2 &= z - b \sin \alpha \approx z - b\alpha
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Yarım taşıt modelinin dinamik davranışını tanımlayan hareket denklemleri ise (3.5) eşitliğinde tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
m\ddot{z} &= -k_2(z - b\alpha - z_4) - k_1(z + a\alpha - z_3) - c_2(\dot{z} - b\dot{\alpha} - \dot{z}_4) - c_1(\dot{z} + a\dot{\alpha} - \dot{z}_3) \\
J\ddot{\alpha} &= k_2(z - b\alpha - z_4)b - k_1(z + a\alpha - z_3)a - c_2(\dot{z} - b\dot{\alpha} - \dot{z}_4)b - c_1(\dot{z} + a\dot{\alpha} - \dot{z}_3)a \\
m_1\ddot{z}_3 &= -k_1(z_3 - (z + a\alpha)) - k_{01}(z_3 - z_{01}) - c_1(\dot{z}_3 - (\dot{z} + a\dot{\alpha})) \\
m_2\ddot{z}_4 &= -k_2(z_4 - (z - b\alpha)) - k_{02}(z_4 - z_{02}) - c_2(\dot{z}_4 - (\dot{z} - b\dot{\alpha}))
\end{aligned} \quad (3.5)$$

Burada (3.5) eşitliğinin elde edilmesinde taşıt gövdesinin baş vurma hareketini küçük açılar ( $-6^\circ < \alpha < 6^\circ$ ) ile yaptığı kabul edilmiştir. Ayrıca daha gerçekçi bir modelleme adına taşıt gövdesinin ağırlık merkezi taşıtın ön tarafına daha yakın kabul edilmiştir. İfade de yer alan diğer terimler aşağıdaki Şekil 3.3’de açık şekilde gösterilmiştir.



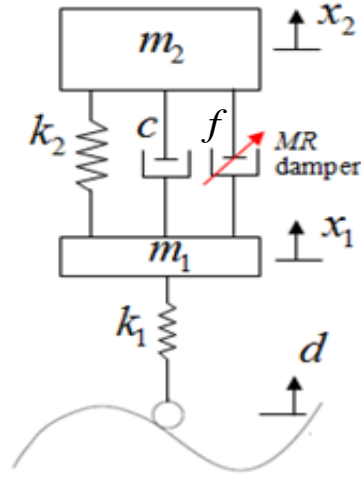
Şekil 3.3: Yarı taşıt modeli.

### 3.3. Çeyrek Taşıt Modeli

Taşıt titreşimlerinin analizi ve kontrolünde tam modelin dörtte birini yani tek tekeri göz önüne almak, bu alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Gerçekte taşıtın ön ve arka tekerlerine gelen yükler ve kullanılan yayların özellikleri farklıdır. Çeyrek taşıt modeli, tasarlanan süspansiyon ve kontrol sisteminin etkinliğini tam taşıt modeline geçmeden görme anlamında birçok bilgi vermektedir.

Çeyrek taşıt modelinde taşıtın sadece dikey yöndeki zıplama titreşimleri göz önünde bulundurulur. Tek eksenle değerlendirme söz konusu olmasına rağmen taşıt

dinamiğinde incelenen sürüş konforu, yol tutuşu ve süspansiyon çalışma aralığı gibi tasarım kriterleri iyi bir şekilde öngörülebilmektedir. Çeyrek taşıt modelini aslında Şekil 3.4’de gösterilen iki serbestlik dereceli kütle yay sistemi olarak ele alabiliriz. Taşıtın şase ve gövdesi (yaylı kütle) tek serbestlik dereceli  $m_2$  kütlesi ile ifade edilmektedir. Tekerlek ve aks kütlesi (yaysız kütle) yine tek serbestlik dereceli  $m_1$  kütlesi ile gösterilmektedir. Süspansiyon sisteminin sönüm katsayısı  $c$  ve yay katsayısı  $k_2$  ile modellenmektedir. Tekerlek ise  $k_1$  yayı ile ifade edilmektedir. Sistemde ayrı bir aktif ya da yarı aktif sönümle elemanı var ise  $f$  kontrol kuvveti modele eklenmektedir. Yol pürüzlülüğü ise sisteme  $d$  girişi ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.4: Çeyrek taşıt modeli.

Çeyrek taşıt modelinde her iki kütleyle ait hareket denklemleri (3.6) eşitlikleri ile ifade edilebilir

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) - k_1(x_1 - d) + f \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) - f \end{aligned} \quad (3.6)$$

Hareket denklemlerini  $M$  kütle matrisi,  $C$  sönüm matrisi,  $K$  katılık matrisi,  $H$  kuvvetin uygulanma noktası  $L$  ise yol girişini tanımlayan vektör olmak üzere matris formunda yazdığımızda (3.7) eşitliği elde edilir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (k_1+k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} -k_1 \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (3.7)$$

$$M\ddot{x} = -C\dot{x} - Kx - Hf - Ld$$

(3.7) eşitliği,  $x_s = [x_2 \quad \dot{x}_2 \quad x_1 \quad \dot{x}_1]^T$  seçilen durum değişkenlerini ve  $u = [f \quad d]^T$  sistem giriş vektörünü temsil edecek şekilde eşitlik (3.8)'de verilen durum uzayı formunda tanımlanabilir.

$$\dot{x}_s = Ax_s + Bu \quad (3.8)$$

Seçilen durum değişkenlerine bağlı olarak  $A$  ve  $B$  matrisleri eşitlik (3.9)'da açık şekilde yazılmıştır.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{c}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} & \frac{c}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_1} & \frac{c}{m_1} & -\frac{(k_1+k_2)}{m_1} & -\frac{c}{m_1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

## 4. ÇEYREK TAŞIT YARI AKTİF SÜSPANSİYON KONTROL TASARIMLARI

Taşıt süspansiyon sistemlerinin birbiri ile çelişen yol tutuşu ve konfor beklentilerini karşılaması gerçekleştirilecek kontrol yaklaşımları ile mümkündür. Literatürde çeyrek taşıt modeli birçok kontrol tasarımının etkinliğini doğrulamak adına yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bölüm içeriğinde yarı aktif süspansiyon kontrolünde kullanılan kontrol tasarımlarına yer verilmiştir.

Yarı aktif süspansiyon sisteminin istenilen performansı sergilemesi, kontrolör tarafından hesaplanan gerekli ideal kuvvet ile sönümleyici tarafından üretilen sönümleme kuvvetinin Bölüm 2’de anlatılan yarı aktif sönümleyici akım/voltaj sürme yaklaşımları kullanılarak gerekli elektriksel girdinin hesaplanması ile sağlanır. Bu metot yarı aktif süspansiyon kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

İdeal sönümleme kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan başlıca kontrol yaklaşımları olarak Hibrit Skyhook-Groundhook kontrol, LQG kontrol,  $H_{\infty}$  kontrol gösterilebilir. Bölüm içeriğinde bu kontrol yaklaşımları ile ilgili temel bilgiler ve çeyrek taşıt modeline uygulanışı yer almaktadır.

### 4.1. Hibrit Skyhook–Groundhook Kontrol

Skyhook kontrol yaklaşımı, taşıt gövdesini temsil eden üst kütleyle bağlı bir sönümleyicinin hayali bir kanca ile gökyüzüne bağlanması kabulüne dayanır. Sönümleyicinin ürettiği kuvvet üst kütle hızı ve sönüm katsayısı ile belirlenir. Üst kütle performansına odaklanmış ideal bir kontrol yaklaşımıdır.

Groundhook kontrol metotunda ise benzer yaklaşım aks kütlelerini temsil eden alt kütle için düşünülür, üst kütlede herhangi bir sönüm söz konusu değildir. Bu yaklaşım ise taşıtın yol tutuş performansı üzerine yoğunlaşmıştır.

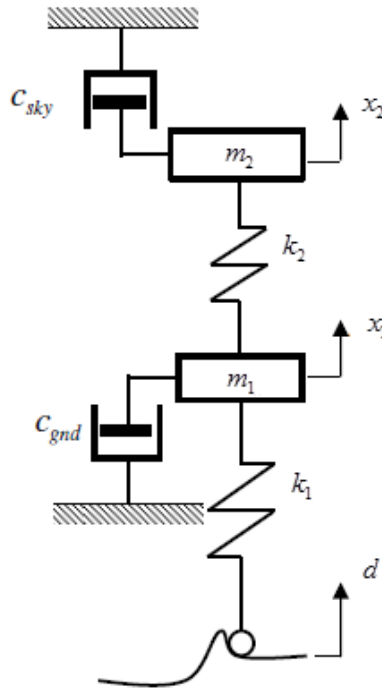
Bu iki kontrol yaklaşımının bir arada kullanıldığı yöntem ise hibrit kontrolör olarak geçmektedir. Aşağıdaki (4.1) ifadesinde skyhook ve groundhook durumlarında üretilen kuvvet değeri ve hibrit kontrolcünün gerekli kuvvet değerine karar verme şartları verilmiştir. Burada her iki durum için  $c_{sky}$  ve  $c_{gnd}$  sönüm katsayılarının seçimi önemlidir.

$$F_{sky} = \begin{cases} c_{sky} \dot{x}_2 & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_2 > 0 \\ 0 & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_2 \leq 0 \end{cases}$$

$$F_{gnd} = \begin{cases} -c_{gnd} \dot{x}_1 & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_1 < 0 \\ 0 & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_1 \geq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$F_{hibrit} = \alpha_h F_{sky} + (1 - \alpha_h) F_{gnd}$$

Hibrit kontrol yaklaşımının şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.

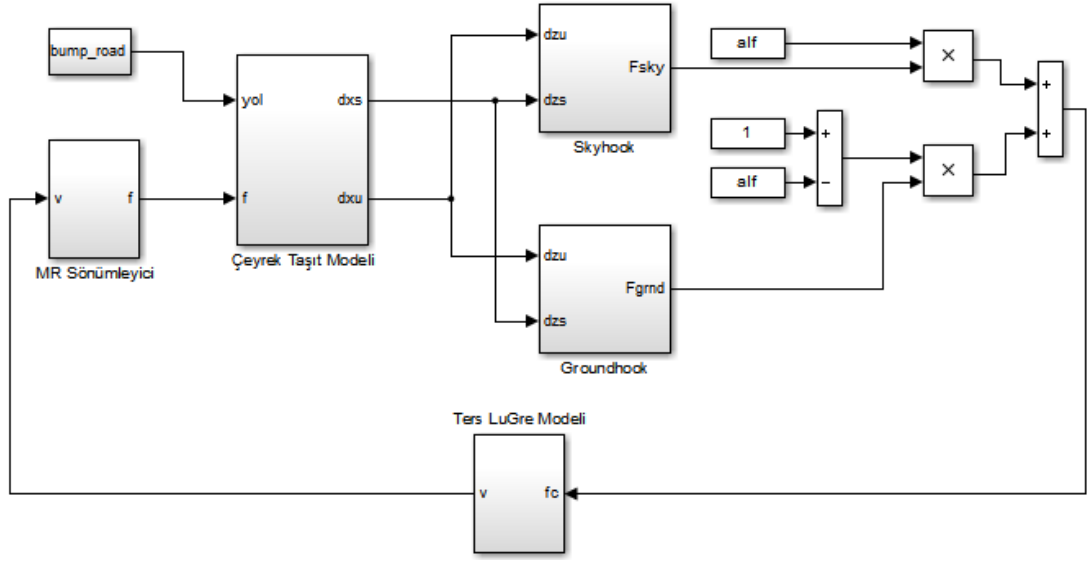


Şekil 4.1: Hibrit kontrol gösterimi.

Kontrolör  $\alpha_h$ 'nin 1 seçilmesi durumunda Skyhook kontrolcü, sıfır seçilmesi durumunda ise Groundhook kontrolcü gibi davranmaktadır.

Kontrolörün çeyrek taşıt modeline uygulanması ise (2.10) eşitliğinde belirtilen Ters LuGre modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İdeal sönüm kuvveti  $f_c$  yerine hibrit kontrolcünün belirlediği  $F_{hibrit}$  değeri yazılarak MR sönümleyici için gerekli kontrol voltajı belirlenmektedir. Kontrolün çeyrek taşıt modeline MATLAB-Simulink ortamında uygulaması Şekil 4.2’de verilmiştir.





Şekil 4.2: Çeyrek taşıt hibrit kontrol uygulaması.

## 4.2. LQG Kontrolör

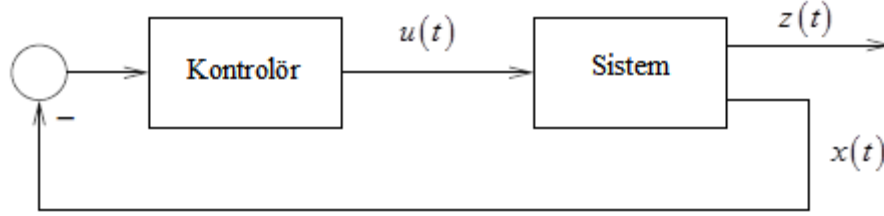
Optimal kontrol yöntemi olan LQG (linear quadratic gaussian) kontrolden bahsetmeden önce LQR (linear quadratic regulator) kontrol yapısından bahsetmek daha doğrudur. Durum değişkenlerinin geri beslemesi ile yapılan kontrol yapısı Şekil 4.3’ de gösterilmiştir. Burada  $x(t)$  durum değişkenlerini,  $z(t)$  en kısa sürede minimize edilmek istenen durum değişkenleri,  $u(t)$  ise sisteme olan kontrol girişini göstermektedir. Sistem girişinden, ölçülen değişkenlere olan transfer fonksiyonunu Laplace operatörü ile yazıldığında (4.2) eşitliği elde edilir.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = -K(s) \quad (4.2)$$

Burada istenen aşağıda verilen eşitlik (4.3)’deki amaç fonksiyonunu minimize edecek  $K(s)$  transfer matrisini elde etmektir.

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} \|x(t)\|^2 + \rho \|u(t)\|^2 dt \quad (4.3)$$

“ $\int_0^{\infty} \|x(t)\|^2 dt$ ” ifadesi sistem durum değişkenlerinin enerjisi, “ $\int_0^{\infty} \|u(t)\|^2 dt$ ” ise kontrol sinyalinin enerjisi olarak düşünülebilir. Buradaki amaç her iki ifadeyi de minimize etmektir. Sabit katsayı  $\rho$  bu iki amaç arasındaki ödünleşimi sağlamaktadır.



Şekil 4.3: LQR durum değişkenli geri besleme yapısı.

(4.3) eşitliği  $Q$  ve  $R$  pozitif tanımlı simetrik matrisler olmak üzere genellikle aşağıdaki (4.4)'de verilen şekliyle bilinmektedir.

$$J_{LQR} = \int_0^{\infty} x(t)' Q x(t) + u(t) R u(t) dt \quad (4.4)$$

(4.4) eşitliğindeki amaç aslında bir kazanç katsayısı matrisi  $K$  ile sağlanabilir.

$$u = -Kx \quad (4.5)$$

$$K = R^{-1} B' P \quad (4.6)$$

(4.6) eşitliğinde yer alan  $P$  matrisi aşağıdaki cebirsel Riccati denkleminin çözümüdür.

$$A' P + P A + Q - P B R^{-1} B' P = 0 \quad (4.7)$$

Durum değişkeni geri beslemeli LQR kontrol yapısında tüm değişkenlerin ölçüldüğü kabulü vardır. Bu kabul gerçekte pek mümkün olmamaktadır. Bu durumda ölçülemeyen değişkenler tasarlanan gözlemci yardımı ile tahmin edilir. Durum uzayı ve hata ifadeleri,  $\hat{x}$  tahmini durum değişkeni olmak üzere aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A \hat{x} + B u \\ \dot{e} &= A x - A \hat{x} = A e \end{aligned} \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliğinde  $A$  matrisinin asimptotik kararlı olma durumu, herhangi bir giriş için hatanın zamanla sifira, tahmini durum değişkeninin ise gerçek değerine yakınsayacağını garanti eder.  $A$  matrisi için böyle bir durum söz konusu olmadığı durumda ise durum uzayı denkleminde bir düzeltme terimi  $L(y - \hat{y})$  eklenerek kararlılık sağlanır.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x}\end{aligned}\quad (4.9)$$

Son haliyle durum uzayı ve hata dinamiği eşitlik (4.10)'da verilen şekli alır.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \\ \dot{e} &= A = x - A\hat{x} - L(Cx - C\hat{x}) = (A - LC)e\end{aligned}\quad (4.10)$$

$\hat{x}$  tahmini  $x$ 'den uzaklaştığı zaman, düzeltme terimi hatayı giderecek şekilde çalışır. Aksi durumda sisteme herhangi bir etkisi söz konusu olmamaktadır.  $(A - LC)$  ifadesi asimptotik kararlı olduğu sürece hata zamanla sıfırlanacaktır.

Uygulamada durum değişkenlerinin ölçümünde sensör gürültüsü olması ve sisteme dışarıdan bir bozucu giriş söz konusu olması sebebiyle (4.10) ifadesine gürültü ve bozucu girdileri de eklemek gerekmektedir. Bu etkiler de göz önünde bulundurulduğunda durum uzayı, (4.11) eşitliğinde verilen formu almaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B[u \quad d]^T \\ y &= Cx + n\end{aligned}\quad (4.11)$$

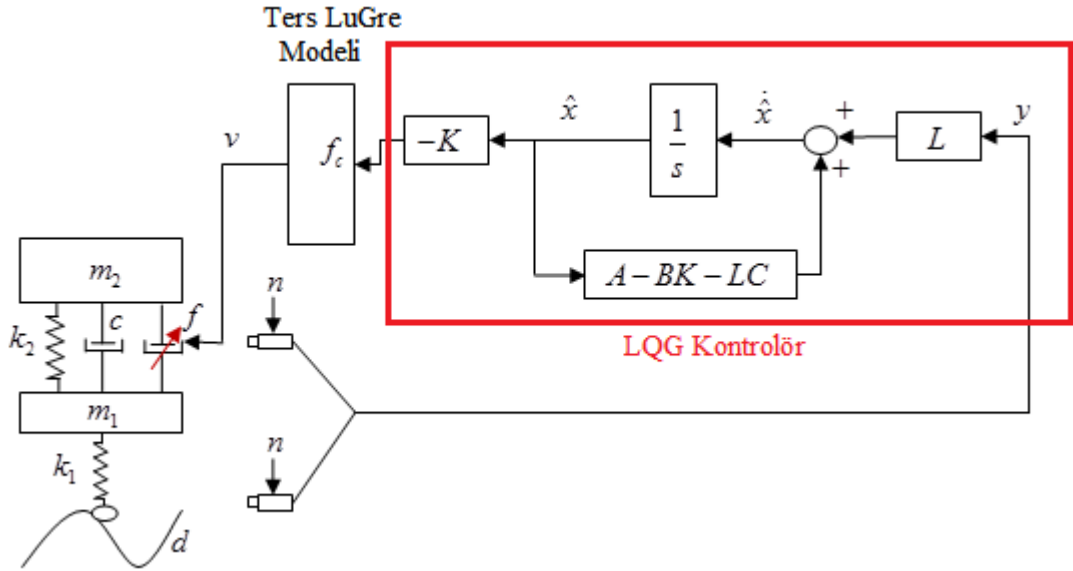
Eşitlik (4.11)'in ölçülebilir ve kontrol edilebilir olduğu kabulü ile LQG tahmin kazancı aşağıdaki eşitlik (4.12)'de verilmiştir.

$$L = PC^T R^{-1}\quad (4.12)$$

Burada  $P$  matrisi aşağıdaki denklem (4.13)'de verilen cebirsel Riccati eşitliğinin çözümüdür.

$$AP + PA' + BQB' - PC'R^{-1}CP = 0\quad (4.13)$$

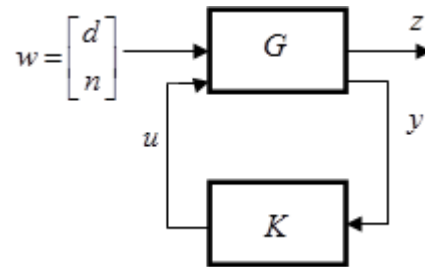
Çeyrek taşıt modeli üzerinden süspansiyon açıklığı ve tekerlek sapması ölçülmekte ve gerekli kontrol kuvveti hesaplanmaktadır. Kontrolör tarafından hesaplanan optimal kuvvet değeri Ters LuGre modeli kullanılarak MR sönümleyici için gerekli kontrol gerilimi oluşturulmaktadır. Şekil 4.4’de LQG kontrolörün, çeyrek taşıt modeline uygulanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Çeyrek taşıt MR süspansiyon LQG kontrolör yapısı.

### 4.3. $H_\infty$ Kontrol Tasarımı

$H_\infty$  kontrol yaklaşımında kontrol edilmek istenen sistem, odaklanan performans çıkışları  $z$  ve sisteme olan tüm dış (sistem gürültüleri vb.) girişler  $w$ , olmak üzere Şekil 4.5’ de gösterilen genelleştirilmiş formda ifade edilir. Buradaki amaç sisteme olan girişlerin altında çıkış değerlerini minimize etmektedir. Bu durum  $w$ ’den  $z$ ’ye olan transfer fonksiyonunun  $T_{zw}$ ,  $H_\infty$  normunu minimize etmekle eşdeğerdir.



Şekil 4.5: Genelleştirilmiş sistem yapısı.

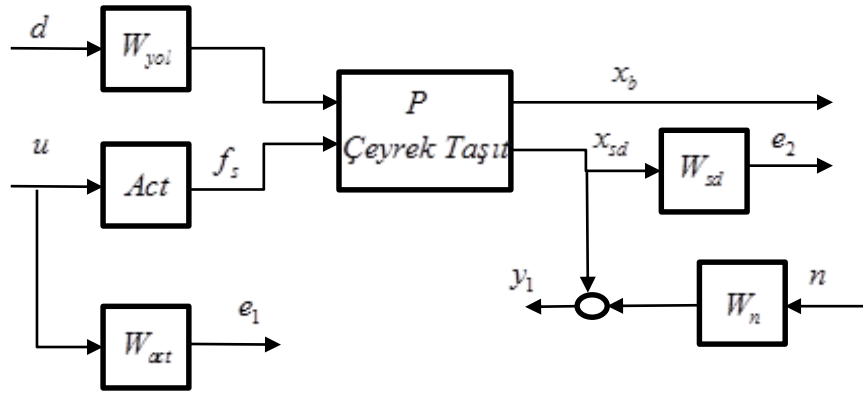
$$\min \|T_{zw}\|_{\infty} \quad (4.14)$$

Eşitlik (4.14)'de verilen ifadenin optimal çözümünü bulmak genellikle zor olduğu için uygulamada kapalı çevrim transfer fonksiyonunun  $H_{\infty}$  normunu pozitif bir sayıdan küçük yapan  $K$  kontrolcüsünü bulmak daha uygundur [Rajala, 2011] .

$$\|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma \quad (4.15)$$

Yukarıdaki eşitlik (4.15)'de  $\gamma_0$  optimal çözüm olmak üzere  $\gamma > \gamma_0$  şeklindedir.

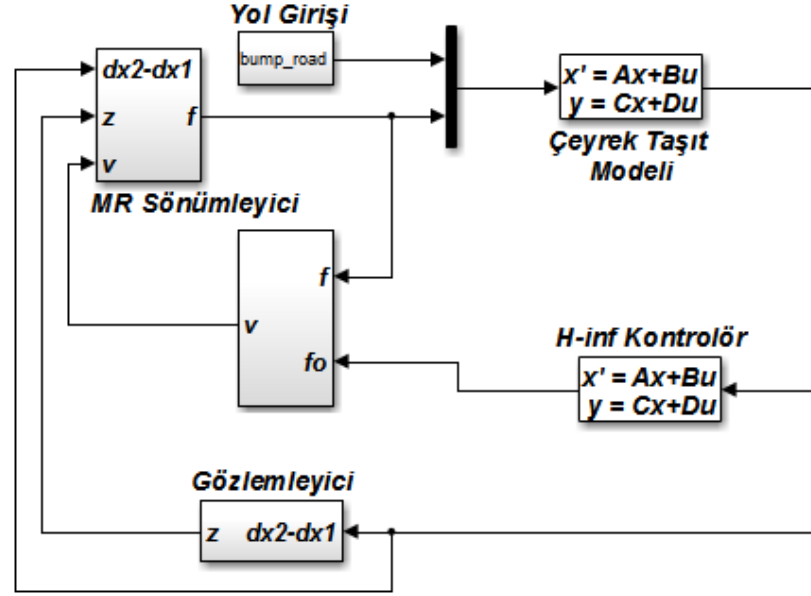
$H_{\infty}$  kontrol tasarımında bir önemli nokta da, sistemdeki belirsizlikleri bastıran ağırlık filtrelerinin seçimidir. Şekil 4.6'da taşıt titreşimlerinin kontrolü için mümkün olan ağırlık filtreleri  $W_{yol}$ ,  $W_{sd}$ ,  $W_n$ ,  $W_{act}$  gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Ağırlık filtrelerinin yerleşimi.

$H_{\infty}$  kontrol problemi Riccati denklemlerinin çözümü ile bulunması genel bir yoldur. Çözüm için kabuller ve çözüm algoritması [Glover et al., 1988] çalışmasında detaylı bir şekilde verilmiştir. MATLAB programı içerisinde yer alan “hifsyn” komutu, sistem ve ağırlık filtreleri bir araya getirildikten sonra bu algoritmayı kullanarak kontrol matrisini ve  $\gamma$  değerini hesaplamaktadır. Ağırlık filtreleri tasarlandıktan sonra “hifsyn” komutu ile elde edilen kontrol vektörü tek girişli tek çıkışlı durum uzayı formatında yazılarak gerekli optimum kuvvet değeri hesaplanmaktadır.

Hesaplanan optimum kontrol ile MR sönümleyicinin ürettiği kuvvet karşılaştırılarak MR sönümleyici için gerekli elektriksel girdi bulunabilir. Kontrolcünün MATLAB-Simulink ortamında uygulanması Şekil 4.7' de görülmektedir.



Şekil 4.7: Çeyrek taşıt MR süspansiyon  $H_\infty$  kontrolör yapısı.

## 5. UYARLAMALI YARI AKTİF KONTROL TASARIMI

Bu bölümde tez çalışmasının ana konusu olan sistem ve MR sönümleyici parametrelerindeki belirsizlikler altında, sistem kararlılığını sağlayan Lyapunov esasına dayalı doğrusal olmayan uyarlamalı kontrol gerçekleştirilecektir. Kontrolör [Şaban, 2010] çalışmasında altı katlı bina modeline uygulanmış ve etkinliği açık şekilde ortaya konmuştur.

Kontrolör, MR sönümleyicinin ölçülemeyen iç dinamiği için gözlemleyici, zaman içerisinde değişen sistem parametreleri ve belirlenmesi deneysel çalışma gerektiren MR sönümleyici parametreleri için ise adaptasyon kuralları gibi yenilikler içermektedir. MR sönümleyici için gerekli kontrol voltajı, kontrolör tarafından herhangi bir ters sönümleyici modeline gerek kalmadan direkt hesaplanmaktadır.

Kontrolör yapısından bahsedecek olursak, Lyapunov esasına dayalı kontrol yaklaşımlarında tüm sistem dinamiklerini içine alan pozitif tanımlı bir fonksiyonun türevinin negatif ya da negatif yarı tanımlı olması sistem kararlı olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle sistemde hata olarak tanımlanan ölçüm ve parametre belirsizleri kararlılık analizi kısmı göz önünde bulundurularak tanımlanır ve tasarlanan adaptasyon kuralları ile güncellenir.

MR sönümleyiciyi az sayıda parametre ile gerçekçi bir şekilde tanımlayan LuGre modeli aynı zamanda uyarlamalı kontrol uygulamalarında da avantaj sağlamaktadır. LuGre modeline ait MR sönümleyici kuvvet ifadesi ölçülemeyen bir iç dinamik içermesinden dolayı doğrudan kullanılamamaktadır. Bunun yerine iç değişken ifadesi tahmin edilen değeri ile değiştirildiğinde elde edilen tahmini kuvvet değeri kullanılmalıdır. Kuvvet ifadesinde yer alan pozitif değere sahip  $a_0$  değerinin bilindiği kabulü ile tahmini kuvvet ifadesi bir dizi işlemde sonra eşitlik (5.4)'de verilmiştir. Ayrıca modele ait sönüm ve katılık değerlerinin tam olarak bilinmediği kabul edilmiştir. Bölüm 2'de verilmiş olan LuGre modeline ait kuvvet denklemini (2.3), düzenlendiğinde (5.1) eşitliği elde edilir.

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v - \sigma_1 a_0 |\dot{x}| z + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x} + \sigma_b \dot{x} v \quad (5.1)$$

Yukarıdaki (5.1) kuvvet denklemi matris işlemlerinde kolaylık sağlaması açısından matris formunda yazıldığında,

$$f = \begin{bmatrix} z & vz & -|\dot{x}|z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_a \\ \sigma_0 \\ \sigma_1 a_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{x}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 + \sigma_2 \\ \sigma_b \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$f = \rho_1 \theta_1 + \rho_2 \theta_2$$

elde edilir. Burada  $\rho_1, \rho_2$  ölçülebilen sinyal vektörü;  $\theta_1, \theta_2$  bilinmeyen parametre vektörleridir.

$$\rho_1 = \begin{bmatrix} z & vz & -|\dot{x}|z \end{bmatrix} \quad \theta_1 = \begin{bmatrix} \sigma_a & \sigma_0 & \sigma_1 a_0 \end{bmatrix}^T \quad (5.3)$$

$$\rho_2 = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{x}v \end{bmatrix} \quad \theta_2 = \begin{bmatrix} \sigma_1 + \sigma_2 & \sigma_b \end{bmatrix}^T$$

Tahmini yapılacak parametreler ve ölçülemeyen iç değişken ifadelerini tahminleri ile değiştirdiğimizde tahmin edilen MR sönümleyici kuvvet değeri sonuç olarak eşitlik (5.4)'de verildiği gibidir.

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{z} & v\hat{z} & -|\dot{x}|\hat{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_a \\ \hat{\sigma}_0 \\ \sigma_1 a_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{x}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 + \sigma_2 \\ \hat{\sigma}_b \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\hat{f} = \hat{\theta}_{11}z - \hat{\theta}_{13}|\dot{x}|\hat{z} + \hat{\theta}_{21}\dot{x} + \left( \hat{\theta}_{12}z + \hat{\theta}_{22}\dot{x} \right)v$$

Sistemde hata sinyalini, ölçülen ve istenen değerlerin farkı olarak tanımlayalım,

$$e = x - x_d \quad (5.5)$$

Eşitlik (5.5)'de  $x$  değeri kütlelerin yer değişim miktarlarını tanımlamaktadır. Kontrolcüden beklenen her iki kütle için yer değişimlerini bastırmasıdır. Bu nedenle istenen pozisyon değeri  $x_d$  sifira eşittir. Başka bir deyişle ölçülen pozisyon değerleri kontrolör tarafından hata olarak algılanmaktadır. Hata sinyalini çeyrek taşıt modelini uygulamak için yeni bir hata izleme sinyali tanımlayacak olursak,

$$r = \dot{e} + \alpha e \quad (5.6)$$

$$r = \dot{x} + \alpha x$$



Burada  $\alpha$  pozitif tanımlı diyagonal kazanç matrisidir. Kontroldeki amaç hata izleme sinyalinin sifıra yakınsamasını sağlamaktır. Bu yolla her iki kütle için hız ve pozisyonları da sifıra yakınsayacaktır.

Daha önce tanımlanan (5.6) eşitliğinin türevini aldığımızda ve eşitlik (3.7)'de verilen çeyrek taşıt modeline ait hareket denklemini bu ifade de yerine yazdığımızda aşağıda verilen eşitlik (5.7) elde edilir.

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= M(\ddot{x} + \alpha\dot{x}) \\ &= \underbrace{M\alpha\dot{x} - C\dot{x} - Kx - Ld - Hf}_{Y\phi} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Burada  $Y$  ölçülen sinyal matrisini  $\phi$  ise bilinmeyen parametre vektörünü ifade etmektedir. Çeyrek taşıt modeli için bu değerler eşitlik (5.8) ve eşitlik (5.9)'da açık bir şekilde yazılmıştır.

$$\begin{aligned} Y &= [Y_m \quad Y_c \quad Y_k] \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_1 \dot{x}_1 & 0 & \dot{x}_2 - \dot{x}_1 & d - x_1 & x_2 - x_1 \\ 0 & \alpha_2 \dot{x}_2 & \dot{x}_1 - \dot{x}_2 & 0 & x_1 - x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\phi = [\phi_m \quad \phi_c \quad \phi_k] = [m_1 \quad m_2 \quad c \quad k_1 \quad k_2]^T \quad (5.9)$$

Daha önce eşitlik (5.2)'de tanımlanan MR sönümleyici kuvvet değeri eşitlik (5.7)'de yerine yazılır ve  $H\hat{f}$  ifadesi eklenip çıkarılırsa hata dinamiği eşitlik (5.10)'da verilen şekli alır.

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= Y\phi + H\chi - Hu_x - H(\rho_1\theta_1 + \rho_2\theta_2 - \hat{\rho}_1\hat{\theta}_1 - \rho_2\hat{\theta}_2) \\ &= Y\phi + H\chi - Hu_x - H\rho_2\tilde{\theta}_2 - \\ &\quad H(\theta_{11}z - \hat{\theta}_{11}\hat{z} + \theta_{12}vz - \hat{\theta}_{12}v\hat{z} - \theta_{13}|\dot{x}|z + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}|\hat{z}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

İşlem kolaylığı açısından  $\chi$  ve  $u_x$  terimleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \chi &= -\hat{\theta}_{11}\hat{z} + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}|\hat{z} - \hat{\theta}_{21}\dot{x} \\ u_x &= (\hat{\theta}_{12}\hat{z} + \hat{\theta}_{22}\dot{x})v \end{aligned} \quad (5.11)$$

Bölüm sonunda gerçekleştirilecek kararlılık analizi de göz önüne alınarak eşitlik (5.10) ifadesinde yer alan kontrol girişi  $Hu_x$  aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır.

$$Hu_x = Kr + H\chi + Y\phi + H\left(-\hat{\theta}_{11}\zeta_1 - \hat{\theta}_{12}\zeta_2 v + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}|\zeta_3\right) \quad (5.12)$$

Eşitlik (5.12)'den MR sönümleyici için kontrol voltajını çekecek olursak,

$$Hv = \frac{Kr + H\chi + Y\phi + H\left(-\hat{\theta}_{11}\zeta_1 + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}|\zeta_3\right)}{\underbrace{\left(\hat{\theta}_{12}\hat{z} + \hat{\theta}_{22}\dot{x} + \hat{\theta}_{12}\zeta_2\right)}_{\beta}} \quad (5.13)$$

elde edilir. Eşitlik (5.13)'de  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$  terimleri yardımcı filtre değerleri,  $K$  pozitif tanımlı kontrol kazanç matrisidir. Tasarlanan kontrol girişi, hata dinamiği ifadesinde eşitlik (5.10)'da yerine yazılır ve  $H(\theta_{11}(\hat{z} + \zeta_1))$ ,  $H(\theta_{12}v(\hat{z} + \zeta_2))$ ,  $H(\theta_{13}|\dot{x}|(\hat{z} + \zeta_3))$  terimleri eklenip çıkarılırsa hata dinamiği sonuç olarak eşitlik (5.14) verilen şekli alır.

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= -Kr + Y\tilde{\phi} - H\rho_2\tilde{\theta}_2 \\ &+ H\left\{-\theta_{11}(\hat{z} + \zeta_1) - \theta_{11}(\tilde{z} - \zeta_1)\right\} \\ &+ H\left\{-\theta_{12}v(\hat{z} + \zeta_2) - \theta_{12}v(\tilde{z} - \zeta_2) + \theta_{13}|\dot{x}|(\hat{z} + \zeta_3) + \theta_{13}|\dot{x}|(\tilde{z} - \zeta_3)\right\} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Hata dinamiğinin son halinde yer alan MR sönümleyici iç değişken tahmin ifadesi ve iç değişken tahmin hatası ise aşağıdaki eşitlik (5.15)'de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= \dot{x} - a_0|\dot{x}|\hat{z} \\ \dot{\tilde{z}} &= \dot{z} - \dot{\hat{z}} \rightarrow \dot{\tilde{z}} = -a_0|\dot{x}|\tilde{z} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Kontrolün kararlılığını inceleyecek olursak öncelikle kapalı çevrim sistem denklemini içinde yer alan tüm hata değişkenlerini kapsayan pozitif tanımlı aday Lyapunov fonksiyonu tanımlanır. Lyapunov fonksiyonu genellikle sistemin enerjisi olarak düşünülür ve zamanla azalması beklenir. Bu yaklaşım kendisi pozitif tanımlı türevi ise negatif yarı tanımlı bir fonksiyonu ifade eder. Kararlılık analizi için aday Lyapunov fonksiyonu eşitlik (5.16)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
V &= \frac{1}{2} r^T M r + \frac{1}{2} \tilde{z}^2 + \frac{1}{2} \phi^T \Gamma_\phi^{-1} \phi + \frac{1}{2} \theta_2^T \Gamma_2^{-1} \theta_2 \\
&+ \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_1} \theta_{11}^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_2} \theta_{12}^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_3} \theta_{13}^2 + \frac{1}{2} \theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1)^2 \\
&+ \frac{1}{2} \theta_{12} (\tilde{z} - \zeta_2)^2 + \frac{1}{2} \theta_{13} (\tilde{z} - \zeta_3)^2
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevini aldığımızda eşitlik (5.17) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= r^T M \dot{r} + \tilde{z} \dot{\tilde{z}} + \phi^T \Gamma_\phi^{-1} \dot{\phi} + \theta_2^T \Gamma_2^{-1} \dot{\theta}_2 \\
&+ \frac{1}{\gamma_1} \theta_{11} \dot{\theta}_{11} + \frac{1}{\gamma_2} \theta_{12} \dot{\theta}_{12} + \frac{1}{\gamma_3} \theta_{13} \dot{\theta}_{13} \\
&+ \underbrace{\theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_1) + \theta_{12} (\tilde{z} - \zeta_2) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_2) + \theta_{13} (\tilde{z} - \zeta_3) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_3)}_P
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Daha önce eşitlik (5.14) ve eşitlik (5.15) ile tanımlanan hata dinamiği ve gözlemleyici ifadelerini Lyapunov fonksiyonunun türevinde yerine yazdığımızda eşitlik (5.18) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= r^T \left\{ \begin{array}{l} -Kr + Y\tilde{\phi} - H\rho_2\tilde{\theta}_2 - H\tilde{\theta}_{11}(\hat{z} + \zeta_1) - H\theta_{11}(\tilde{z} + \zeta_1) \\ -H\tilde{\theta}_{12}v(\hat{z} + \zeta_2) - H\theta_{12}v(\tilde{z} + \zeta_2) + H\tilde{\theta}_{13}|\dot{x}|(\hat{z} + \zeta_3) \\ + H\theta_{13}(\tilde{z} + \zeta_3) \end{array} \right\} \\
&+ \tilde{z} \{-a_0|\dot{x}|\tilde{z}\} + \phi^T \Gamma_\phi^{-1} \dot{\phi} + \theta_2^T \Gamma_2^{-1} \dot{\theta}_2 \\
&+ \frac{1}{\gamma_1} \theta_{11} \dot{\theta}_{11} + \frac{1}{\gamma_2} \theta_{12} \dot{\theta}_{12} + \frac{1}{\gamma_3} \theta_{13} \dot{\theta}_{13} + P
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Yukarıdaki eşitlik (5.18)'de yer alan adaptasyon terimleri ve yardımcı filtreler eşitlik (5.19) ve eşitlik (5.20)'deki gibi tanımlanırsa

$$\begin{aligned}
\dot{\phi} &= -\Gamma Y^T r \\
\dot{\theta}_2 &= \Gamma_2 \rho_2^T H^T r \\
\dot{\theta}_{11} &= \gamma_1 (\hat{z} + \zeta_1) H^T r \\
\dot{\theta}_{12} &= \gamma_2 v(\hat{z} + \zeta_2) H^T r \\
\dot{\theta}_{13} &= -\gamma_3 |\dot{x}| (\hat{z} + \zeta_3) H^T r
\end{aligned} \tag{5.19}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\zeta}_1 &= -a_0 |\dot{x}| \zeta_1 - H^T r \\
\dot{\zeta}_2 &= -a_0 |\dot{x}| \zeta_2 - v H^T r \\
\dot{\zeta}_3 &= -a_0 |\dot{x}| \zeta_3 - |\dot{x}| H^T r
\end{aligned} \tag{5.20}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi eşitlik (5.21)'de verilen olan son halini alır.

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= -r^T K r - a_0 |\dot{x}| \tilde{z}^2 - \theta_{11} a_0 |\dot{x}| (\tilde{z} - \zeta_1)^2 \\
&\quad - \theta_{12} a_0 a_0 |\dot{x}| (\tilde{z} - \zeta_2)^2 - \theta_{13} a_0 |\dot{x}| (\tilde{z} - \zeta_3)^2
\end{aligned} \tag{5.21}$$

Yukarıdaki eşitlik (5.21)'de son üç terimin her zaman sıfırdan küçük olması nedeniyle fonksiyon aşağıdaki gibi bir üst limit ile sınırlanabilmektedir.

$$\dot{V} \leq -r^T K r \tag{5.22}$$

Sonuç olarak, sistem dinamiklerini içeren kendisi pozitif tanımlı türevi negatif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonu elde edilir. Bu da sistemin kararlı olduğunu ve tüm değişkenlerin sınırlı bir bant içerisinde kalacağını garanti eder.

Doğrusal olmayan uyarlamalı kontrolörün yarı aktif süspansiyon sistemine uygulanmasında eşitlik (5.13) ile elde edilen gerilim değerinin payda kısmı  $\varepsilon$  küçük bir sayı olmak üzere eşitlik (5.23)'de verildiği gibi sanal olarak sıfırdan uzaklaştırılması gerekmektedir.

$$\beta = \begin{cases} \varepsilon & -\varepsilon \leq \beta \leq \varepsilon \\ \beta & \beta < \varepsilon \text{ ve } \varepsilon < \beta \end{cases} \tag{5.23}$$

MR sönümleyicinin elektriksel besleme limitinden dolayı hesaplanan gerilim değeri eşitlik (5.24)'de verilen kırpma işleminden geçirildikten sonra MR sönümleyiciye gönderilmektedir.

$$v = \begin{cases} 0 & v \leq 0 \\ v & 0 < v < V_{maks} \\ V_{maks} & V_{maks} < v \end{cases} \tag{5.24}$$

## 6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde iki farklı simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk simülasyon çalışması daha önceki bölümlerde açıklanmış olan yarı aktif hibrit skyhook, LQG,  $H_\infty$  ve doğrusal olmayan uyarlamalı kontrolörlerin MATLAB-Simulink ortamında karşılaştırmalı performans değerlendirmelerini içermektedir. Simülasyonlarda çeyrek taşıt modeline tümsek formunda ve rastgele profile sahip yol girdilerinin etki ettiği kabul edilmiştir. Kullanılan MR sönümleyicinin pasif haldeki sönümleme kuvvetinin fazla olması sebebiyle kontrol etkinliğini daha iyi görmek adına ilk simülasyonda biraz ağır sayılabilecek çeyrek taşıt modeli göz önüne alınmıştır. Kullanılan çeyrek taşıt modeline ait sistem parametrelere değerleri ise [Tam et al., 1996] çalışmasından alınmıştır.

İkinci simülasyon çalışmasında ise kurulan çeyrek taşıt deney düzeneğinde kullanılan gerçek sistem parametrelerinden faydalanılmıştır. Tez çalışmasının ana konusu olan uyarlamalı kontrol yaklaşımının performans değerlendirmesi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

### 6.1. Simülasyon Çalışması I

Uyarlamalı kontrolör için sistem ve MR sönümleyici parametrelerinin başlangıç değerlerine ihtiyaç vardır. Çeyrek taşıt modeline ait sistem değerleri ve başlangıç şartları Tablo 6.1’de yer almaktadır. MR sönümleyiciye ait gerçek parametre değerleri ise daha önce verilmiş olan Tablo 2.3’de yer almaktadır. MR sönümleyici başlangıç değerleri ise  $\theta_{ij} = [1.3 \times 10^3 \quad 0.4 \times 10^3 \quad 70 \times 10^3 \quad 300 \times 10^3 \quad 4 \times 10^3]$  şeklindedir.

Tasarımda kontrol kazanç matrisi  $K = \text{diag}(1 \quad 10^5)$ , MR sönümleyici parametrelerinin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi  $\Gamma_2 = \text{diag}(1262 \quad 1020)$  ve adaptasyon katsayıları ise  $\gamma_1 = 551 \times 10^5$ ,  $\gamma_2 = 742 \times 10^6$ ,  $\gamma_3 = 31 \times 10^5$  şeklindedir. Çeyrek taşıt modeline ait parametrelerin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi ise  $\Gamma_\phi = \text{diag}(130.3 \quad 523 \quad 880 \quad 488 \times 10^5 \quad 20 \times 10^5)$  şeklindedir.

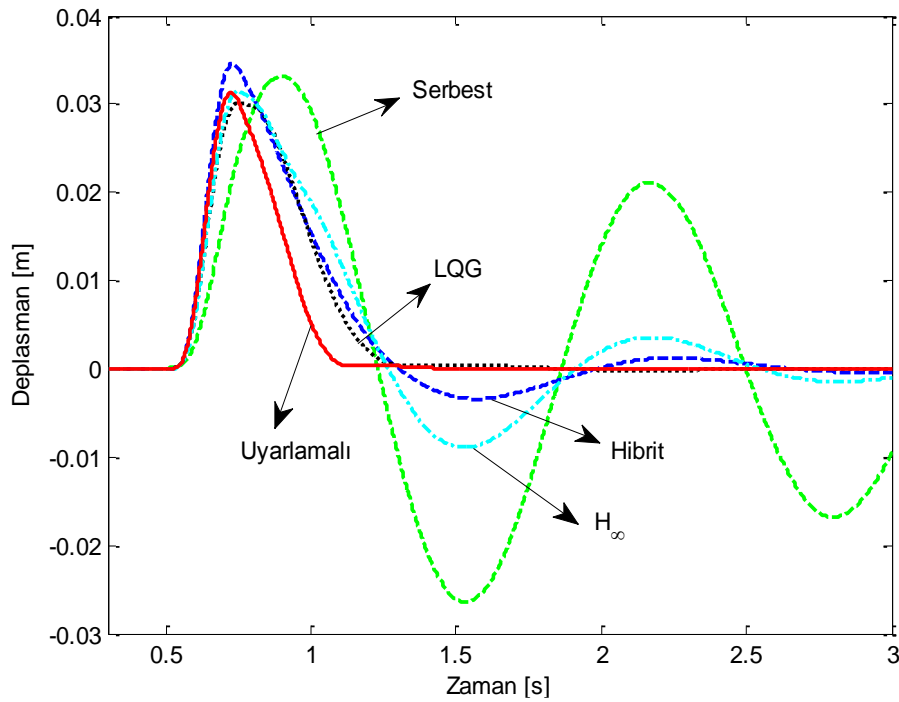
Tablo 6.1: Çeyrek taşıt model parametreleri.

Sembol	Gerçek Değer	Başlangıç Değeri	Birim
$m_1$	62	50	Kg
$m_2$	504.5	450	Kg
$c$	400	500	N.s/m
$k_1$	252000	210000	N/m
$k_2$	13100	15000	N/m

Yol girişi olarak aşağıdaki fonksiyon ile tanımlanan tümsek düşünülmüştür.

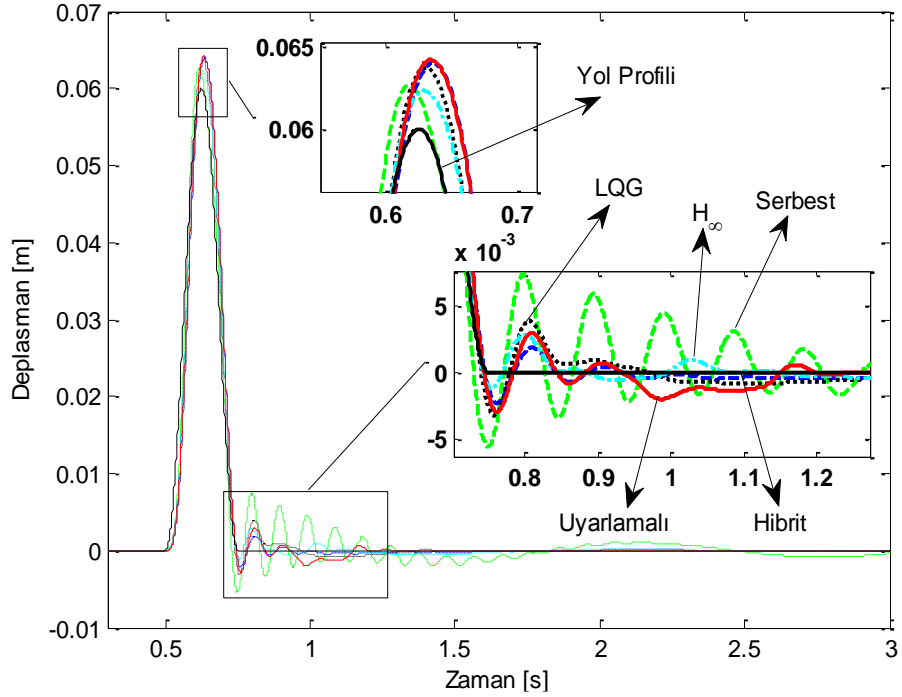
$$d(t) = \begin{cases} 0.06(1 - \cos 8\pi t) / 2 & 0.5 \leq t \leq 0.75 \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (6.1)$$

Şekil 6.1’de taşıt gövdesinin (yaylanmalı kütle) düşey eksenindeki deplasman grafiği verilmiştir. Uyarlamalı kontrolörün nominal sistem parametrelerine zaman içerisinde ulaşması durumunda bile üst kütlein salınımını diğer sistem kontrolcülerine göre kısa sürede yok ettiği görülmektedir. Yol girişi tepe noktasının üst kütlein deplasmanına olan etkisi ise diğer kontrolcülere göre azaltılmıştır.



Şekil 6.1: Taşıt gövdesi düşey yer değişim hareketi.

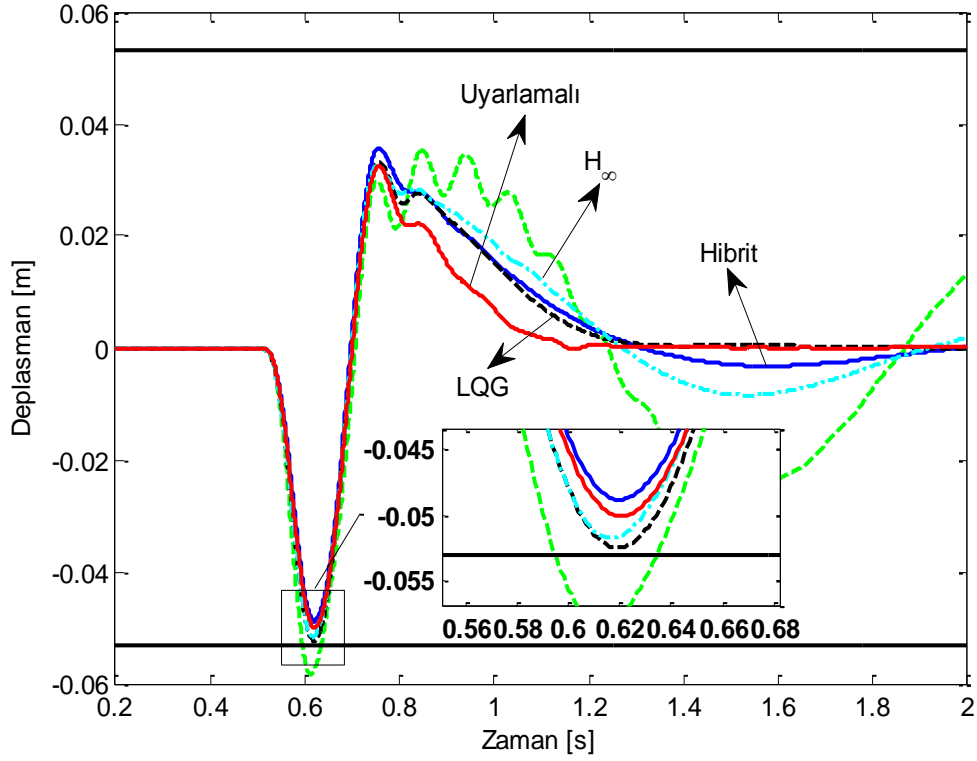
Şekil (6.2)'de tekerlek kütlelerinin düşey yerdeğişimi görülmektedir. Bu grafiği yol tutuşu ile ilişkilendirebiliriz. Genede konfordaki iyileşme yol tutuşundan ödün verme ile gerçekleşir. Fakat uyarlamalı kontrolün konfordaki iyileşmeyi, yol tutuşunda diğer kontrolörlerle benzer performansı sergileyerek sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.2: Tekerlek kütleleri düşey yer değışim hareketi.

Süspansiyon performans değerlendirmesinde bir diğer önemli nokta ise, süspansiyon çalışma aralığıdır. Bu aralığın aşılması yapısal hasara sebep olduğu gibi sağlanmak istenen performans kriterlerinden uzaklaşma anlamına da gelmektedir.

Şekil 6.3'de karşılaştırması yapılan kontrol yaklaşımlarının süspansiyon çalışma aralığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekildeki siyah düz çizgiler sönümleyicinin çalışma aralığını göstermektedir. Lord 1005-3 serisi MR sönümleyici için bu aralık  $\pm 53$  mm dir. Uyarlamalı kontrol tasarımının yarı aktif sönümleyiciyi diğer kontrol yaklaşımlarına göre daha kısa bir çalışma aralığında tuttuğu görülmektedir. Ayrıca kısa sürede salınımların bastırılması sebebiyle süspansiyonda oluşabilecek gereksiz ısınmaların önünde geçilmiştir.

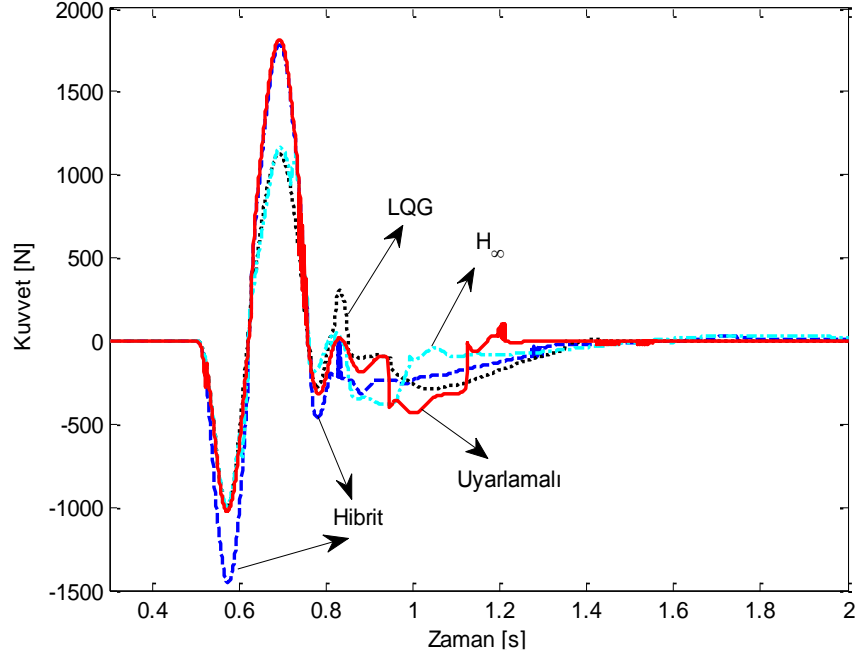


Şekil 6.3: Süspansiyon çalışma aralığı.

Uygulanan kontrol yaklaşımlarının performans değerlendirmesinde kontrol girişleri önemlidir. Şekil 6.4’de uygulanan kontrol metotlarına ait MR sönümleyici kuvvet çıktıları görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere uyarlamalı kontrol yaklaşımının kuvvet cevabı diğer kontrol metotlarına göre bir miktar fazladır. Bunun nedeni MR sönümleyiciyi tanımlayan parametrelere ait başlangıç değerlerinin gerçek değerlerinden farklı seçilmesidir. MR sönümleyici parametrelerinin gerçek değerlerine yakınsaması ile birlikte uyarlamalı kontrol yaklaşımına ait kuvvet cevabı da diğer metotlar ile aynı mertebelere gelmektedir.

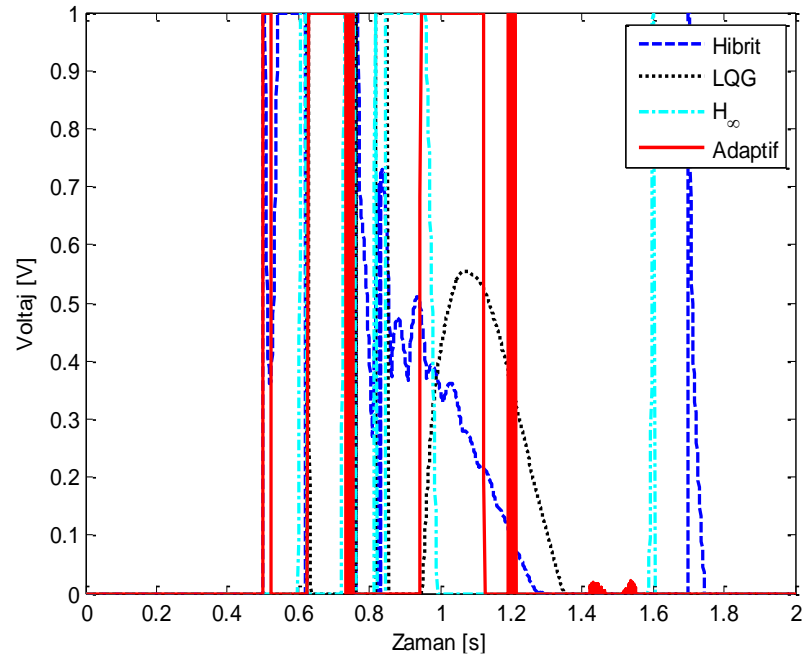
Üzerinde durulması gereken bir diğer nokta ise MR sönümleyici besleme gerilimidir. Uygulanan kontrol yaklaşımının sağlanmak istenen performansı asgari enerji sarfiyatı ile gerçekleştirmesi beklenir. Şekil 6.5’de MR sönümleyici besleme gerilimleri görülmektedir. Uyarlamalı yarı aktif kontrol gerilim çıkışının kırpmalı bir yapıda olması oluşturulan kuvvet çıktısında kısa süreli küçük değişimlere sebep olmaktadır. Bu etki Şekil 6.4’de görülmektedir.





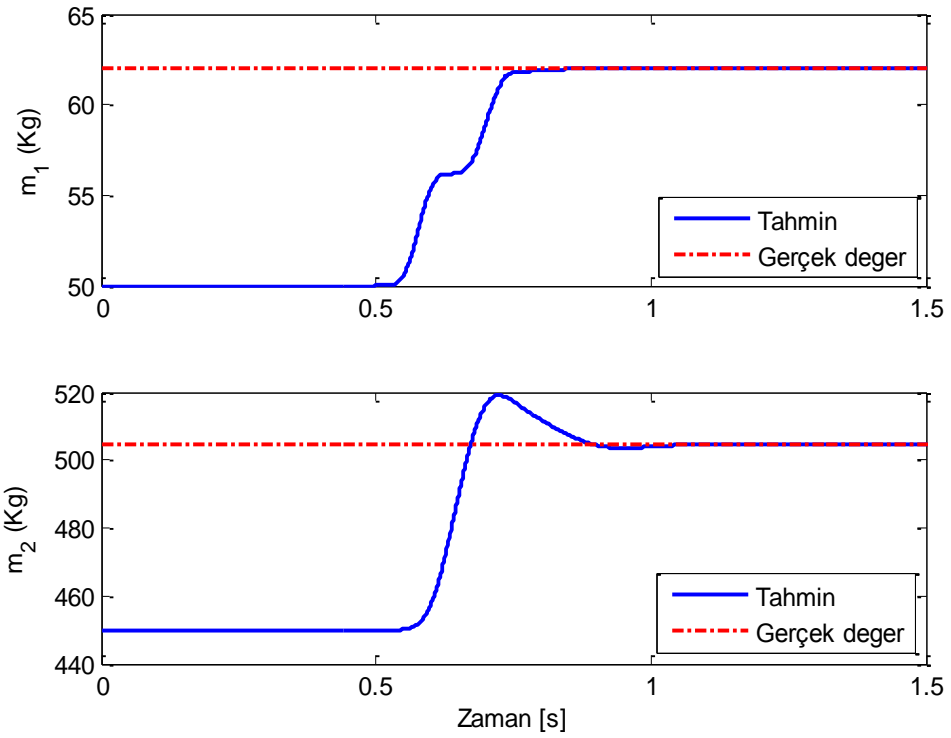
Şekil 6.4: MR sönümleyici kuvvet cevapları.

Uyarlamalı kontrol yaklaşımı kısa bir sürede gövde ve tekerlek salınımlarını bastırması nedeniyle MR sönümleyiciye gönderilen elektriksel girdi diğer kontrol metotlarına göre daha önce sonlandırılmaktadır.

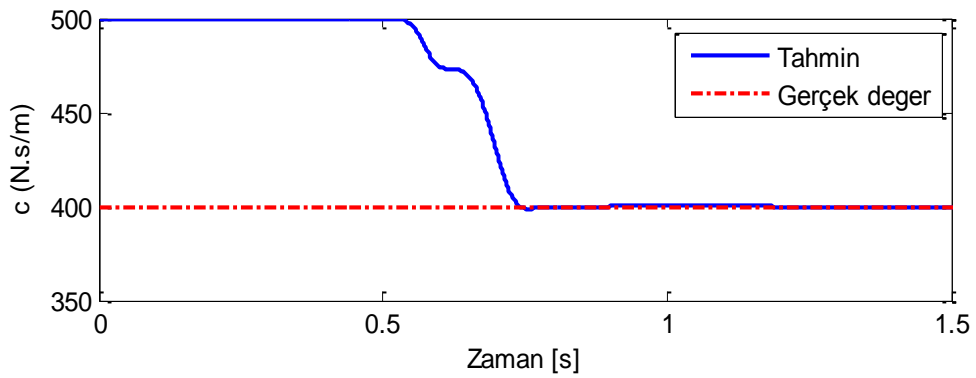


Şekil 6.5: MR sönümleyici kontrol voltajı.

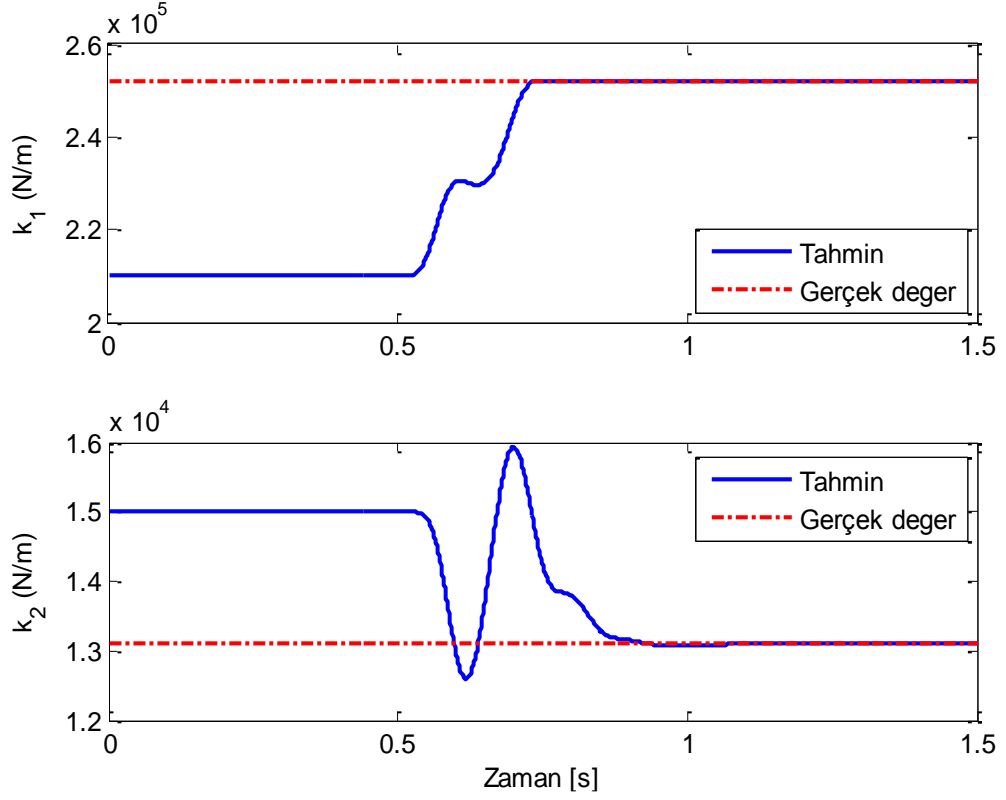
Uygulamada taşıt ve süspansiyon sistemine ait parametrik belirsizlikler süspansiyon performansı üzerine etki etmektedir. Örnek verecek olursak, taşıt gövde kütlesi, içerisindeki yolcu sayısı veya bagaj yüklemesi ile değişmektedir. Benzer şekilde süspansiyon özelliği de zaman içerisinde ısınma ve oluşan deformasyon sebebiyle değişmektedir. Bu gibi nedenler değişen şartlara kendini uyarlayabilen uyarlamalı kontrol gibi yöntemlerin önemini arttırmaktadır. Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de taşıt kütle yay ve sönüm parametrelerinin gerçek değerlerine yakınsama karakteristiği görülmektedir.



Şekil 6.6: Çeyrek taşıt kütle parametrelerinin yakınsama karakteristiği.

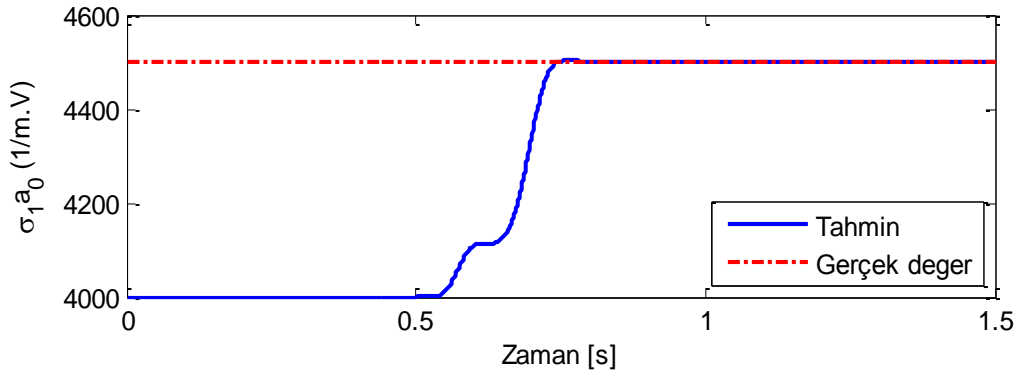


Şekil 6.7: Çeyrek taşıt sönüm değeri yakınsama karakteristiği.

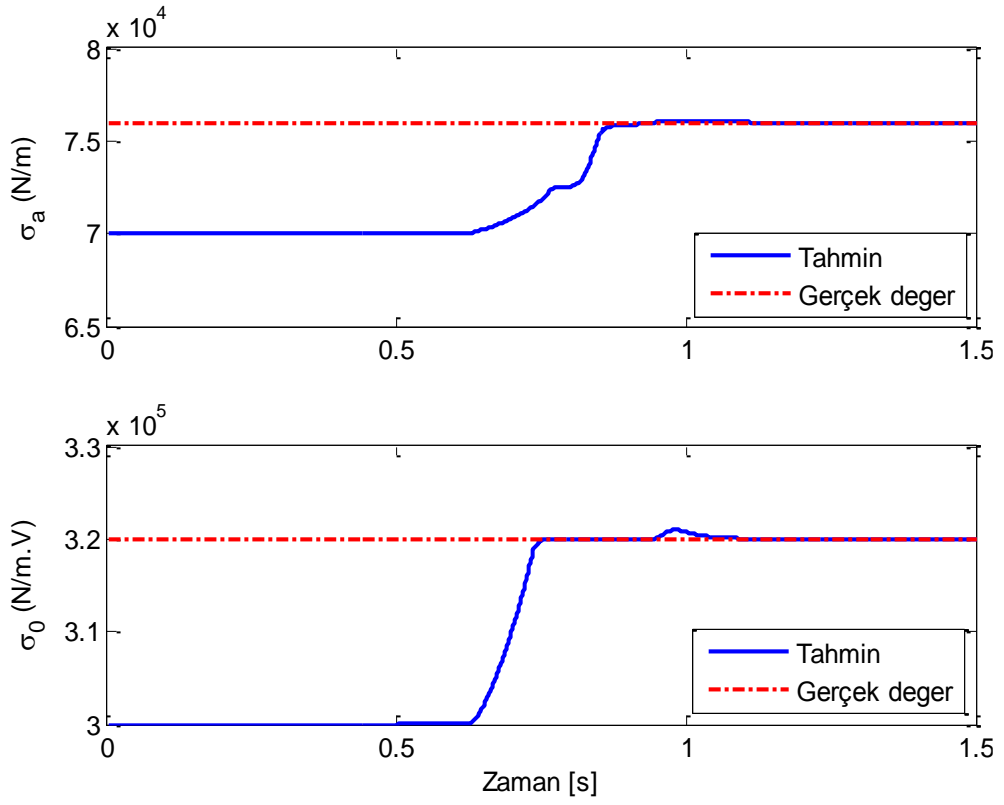


Şekil 6.8: Çeyrek taşıt yay katsayı değerinin yakınsama karakteristiği.

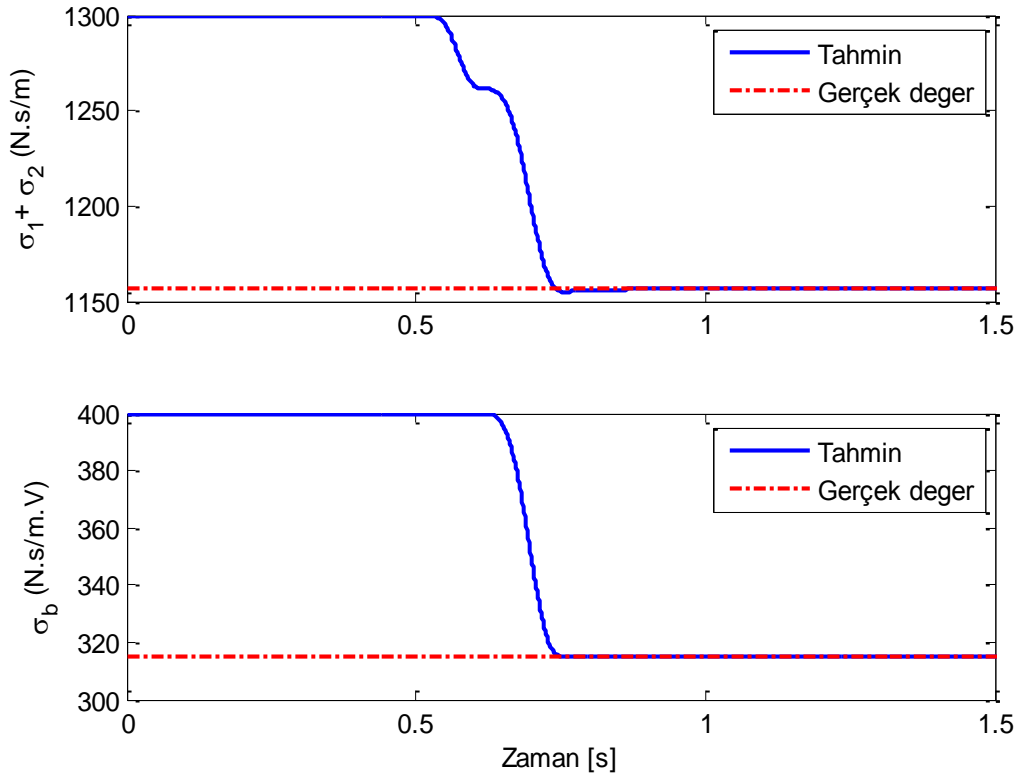
MR sönümleyici parametrelerinin [Şaban, 2010] çalışmasında deneysel olarak elde edilen gerçek değerlerine yakınsama karakteristiği ise Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de görülmektedir.



Şekil 6.9: MR Sönümleyici parametre yakınsama karakteristiği.



Şekil 6.10: MR Sönümleyici rijitlik katsayılarının yakınsama karakteristiği.



Şekil 6.11: MR Sönümleyici parametrelerinin yakınsama karakteristiği.

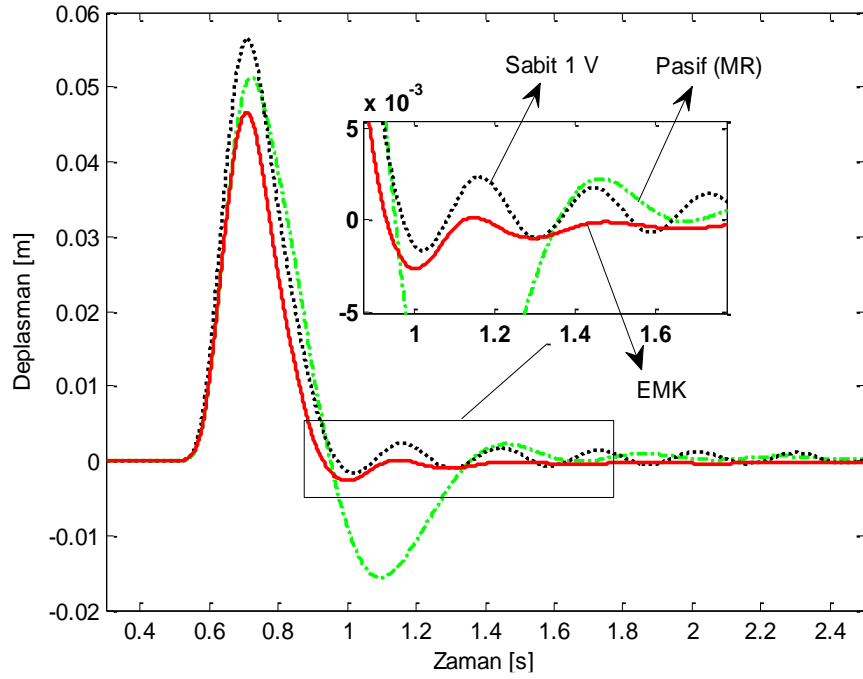
Seçilen kazanç matrisleri ve adaptasyon katsayı değerleri ile birlikte tüm sistem ve MR sönümleyici parametrelerinin başlangıç değerlerinden gerçek değerlerine kısa sürede yakınsadığı görülmektedir. Adaptasyon sırasındaki sistem değerlerindeki değişimin gerek sürüş konforu gerekse yol tutuşu açısından kontrolörün etkinliğini karşılaştırıldığı durumlara göre bozmadığı görülmektedir.

## **6.2. Simülasyon Çalışması II**

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kurulan gerçek ölçekli çeyrek taşıt deney düzeneğine ait sistem parametreleri kullanılarak tümsek ve rastgele yol girişleri altında uyarlamalı yarı aktif kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Tümsek yol girişi sisteme yaklaşık 0.25 saniye gibi sürede etkimektedir. Bu kadar kısa bir sürede tüm sistem ve MR sönümleyici parametrelerinin tahminini gerçekleştirmek hem çok yüksek kazanç katsayıları gerektirmekte hem de deneysel uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bu başlık altında ilk olarak incelenen tümsek yol girişi durumunda, taşıt ve MR sönümleyici dinamik modelini tanımlayan parametrelerin tam olarak bilindiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla parametre adaptasyonunu sağlayan adaptasyon katsayıları sıfır kabul edilmiştir. Bu kontrol yaklaşımı literatürde EMK (exact model knowledge) kontrol olarak geçmektedir.

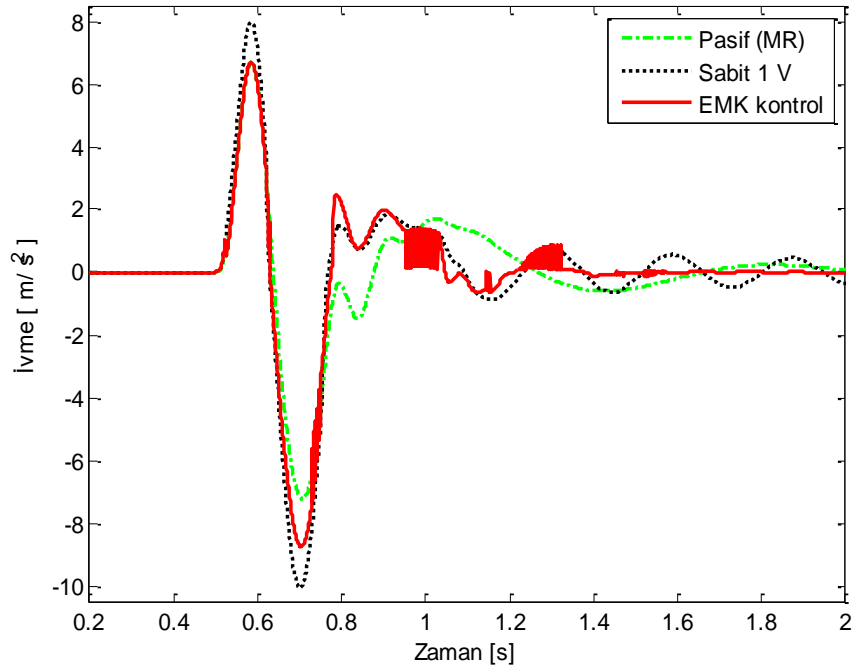
### **6.2.1. Tümsek Yol Girişi**

Bu bölümde incelenen EMK kontrol yaklaşımının performansı pasif hal (MR sönümleyicinin hiçbir elektriksel girdi ile beslenmediği) ve sönümleyicinin sabit bir volt gerilim ile beslendiği durum ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile birlikte uygulanan kontrol yaklaşımının sert süspansiyon ile yumuşak süspansiyon arasında bir karakter sergilediği görülmektedir. Kontrol yaklaşımının, tümsek tepe noktasında taşıt gövde kütlelerinin yer değişimini önemli ölçüde azalttığı Şekil 6.12'de görülmektedir. Tümsek bitiminde ise taşıt gövde kütlelerinin kısa sürede yeni yol şartlarına uyum sağladığı ve salınımlarının azaltıldığı görülmektedir.



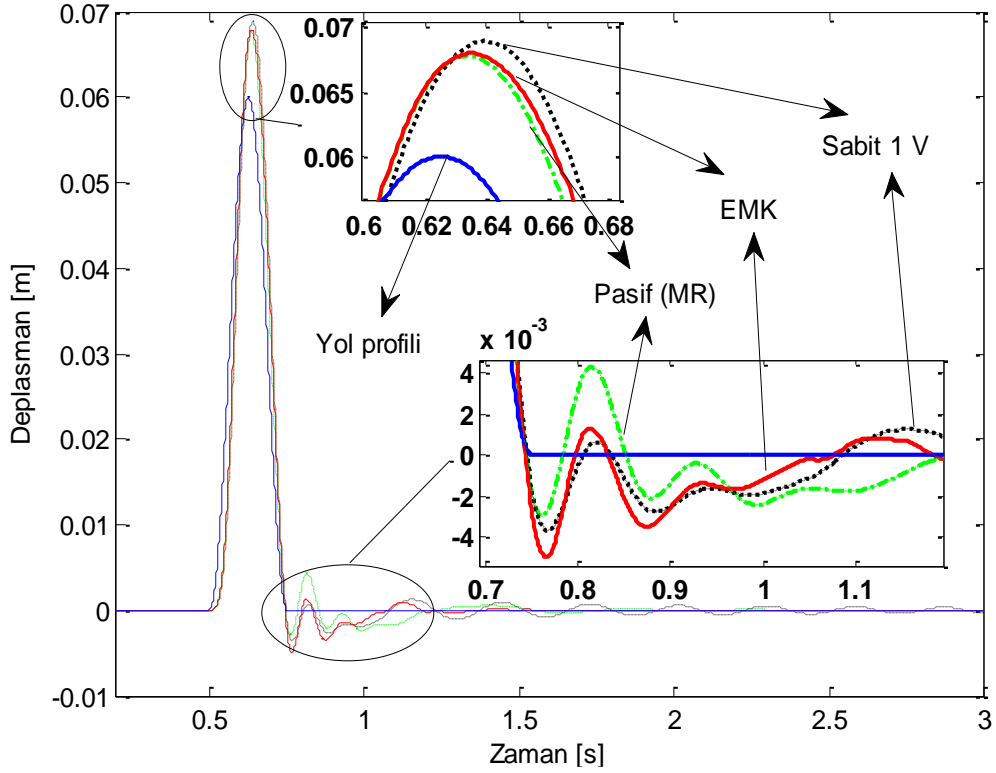
Şekil 6.12: Taşıt gövde kütleli düşey yer değışimi.

Taşıt konfor değeri değerlendirilmesinde üst kütleli ivme cevabı önemlidir. Taşıt gövdesinin aşırı ivmelenmesi ve salınımlar göstermesi konfor üzerinde bozucu etkiye neden olmaktadır. Uygulanan kontrol yaklaşımının tümsek tepe noktası ve bitiminde ortaya çıkan pozitif negatif yönlü ivmelenmelerde pasif duruma yakın performans sergilediği Şekil 6.13'de görülmektedir.



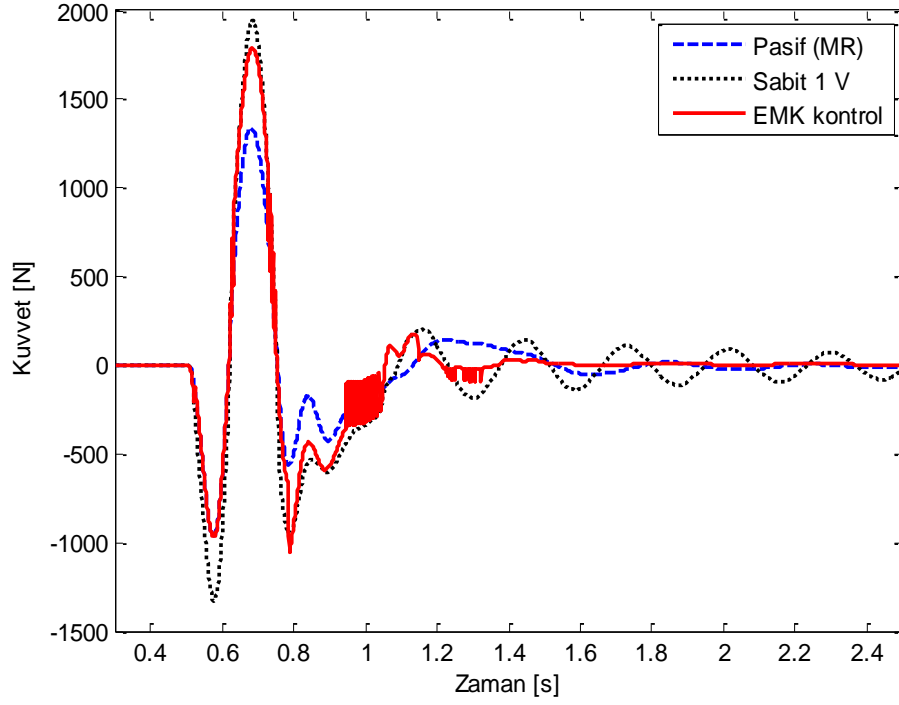
Şekil 6.13: Taşıt gövdesinin düşey ivme cevabı.

Taşıt süspansiyon sistemlerinde odaklanılan bir diğer ölçüt olan yol tutuşu, tekerlek kütlelerini temsil eden alt kütlelerin yol çizgisini takip etmesi ile değerlendirilmektedir. Tümsek tepe noktasında tekerleğin yoldan ayrılmaması ve tümsek bitiminde kısa sürede titreşimlerinin azalması beklenir. EMK kontrol yaklaşımının konfordaki iyileşmeyi yol tutuşunda kötüleşmeye sebep olmadan gerçekleştirdiği Şekil 6.14’de görülmektedir.



Şekil 6.14: Tekerlek kütlelerinin düşey yer değışimi.

Yol tutuşu ve konfordaki iyileşme ne kadarlık bir kontrol kuvveti altında gerçekleştiği uygulanan kontrol yaklaşımının değerlendirilmesinde önemlidir. Pasif hal beklendiği gibi en düşük kuvvet çıktısının olduğu durumdur. EMK kontrol yaklaşımı ise pasif hal ve sabit gerilim arasında kuvvet çıkışı vermektedir. EMK gerilim çıkışının sıfır bir volt arası kırpmalı yapısı kuvvet çıkışında bozucu etkiye neden olabilmektedir. Kısa süreli bu etki Şekil 6.15’de gösterilen kuvvet cevabında birinci saniye yakınlarında görülebilmektedir.



Şekil 6.15: MR sönümleyici kuvvet cevapları.

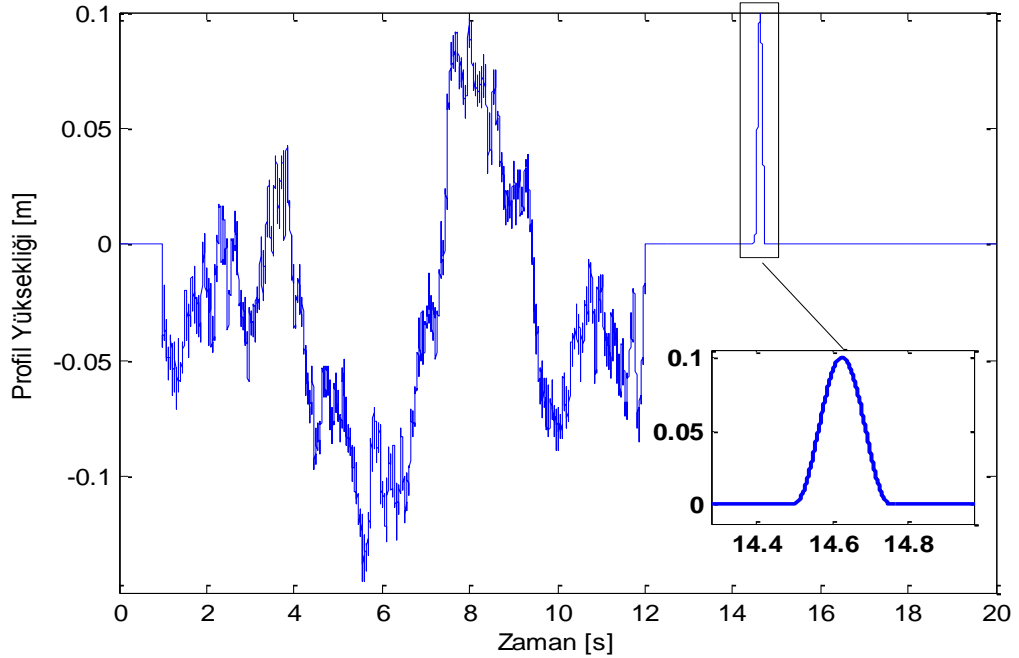
### 6.2.2. Rastgele Yol Girişi

Bu bölümde tanımlanan özel bir profile sahip yol girişi altında hem parametre adaptasyonunun sağlandığı uyarlamalı kontrol hem de EMK kontrol yaklaşımı simülasyon ortamında test edilmiştir. Yol profilinin ilk bölümü çeyrek taşıt modelinin titreşim modlarını ortaya çıkarabilecek nitelikte rastgele bir yapıya sahiptir. Yol profilinin bu ilk bölümünde çeyrek taşıt modeli ve MR sönümleyici parametrelerinin adaptasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde odaklanılan esas nokta parametre adaptasyonu olmamasına rağmen uyarlamalı kontrolör süspansiyon sisteminin değerlendirmesinde kullanılan kriterler açısından karşılaştırıldığı durumlara göre başarılıdır. Rastgele yapıya sahip yol yüzeyinin sonlanması ile birlikte parametre adaptasyonu da sonlanmaktadır. Adaptasyon sonucunda ulaşılan parametre değerleri ile birlikte kontrol yaklaşımı tümsek giriş altında test edilmiştir. Tanımlanan yol profili ise Şekil 6.16'da görülmektedir.

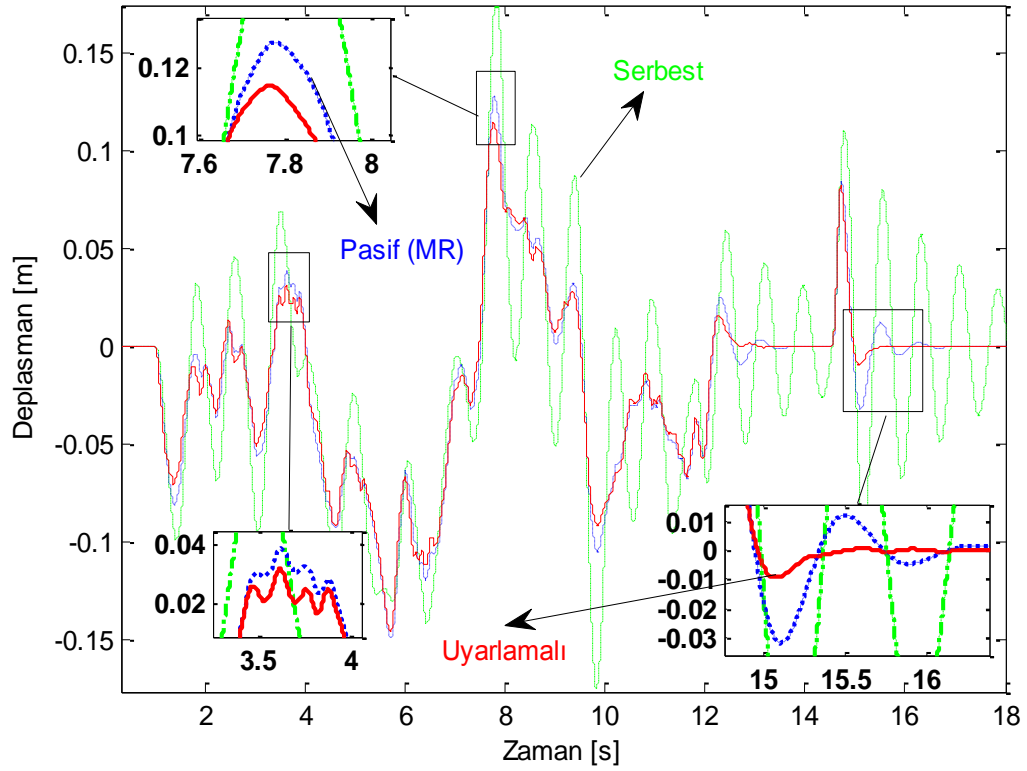


Çeyrek taşıt modelinin kütle, sönüm ve yay katsayılarına ait başlangıç değerleri  $\phi_{initial} = [50 \ 200 \ 300 \ 195 \times 10^3 \ 20 \times 10^3]$  şeklindedir. MR sönümleyici başlangıç değerleri ise  $\theta_{ij} = [1.2 \times 10^3 \ 0.35 \times 10^3 \ 73 \times 10^3 \ 315 \times 10^3 \ 4 \times 10^3]$  seçilmiştir. Kontrol kazanç matrisi  $K = \text{diag}(1 \ 10^3)$ , MR sönümleyici parametrelerinin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi  $\Gamma_2 = \text{diag}(17.5 \ 30.5)$  ve adaptasyon katsayıları ise  $\gamma_1 = 21.9 \times 10^4$ ,  $\gamma_2 = 441 \times 10^4$ ,  $\gamma_3 = 12.9 \times 10^4$  şeklindedir. Çeyrek taşıt modeline ait parametrelerinin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi ise  $\Gamma_\phi = \text{diag}(8.9 \ 12.6 \ 20.2 \ 455 \times 10^3 \ 118 \times 10^3)$  şeklindedir.



Şekil 6.16: Yol Profili

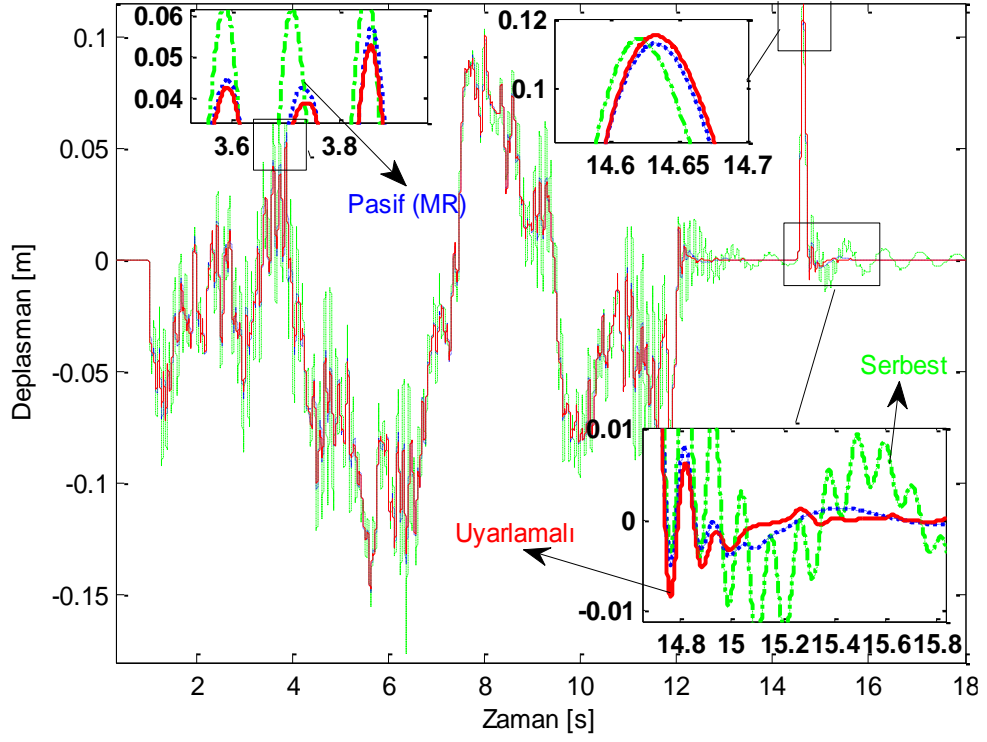
Yol profilinin ilk bölümünde gerçekleşen parametre adaptasyonu, odaklanılan gövde yer değişim değeri üzerinde bozucu bir etkiye neden olmadığı Şekil 6.17’de görülmektedir. Uyarlamalı kontrol üst kütle deplasmanında karşılaştırıldığı Serbest ve Pasif (MR) durumlarına göre azalma sağladığı görülmektedir. Ayrıca tümsek bitiminde üst kütle salınımlarının kısa sürede bastırıldığı görülmektedir.



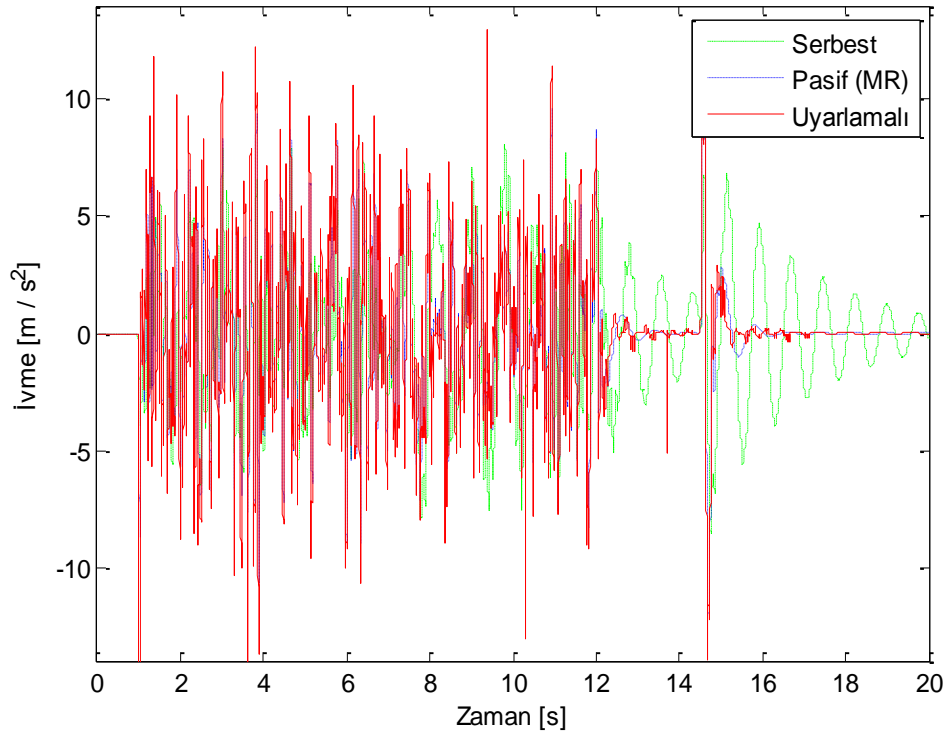
Şekil 6.17: Taşıt gövdesi yer değişimi.

Tekerlek kütlesi hareketi ise Şekil 6.18’de verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere uyarlamalı kontrol yaklaşımı bozuk yol boyunca tekerlek kütlesini içerdiği parametre belirsizliklerine rağmen karşılaştırıldığı durumlara göre yola daha yakın tutmaktadır. Bozuk yoldan düzgün yola geçiş salınım genlikleri azaltılmış ve kısa sürede bastırılmıştır. Benzer iyileştirme tümsek sonrası düzgün yola geçişte de söz konusudur. Uyarlamalı kontrol yaklaşımı tümsek tepe noktasında da tekerleği yola daha yakın tutmaktadır.

Şekil 6.19’da ise taşıt gövdesinin ivme cevapları görülmektedir. Simülasyonda kullanılan MR sönümleyici pasif halde yüksek sönümleme kuvveti üretmektedir. Bu nedenle uyarlamalı kontrolör bozuk yol boyunca Pasif duruma yakın ivme cevapları sergilemektedir. Kontrolör etkinliği yol geçişlerinde yaşanan ivme değişimlerinin bastırılmasında daha fazla öne çıkmaktadır. MR sönümleyiciye gönderilen gerilim kırpmalı bir yapıdan geçmesi ivme cevabında düşük genlikli ve kısa süreli bozucu etkilere neden olmaktadır. Bu etki Şekil 6.19’da görülmektedir.

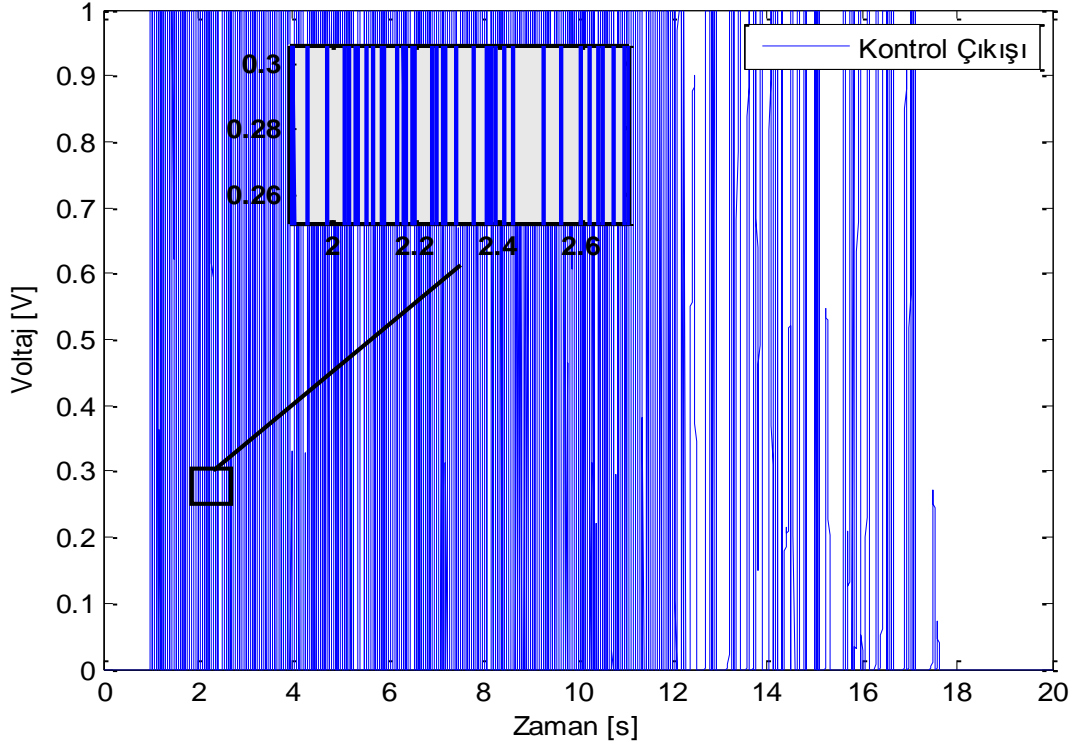


Şekil 6.18: Tekerlek yer değişimi.



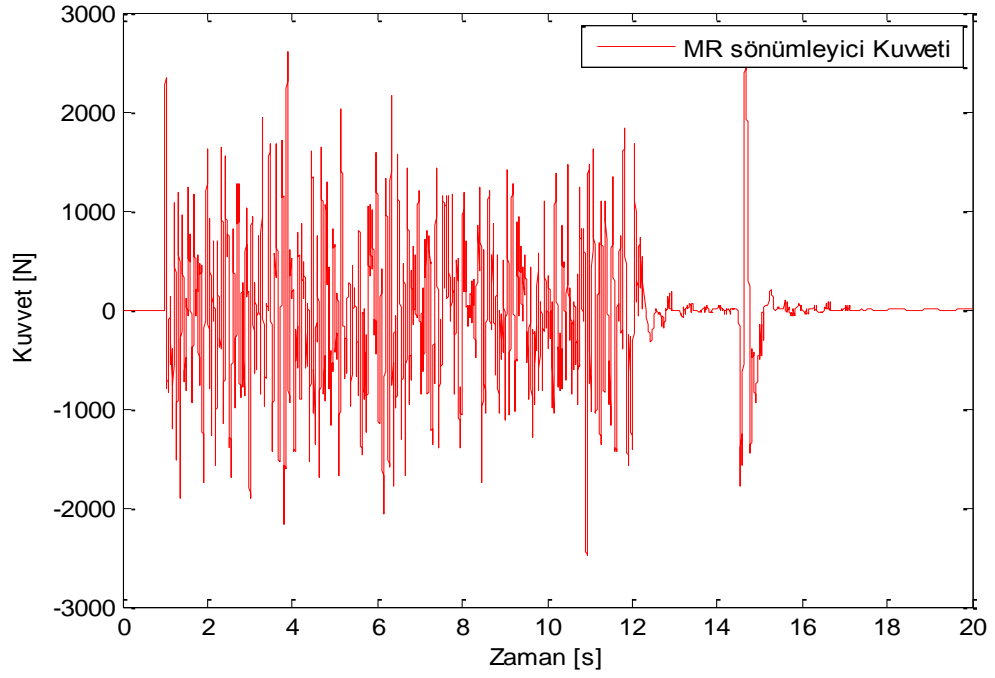
Şekil 6.19: Taşıt gövdesi ivme cevabı.

Uyarlamalı kontrolör çıkış gerilimi ise Şekil 6.20’de görülmektedir. Yolda herhangi bir pürüz yokken kontrolör çıkış vermemekte, bozuk yola geçişle beraber çıkış artmakta ve son olarak da yol bitiminde titreşimlerin sönümlenmesiyle birlikte kontrol çıkışı sonlanmaktadır.



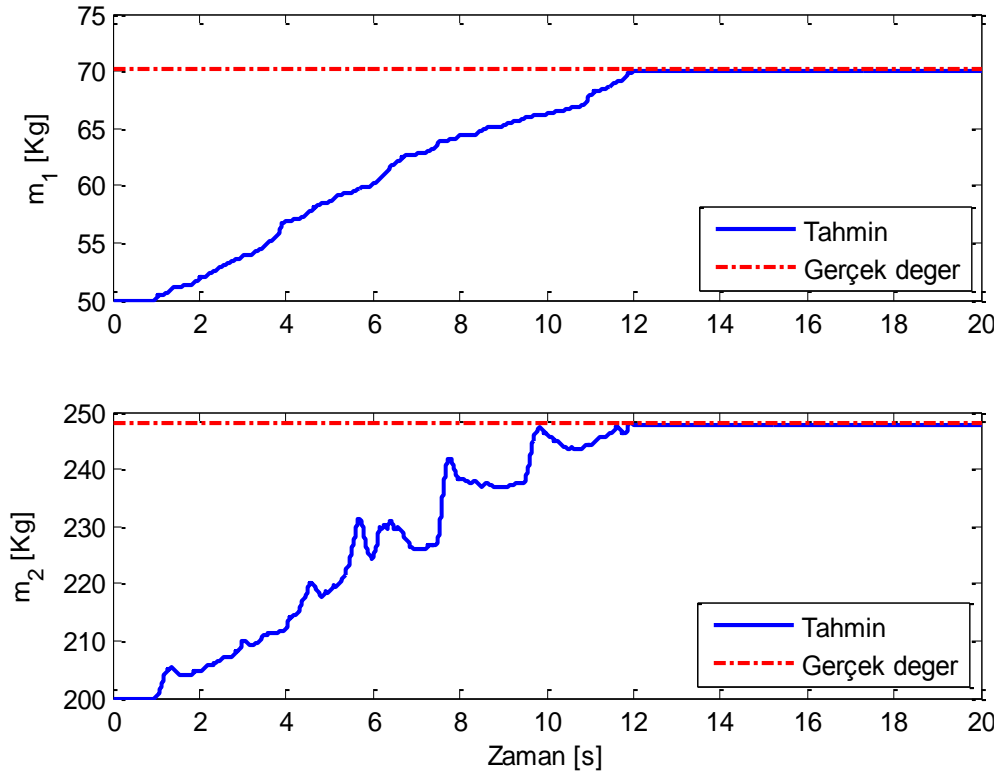
Şekil 6.20: Kontrol çıkış gerilimi.

Yukarıdaki çıkış gerilimi ile beslenen MR sönümleyicinin oluşturduğu sönümlenme kuvveti ise Şekil 6.21’de verilmiştir. Gerçekleştirilen uyarlamalı kontrol yaklaşımının endüstride aranan yol tutuşu ve konfor kriterleri bakımında sağladığı iyileştirme açık şekilde görülmektedir. Kontrol yaklaşımının bir diğer öne çıkan yönü ise çeyrek taşıt ve MR sönümleyici parametrelerindeki belirsizliklere karşı dayanıklı olmasıdır. Oluşturulan yol profilinin ilk bölümünde gerçekleştirilen parametre adaptasyonlarındaki kontrolör başarısı Şekil 6.22 ile Şekil 6.26 arasında açık şekilde görülmektedir.



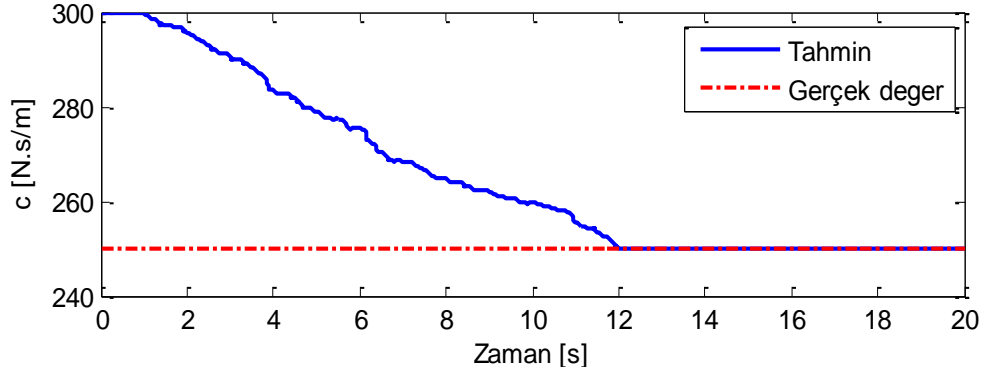
Şekil 6.21: MR sönümleyici kuvvet-zaman cevabı.

Yol profilinin ilk bölümünde gerçekleştirilen ve daha sonra kesilen parametre adaptasyonu çeyrek taşıt modeline ait kütle değerleri için Şekil 6.22’de verilmiştir.



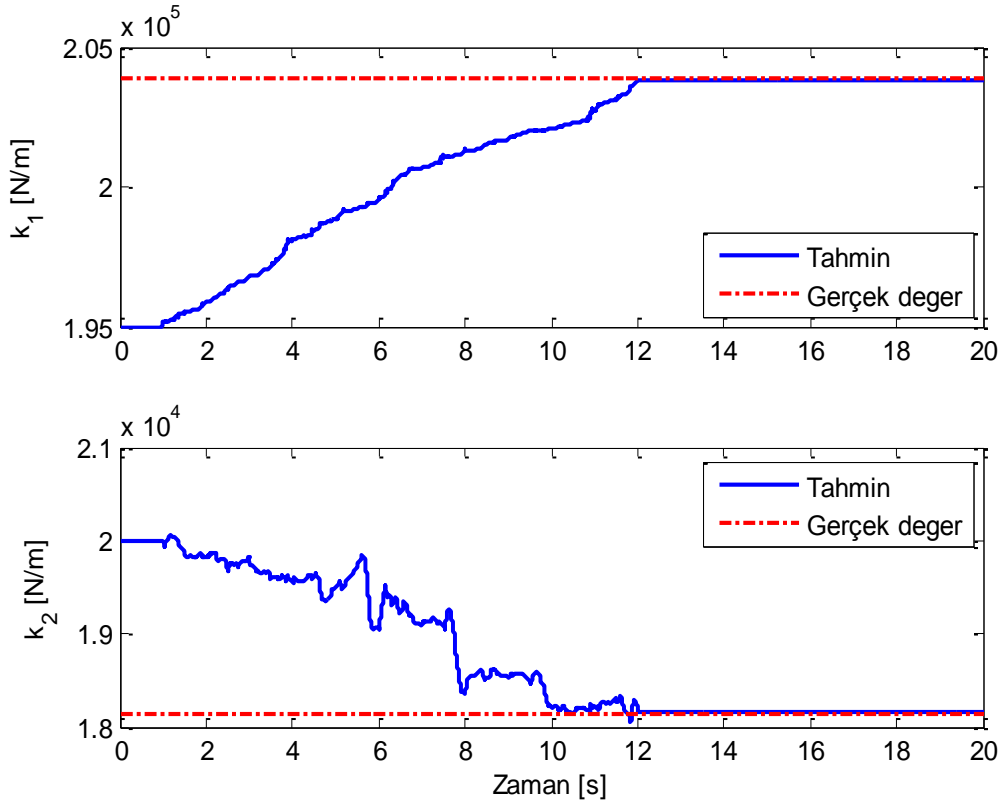
Şekil 6.22: Taşıt kütlelerinin tahmini.

Sistemde olduğu düşünölen sönüm elemanının sönüm katsayısı için gerçekleştirilen tahmin ise Şekil 6.23’de verilmiştir.



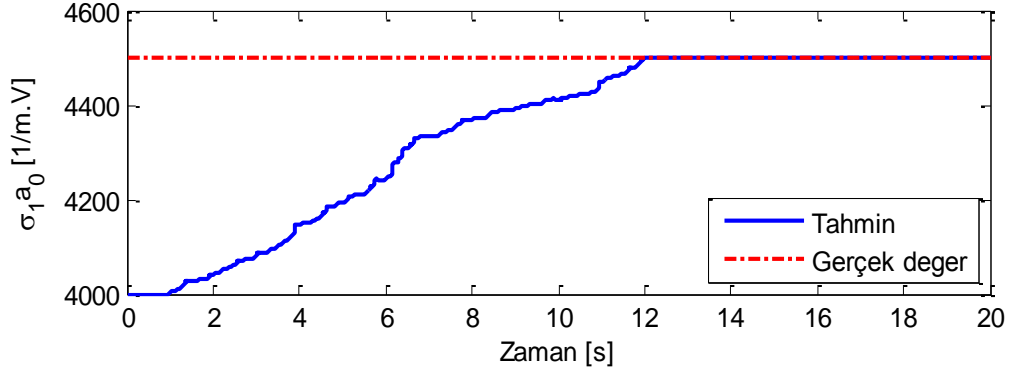
Şekil 6.23: Viskoz sönüm katsayısı yakınsama davranışı.

Yukarıdaki şekillerde gösterilen yakınsama başarısı yay katsayılarının tahmininde de yakalanmıştır. Süspansiyon ve tekerlek yay katsayılarının parametre değişimi Şekil 6.24’de verilmiştir.

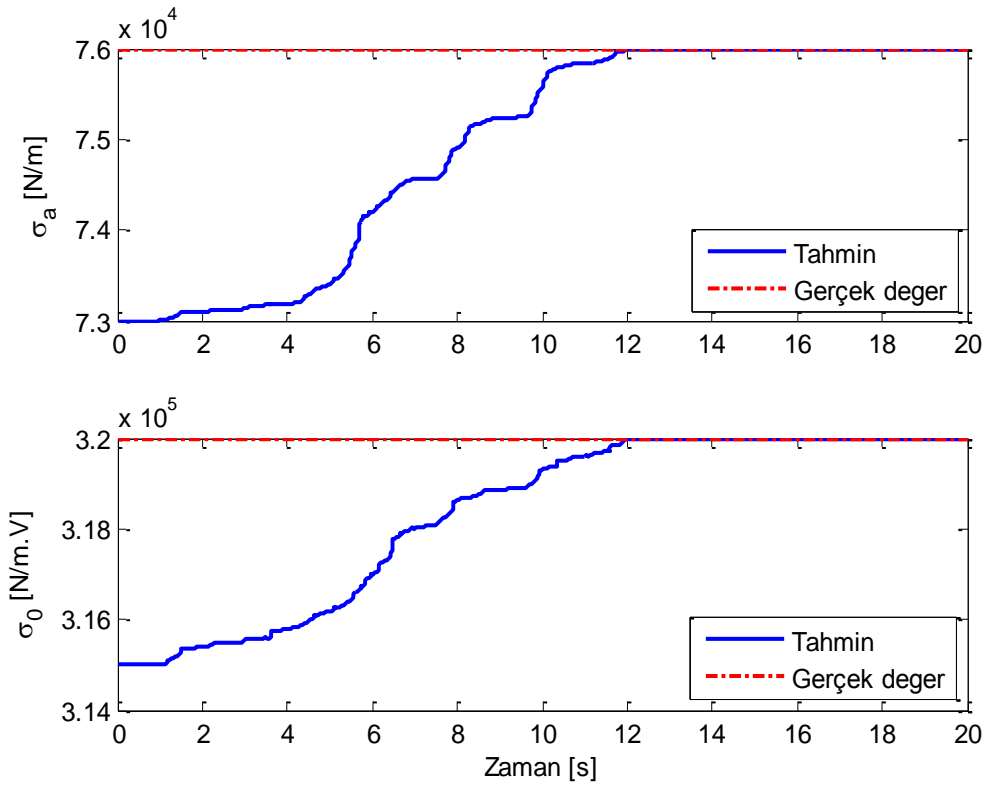


Şekil 6.24: Yay katsayılarının yakınsama davranışı.

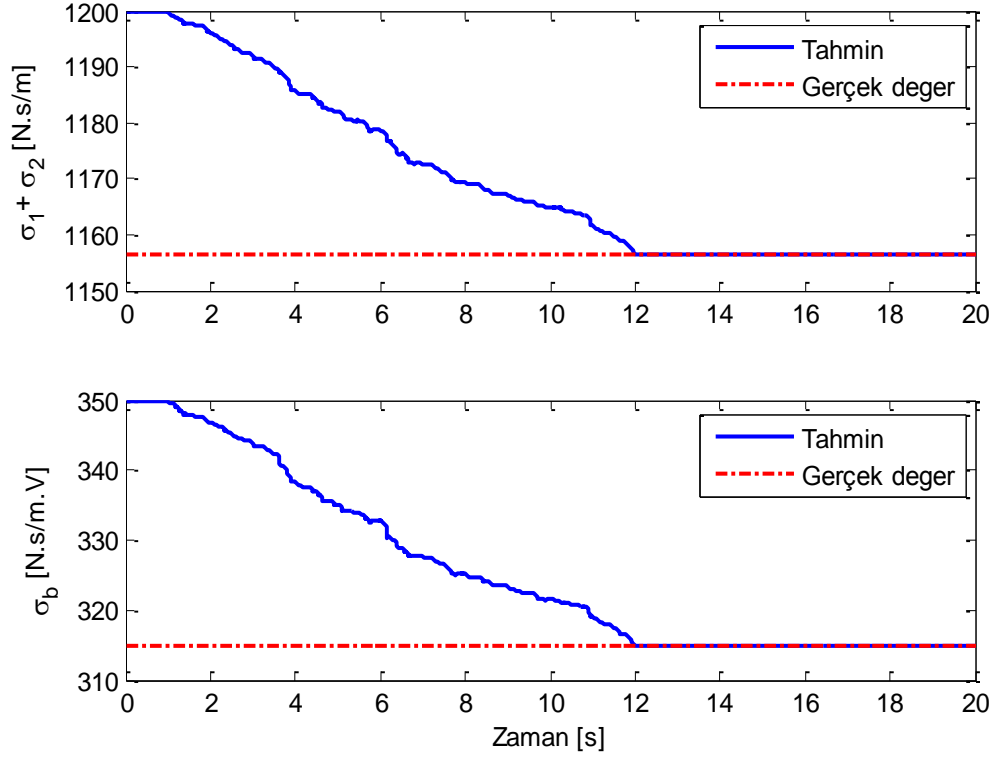
Uygulanan kontrolör aynı zaman da MR sönümleyici parametreleri içinde tahmin sunmaktadır. MR sönümleyici parametre tahminleri ise Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da görülmektedir.



Şekil 6.25: MR sönümleyici parametre yakınsama karakteristiği.



Şekil 6.26: MR sönümleyici katılık parametrelerinin yakınsaması.



Şekil 6.26: MR sönümleyici parametrelerinin yakınsaması.

Bu bölümde yapılan simülasyon çalışmalarını özetleyecek olursak, ilk simülasyon çalışmasında ağır sayılabilecek bir çeyrek taşıt modeline ait parametreler kullanıldı. Uyarlamalı yarı aktif kontrol yaklaşımının ideal kontrol metodu Hibrit kontrol ve LQG,  $H_\infty$  gibi optimal kontrol metotları ile karşılaştırılmalı performans incelemesine yer verildi. Ele alınan çeyrek taşıt sistem modeli parametre belirsizlikleri içermesine rağmen uyarlamalı kontrol yaklaşımının yol tutuşu ve konfor ölçütlerini karşılaştırıldığı durumlara göre önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü.

İkinci simülasyon çalışmasının ilk bölümünde deneysel çalışma kapsamında kurulan çeyrek taşıt model parametreleri kullanılarak tümsek yol girişi altında EMK kontrol metodu incelendi. İkinci bölümünde oluşturulan rastgele ve tümsek yüzeyler içeren yol girişi altında ilk olarak parametre adaptasyonu gerçekleştirildi sonrasında tümsek giriş altında kontrolör performansı Serbest ve Pasif (MR) durumları ile karşılaştırılmalı olarak incelendi.



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMA

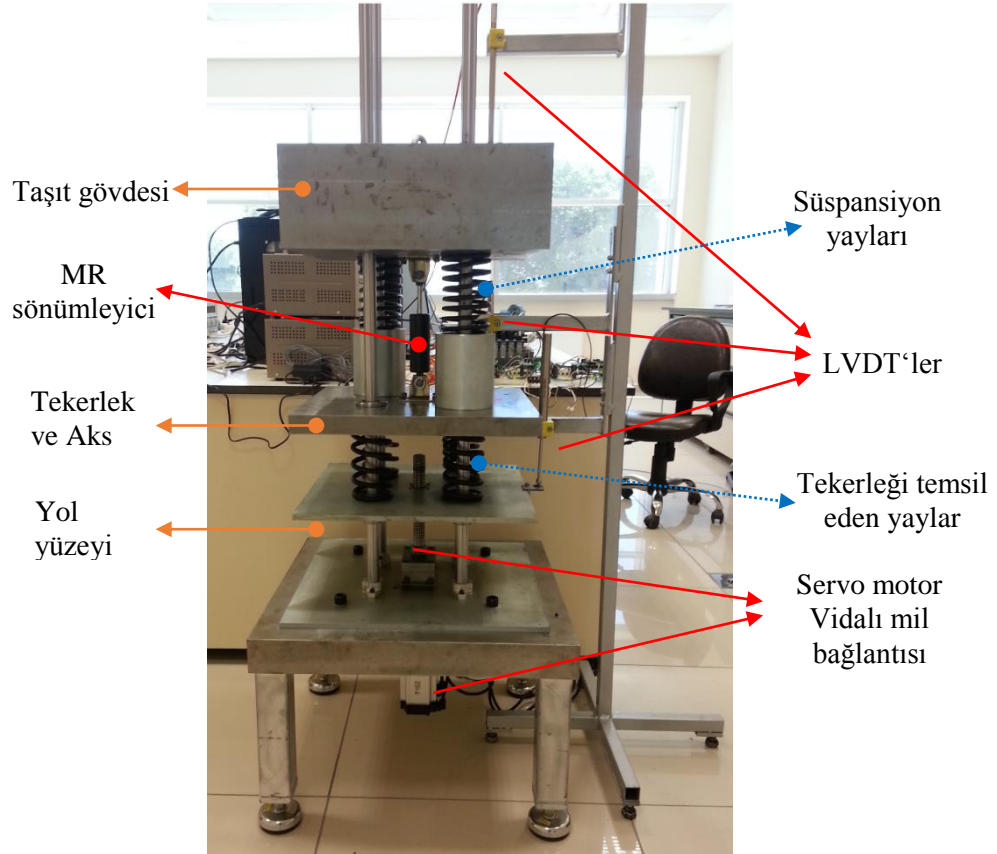
Bu bölümde doğrusal olmayan uyarlamalı kontrolörün çeyrek taşıt modeline deneysel olarak uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sisteme yol girişi olarak rastgele bir yüzey profili ve tümsek kullanılmıştır. Kontrolörün etkinliği, serbest (sönümsüz), pasif (MR sönümleyici bağlanmış fakat gerilim uygulanmadığı) ve MR sönümleyicinin sabit bir volt ile beslendiği durumlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırıldığı durumlar karşısında kontrolör etkinliği sistem ve MR sönümleyiciye ait parametre belirsizlikleri içermesine rağmen açık şekilde görülmektedir. Parametre adaptasyonu açısından da kontrolör başarılı bir performans sergileyerek zaman içerisinde gerçek değerlere yakın tahminlerde bulunmaktadır.

### 7.1. Test Düzenineğinin Tanıtımı

Literatürde sıkça kullanılan çeyrek taşıt model parametreleri referans alınarak Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Sistem Dinamiği ve Kontrol laboratuvarında iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt deney düzenineği oluşturulmuştur. Farklı yol profillerini modellemek üzere Panasonic MSME 750W AC servo motor, 1/5 oranında redüktör ile sisteme dahil edilmiştir. Kontrol için gerekli taşıt gövdesini ve tekerleği temsil eden kütleler ile yol girişine ait yer değişim değerleri sistem üzerinden iki adet Waycon SM serisi ve bir adet Solatron S serisi LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörleri kullanılarak ölçülmüştür. Doğrusal olmayan uyarlamalı kontrol yaklaşımının taşıt konfor performansını değerlendirmek için ise Brüel&Kjaer 4507-B-002 serisi ivmeölçer kullanılmıştır.

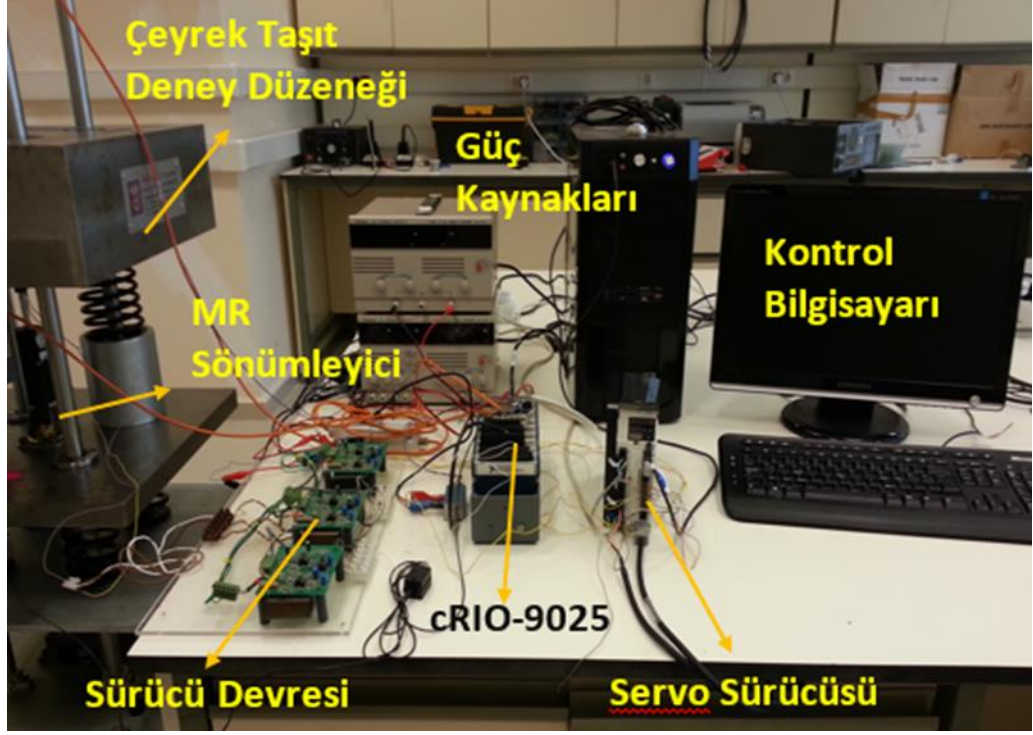
Yarı aktif sönümleyici olarak Lord RD 1005-3 serisi MR sönümleyici kullanılmıştır. MR sönümleyici için gerekli besleme akımı gerçek zamanlı kontrolör NI (National Instruments) cRIO-9025 tarafından sağlanamamaktadır. Bu sebeple uyarlamalı yarı aktif kontrol yaklaşımı ile hesaplanan kontrol gerilimi gerçek zamanlı kontrolör çıkışından bir lineer sürücü devresi vasıtası ile MR sönümleyiciye gönderilmektedir.

Yol profilini oluşturan servo motor hız kontrol modunda kullanılmaktadır. Labview ortamında oluşturulan iki farklı yol profiline karşılık gelen 0-10 volt aralığındaki hız profilleri cRIO-9025 üzerinde bulunan NI 9264 analog çıkış modülü kullanılarak servo motor sürücüsüne gönderilmektedir. Çeyrek taşıt deney düzeneği ait genel görünüş Şekil 7.1’de verilmiştir.



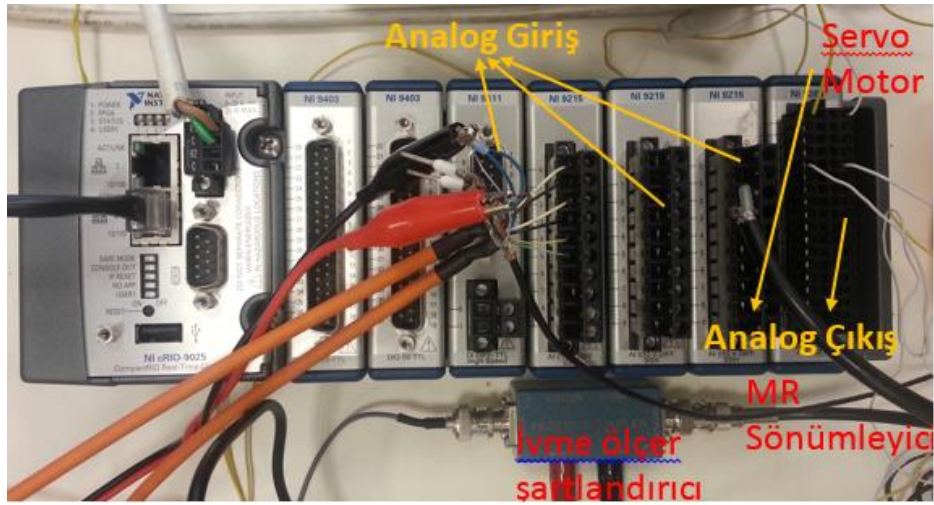
Şekil 7.1: Deney düzeneği genel görünüşü.

Kontrol çalışmasında analog giriş ve çıkışlar kullanılmasından dolayı istenmeyen elektriksel gürültüler oluşmaktadır. Oluşan bu gürültüler MR sönümleyici kontrol gerilimi, servo motor sürücüsüne gönderilen hız kontrol gerilimi ve sensörler üzerinde bozucu etkiye neden olmaktadır. Bu sorun kablo yalıtımlarına dikkat edilerek ve tek bir toprak hattı kullanılarak aşılmıştır. Kontrol ekipmanlarının genel yerleşimi Şekil 7.2’de görülmektedir.



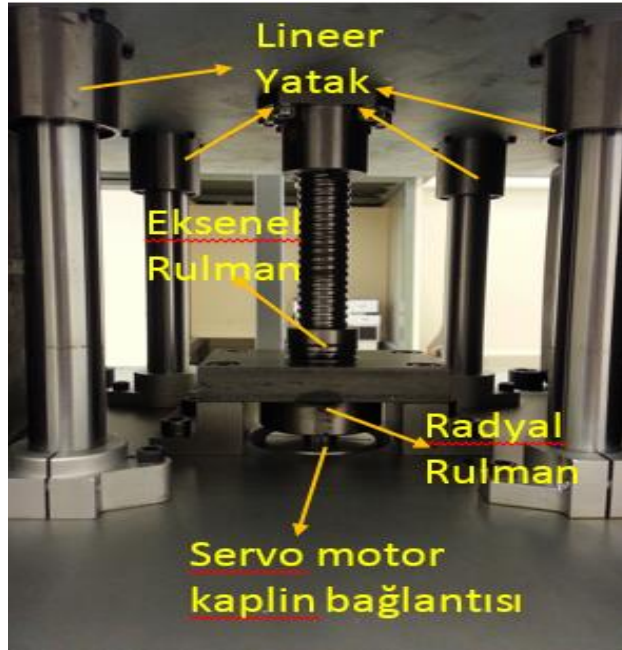
Şekil 7.2: Deney düzeneğinin genel görünüşü.

Sistemden ölçülen yer değişim ve ivme değerleri National Instruments NI 9215 analog giriş modülü üzerinden NI cRIO-9025 gerçek zamanlı kontrolörde toplanmaktadır. MR sönümleyici besleme voltajı ve parametre adaptasyonu Labview ortamında kurulan kontrolcü modeli ile hesaplanarak kontrol çıkışı NI 9264 analog çıkış modülü üzerinden MR sönümleyici sürücü devresine gönderilmektedir. NI cRIO-9025 gerçek zamanlı kontrolöre ait görünüş Şekil 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.3: NI cRIO-9025 genel görünüşü.

Düzenekte kullanılan kütle blokları CNC frezede mil deliklerinin simetrisine dikkat edilerek hassas bir şekilde işlenerek, yay ve servo motor bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Çeyrek taşıt modeli ile taşıtın sadece düşey yöndeki hareketi modellenmektedir. Gerçekçi bir modelleme için düzeneğin düşey yöndeki yatak sürtünmeleri minimum seviyede olmalıdır. Bu nedenle servo motor bağlantı noktasında sistem, aksel ve radyal rulmanlar ile yataklanmıştır. Kütlelerin miller ile olan temasında ise lineer rulmanlar kullanılmıştır. Bağlantı noktalarına ait genel bir görünüş Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7.4: Servo motor yataklama bağlantısı.

## 7.2. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu bölümde deneysel çeyrek taşıt modeline ait kütle, yay ve sönüm değerlerinin elde edilme yöntemi açıklanacaktır. Yay katsayılarının doğru bir şekilde elde edilmesi sistem karakteristiğini ifade etmekte önemlidir. Referans alınan çeyrek taşıt modelinde tekerlek tek yay ile ifade edilmektedir. Bu nedenle deney düzeneğinde yol yüzeyi ile aks kütlesi arasında yer alan dört adet yaya ait yay katsayıları toplanarak sistemde tek yay varmış gibi düşünülebilir. Aynı yaklaşım süspansiyon yayını ifade etmekte de kullanılmıştır. Süspansiyon yayını ifade eden yay katsayısı ikiye bölünerek iki adet yay kullanılmıştır.

Helisel çeki ve bası yaylarında yay katsayısı teorik olarak aşağıdaki (7.1) ifadesi ile hesaplanmaktadır. Yay katsayı ifadesinde  $d$  tel çapını,  $G$  tel malzemesinin kayma modülü,  $N$  aktif sarım sayısı  $D$  ise sarım çapını temsil etmektedir.

$$k = \frac{d^4 G}{8ND^3} \quad (7.1)$$

Literatürde yaygın bir şekilde kullanılan çeyrek taşıt modeli yay katsayıları esas alınarak gerekli sarım sayısı, tel çapı ve sarım çapı hesabı yapılmıştır. Fakat üretimden ve malzemenin kendisinden kaynaklanan nedenler hesaplanan bu katsayı değerlerini elde etmeyi imkansız kılmaktadır. Bu sebeple, istenilen özellikte sardırılan her bir yay montaj öncesi basma test düzeneğinde test edilerek karakterize edilmelidir. Yay katsayılarının tespiti için yapılan çalışma Şekil 7.5’de yer almaktadır.



Şekil 7.5: Yay katsayılarının belirlenmesi.

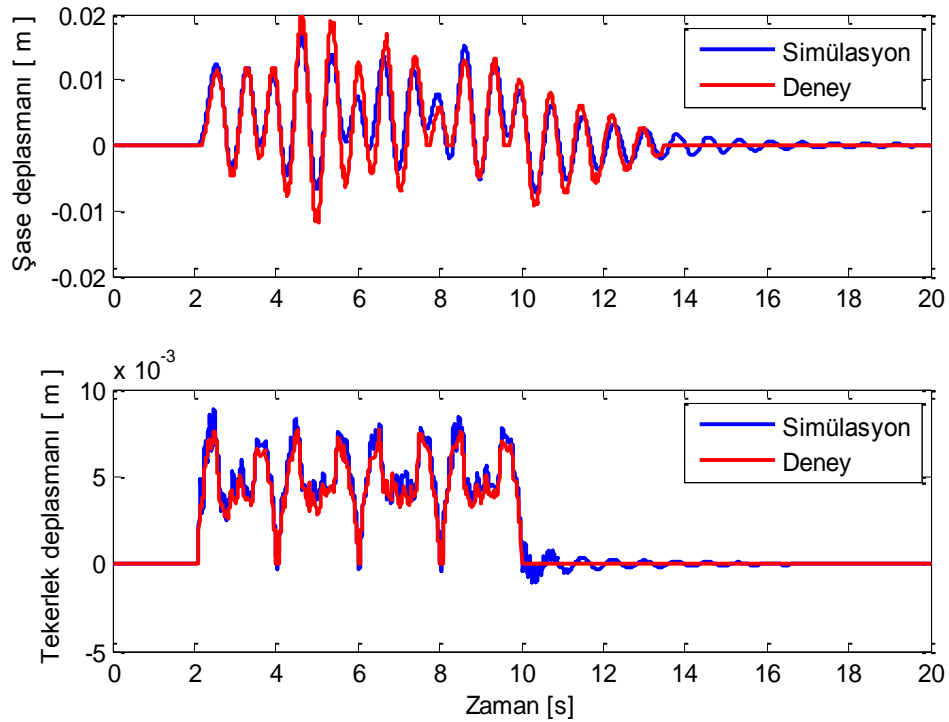
Instron basma test düzeneğinde test edilen her bir yay için kuvvet-deplasman grafiği elde edilmiş ve grafikteki değerlere birinci dereceden bir doğru denklemleri uydurulmuştur. Bu doğruların eğimleri her bir yay için yay katsayılarına karşılık gelmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 7.1’de verilmiştir. Sonuçlar

arasındaki farklılıklar yaylar üzerinden alınan ölçüm hataları ve malzemenin özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 7.1: Çeyrek taşıt deney düzeneği yay parametreleri.

Sembol	Anlamı	Teorik Değeri	Deneysel Değeri	Birimi
$k_1$	Tekerlek yay sabiti	205120	203860	N/m
$k_2$	Süspansiyon yay sabiti	18311	18144	N/m

Kullanılan kütle bloklarının ağırlıkları Solidworks programı kullanılarak oluşturulan katı modelden çıkarılmıştır. Sistemde fiziki olarak yer alması bile yayların iç sönümü ve modellenemeyen yatak sürtünmeleri dolayı bir sönüm elemanı olduğu kabul edilmiştir. Bu sönüm elemanına ait sönüm katsayısı ise Şekil 7.6'de verilen gerçek model serbest titreşim grafiğine en yakın sonucu veren değer olarak alınmıştır. Sonuçlar arasındaki farklılıklar modellenemeyen etkilerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.6: Sönüm katsayısının belirlenmesi.

Model parametrelerinin doğruluğunu test etme bakımından da Şekil 7.6'da elde edilen sonuçlar önem taşımaktadır. Deneysel düzeneğine ait kütle, sönüm ve yay parametrelerine ait katsayı değerleri Tablo 7.2'de görülmektedir.

Tablo 7.2: Çeyrek taşıt deney düzeneği sistem parametreleri.

Sembol	Anlamı	Gerçek Değeri	Birimi
$m_1$	Aks kütlesi	247.9443	Kg
$m_2$	Taşıt kütlesi	70.1490	Kg
$k_1$	Tekerlek yay sabiti	203860	N/m
$k_2$	Süspansiyon yay sabiti	18144	N/m
$c$	Sönüm Katsayısı	250	N.s/m

### 7.3. Yol Girdileri

Çeyrek taşıt modeli ile yapılan titreşim analizlerinde rastgele ve tümsek profiline sahip yol girişleri kullanılmaktadır. Tümsek yol girişi tanımlamada (6.1)'de verilen matematiksel ifade kullanılabilir. Rastgele yol profili oluşturmada ise yol pürüzlülüğü ISO 8608 standartlarında tanımlanan PSD (Power spectral density) değerleri kullanılır. Yol pürüzlülüğü araç hızına ve yol pürüzlülük katsayısına bağlıdır. Literatürde bir boyutlu rastgele yol profili oluşturmada “şekillendirme filtresi” ve “sinusoidal yaklaşım” yaygın olarak kullanılan iki metottür. Sabit hızla giden bir araç için rastgele yol yüzeyi aşağıdaki (7.2) eşitliği kullanılarak oluşturulabilir [Tyan et al., 2005].

$$\frac{d}{dt} z_R(t) = -\alpha V z_R(t) + w(t) \quad (7.2)$$

Burada  $w(t)$ ,  $\sigma^2$  yol pürüzlülük varyansı,  $\alpha$  yol yüzeyine bağlı katsayı ve  $V$  araç hızı olmak üzere spektral yoğunluğu (7.3) ile tanımlanan beyaz gürültü yaklaşımıdır.

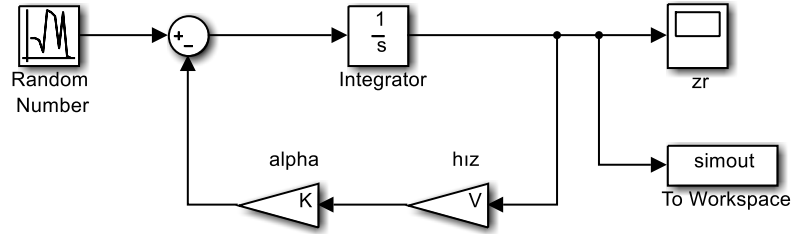
$$\Psi_w = 2\alpha V \sigma^2 \quad (7.3)$$

Standartlarda belirtilen yol pürüzlülük sınıfları ve standart sapma değerleri Tablo 7.3'de verilmiştir.

Tablo 7.3: Yol pürüzlülük standart sapması.

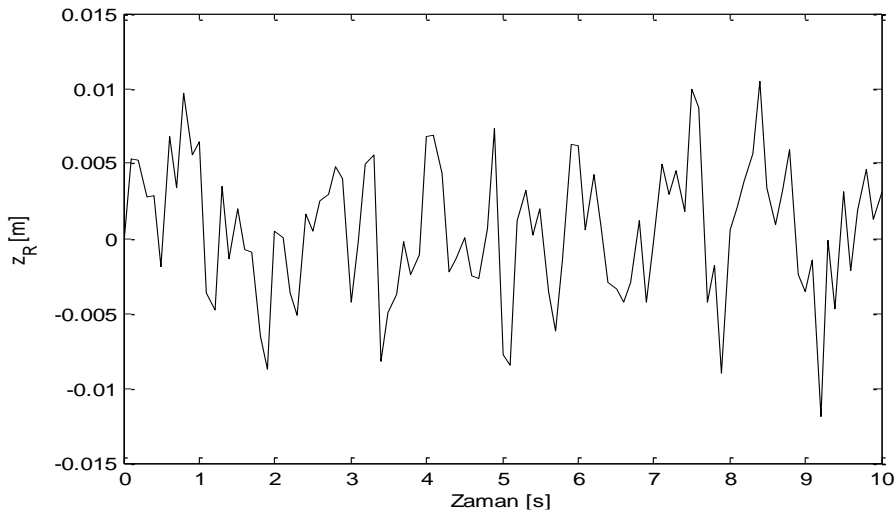
Yol Sınıfı	Standart Sapma $\sigma$ ( $10^{-3}$ m)	$\alpha$ (rad/ m)
A (Çok iyi)	2	0.127
B (İyi)	4	0.127
C (ortalama)	8	0.127
D (kötü)	16	0.127
E (Çok kötü)	32	0.127

Standartlarda belirtilen B sınıfı yol yüzeyi ve 60 km/h araç hızı kabulü ile yukarıdaki (7.2) eşitliği kullanılarak MATLAB-Simulink ortamında oluşturulan model görünümü Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7: Rastgele yol profili Simulink blok gösterimi.

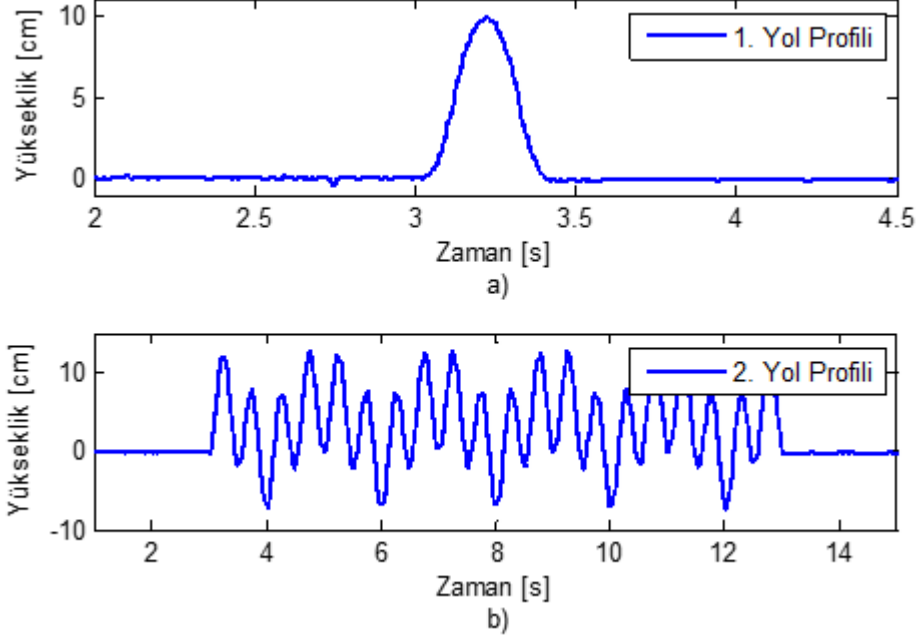
Oluşturulan blok yapısının koşulması ile elde edilen tekrarlanabilir rastgele yol yüzey profili ise Şekil 7.8’de görülmektedir.



Şekil 7.8: B sınıf rastgele yol profili.

Deney düzeneğinde yol profillerini oluşturmak için kullanılan servo motor hız kontrol modunda kullanıldığı için (7.2) eşitliği ile tanımlanan rastgele yol yüzeyi oluşturulamamıştır. Bunun yerine farklı genlik ve frekanslara sahip sinüs dalgaları toplanarak tekrarlanabilir rastgele bir yol yüzeyi oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan yol girişleri Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



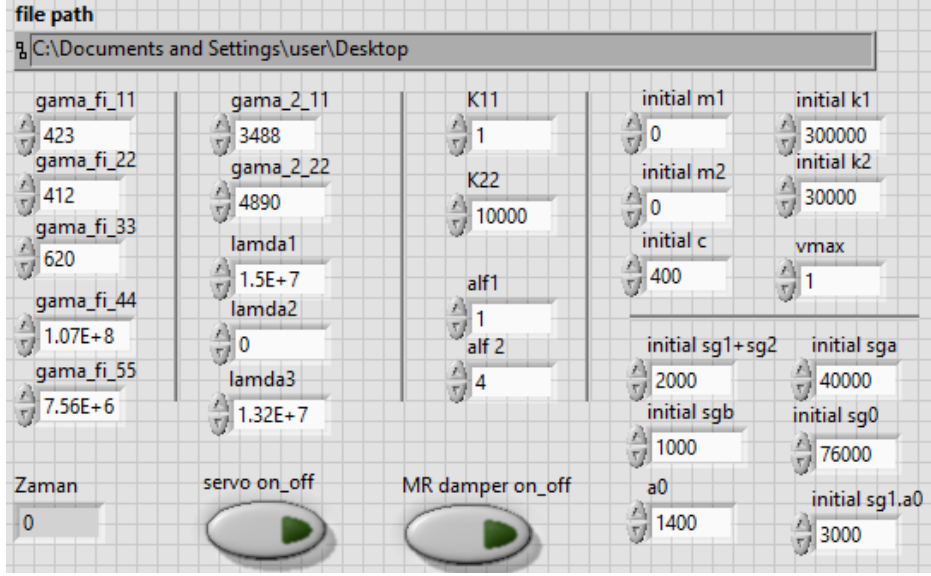


Şekil 7.9: a) Tümsek yol profili, b) Rastgele yol profili.

## 7.4. Uyarlamalı Kontrol Deneysel Uygulama

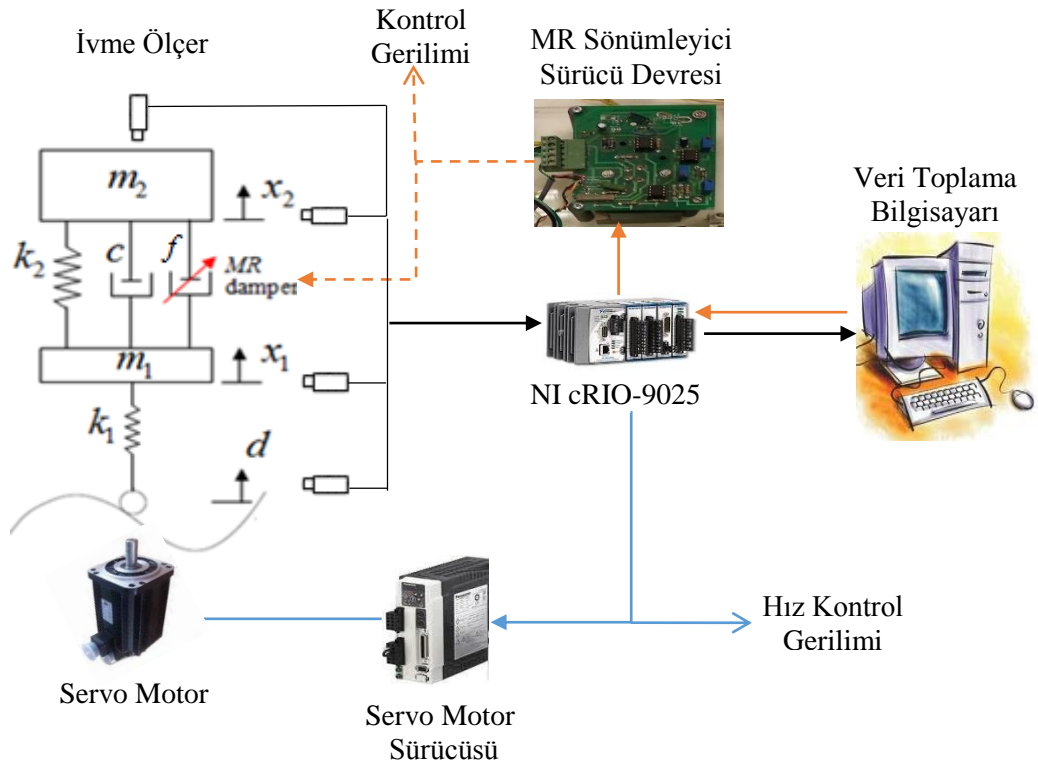
Bölüm 5’de anlatılan uyarlamalı kontrol yapısı NI-LABVIEW ortamında oluşturulmuştur. Sensörlerden gelen yol ve kütlelere ait yer değişim değerleri kontrol algoritması içerisinde işlenerek MR sönümleyici besleme gerilimi hesaplanmaktadır. Analog çıkış modülü üzerinden bu değer MR sönümleyici sürücü devresine gönderilmektedir. Parametre adaptasyonu ve yer değişim bilgileri eş zamanlı olarak tek bir dosya üzerine yazılmaktadır. Şekil 7.10’da uyarlamalı kontrolörün LABVIEW ortamında oluşturulan arayüzünün uyarlamalı kontrolör kısmı görülmektedir. Aynı arayüz üzerinde yer alan grafikler ile sistemdeki tüm değişkenler takip edilebilmekte ve kazanç katsayıları deney esnasında değiştirilebilmektedir.

Oluşturulan yol yüzeyi de aynı arayüz üzerinden kontrol edilmektedir. Deney esnasında yol yüzeyleri arasında geçiş yapılabilmekte ya da yol profilinde değişiklik yapılabilmektedir.



Şekil 7.10: LABVIEW kontrol arayüzü.

Uyarlamalı kontrol yapısı ve kullanılan ekipmanlara ait şematik gösterim Şekil 7.11’de verilmiştir.



Şekil 7.11: Uyarlamalı kontrol yapısı.

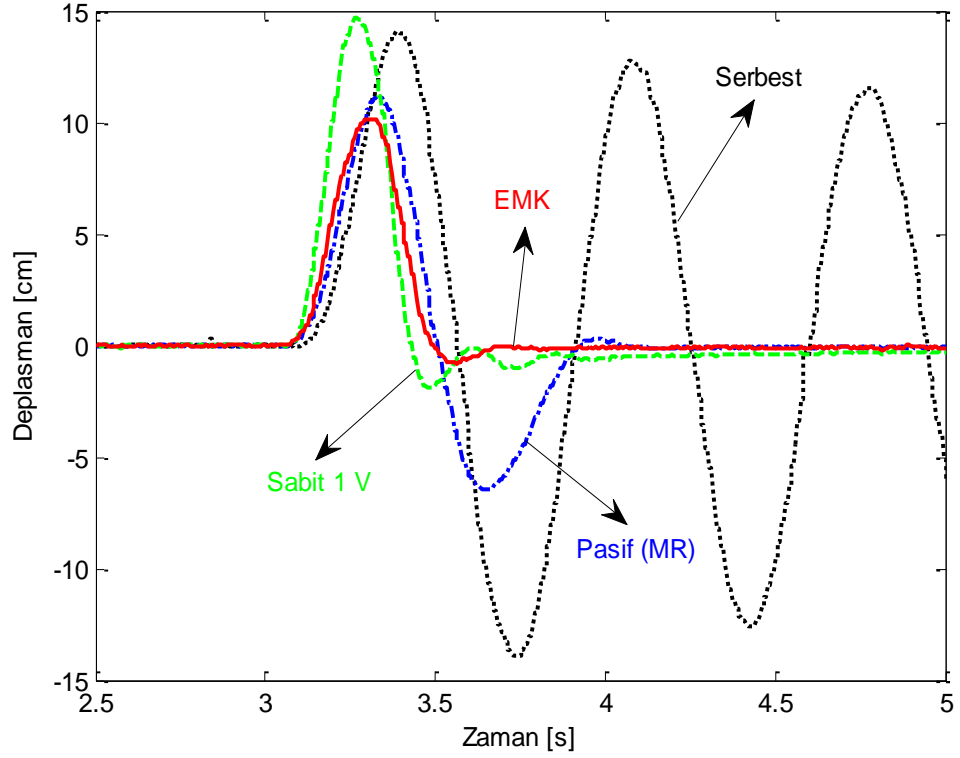
Deneyisel çalışma iki farklı durum ele alınmıştır. Birinci durumda çeyrek taşıt modeline Şekil 7.9.a) 'da gösterilen tümsek yol girişi uygulanmıştır. Kontrolörün etkinliği serbest, MR sönümleyicinin pasif olduğu ve MR sönümleyiciye sabit bir volt gerilimin uygulandığı durumlar ile karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımda sistem ve MR sönümleyici parametrelerinin bilindiği kabul edilmiş ve parametre adaptasyonu gerçekleştirilmemiştir. Bu yaklaşım EMK (exact model knowledge) kontrol olarak bilinmektedir.

Ele alınan ikinci durumda ise sistem Şekil 7.9.b)'de gösterilen rastgele yol girişi altında incelenmiştir. Taşıt parametreleri ve MR sönümleyici parametre değerlerinin tam olarak bilinmediği kabul edilmiştir. Seçilen başlangıç değerleri ile uyarlamalı kontrol çalıştırılmakta ve zaman içerisinde parametrelerin gerçek değerlerine önemli ölçüde yakınsadığı görülmektedir. İkinci durum da uyarlamalı kontrolör, serbest ve MR sönümleyicinin pasif olduğu durum ile karşılaştırılmıştır.

Çeyrek taşıt modelinde kontrolör performansını değerlendirmede odaklanılan ölçütler konfor, yol tutuşu ve süspansiyon çalışma aralığıdır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada da bu ölçütler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Kontrolörün etkinliği sistem ve MR sönümleyici parametre belirsizliklerinin altında doğrulanmıştır.

#### **7.4.1. Tümsek Yol Girişi Altında Sistem Cevapları**

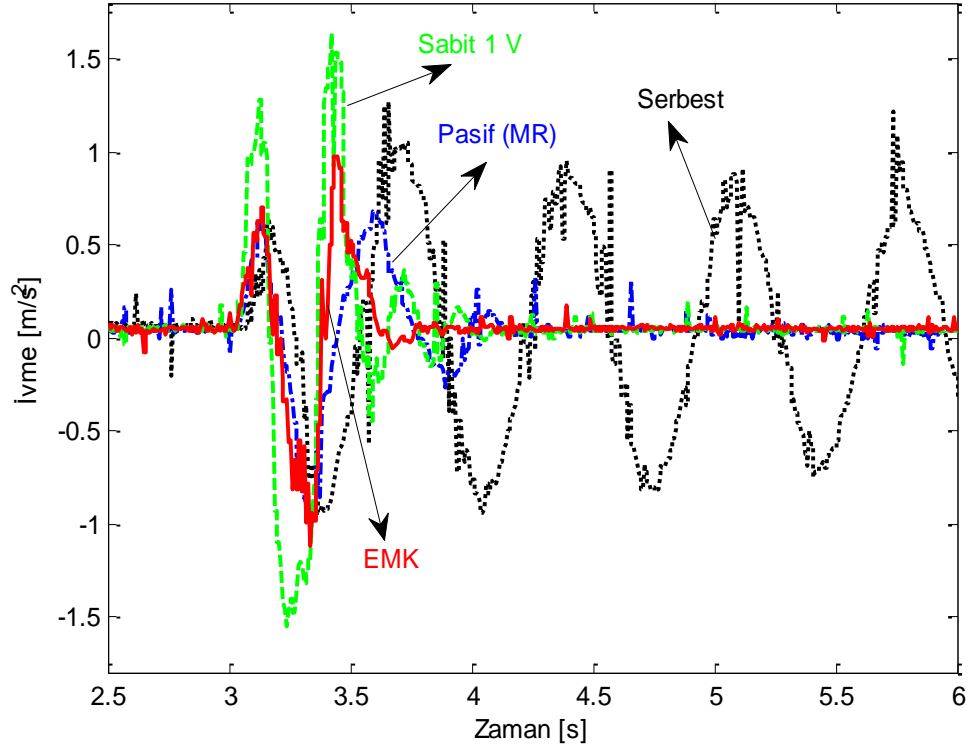
Deneyisel olarak elde edilen sistem parametre değerleri Tablo 7.2'de verilmiştir. MR sönümleyici parametre değerleri ise daha önce verilen Tablo 2.3'de yer almaktadır. Ele alınan birinci durum için taşıt gövde kütlelerinin tümsek yol girişine verdiği yer değişim cevabı Şekil 7.12'de görülmektedir. Taşıt gövdesinin tümsek tepe noktasındaki yer değişimi serbest ve sabit gerilim durumlarına göre önemli ölçüde azaltıldığı görülmektedir. Pasif duruma göre ise iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca tümsek bitiminde konforu olumsuz etkileyebilecek salınımlar ve salınım genlikleri önemli ölçüde küçültülmüştür. Uygulanan uyarlamalı kontrol yaklaşımının ani değişen yol şartları altında taşıt gövde kütlelerinin yer değişimini kısa sürede bastıracağı açık şekilde görülmektedir.



Şekil 7.12: Taşıt gövdesinin konum değişimi.

EMK kontrol yaklaşımının karşılaştırıldığı durumlar incelenecek olursa; pasif hal klasik düşük sönümlü sistem gibi davranmaktadır, sabit gerilim ile beslenmesi halinde ise yol etkisinin gövdeye iletilmesi artmış aynı zamanda tümsek sonrası salınımlar ortaya çıkmıştır. Süspansiyon sistemi rijit bir eleman gibi davranarak yol etkisini büyük ölçüde üst kütleyle iletmektedir. Tüm bu etkiler konfor performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

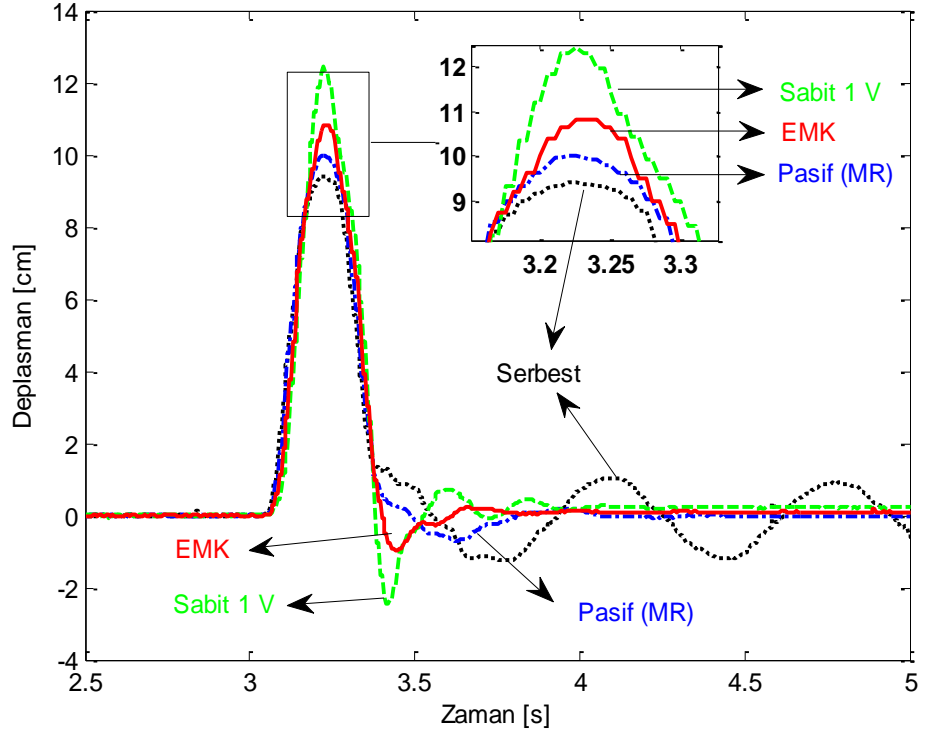
Bu etkiler Şekil 7.13'de verilen taşıt gövdesi ivme cevabında da açık şekilde görülmektedir. EMK kontrol, taşıt gövdesinin ivme cevabını tümseklerle beraber pasif duruma göre az bir miktar artırmakta fakat sonrasında iyileşme göstererek düz yola geçişte görülen salınımları ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca sabit besleme durumunda iyice belirginleşen ani yol girişi kaynaklı ivmelenme kısa sürede bastırmıştır. Kontrol yapısından kaynaklanan kırpmalı MR sönümleyici kontrol beslemesi ivme cevabı üzerinde kısa süreli ve düşük genlikli ivmelenmelere sebep olmaktadır. Bu bozucu etki ivme cevabı üzerinde az da olsa görülmektedir.



Şekil 7.13: Taşıt gövdesi ivme cevabı.

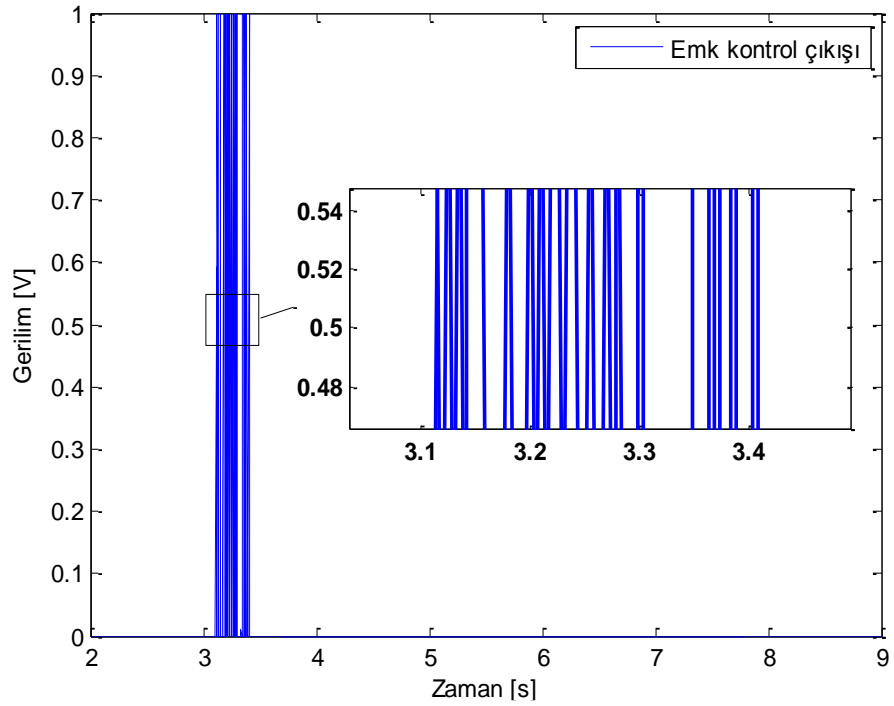
EMK kontrol yaklaşımını yol tutuş performansı açısından inceleyecek olursak, Şekil 7.14’de gerek tekerlek kütlelerinin tümsek tepe noktasında yol çizgisini yakından takip etmesi gerekse tümsek bitiminde salınımları önemli ölçüde azaltması açısından karşılaştırıldığı durumlara göre iyileştirme sağladığı görülmektedir. Sabit besleme durumu konfordaki olumsuz etkiyi yol tutuşunda da sergilemektedir. Pasif (MR) durumu ise yol tutuşunda uyarlamalı kontrol performansına yaklaşmıştır.

Uygulanan kontrol yaklaşımı ile birlikte MR sönümleyiciye sürekli gerilim uygulanmayarak, sistem performansı üzerinde oluşabilecek olumsuz bir etkinin önünü geçilmiştir. Bunun yanında pasif durumda ortaya çıkan salınımlar ve aşırı genlikli yer değişimler engellenmiştir. Ayrıca MR sönümleyiciye kırpmalı bir kontrol çıkışı gönderilmesi gereksiz enerji sarfiyatını önlemektedir.



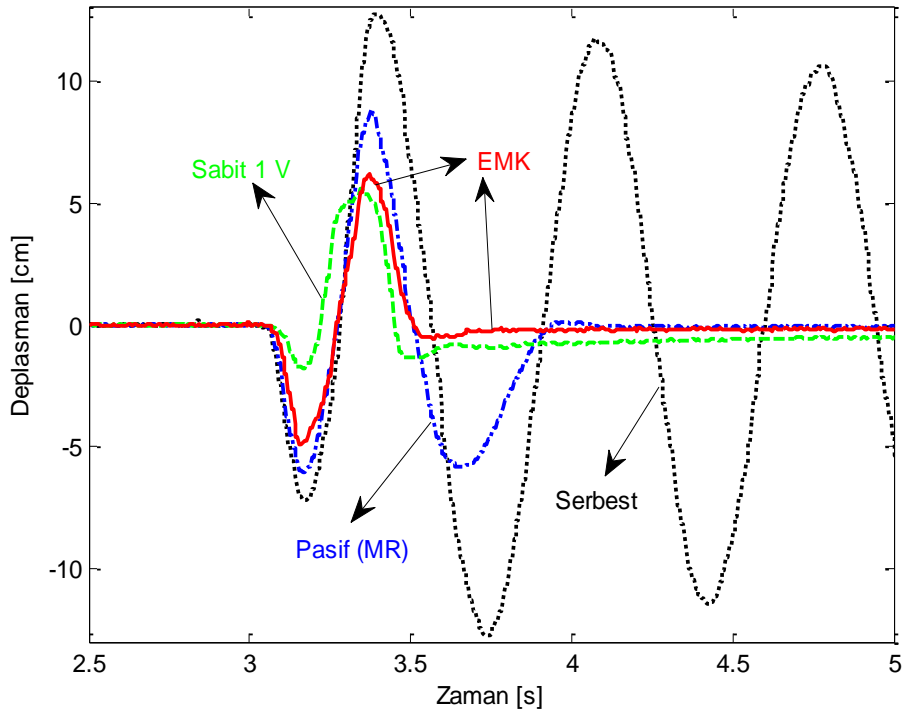
Şekil 7.14: Tekerlek(Aks) kütesinin yer değişimi.

Kontrolörün MR sönümleyiciye olan kontrol çıkışı ise Şekil 7.15’de görülmektedir. Kontrolör tümsek başlangıcı ile beraber çıkış vermekte salınımların sonlanması ile kontrol çıkışını kesmektedir.



Şekil 7.15: Kontrolörün gerilim zaman değişimi.

Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer nokta ise sönümleyicinin süspansiyon çalışma aralığında kalmasıdır. Deneysel çalışmada kullanılan MR sönümleyici uygulanan yol girişleri için yeterli stroka sahip olmasından dolayı bu ölçüt sağlanmıştır. Şekil 7.16'de gösterilen sönümleyici çalışma aralığı sistem hareketi açısından fikir vermektedir. Şekilden sabit gerilim durumunda sönümleyicinin tümsek başlangıç ve bitiş noktalarında kısa bir aralıkta çalıştığını, bu noktalarda üst ve alt kütlelerin beraber hareket ettiğini dolayısı ile yol etkisini direk kütlelere ilettiğini söyleyebiliriz.



Şekil 7.16: Sönümleyici çalışma aralığı.

#### 7.4.2. Rastgele Yol Girişi Altında Sistem Cevapları

Ele alınan bu durum uygulanan uyarlamalı kontrolörün bir diğer üstünlüğü olan çeyrek taşıt model ve MR sönümleyici parametrelerindeki belirsizliklerin altında odaklanılan performans ölçütlerini sağladığını görmek açısından önemlidir. Tekere etkiyen yol giriş profili daha önce Şekil 7.9.b)'de tanımlanmıştır. Uyarlamalı kontrol için gerekli olan çeyrek taşıt sistemine ait parametreler Tablo 7.4'de verilmiştir.

Tablo 7.4: Çeyrek taşıt sistem parametreleri.

Sembol	Anlamı	Gerçek Değeri	Başlangıç Değeri	Birimi
$m_1$	Aks kütlesi	247.9443	0	Kg
$m_2$	Taşıt kütlesi	70.1490	0	Kg
$k_1$	Tekerlek yay sabiti	203860	100000	N/m
$k_2$	Süspansiyon yay sabiti	18144	30000	N/m
$c$	Sönüm Katsayısı	250	400	N.s/m

MR sönümleyici parametrelerine ait başlangıç değerleri ise Tablo 7.5’de verilmiştir. Tablo 7.5’de görüldüğü üzere kontrolör MR sönümleyici modelinde yer alan pozitif katsayı  $a_0$  ‘ın bilindiği kabulünü içermektedir. Bir diğer nokta ise yapılan çalışmada MR sönümleyici iç değişkeninin rijitliğini tanımlayan  $\sigma_a$  katsayısı için gerçek değerine yakınsama gerçekleştirilememiştir. Kontrol üzerinde oluşabilecek olumsuz bir etkiye neden olmamak için bu parametre için adaptasyon yapılmamıştır.

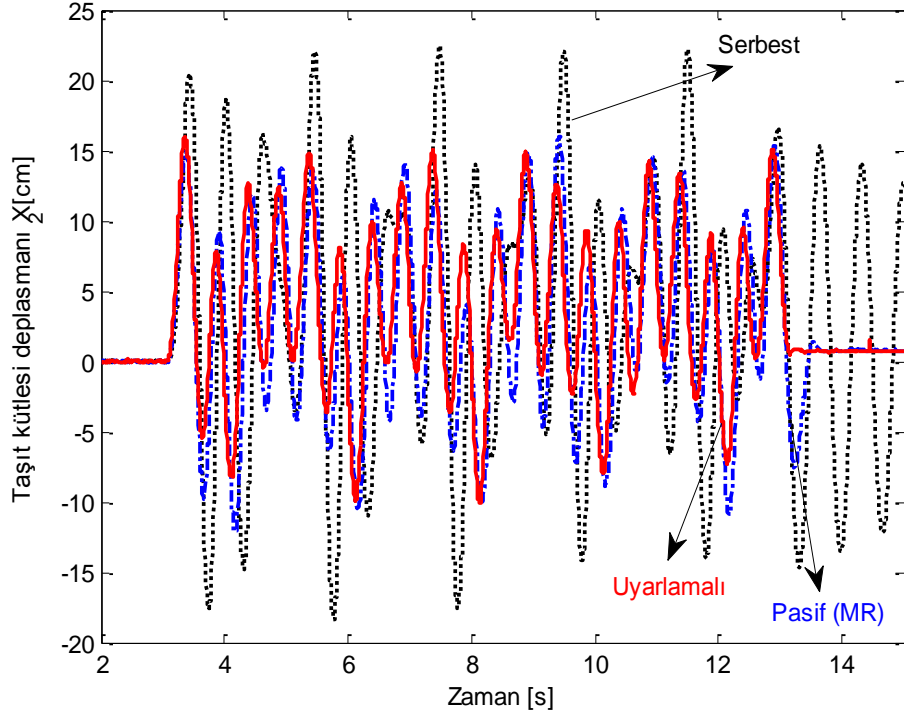
Tablo 7.5: MR sönümleyici başlangıç değerleri.

Sembolü	Gerçek Değeri	Başlangıç Değeri	Birimi
$\sigma_1 + \sigma_2$	1156.5	2000	N.s/m
$\sigma_b$	315	1000	N.s/(m.V)
$\sigma_0$	320000	330000	N.s/m
$\sigma_1 \cdot a_0$	4500	3000	N.s/(m <sup>2</sup> )
$\sigma_a$	76000	76000	N/m
$a_0$	1400	1400	1/m

Kontrolör etkinliğini sürüş konforu açısından inceleyecek olursak, taşıt kütlesinin düşey yer değişiminde serbest duruma göre çok daha fazla azalma gerçekleşmiş, pasif duruma göre ise iyileşme sağlandığı Şekil 7.17’de görülmektedir.

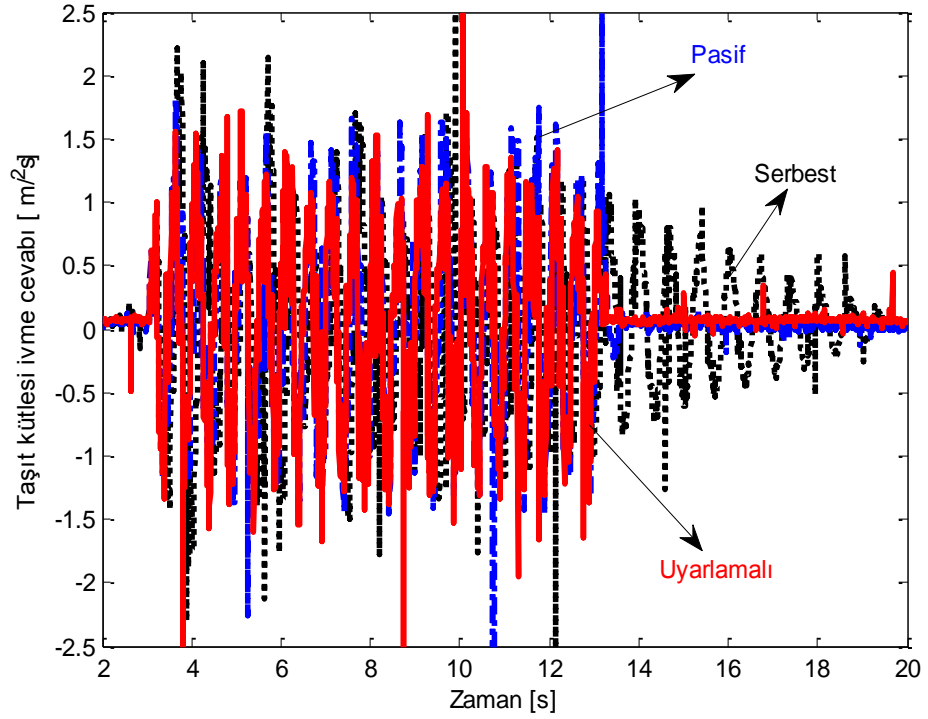
Yol profilinin gövdeye olan etki azaltılmıştır. Bozuk yol bitiminde ise üst kütle çok az bir yer değişimi göstererek eski konumuna dönmektedir. Sistem ani değişen şartlara kısa sürede adapte olduğu da görülmektedir.





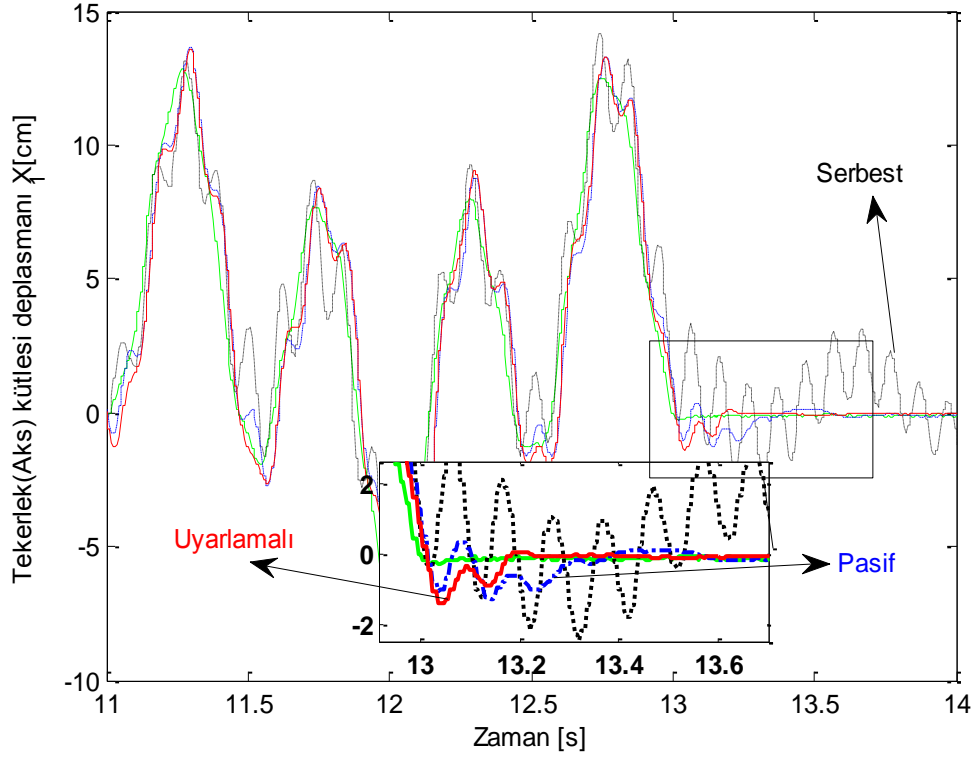
Şekil 7.17: Yaylanmalı kütle konum değişimi.

Konumun zamanla değişiminden belli olan konfor iyileşmesi taşıt gövdesinin ivme cevaplarına da yansımaktadır. Şekil 7.18'de taşıt gövdesinin ivme cevabı görülmektedir.



Şekil 7.18: Taşıt gövde ivmelenmesi.

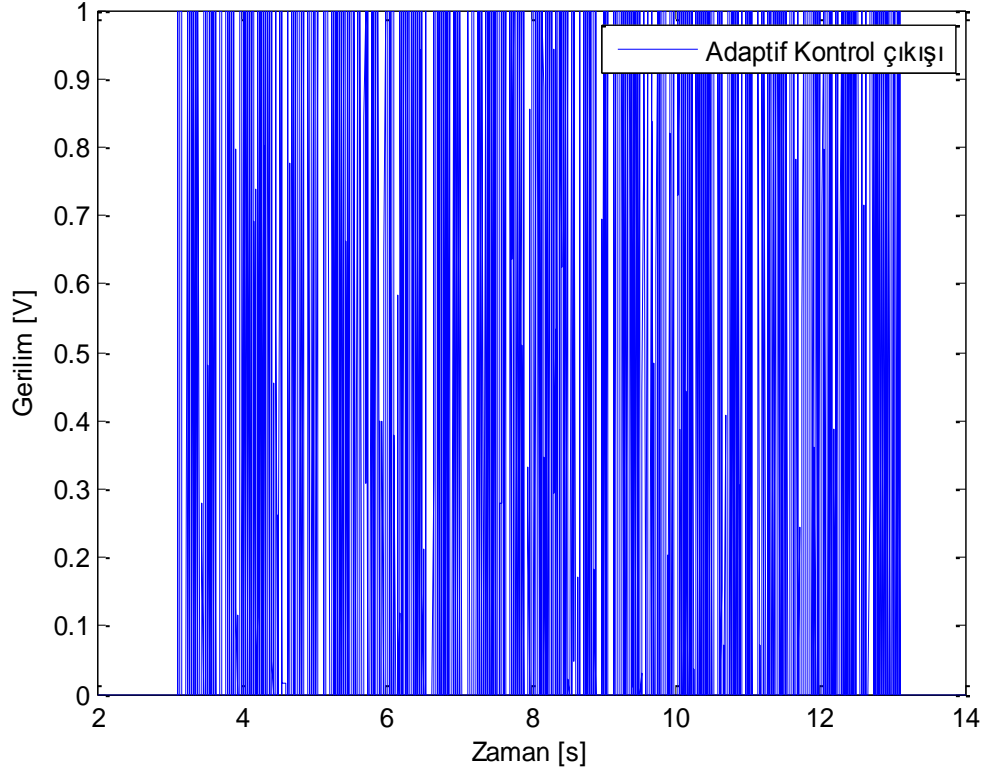
İvme cevabında serbest duruma göre %12 lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu değer pasif durumda %10.9 olarak elde edilmiştir. Kontrolcünün sağlamasını beklediğimiz bir diğer kriter olan yol tutuş performansı Şekil 7.19'da verilmiştir. Kontrolcünün konfordaki kazanımı yol tutuşunda ödün vermeden ikisini de aynı anda sağladığı görülmektedir.



Şekil 7.19: Tekerlek kütlesinin yer değişim zaman grafiği.

Kontrol yaklaşımının performans değerlendirmesinde pasif durum ile yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bunun temel nedeni olarak kullanılan MR sönümleyicinin oluşturulan deney düzeneği için fazla sert kalmasıdır. Bunun yanında parametre belirsizliklerinin de kontrol çıkışı üzerindeki olumsuz etkisi de göz önüne alınacak olursa, daha az kuvvet üreten herhangi bir MR sönümleyici ile kontrolör performansı tümsek yol testinde elde edilen başarılı sonuçlara yaklaşacaktır.

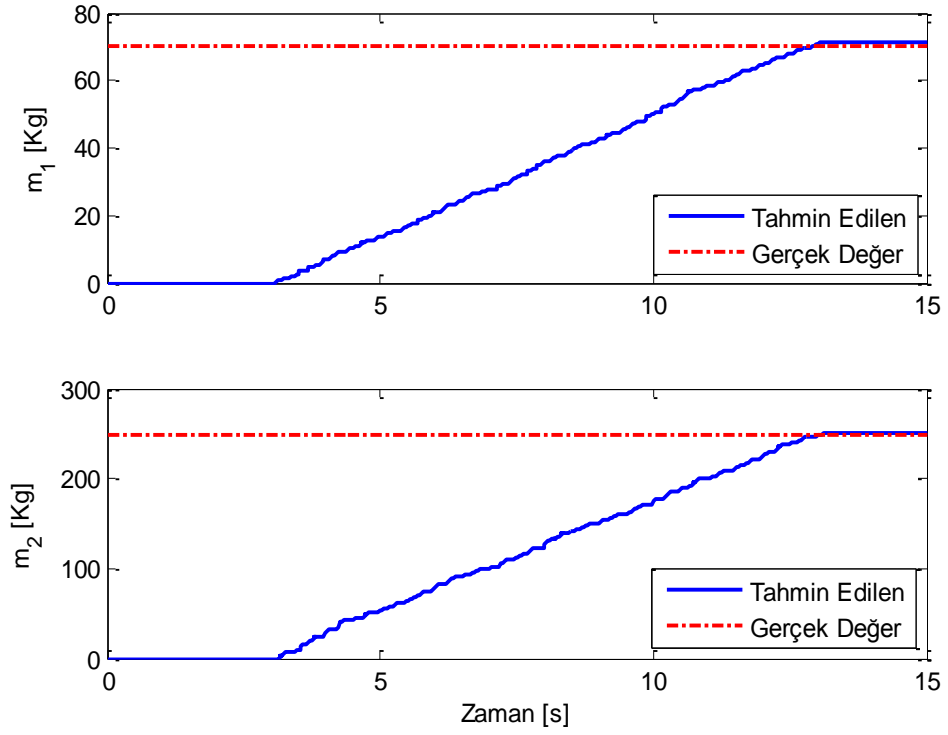
Kontrolör çıkışı ise beklendiği gibi yol süspansiyon açıklığını kapatmaya çalışacak şekilde salınımların bitimine kadar devam etmektedir. Şekil 7.20'de kontrolcü tarafından hesaplanan MR sönümleyici besleme gerilimi görülmektedir.



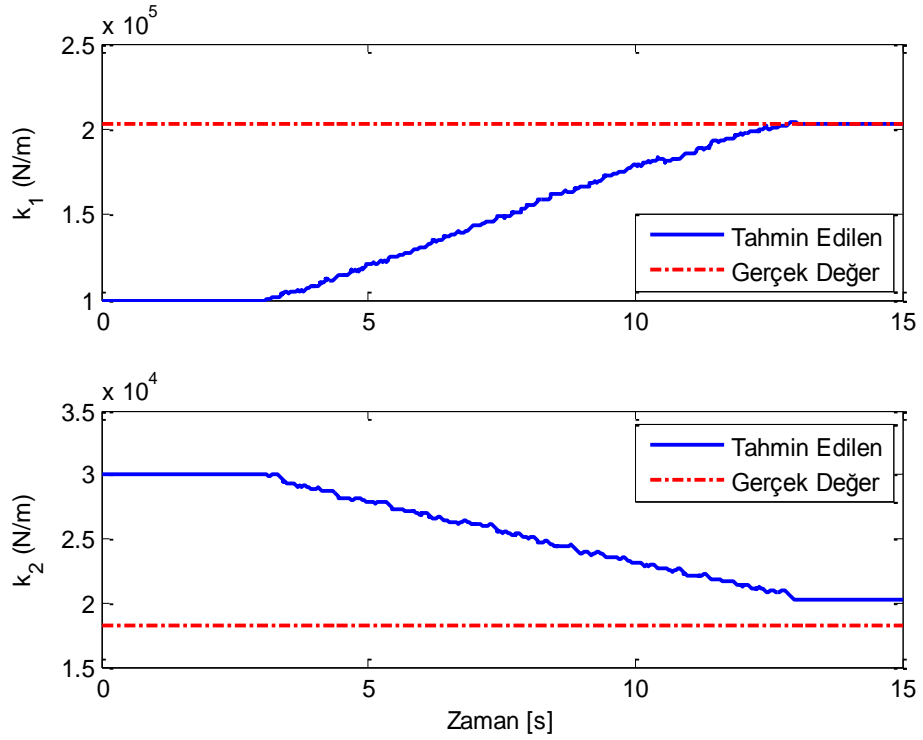
Şekil 7.20: Kontrolörün gerilim çıkış değişimi.

Gerçekleştirilen deneysel MR sönümleyicili süspansiyon sistemi çalışmasında doğrusal olmayan uyarlamalı kontrolcü değerlendirildiği performans kriterleri bakımından otomotiv endüstrisinin beklentilerini karşılayacak şekilde çalıştığı söylenebilir. Diğer birçok MR sönümleyici kontrol yaklaşımından farklı olarak getirdiği parametre tahmin yeniliğini inceleyecek olursak, Şekil 7.21’de çeyrek taşıt modeline ait kütle değerlerinin gerçek değerlerine yakınsaması görülmektedir.

Şekil 7.22’ de ise sistem de bulunan yay katsayılarının tahmini gösterilmektedir. Bu grafiklerden kontrolcünün parametre tahmininde başarılı olduğunu ve parametre belirsizlikleri altında karşılaştırıldığı durumlara göre performans ölçütlerini çok daha iyi sağladığı görülmektedir.



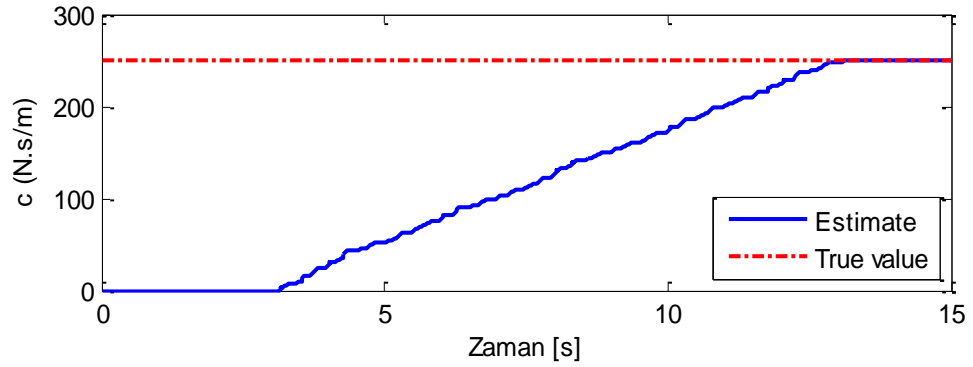
Şekil 7.21: Gövde ve aks kütlelerinin tahmini.



Şekil 7.22: Süspansiyon ve tekerlek yay sabitlerinin tahmini.

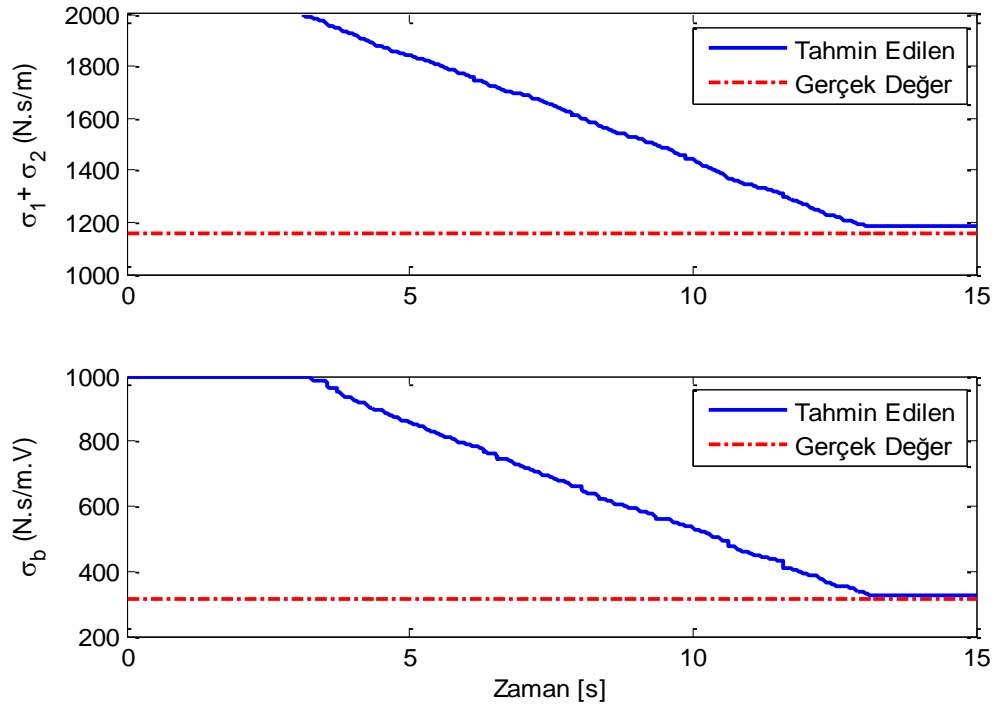
Çeyrek taşıt modelini daha gerçekçi yansıtmak adına sisteme viskoz sönüm ilave edilmiştir. Bu sönüm elemanı modellenemeyen yatak sürtünmeleri ve yay

elemanlarının iç sönümü olarak düşünülebilir. Şekil 7.23’de sistemde bulunan viskoz sönüm elemanının parametre tahmini görülmektedir.

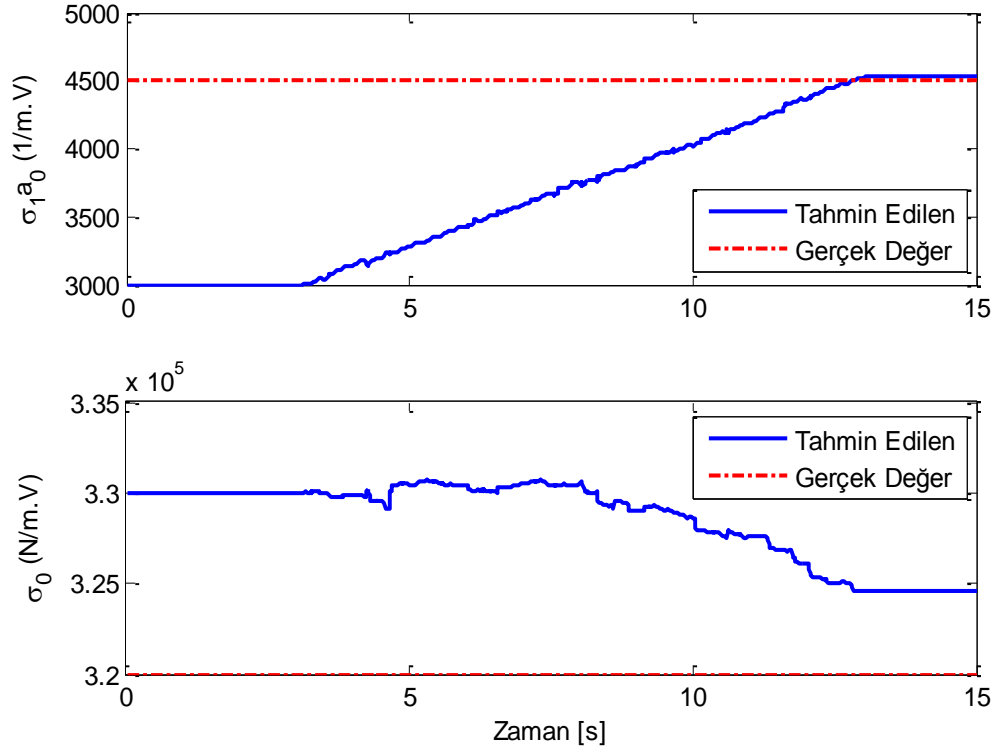


Şekil 7.24: Sönüm katsayısının tahmini.

Uygulanan kontrolcü aynı zamanda MR sönümleyiciyi tanımlayan parametreler için de tahminde bulunmaktadır. Bölüm 2’de detaylı şekilde açıklaması verilen MR sönümleyici parametrelerine ait tahmin grafikleri Şekil 7.24 ve Şekil 7.25’de verilmiştir.



Şekil 7.24: MR sönümleyici parametre tahmini.



Şekil 7.25: MR sönümleyici parametre yakınsama karakteristiği.

Kontrolcünün genel olarak sistem ve MR sönümleyici parametrelerinin tahmininde gerçek sonuçlara yakınsadığı görülmektedir. Burada esas amaç parametre tahminlerinin gerçek değerleri ile örtüşmesi değil kontrolcünün parametre değişimlerine karşı kararlı olduğunu göstermektir.

Elde edilen sonuçlar göz önünde bundurulduğunda uygulanan uyarlamalı kontrol yaklaşımının belirsiz parametreler altında karşılaştırıldığı durumlara göre başarılı olduğu görülmektedir. Seçilecek daha düşük kuvvet aralığına sahip MR sönümleyici ile daha iyi sonuçlar alınacağı öngörülmektedir.

## 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tam taşıt modeline geçmeden önce kullanılacak kontrolör performansını değerlendirmede sıkça kullanılan çeyrek taşıt süspansiyon modeli üzerinde uyarlamalı kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında kurulan çeyrek taşıt modeli iki farklı yol girişi altında test edilmiş ve uyarlamalı kontrolörün gerek pasif gerekse sabit gerilim ile beslenmesi durumlarından çok daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Performans değerlendirmesi, taşıt gövdesini temsil eden üst kütlenin yer değişimi, ivme cevabı ve süspansiyon çalışma aralığı göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. Yol tutuş karakteristiği ise aks kütlelerini temsil eden alt kütlenin yol yüzeyini ne kadar yakından takip ettiği bakımından incelenmiştir. Uyarlamalı kontrol yaklaşımının parametre tahmini açısından ve bu belirsizlikler altında performans kıstaslarını sağlayacak kontrol gerilimini sağlamakta başarılı olduğu görülmüştür. Deneysel uygulaması yapılmayan fakat literatürde yaygın bir şekilde kullanılan Skyhook, LQG,  $H_\infty$  kontrol yöntemleri karşısında uyarlamalı kontrol yaklaşımının konfor ve yol tutuş kriterleri açısından simülasyon ortamında başarılı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Deney düzeneğinde yapılabilecek iyileştirmeleri sıralayacak olursak, farklı yol profillerini gerçekleştirme açısından daha yüksek kapasiteli frenli servo motor seçilebilir. Kullanılan AC servo motor olduğu için diğer elektronik kontrol ekiplerini aksamlar ile iyi izole edilmelidir ve mümkün olduğunca ortak toprak hattı kullanılmalıdır. Hız kontrol modunda sürülmesinden dolayı ufak bir parazit sistemde istenemeyen hareketlere neden olabilmektedir. LVDT'lerin çalışma prensiplerinden dolayı gürültülü sonuç okumamak adına metal aksamlarla olan teması kesilmelidir. İleriki çalışmalarda simülasyon ortamında denenen sistem kontrol yaklaşımlarının deneysel olarak test edilmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Carlson J. D., Weiss Keith D., (1994), "A Growing Attraction To Magnetic Fluids", *Machine Design*, 66 (15), 61-66.
- Choi S. B., Lee S. K., Park Y. P., (2001), "A Hysteresis Model For The Field Dependent Damping Force of A Magnetorheological Damper", *Journal of Sound and Vibration*, 245 (2), 375-383.
- Çetin S., Zergeroğlu E., Sivrioğlu S., Yüksek I., (2011), "A new semiactive nonlinear adaptive controller for structures using MR damper: Design and experimental validation", *Nonlinear Dynamics*, 66 (4), 731-743.
- Çetin Ş., (2010), "MR Sönümleyici ile Yapıların Titreşim Kontrolü", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Dong X., Yu M., Liao C., Chen W., (2010), "Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension", *Nonlinear Dynamics*, 59 (3), 433-453.
- Du H., Sze K.Y., Lam J., (2005), "Semi-active  $H_{\infty}$  control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers,". *Journal of Sound and Vibration*, 283 (3-5), 981-996.
- Dyke S. J., Spencer B. F., Sain M. K., Carlson J. D., (1996), "Modelling and control of Magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, 5(5), 565-575.
- Glover, K., and J.C. Doyle, (1988) "State-space formula for all stabilizing controllers that satisfy an H-infinity norm bound and relations to risk sensitivity," *Systems and Control Letters*, vol. 11, 167-172.
- Guglielmino E., Sireteanu T., Stammers C. W., Ghita G., Giuclea M., (2008), "Semi-Active Suspension Control", Springer.
- Jiménez R., Álvarez-Icaza L., (2005), "LuGre friction model for a magnetorheological damper", *Structural Control and Health Monitoring*, 12 (1), 91–116.
- Kwok N. M., Ha Q. P., Nguyen M. T., Li J., Samali B., (2006), "A Novel Hysteretic Model for Magneto-Rheological Fluid Damper and Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization", *Sensors And actuators A: Physical*, 132(2), 441-451.
- Kwok N. M., Ha Q. P., Nguyen M. T., Li J., Samali B., (2007), "Bouc-Wen Model Parameter Identification for a MR Fluid Damper Using Computationally Efficient GA", *ISA Transactions*, 46(2), 167-179.



Mauricio F. Z., (2009), “Semiactive Control Strategies for vibration mitigation in adaptronic system Equipped with Magnetorheological Dampers”, Doctoral Thesis, Universitat de Girona.

Mori T., Nilkhamhang I., Sano A., (2007), “Adaptive semi-active control of suspension system with MR damper”, IFAC Workshop on Adaptive Learning Control and Signal Processing, 191-196, St. Petersburg, Russia, 29-31 August.

Rajala S., (2011), “Control Design of An Active Vehicle Suspension System”, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology.

Sammier D., Sename O., Dugard L., (2003), “Skyhook and  $H_\infty$  control of active vehicle suspensions: some practical aspects”, *Vehicle System Dynamics*, 39(4), 279–308.

Savaresi S. M., Poussot-Vassal C., Spelta C., Sename O., Dugard L., (2010), “Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles”, Elsevier, Butterworth Heinemann.

Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K., Carlson J. D., (1997), “Phenomenological model of a magnetorheological damper”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), 230–238.

Tam P. K. S., Wen T., (1996), “A direct composite controller design for a two-time-scale active suspension system”, *Proceedings of Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, 1401–1405, Taipei, Taiwan, 05-10 August.

Terasawa T., Sakai C., Ohmori H., Sano A., (2004), “Adaptive Identification of MR Damper for Vibration Control”, 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2297–2303, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 14-17 December.

Tyan F., Hong Y. F., Tu S. H., Jeng W. S., (2006), “Generation of Random Road Profiles”, *Journal of Advanced Engineering*, 4(2), 151-156.

Wen Y. K., (1976), “Method for Random Vibration of Hysteretic Systems”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 102 (2), 249-263.

Zuo L., Slotine J. J. E., Nayfeh S. A., (2004), “Experimental study of a novel adaptive controller for active vibration isolation”, *Proc. 2004 American Control Conference*, 3863-3868, Boston, MA, USA, 30 June-2 July.

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Suat YILDIZ 1987 yılında Trabzon'da doğdu. Gebze Anadolu Lisesi'nden 2004 yılında mezun olmuştur. Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Teorisi ve Dinamiği A.B.D'inde başladığı yüksek lisans eğitimine askerlik hizmet nedeniyle ara verdi. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D'inde başladığı öğrenciliğine ÖYP (Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı) kapsamında araştırma görevlisi olarak devam etmektedir.

## EKLER

### Ek-1 : Tez Kapsamında Yapılan Yayınlar

Yıldız A. S., Sivrioglu S., Zergeroglu E., Çetin Ş., (2013), “Adaptive Control of Semiactive Quarter Car Model with MR Damper;”, Proceeding of the 9th Asian Control Conference ASCC 2013, Bogazici University, İstanbul, 23-26 June.

Yıldız A. S., Sivrioglu S., Zergeroglu E., Çetin Ş., Başaran S., (2012), “MR Damper Esaslı Yarı Aktif Taşıt Süspansiyon Sisteminin Uyarlamalı Kontrolü”, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK 12, 293-299, Niğde Üniversitesi, Niğde, 11-13 Ekim.

### Ek-2 : Lord RD 1005-3 Serisi MR Sönümleyici Polinom Katsayıları

Pozitif ivmelenme				Negatif ivmelenme			
Katsayı		Katsayı		Katsayı		Katsayı	
$b_0$	-165.66	$c_0$	-535.57	$b_0$	-91.8	$c_0$	473.89
$b_1$	114.63	$c_1$	530.84	$b_1$	121.49	$c_1$	560.46
$b_2$	0.85	$c_2$	86.52	$b_2$	-6.95	$c_2$	-76.17
$b_3$	-7.39	$c_3$	-21.73	$b_3$	-7.06	$c_3$	-26.41
$b_4$	-0.02	$c_4$	-4.69	$b_4$	0.45	$c_4$	4.01
$b_5$	0.29	$c_5$	0.64	$b_5$	0.26	$c_5$	0.89
$b_6$	-8.16e-6	$c_6$	0.11	$b_6$	-0.01	$c_6$	-0.09
$b_7$	-5.9e-3	$c_7$	-0.01	$b_7$	-5.1e-3	$c_7$	-0.02
$b_8$	5.15e-6	$c_8$	-1.2e-3	$b_8$	1.34e-4	$c_8$	9.98e-4
$b_9$	5.65e-5	$c_9$	8.34e-5	$b_9$	4.71e-5	$c_9$	1.49e-4
$b_{10}$	-3.37e-8	$c_{10}$	4.63e-6	$b_{10}$	-5.51e-7	$c_{10}$	-3.96e-6
$b_{11}$	-2.05e-7	$c_{11}$	-2.69e-7	$b_{11}$	-1.68e-7	$c_{11}$	-5.32e-7