İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF TİCARİ BİR ARAÇ İÇİN YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mustafa Engin Emekli

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği
Programı: Mekatronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Bilin Aksun GÜVENÇ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF TİCARİ BİR ARAÇ İÇİN YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mustafa Engin Emekli
(518061010)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.05.2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 10.06.2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Bilin Aksun GÜVENÇ

Diğer Jüri Üyeleri Yrd.Doç.Dr Tankut Acarman

Yrd.Doç.Dr Erdinç Altuğ

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Süspansiyon sistemi, gerek konfor gerekse yol tutuş özellikleri bakımından bir taşıtın en önemli bileşenlerinden biridir. Pasif süspansiyonların tasarım sınırlarının sonuna gelindiği için günümüzde aktif ve yarı aktif süspansiyonlar hem ticari hem de hem de yolcu taşıtları için önem taşıyan bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sistemi tasarlanmış ve prototip bir araçta gerçek zamanlı testleri yapılmıştır.

Tecrübeleri ve bilgisi ile bana yardımlarda bulunan ve çalışmalarımın her aşamasında bana yol gösteren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Bilin Aksun GÜVENÇ'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Çalışmamda BIDEB 2210 Yurtiçi Yüksek lisans burs programı ile bana destek veren TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam sırasında prototip araç ve test olanakları ile bana yardımcı olan FORD-OTOSAN'a teşekkür ediyorum.

Ayrıca bana desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Levent GÜVENÇ'e ve tüm MEKAR çalışanlarına teşekkür ederim. Beni eğitim hayatım boyunca destekleyen ve sevgilerini esirgemeyen aileme en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Haziran-2008 **Mustafa Engin Emekli**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xiii**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Amaç 1
1.2. Günümüze kadar yapılan çalışmalar 2
1.3. Kapsam 5

2. YOL TAŞITLARINDA SÜSPANSİYON SİSTEMİ **6**
2.1. Pasif Süspansiyon sistemi 6
2.2. Süspansiyon sisteminde performans ölçütleri 7
2.3. Süspansiyon sisteminin performans ölçütlerinin frekans cevabı ile değerlendirilmesi 10

3. YARI AKTİF SÜSPANSİYON KONTROLÜNDE KULLANILAN ARAÇ MODELLERİ **13**
3.1. Giriş 13
3.2. Çeyrek Araç Modeli 13
3.3. Çeyrek Araç Modeli Durum-Uzay modeli 16
3.4. Yarım Araç Modeli 18
3.5. Arkada Bağımlı Süspansiyona Sahip Tam Araç Modeli 21
3.6. CARMAKER™ ortamında araç modellenmesi 23

4. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNDE KULLANILAN KONTROL ALGORİTMALARI **27**
4.1. Giriş 27
4.2. Skyhook Kontrol Algoritması 28
4.3. Groundhook Kontrol Algoritması 31
4.4. Hibrid Kontrol Algoritması 32
4.5. Geçici Rejimde Aktif Gövde Kontrolü (GRAGK) 33
4.5.1. Yalpa ve Yunuslama kontrolcüleri 34
4.5.2. Yunuslama kontrolcüsü 35
4.5.3. Üst düzey kontrolcü (Supervisory Control) 36

5. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ İÇİN KALMAN FİLTRESİ TASARIMI VE OFFSET GİDERİLMESİ **37**
5.1. Giriş 37
5.2. Kalman filtresi tasarımı 37
5.3. Offset giderici çevrim tasarımı 39
5.4. Kalman Filtresi ve ofset giderici çevrim için yapılan benzetimler 40

6. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN BENZETİM SONUÇLARI **44**

6.1. Giriş 44
6.2. CARMAKER™ modeli ile yapılan benzetimler 50

7. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN TEST EDİLECEĞİ PROTOTİP ARACININ TOPLANMASI VE MODİFİYE EDİLMESİ 61
7.1. Giriş 61
7.2. Yarı Aktif Süspansiyon Sistemi sensör altyapısı 62
7.2.1. İvmeölçerler 62
7.2.2. Lineer Potansiyometreler 64
7.2.3. Yarı aktif süspansiyon sönümleyici donanımı 66
7.3. Dspace donanımları 68
7.3.1. dSpace DS1401 MicroAutoBox 69
7.3.2. dSpace RapidPro 71
7.3.3. RapidPro ve MABX yazılımları 73
7.4. Araçta yapılan donanımsal değişiklikler 74
7.4.1. Sensör bağlantılarının düzenlenmesi için PCB tasarlanması 75
7.4.2. dSpace birimlerinin araç üzerinde paketlenmesi 75

8. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNE AİT KONTROL MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI 77
8.1. Giriş 77
8.2. Model konfigürasyonu 77
8.3. Yarı Aktif Süspansiyon Sensör beslemeleri ve Sensör okumaları 79
8.4. Yarı Aktif Süspansiyon sistemi sönümleyici sürücü blokları 82
8.5. Sensör Sinyallerinin ofset giderici çevrim ve Kalman filtresinden geçirilmesi 85
8.6. Hibrid Kontrolcünün modele eklenmesi 86

9. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN YOL VE DENEY DÜZENEĞİ TESTLERİ VE SONUÇLAR 88
9.1. Giriş 88
9.2. Yarı Aktif Süspansiyon Sistemi Squeak & Rattle testleri 91
9.3. Yarı aktif süspansiyon sistemi yol testleri 99

10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 106

KAYNAKLAR 108

EK-A KALMAN FİLTRESİNE AİT BENZETİM SONUÇLARI 111

EK-B PROTOTİP ARACA AİT YOL TESTİ SONUÇLARI 114

ÖZGEÇMİŞ 118

KISALTMALAR

CVD	: Continuously Varying Dampers
MABX	: Micro Auto Box
RTILib	: Real Time Interface Library
RPCU	: Rapid Pro Control Unit
S&R	: Squeak And Rattle
CG	: Center of Gravity
ADC	: Analog Digital Converter
DAC	: Digital Analog Converter
CAN	: Controller Area Network
PWM	: Pulse Width Modulation
DSP	: Digital Signal Processing
PSD	: Power Spectral Density

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 1.1 : OPEL IDS-plus™ sistemi [22] 3
Şekil 1.2 : Delphi MagneRide™ sistemi [23] 3
Şekil 1.3 : ZF-Sachs CDC™ sistemi [24] 4
Şekil 2.1 : Gövde Deplasmanı için frekans cevabı....11
Şekil 2.2 : Tekerlek deplasmanı için frekans cevabı 12
Şekil 3.1 : Çeyrek araç modeli....14
Şekil 3.2 : Asılı kütle ve asılı olmayan kütleye ait serbest cisim diyagramı 14
Şekil 3.3 : Çeyrek araç modeli MATLAB/SİMULİNK™ diyagramı 15
Şekil 3.4 : Çeyrek araç modeli yapısı 17
Şekil 3.5 : Yarım Araç Modeli 19
Şekil 3.6 : Yarım Araç Modelinde asılı kütleye ait serbest cisim diyagramı....19
Şekil 3.7 : Yarım Araç Modelinde asılı olmayan kütlelere ait serbest cisim diyagramları 20
Şekil 3.8 : Yarım araç modeli SİMULİNK™ diyagramı 21
Şekil 3.9 : Arkada bağımlı tam araç süspansiyon modeli [8, 9]....22
Şekil 3.10: CARMAKER™ araç modelinin Simulink™ penceresi 24
Şekil 3.11: CARMAKER™ araç modelinin alt bileşenleri 25
Şekil 3.12: CARMAKER™ modeline ait yarı aktif süspansiyon kontrolcüsü 26
Şekil 4.1 : Skyhook Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar....29
Şekil 4.2 : Skyhook Kontrol algoritması: Damper kuvvetleri....29
Şekil 4.3 : Yarı aktif sönümleyicinin çalışma bölgeleri 30
Şekil 4.4 : Groundhook Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar....32
Şekil 4.5 : Hibrid Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar 33
Şekil 4.6 : TABC algoritmasının genel blok diyagramı [8] 34
Şekil 4.7 : Yalpalama dinamiği [8] 34
Şekil 4.8 : Yalpalama kontrolcü blok diyagramı [8] 35
Şekil 5.1 : Observer ve süspansiyon sistem modeline ait blok diyagram 38
Şekil 5.2 : Observer, sistem modeli ve ofset gidericinin blok diyagramı [9]....40
Şekil 5.3 : Sensör gürültüsü simülasyon girişi 41

Şekil 5.4 : Rastgele gürültü sinyali olarak seçilen yol girişi, w(t) 42
Şekil 5.5 : Sabit frekanslı sinüs dalgası olarak seçilen yol girişi, w(t) 42
Şekil 5.6 : Değişken frekanslı sinüs dalgası olarak seçilen yol girişi, w(t) 43
Şekil 6.1 : 0.01 m genlikli, 1 Hz frekanslı yol girişi için asılı kütle deplasmanı 45
Şekil 6.2 : 0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı kütle hızı 45
Şekil 6.3 : 0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı olmayan kütle deplasmanı 46
Şekil 6.4 : 0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı olmayan kütle deplasmanı) 46
Şekil 6.5 : 1-20 Hz arası süpürülmüş sinüs sinyali yol girişi için asılı kütle deplasmanı 47
Şekil 6.6 : 1-20 Hz arası süpürülmüş sinüs sinyali yol girişi için asılı olmayan kütle deplasmanı 48
Şekil 6.7 : 3 Hz için asılı kütle deplasmanının değişik β değerlerine göre değişimi48
Şekil 6.8 : 10 Hz için asılı kütle ivmesinin değişik β değerlerine göre değişimi.....49
Şekil 6.9 : CARMAKER™ programının ana penceresinin görünümü 50
Şekil 6.10 : CARMAKER™ programında oluşturulan yarı aktif süspansiyon kontrolcüsü blok diyagramının görünümü.....51
Şekil 6.11 : Sol ön asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu 52
Şekil 6.12 : Sağ ön asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu.....53
Şekil 6.13 : Sol arka asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu 53
Şekil 6.14 : Sağ arka asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu.....54
Şekil 6.15 : Sol ön asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu 55
Şekil 6.16 : Sağ ön asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu.....55
Şekil 6.17 : Sol arka asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu 56
Şekil 6.18 : Sağ arka asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu.....56
Şekil 6.19 : TABC algoritmasının ani frenleme için CARMAKER™'da yapılan simülasyonu 57
Şekil 6.20 : Sol ön Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu.....58
Şekil 6.21 : Sağ ön Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu.....59
Şekil 6.22 : Sol arka Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu 59
Şekil 6.23 : Sağ arka Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu.....60
Şekil 7.1 : Prototip araçta kullanılan Crossbow ivmeölçerler.....63
Şekil 7.2 : İvmeölçerlerin araç üzerindeki yerleri (Ön ve arka gövde ivmeölçerleri)64
Şekil 7.3 : Lineer potansiyometre 65
Şekil 7.4 : Arka lineer potansiyometrenin araç üzerindeki yeri.....65

Şekil 7.5 : Ön lineer potansiyometrenin araç üzerindeki yeri 66
Şekil 7.6 :Ön CVD'nin araç üzerindeki bağlantı yerleri 67
Şekil 7.7 : PWM sinyalinin genel görünüşü.....68
Şekil 7.8 : dSpace-RTlib kütüphaneleri 69
Şekil 7.9 : MicroAutobox genel yapısı 70
Şekil 7.10 : Akü-MABX bağlantı şeması.....70
Şekil 7.11 : RapidPro MABX sensör bağlantı şeması.....71
Şekil 7.12 : PS-FBD 2/1-CVD bağlantı şeması.....72
Şekil 7.13 : Configuration Desk™ arayüzü 73
Şekil 7.14 : Configuration Desk PWM çıkışı için konfigürasyon penceresi.....74
Şekil 7.15 : dSpace ve PCB'nin araç üzerinde paketlenmesi 1.....76
Şekil 7.16 : dSpace ve PCB'nin araç üzerinde paketlenmesi 2.....76
Şekil 8.1 : Yarı aktif süspansiyon kontrol modelleri.....77
Şekil 8.2 : *.hwt dosyasının seçilmesini sağlayan ekran.....78
Şekil 8.3 : RapidPro ADC bloğu 79
Şekil 8.4 : RapidPro ADC bloğu setup ekranı.....80
Şekil 8.5 : MABX ADC'leri bloğu setup ekranı 80
Şekil 8.6 : MABX ADC bloğu.....81
Şekil 8.7 : Sönümleyicilerin sürüldüğü Simulink™ bloğu.....83
Şekil 8.8 : RapidPro PWM bloğu 84
Şekil 8.9 : İvmeölçer bloğu.....85
Şekil 8.10 : Kalman Filtresi ve ofset giderici çevrime ait Simulink bloğu 86
Şekil 8.11 : Kalman filtresi ve kontrolcü blokları 87
Şekil 8.12 : Hibrid kontrolcü bloğu.....87
Şekil 9.1 : Squeak and rattle test düzeneğine ait hidrolik sistemin görünüşü 89
Şekil 9.2 : Arka sönümleyici için akımlara göre kuvvet-hız eğrileri.....90
Şekil 9.3 : Silindirlerden birine ait her sekansın deplasmanı.....92
Şekil 9.4 : Değişik β katsayılarında test edilmiş Hibrid kontrolcü 93
Şekil 9.5 : 8. sekans için gövde ivmeölçerinin PSD'leri.....94
Şekil 9.6 : 8. sekans için gövde ivmeölçerinin PSD'leri.....94
Şekil 9.7 : 8.sekansa ait zaman domeninde gövde ivmeölçeri sonuçları 95
Şekil 9.8 : 7.sekansa ait gövde PSD'leri.....96
Şekil 9.9 : 7.sekansa ait tekerlek PSD'leri 96
Şekil 9.10 : Sol ön çeyrek için Kalman filtresi çıkışları ve Ofsetli ivme sinyali 97
Şekil 9.11 : Test sırasında sol arka yarı aktif sönümleyicinin çalışma aralığı.....98
Şekil 9.12 : Test sırasında sol arka yarı aktif sönümleyicinin çalışma aralığı.....98
Şekil 9.13 : Sert, yumuşak ve Hibrid süspansiyon için sol ön alt ivme PSD.....99

Şekil 9.14 : Sert, yumuşak ve Hibrid kontrolcülü durum için sol ön alt ivme zaman domeni 100
Şekil 9.15 : Sert, yumuşak ve Hibrid süspansiyon için sol ön üst ivmeölçer PSD 101
Şekil 9.16 : Sol ön gövde ivmesine ait PSD 102
Şekil 9.17 : Sol ön tekerlek ivmesine ait PSD 102
Şekil 9.18 : Dört çeyreğe ait yol testi sonuçları 103
Şekil 9.19 : Sönümleyiciye ait çalışma bölgeleri 104
Şekil 9.20 : Sönümleyici akımının değişimi 105
Şekil A.1 : X_{r1} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer 111
Şekil A.2 : X_{r2} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer) 112
Şekil A.3 : X_{r3} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer 112
Şekil A.4 : X_{r3} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer 113
Şekil B.1 : Sağ ön gövde ivmeölçeri PSD sonucu 115
Şekil B.2 : Sağ ön tekerlek ivmeölçeri PSD sonucu 115
Şekil B.3 : Sol arka govde ivmeölçeri PSD sonucu 116
Şekil B.4 : Sol arka tekerlek ivmeölçeri PSD sonucu 116

SEMBOL LİSTESİ

m_s, m_u	: Asılı kütle ve asılı olmayan kütleler
k_s, k_u	: Gövde ve tekerlek yay sabitleri
b_s, b_u	: Gövde ve tekerlek sönümleyici sabitleri
x_s, x_u	: Asılı kütle ve asılı olmayan kütle düşey yerdeğiştirmeleri
r	: Çeyrek araç modeli için yol girişi
w	: Yarım araç modeli için yol girişi
x_1, x_3	: Ön ve arka asılı kütle deplasmanları
x_2, x_4	: Ön ve arka asılı olmayan kütle deplasmanları
M_b	: Aracın asılı olmayan kütlesi
m_{tf}, m_{tr}	: Ön ve arka asılı olmayan kütleler
k_f, k_r	: Ön ve arka yay sabiti
c_f, c_r	: Ön ve arka sönümleyici sabiti
θ	: Kafa vurma açısı
I_{yy}	: -y eksenindeki atalet momenti
I_{xx}	: -x eksenindeki atalet momenti
I_{ur}	: Arka aksın atalet momenti
L_f	: Ağırlık merkezinin ön tekerleğe olan uzaklığı
L_r	: Ağırlık merkezinin arka tekerleğe olan uzaklığı
x	: Gövde deplasmanı
z	: Araç gövdesinin düşey deplasmanı (Tam araç modeli)
$z_{s^{**}}$	: Bağımsız asılı kütlelerin düşey deplasmanı
z_{**}	: Asılı olmayan kütlelerin düşey deplasmanı
ϕ	: Yalpa açısı
ϕ_{ur}	: Arka aksın yalpa açısı
M	: Araç gövdesinin asılı kütlesi
M_{**}	: Ön taraf için asılı olmayan kütleler
M_{ur}	: Arka taraf için asılı olmayan kütleler
$f_{s^{**}}$	: Yay kuvvetleri
$f_{d^{**}}$	: Sönümleyici kuvvetleri
$f_{t^{**}}$	: Tekerleğe ait yay kuvvetleri
$k_{s^{**}}$	: Yay sabitleri
$c_{s^{**}}(t)$	: Yarı aktif Sönümleme faktörleri
ω_{ij}	: Yol girişi
a, b	: Ağırlık merkezinden ön ve arka tekerleklere olan mesafeler
c, d	: Ağırlık merkezinden sağ ve sol tekerleklere olan mesafeler
e, g	: Arka aksın ağırlık merkezinden sağ ve sola olan mesafeler

HAFİF TİCARİ BİR ARAÇ İÇİN YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sisteminin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle bilgisayar ortamında yapılan benzetimlerle kontrolcüler değişik araç modellerin üzerinde test edilmiştir. Daha sonra prototip araca gerekli sensör ve CVD sönümleyici donanımları eklenip yapılan gerçek zamanlı yol testleri ile sistemin performansı benzetimler ile doğrulanmıştır.

Süspansiyon sistemlerinde, yol tutuşu ve konfor birbirleri ile zıt olan iki karakteristik özelliktir. Konvansiyonel olan pasif süspansiyonlarda bu özelliklerden birindeki iyileşme, diğerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Sönümleme oranı değiştirilebilen yarı-aktif sönümleyiciler sayesinde sürüş sırasında bu iki özellik arasında geçiş sağlanabilmektedir.

Yarı-Aktif Süspansiyon Sistemi, donanımsal olarak sertliği kontrol edilebilir sönümleyiciler, ve kontrol sisteminin ihtiyaç duyduğu sensörlerden meydana gelmektedir. Bunun yanında, gerçek zamanlı olarak, sensörlerden gelen bilgileri değerlendirip işledikten sonra, kontrol algoritması uyarınca, gerekli kontrol sinyallerini oluşturan, kontrol ünitesi de sistemin elemanları arasındadır.

Tez çalışmasının bölümleri şu şekilde sıralanmaktadır: Öncelikle, kontrol algoritması geliştirilirken temel alınan süspansiyon performans ölçütleri çalışmada sunulmuştur. Bu kontrol algoritmaları, bilgisayar ortamında geliştirilirken kullanılan, araç süspansiyon modelleri ve elde edilen benzetim sonuçları çalışmanın bölümleri arasındadır. Bunun yanında sensör verisinin filtrelenmesi ve gerekli sinyal işlemlerinin yapılması için tasarlanan Kalman filtresi ve ofset giderici çevrimden bahsedilecektir. Ayrıca yarı-aktif süspansiyon sisteminin FORD Transit Connect aracı üzerine montajı, sensörlerin ve diğer donanımların araca eklenmesi, yapılan donanımsal konfigürasyonlar gene bu çalışmada sunulmaktadır. Bunun ardından araç simülasyon ortamında geliştirilen kontrol altyapısının gerçek sisteme adaptasyonu ile ilgili çalışmalar gelmektedir. Son olarak da, araç ile yapılan testler ve elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur.

Yapılan çalışmanın simülasyonla ilgili kısımlarında MATLAB/Simulink[1] ve CARMAKER[2] kullanılmıştır. Bunun yanında, gerek sensörlerin okunması, gerekse aktüatörlere gerekli sinyallerin gönderilmesi amacı ile ve sistemin gerçek zamanlı kontrolünün yapılması amacı ile Dspace firmasına ait Microautobox ve RapidPro birimleri kullanılmaktadır. Bunun dışında DSPACE ürünlerinin kimi konfigürasyonları için donanımların bir yazılımı olan Configuration Desk, ve çeşitli ara yüzlerin oluşturulmasında ise Control Desk[3] yazılımları, kullanılan diğer yazılımlardır.

[1] MATLAB/Simulink, Mathworks firmasının ticari ürünüdür.

[2] CARMAKER, IPG Gmbh Firmasının ticari ürünüdür.

[3] Control Desk, Dspace firmasının ticari ürünüdür.

DESIGN OF A SEMI ACTIVE SUSPENSION SYSTEM FOR A LIGHT COMMERCIAL VEHICLE

SUMMARY

In this thesis, semi active suspension system for a light commercial vehicle is designed. First of all, computer simulations of fundamental controller algorithms is performed with appropriate vehicle models. Moreover, prototype vehicle is equipped with additional sensors and CVD dampers. The real time road tests are used to validate the simulation results.

In suspension systems, road holding and comfort are the characterictic properties which are working just in an opposite way.In convensional passive suspension systems, those properties have an adverse effect on each other. With the addition of Continously Variable dampers, it is possible to make a transition between these two effects.

Semi Active suspension system consists of dampers with variable damping ratio and the sensor that are necessary for controller. Furthermore, there must be controller unit that is capable of processing sensor data and generating an appropriate control signals.

The chapters of this thesis are as follows: First of all, performance criteria of suspension system are mentioned. Control algoritms are developed according to these criteria. Next, controller algorithms, details about the vehicle models used and the simulation results were discussed. In addition, some discussion about the Kalman Filter and offset reduction loop is made. Moreover, integration of sensor and damper equipment to FORD Transit Connect and the other configurations are presented. Adaptation of control algoritms into the real system is discussed next. Finally, real-time in vehicle tests and the results are presented.

During this thesis, computer simulations are performed using MATLAB/Simulink[4] and CARMAKER[5]. In addition, sensor and actuator signal processing and generation and control of whole system in real time is handled by hardwares, Dspace MicroAutobox and RapidPro. These hardwares are also configured ann controlled by partially Control Desk[6] and Configuration Desk. These softwares are used to setup a graphical user interface for tests and recording the test data.

[4] MATLAB/Simulink, is the registered trademark of Mathworks.

[5] CARMAKER, is the registered trademark of IPG Gmbh.

[6] Control Desk is th registered trademark of Dspace Gmbh.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

21.yy' a girerken taşıt teknolojisindeki gelişmeler, kullanılan konvansiyonel sistemlerin yerini alan elektronik kontrollü ve daha hassas yeni sistemler meydana getirmiştir. Motor, şanzıman ve süspansiyon gibi alt sistemlerdeki tasarım kısıtları elektronik kontrollü sistemler ile aşılmaya başlanmış ve sistemlerin performansında önemli artışlar görülmüştür.

Süspansiyon sistemlerindeki gelişmeler, taşıtların ortaya çıkmasıyla birlikte başlamış ve uzun yıllar paralel bir şekilde devam etmiştir. Süspansiyon sistemlerinde yapılan araştırma geliştirme faaliyetlerinin asıl amacı, karmaşık eğrisel elemanlara sahip süspansiyon sistemini yol koşullarına ve sürücünün isteğine göre optimize etmektir. Bu amaçtan yola çıkarak aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemleri gibi elektronik kontrollü sistemler hakkında üretici firmalar ve araştırma kuruluşları tarafından daha çok araştırma yapılmaya başlanmıştır.

Aktif ve yarı aktif olmak ikiye ayrılan elektronik kontrollü süspansiyon sistemleri, yol tutuş ve konfor özelliklerini ayarlamak ve geçiş yapabilmek için tasarlanmaktadır. Aktif süspansiyon sistemleri, pasif bir süspansiyon sistemine ekstra enerji ve kuvvet girişi sağlayacak bir eyleyici ile donatılmışlardır. Eyleyici genellikle hidrolik bir silindir kullanılmaktadır. Aktif süspansiyonlar herhangi bir kısıtlama olmaksızın şasi ve tekerleğin her türlü hareketinde istenilen yönde kuvvet uygulayabilir. Ancak kullanılan hidrolik sistemin pahalı olması, araca ekstra bir ağırlık katması ve kontrolünün karmaşıklığı olması aktif süspansiyon sistemlerinin dezavantajları arasındadır.

Yarı aktif süspansiyon sistemlerinde ise aktif süspansiyonların tersine sisteme herhangi bir enerji girişi yoktur. Bunun yerine pasif süspansiyonlardaki sönümleyicilerin yerine, elektronik olarak sönümleme direnç kuvveti değiştirilebilen bir sönümleyici kullanılır. Bu sönümleyiciler, değişik konstrüksiyonlarda olmaktadır. Viskoz akışkanın akış kesit alanının elektronik olarak bir solenoid valv ile değştirildiği, sürekli değişken sönümleyiciler ve içerisine ferromanyetik maddeden

yapılmış tozlar karıştırılmış, akımla viskozitesi değişen bir akışkan kullanılan manyetoreolojik sönümleyiciler yarı aktif süspansiyonlarda kullanılan sönümleyicilere örnek olarak gösterilebilir.

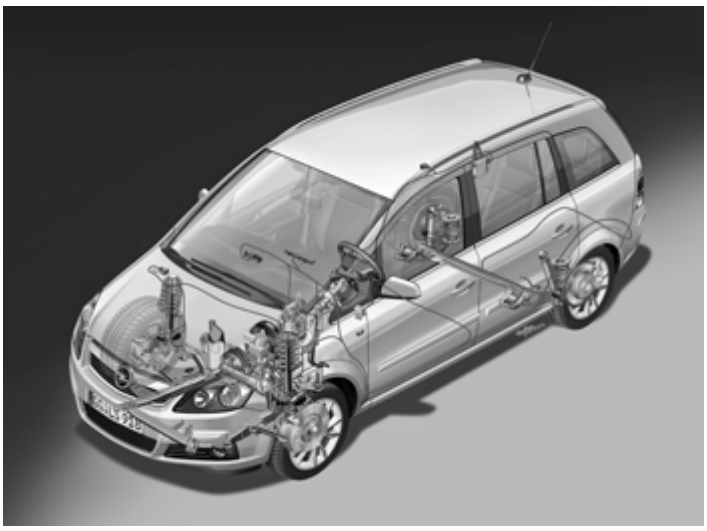
Elektronik kontrollü süspansiyon sistemleri, her kontrol sistemi gibi gerekli kapalı çevrim sinyalini elde etmek için sensörler ile donatılmaktadır. Bu sensörler genellikle, araç gövdesinin ve tekerleklerin düşey hareketleri hakkında bilgi veren ivmeölçerler ve lineer potansiyometrelerdir. Ayrıca daha detaylı kontrolcüler için, aracın yalpalama, yunuslama ve savrulma hareketlerini ölçen sensörlere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada yukarıda anlatıldığı şekilde, hafif ticari bir araç üzerinde başarılı bir şekilde çalışabilecek yarı aktif süspansiyon sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Çalışmada MATLAB/Simulink™ ve CARMAKER™ paket programları yardımı ile kontrolcülerin yaratılması ve yine aynı ortamda oluşturulan araç modelleri ile benzetimlerin yapılıp, performanslarının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Yarı aktif süspansiyon araştırmalarında temel olarak çeyrek araç modeli, yarım araç modeli ve tam araç modeli kullanılmaktadır. Tasarlanan kontrolcülerin gerçek zamanlı araç testlerinde performanslarının doğrulanması için, gerekli sensör, eyleyici ve kontrol birimleri ile donatılmış prototip araç hazırlanmıştır. Son olarak prototip araçta yapılan testlerin sonuçlarına göre yorumlar yapılmıştır.

1.2 Günümüze kadar yapılan çalışmalar

Yarı aktif süspansiyon sistemi maliyetinin az olması, aktif süspansiyonlardaki gibi ek bir enerji sistemine ihtiyaç duymaması ve araç üzerindeki paketlemesinin rahat olmasından dolayı günümüzde gittikçe artan bir sıklıkla araçlara uygulanmaktadır. Aşağıda halen kullanılan sistemlerden örnekler verilmektedir.

Opel firması, 2005 yılında lansmanını gerçekleştirdiği Astra OPC modeline IDS-plus™ adını verdiği bütünleşik araç dinamiği kontrolcüsü yerleştirmiştir. Elektronik stabilite programı (ESP), çekiş kontrol sistemi (TCS) ve yarı aktif süspansiyon sisteminin birlikte çalıştığı bu sistemde acil durumlarda yarı aktif süspansiyon sistemi, sönümleyicileri sertleştirerek, tekerleğin daha az hareket etmesini sağlamakta dolayısıyla daha fazla tekerlek kuvveti üretilmektedir. Bu da aracın yol tutuş özelliklerini arttırmakta ve ESP sisteminin çalışmasına yardımcı olmaktadır. [22]



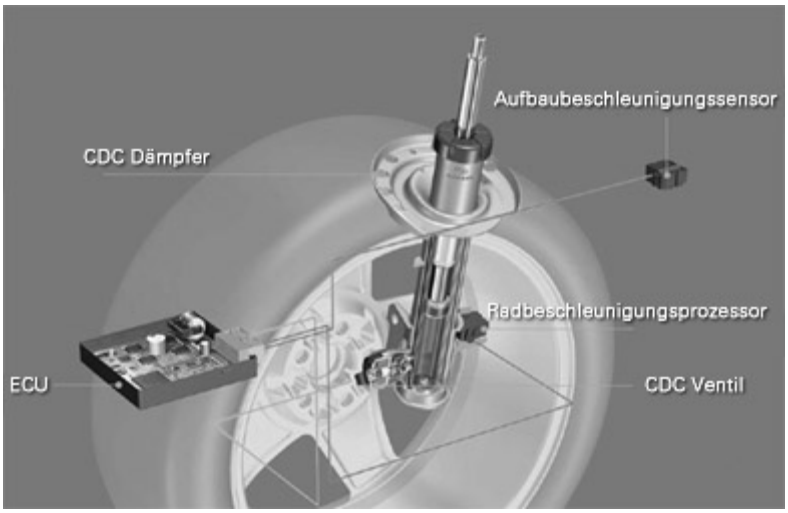
Şekil 1.1: OPEL IDS-plus™ sistemi [22]

Delphi firmasının ürettiği MagneRide™ sistemi, manyetoreolojik sönümleyicilerden oluşan bir yarı aktif süspansiyon sistemidir. Sistemde ayrıca ivmeölçerler ve elektronik kontrol ünitesi bulunmaktadır. Bugün oldukça geliştirilmiş sistem, Ferrari 599 GTB Fiorano, Chevrolet Corvette, Audi R8 ve Audi TT gibi üst segment araçlarda opsiyonel olarak sunulmaktadır. Sürücü seçenekli olarak çalışan sistem, sport, konfor ve normal sürüş modlarına göre süspansiyon sistemini ayarlamaktadır. [23].



Şekil 1.2: Delphi MagneRide™ sistemi [23]

Alman ZF-Sachs firması uzun bir süredir araştırmalar yaptığı yarı aktif sönümleyicileri, 2004 yılında ticari hale getirmiştir. CDC adı verilen sönümleyiciler, solenoid valf ile ayarlanabilen orifise sahiptir. Böylelikle akışkanın viskozitesi ayarlanabilmekte, uygun sönüm kuvveti yaratılabilmektedir. Sistem sadece sönümleyici olarak değil bütünleşik bir sistem olarak tasarlanmıştır. Tekerlek ve gövde deplasmanlarını ölçen iki adet ivmeölçerin kullanıldığı sistemde bir de kontrol ünitesi mevcuttur. [24]



Şekil 1.3 : ZF-Sachs CDC™ sistemi [24]

Yarı aktif süspansiyonlar konusunda yapılan akademik çalışmalar 1970'lerden artmaya başlamıştır. Aşağıda bu konularda yapılan çalışmalardan örnekler verilmektedir.

1974 yılında Karnopp D.C. tarafından yapılan çalışmalarda araçlarda yarı aktif süspansiyon sisteminin temel süspansiyon sistemi olarak kullanılması tartışılmıştır. Bu amaçla iki durumlu Skyhook kontrol stratejisi yaratılmıştır. Konfor ve yol tutuş özelliklerinin bu şekilde değiştirilmesi öngörülmüştür. [3]

Yine aynı yıllarda Hedrick K., durum değişkenleri ile yarı aktif süspansiyon sisteminin modellenmesini incelemiştir. Bu şekilde ileri kontrol sistemlerinin test edilebilirliğini göstermiştir. [4]

Skyhook etkisinin tam tersi gibi çalışan Groundhook kontrol sistemi 1997 yılında Valasek tarafından sunulmuştur. Tekerlek-yol kuvvetlerini maksimize ederek, yol tutuşu arttırmayı amaçlayan bu algoritma, en temel kontrol algoritmalarından biridir. [6]

İki durumlu Skyhook kontrol stratejisi, sönümleyicinin en büyük ve en küçük sönüm kuvvetleri arasında geçiş yapmaktadır. Dolayısıyla aradaki sönüm değerlerini almamaktadır. Savaresi tarafından 2003 yılında gösterilen doğrusal Skyhook algoritması, en küçük ve en büyük sönüm kuvvetleri yerine bu eğriler arasında kalan tüm değerleri içine alacak şekilde bir zarfta çalışmaktadır. Savaresi ayrıca iki durumlu Skyhook ile doğrusal Skyhook' ait sonuçları birbiriyle karşılaştırmıştır. [14]

1.3 Kapsam

Bu tez çalışmalarında yukarıda bahsedilen çalışmalara paralel olarak hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sisteminin tasarımı yapılmıştır. Birinci bölümde elektronik kontrollü süspansiyon sistemlerine bir giriş yapılmıştır. Ayrıca çalışmanın amacı ve günümüze kadar yapılan endüstriyel ve akademik çalışmalardan örnekler verilmiştir. İkinci bölümde yol taşıtlarında süspansiyon sistemleri üzerinde durulmuştur. Temel süspansiyon tasarım ölçütlerine de değinilen ikinci bölümde, süspansiyon sisteminin frekans cevabı çıkarılmıştır. Üçüncü bölümde tasarımda kullanılan temel araç modellerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde ayrıca CARMAKER™ araç modeline ve model yapısına da değinilmiştir. Dördüncü bölümde literatürde belirtilen Skyhook, Groundhook ve Hibrid kontrol algoritmalarına değinilmiştir. Bunlara ek olarak tez çalışması kapsamında yaratılan TABC algoritmasının temel yapısı ve çalışma prensipleri sunulmuştur. Sensör gürültülerinin ve ofsetlerin giderilmesi için tasarlanan Kalman Filtresi ve ofset giderici çevrimden ise beşinci bölümde bahsedilmiştir. Tasarlanan sistemlerin bilgisayar ortamında yapılan benzetimlere ait sonuçların bir kısmı altıncı bölümde sunulmuş, diğer sonuçlar Ek-B'de gösterilmiştir. Yedinci bölümde gerçek zamanlı testler için prototip aracın nasıl modifiye edildiği anlatılmış ve araçta bulunan sensör-eyleyici ve kontrol sistemi elemanlarına değinilmiştir. Bu bölümde ayrıca araç üzerinde kullanılan Dspace kontrol sisteminden bahsedilmiştir. Sekizinci bölümde yaratılan kontrol modellerinin Dspace sistemi için modifiye edilmesi ve gerekli giriş çıkışların nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir. Dokuzuncu bölümde ise araç üzerinde yapılan yol ve deney düzeneği testleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca test sonuçları yorumlanarak gösterilmiştir. Çalışma sonuçlar-tartışma bölümü ile son bulmaktadır.

2. YOL TAŞITLARINDA SÜSPANSİYON SİSTEMİ

2.1 Pasif Süspansiyon sistemi

Süspansiyon sistemi gövdeyi akslar üzerinde tutan elemandır. Gerek araç dinamiğinden kaynaklanan gerekse yol düzgünsüzlüklerinden meydana gelen hareketleri sönümleyen süspansiyon sisteminin görevleri şu şekilde özetlenebilir:

1. **Araç gövdesinin yolun bozucu etkisinden izole edilmesi ve bu sayede aracın konfor özelliklerinin artırılması:** Bu özellik genelde aracın gövdesinin hareketi ile ilişkilendirilir. Aynı zamanda aracın kafa vurma ve yalpalama hareketlerinin kontrol altına alınması da süspansiyonun konfora yönelik görevlerinden biridir.[1, 2]

2. **Aracın gerek düz gerekse düzgünsüz yol şartlarında ayrıca hızlanma ve fren sırasında yol tutuş özelliklerini sağlaması:** Bu özellik ise dikey kuvvetlerin etkisi sonucunda meydana gelen tekerleğin şekil değiştirmesi ile ilgilidir. Şekil değişiminin azaltılması araçta daha iyi yol tutuşu, çekiş fren ve dönme özellikleri sağlayacaktır.[1, 2]

3. **Aracın statik ağırlığını dengelemek**: Bu özellik süspansiyonun stroku ile ilgilidir.

Aynı zamanda süspansiyonun yüksek frekanslı titreşimleri sönümle gibi bir özelliği vardır. Bu sayede araçta meydana gelebilecek gerek gürültü, gerekse yorulma gibi dayanım unsurlarının geliştirilmesinde süspansiyonun önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Günümüzde süspansiyon sistemleri pasif elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanlar özellikleri değiştirilemeyen yay ve sönümleyici sistemleridir. Sistemin içinde bir eyleyici ya da sensör elemanı bulunmamaktadır.

Süspansiyon siteminin ana elemanlarını oluşturan yaylar statik ağırlıkları taşırken damperler de bozucu etkilerin oluşturduğu enerjiyi soğurur. Yay bilindiği üzere deplasmanla orantılı bir kuvvet oluşturur iken, damperlerden meydana gelen tepki

kuvveti ise hareketin hızı ile ilgilidir. Dolayısı ile yayda oluşan kuvvet, yaya ait kuvvet katsayısı ile yayın deplasmanın çarpımı sonunda bulunur. Aynı şekilde damperin oluşturduğu sürtünme kuvveti de hareketin çizgisel hızı ile damper katsayısının çarpımı sonucu elde edilmektedir.

Her ne kadar elemanlar parametreleri sabit sistemler (yay ve sönüm katsayısı) olsa da eğrisel özellikler taşımaktadır. Dolayısı ile süspansiyonun çeşitli hareket bölgelerinde daha sert veya yumuşak davranması sağlanarak değişik performans kriterlerinin sağlanması başarılabilmektedir.

Genelde binek araçlarda spiral yay kullanılmasına rağmen ticari ve yük taşıtlarında özellikle arka yay sistemi yaprak yaylardan meydana gelmektedir. Yaprak yaylar bilindiği üzere, farklı karakteristikleri olan kademeli yaylardır. Bu yüzden de birden çok katlı yaprak yay sistemi eğrisel özellikler taşımaktadır. Bunu dışında süspansiyon sisteminin birer parçası olan ve süspansiyon strokunun sonunda bulunan 'bumpstop' elemanları da farklı sönüm ve yay karakteristikleri taşıdıklarından sisteme eğrisel özellikler katmaktadır. Aynı durum sönümleyiciler içinde geçerlidir. Belirli hızlar için daha sert davranırken yüksek hızlarda kuvvet – hız eğrileri daha yassılaşmaktadır.

Yarı Aktif Süspansiyon tasarımı yapılacak olan Ford Transit Connect aracında kullanılan ön süspansiyon sistemi MacPherson ve arka süspansiyon sistemi ise yaprak yaylardan meydana gelmektedir. Mevcut süspansiyon sistemini temsil eden ve FORD-OTOSAN'dan temin edilen parametreler sistemin simülasyonunda MATLAB™ ve CARMAKER™ programlarına girilmiştir.

2.2 Süspansiyon sisteminde performans ölçütleri

Daha önce de belirtildiği gibi süspansiyonun amacı gövde üzerindeki yol etkilerini gidermek olduğu gibi aynı zamanda aracın kararlılığını muhafaza etmektir. Bu açıdan tasarımı yapılacak sistemden beklentilerin farklılaşmaktadır. Bu çerçevede tasarıma ait belirli performans kriterlerini ortaya koymak gerekir. Kısaca yukarda belirtilen süspansiyon görevleri çerçevesinde elde edilmek istenen özellikler şöyledir:[1- 4]

1. **Düşük frekansta gövde hareketleri:** İnsan vücudu çeşitli rezonans bölgeleri bulunan kompleks bir yapı olarak düşünülebilir. Ancak insan vücudu normalde yüksek frekanstaki titreşimleri hissetmez. Konfor özellileri için

literatürde kabul edilen performans kriteri [0-5] Hz aralığındaki gövde titreşimlerinin azaltılmasıdır.

Yol giriş ω(s) ile gövde deplasmanı $x_1(s)$ arasında bir transfer fonksiyonu

$$G_1(s) = \frac{X_1(s)}{\omega(s)} \qquad \textbf{(1.1)}$$

şeklinde yazılabilir. Amaç $G_1(s)$'in bahsedilen frekanslarda genliğini düşürmek olarak da özetlenebilir. Genelde yol deplasman fonksiyonun belirli bir frekansı ve genliği olan ve ω = A sin (a.t) şeklinde bir fonksiyonla ifade edilmektedir. Yapılan simülasyonlarda ve zaman domeninde yapılan incelemelerde bu sinüs fonksiyonun A = 15 mm olduğu kabul edilmektedir. Bu değer literatürde kabul edilen bir değer olup ortalama bir yol yükseltisini ifade etmektedir. Bununla beraber bu sinüs fonksiyonunun frekans genişliği [0 – 5] Hz aralığında değiştirilmektedir.

2. **Yol tutuşu**: Süspansiyon performansı ile ilgili önemli bir kriter de sistemin aracın yol tutuşuna olan etkisidir. Yol tutuşu ise tekerleğin düşey yöndeki deplasmanı ile değerlendirilmektedir. Tekerleğin merkezinin aşırı hareketi ve sallantısı yol tutuşunun azaldığı anlamına gelmektedir. Bu tür bir hareketin incelenmesi gereken frekans genişliği ise [0 – 20] Hz olarak belirlenmiş olup bu değerler arasındaki tekerlek deplasmanın azaltılması hedeflenmektedir. Bu hareket incelenirken ise aracın yoldan alacağı etkiler yine bir sinüs fonksiyonu ile ifade edilip genliği 1 mm olarak belirlenmiştir.

3. **Yüksek frekansta konfor**: Performans kriterlerinin bir üçüncüsü ise aracın gövdesinin daha yüksek frekanslarda maruz kalacağı titreşimlerdir. Gerçekte bu titreşimlerin konfor üzerinde bir etkisi yoktur. Zira insan vücudu yüksek titreşimleri hissetmemektedir. Ancak bu titreşimlerin azaltılması araçta gürültü ve dayanım unsurlarının geliştirilmesine sebebiyet verir. Bu noktada bu titreşimlerin değerlendirilmesinde gövdenin dikey yöndeki ivmesi kullanılmaktadır. Bu bağlamda ivmenin 5-30 Hz aralığındaki değerlerini azaltmak amaçlanmalıdır.

Aslında aşağıda daha detaylı da inceleneceği gibi bu performans kriterlerinin tamamını gerçekleştirmek mümkün değildir. Kısaca yol tutuşu ve konfor birbirleri ile ters orantılı özelliklerdir. Birindeki iyileşme diğerinde kötüleşmeye neden olur. Bu durumda bir eniyileme yaparak uygun çalışma koşulları seçilebilmektedir. Araçların çoğunda mevcut olan pasif süspansiyon sistemleri, önceden belirlenmiş yol tutuş ve

konfor özelliklerine göre tasarlanır ve bu özellikler kullanım sırasında parçalar değiştirilmedikçe değiştirilemez. Örneğin yumuşak süspansiyonla yol tutuş şartlarından ödün verilmiş veya sert süspansiyonu olan bir araçta konfor özellikleri indirilmiştir. [3,4]

Kinematik özelliklerinin yanında taşıt süspansiyonları pasif, yarı-aktif ve aktif süspansiyonlar olarak değerlendirebilir. Pasif süspansiyon yukarıda bahsedildiği gibi kullanım sırasında özellikleri değiştirilemeyen herhangi bir sensör ve eyleyiciye sahip olmayan sistemlerdir. Yarı-aktif süspansiyon sistemlerinde ise karakteristikleri değiştirilebilen sönümleyiciler kullanılarak aracın süspansiyon özelliklerine bir kontrol algoritması ile müdahale edilebilir. Bu şekilde sistemin çalışma noktaları değiştirilebilir. Aynı süspansiyon istendiğinde konfora yönelik, istenildiğinde yol tutuşuna yönelik bir sistem haline gelebilir. Ancak süspansiyon gene de pasif elemanlardan meydana gelmekte ve sisteme bir enerji akışı sağlanmamaktadır. Yalnızca, süspansiyon sisteminde sönümleme parametreleri değiştirilerek, damperin aynı hızda ürettiği kuvvet değiştirilmektedir. Bu da süspansiyonun özelliğini değiştirilmesinde yeterli bir parametredir.[3,7]

Bunun yanında aktif süspansiyon denilen sistemlerde, aktif eyleyiciler sisteme kuvvet akışı sağlayabilmektedir. Bu eyleyiciler genellikle hidrolik silindirlerden meydana gelmektedir.[7] Burada sönümleyiciler artık birer sürtünme ve direnç elemanın olmaktan çıkar, birer aktif eleman haline gelmektedir. Yani sistemin hareketi ile aynı yönde kuvvet üretebilen sistem bileşenleri bulunmaktadır. Bu tip sistemlerin performansı yarı-aktif sistemlerin üstüne çıkmakla beraber, sistemin enerji sarfiyatı yarı-aktif sistemlere göre daha fazla olduğundan sistemlerin yaygınlaşması yarı-aktif süspansiyon kadar olmamıştır.[5]

Yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin en önemli bileşenleri, yarı aktif sönümleyicilerdir. Kısaca bunlar sönümleme katsayıları belirli bir aralıkta değiştirilebilen, yarı-aktif elemanlardır. Elemanları yarı–aktif olmalarının nedeni sistemin hareketinden bağımsız olarak bir hareket üretme kabiliyetlerinin olmamasıdır. Sadece sürtünme özellikleri değiştirilerek, aynı hızlarda farklı kuvvetler üretebilmektedirler.[10]

Daha yakından baktığımızda özellikle iki tip yarı-aktif sönümleyicinin yaygınlaştığı görülmektedir. Bunlar sürekli Sürekli değişken sönümleyiciler (Continuously Varying Dampers CVD) ve magnetoreolojik damperlerdir.[2] CVD'lerde sönümleyicinin içinde bulunan bir oransal solenoid valf ile akışkanın aktığı kesit değiştirilmekte ve böylece sönümleyicinin sönüm özellikleri kontrol edilmektedir. Dolayısıyla Solenoid valf üzerine etkiyen akım değiştirildiğinde, sönümleyicinin sönümleme özellikleri de

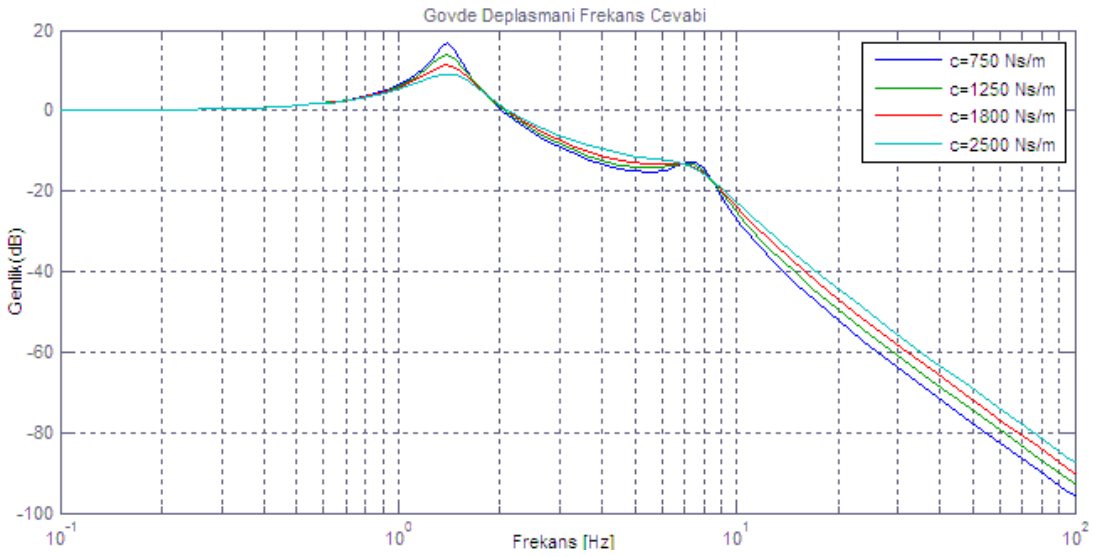
değişmiş olacaktır. Magnetoreolojik sönümleyicilerde ise elektrikle özelliği değiştirilebilen manyetik bir akışkan bulunmaktadır. Bu şekilde akışkanın viskozitesi doğrudan değiştirilebilir.[13]

2.3 Süspansiyon sisteminin performans ölçütlerinin frekans cevabı ile değerlendirilmesi

Yukarıda bahsi geçen ve süspansiyon sisteminin tasarımında yol tutuş ve konfor özelliklerinin birbirleri ile ters orantılı özellikler olduğunun, birindeki bir iyileşme unsurunun diğerinde negatif bir etkiye neden olacağı yapılan simülasyonlar ile de ortaya koyulabilir. Bu bağlamda ileriki bölümlerde incelenecek olan bir çeyrek araç modeli ile ilgilenilen aralıktaki frekanslarda süspansiyon sistemine dair aşağıdaki sonuçlar elde edilebilmektedir.

Öncelikle, frekans analizinde konfor açısından gövdenin deplasmanın düşürülmesinin, yol tutuşu olarak da tekerleğin deplasmanın azaltılmak istendiğinin hatırlatılması gerekmektedir. Tekerleğin aşırı hareketi yol tutuşun azalmasına yol açarken, aracın boylamsal ve yanal dinamiklerinin değişmesine neden olur. Daha önce de belirtildiği gibi konfor analizinde bakılması gereken nokta düşük frekanslarda ([0-5] Hz) gövde deplasmanıdır. Bu noktada, kontrol sadece sönümleme oranı değiştirilerek yapıldığından, bu parametrenin değişik değerlerinde gövde deplasmanı ve tekerlek deplasmanın frekans cevabının nasıl değiştiği incelenerek, parametrenin etkisi gözlenebilir.

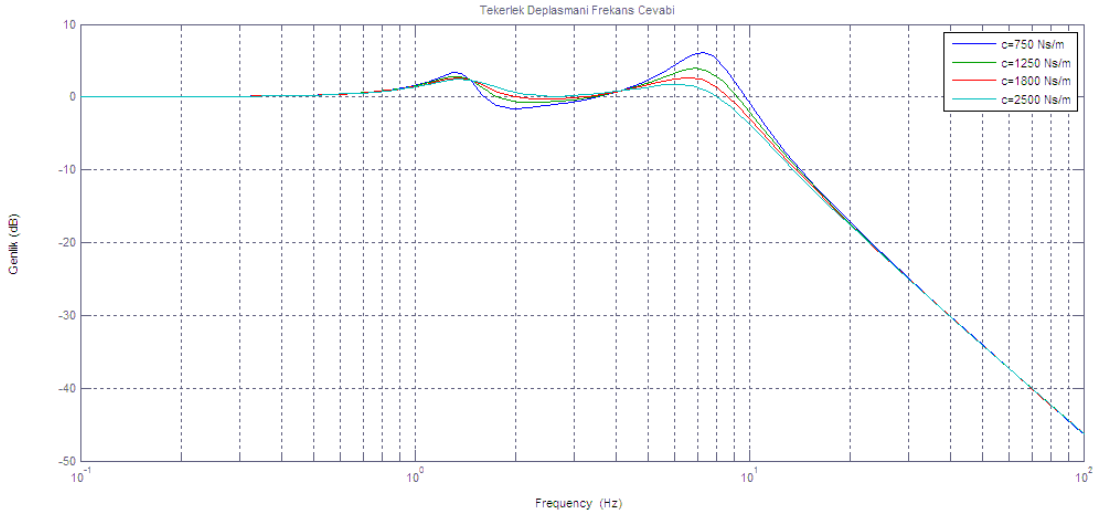
Yarı aktif süspansiyonun sağlayabileceği dört farklı sönümleme oranı seçilerek gövde deplasmanı için öncelikle Şekil 2.1' deki frekans cevabı elde edilmiştir. Bu frekans civarında kullanılan diğer parametreler Ford Transit Connect aracına aittir.



Şekil 2.1 : Gövde Deplasmanı için frekans cevabı

Buna göre elde edilen frekans cevabında iki farklı rezonans tepesi bulunmaktadır. Bunlardan biri 1 Hz civarında olup, bulunduğu frekans noktası sönümleme oranından bağımsızdır. Diğer frekans noktası ise 9 Hz civarında olup, onunda bulunduğu nokta Sönümleme oranı ile değişmemektedir. Sönümleme oranının görüldüğü üzere en önemli etkisi, ilk rezonans tepesinin aşağıya inmesine neden olmasıdır. Bu da konfor özelliklerinin geliştirildiği anlamına gelir. Süspansiyon yumuşatılarak süspansiyonun konfor özelliği artırılmış olur. Ancak bu durumun yol tutuşuna etkisi dışında, sistemin yüksek frekanslardaki cevabına da olumsuz bir etkisi vardır. Buna göre yüksek frekanslardaki süspansiyonun filtreleme özelliği azalmış olur. Bu da gürültü ve dayanım açısından istenmeyen bir durumdur. Sönüm parametresinin değişmesi görüldüğü gibi diğer rezonans noktasında ne frekans ne de genlik anlamında bir değişikliğe neden olmamıştır.[10]

Şekil 2.2' de ise benzer bir inceleme tekerleğin deplasmanı için yapılabilir. Aynı sönümleme değerleri bu kez asılı olmayan kütle (Unsprung Mass) olarak da bilinen tekerlek deplasmanı için değiştirilmiştir.



Şekil 2.2 : Tekerlek deplasmanı için frekans cevabı

Burada da aynı frekans noktalarında iki farklı rezonans tepesi oluşmuştur. Bunlardan ilkine sönümleme oranının etkisi azdır. Ancak ikinci rezonans tepesi sönümleme oranının artması ile önemli oranda azalmaktadır. Bu da sert süspansiyon ile daha az tekerlek deplasmanı ve daha iyi yol tutuşu elde edildiğini göstermektedir.

Görüldüğü üzere süspansiyon sistemi, sönümleme oranı, açısından birbirleri ile çelişen performans kriterleri içermektedir. Bu durum süspansiyon tasarımında bir eniyileme gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ancak yarı-aktif süspansiyon ile bu süspansiyon seçenekleri arasında geçiş yapılması mümkündür. Gerekli durumlarda, konfor ve yol tutuş özellikleri iyileştirilebilir ve bu sayede araç sürüş sırasında dahi süspansiyon özellikleri değiştirilebilir.

Bunun yanında, gövde ve tekerleğin hareketine göre süspansiyonun sönümleme özelliği, bir kontrol algoritması sayesinde sürekli değiştirilerek, istenilen performans kriterlerinin sağlanması mümkün olmaktadır. Buna göre Ford Transit Connect aracının, yarı-aktif süspansiyon kontrolcüleri öncelikle, araca ait parametreler doğrultusunda oluşturulmuş araç modelleri ile tasarlanarak test edilmiş ve öncelikle benzetim ortamında bir tasarım yapılmıştır.

3. YARI AKTİF SÜSPANSİYON KONTROLÜNDE KULLANILAN ARAÇ MODELLERİ

3.1 Giriş

Süspansiyon kontrolcüsünün amacı sönümleme oranını belirli bir algoritmaya göre değiştirerek istenen performansı elde etmektir. Bu amaçla kontrolcü algoritması oluşturmak ve bunu Ford Transit Connect aracına uygun bir şekilde düzenlemek adına, aracın süspansiyon dinamiğini doğru bir şekilde yansıtacak araç modellerine ihtiyaç vardır. Bu amaçla değişik serbestlik derecelerine sahip araç modelleri oluşturarak, kontrolcünün aracın dikey dinamiğine etkisi incelenmiştir. Bu modellerin farklılık göstermesinin nedeni aracın düşey yöndeki hareketinin yanında ağırlık merkezi etrafında dönme hareketleri olan kafa vurma ve yalpalama hareketlerine de süspansiyon ile müdahale edilebilmesidir. Özetle yarı-aktif süspansiyon modeli geliştirilmesinde kullanılan araç modelleri şu şekildedir:

1. **Çeyrek Araç Modeli:** Aracın dörtte birini temsil eden bir modeldir ve süspansiyonun dikey yöndeki hareketleri incelenebilir.

2. **Yarım Araç Modeli:** Aracın dikey yöndeki hareketleri ile beraber kafa vurma hareketleri de incelenebilmektedir:

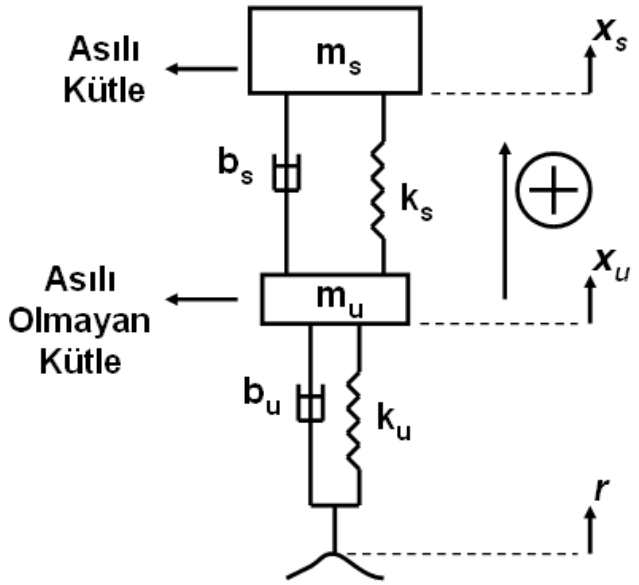
3. **Tam Araç Modeli.** Bu model de aracın dört süspansiyonu ile beraber kafa vurma ve yalpalama hareketleri incelenebilmektedir.

4. **CARMAKER™ araç modeli:** CARMAKER™ paket programı içerisindeki model gerçekçi ve yüksek serbest dereceli bir araç modelidir.

3.2 Çeyrek Araç Modeli

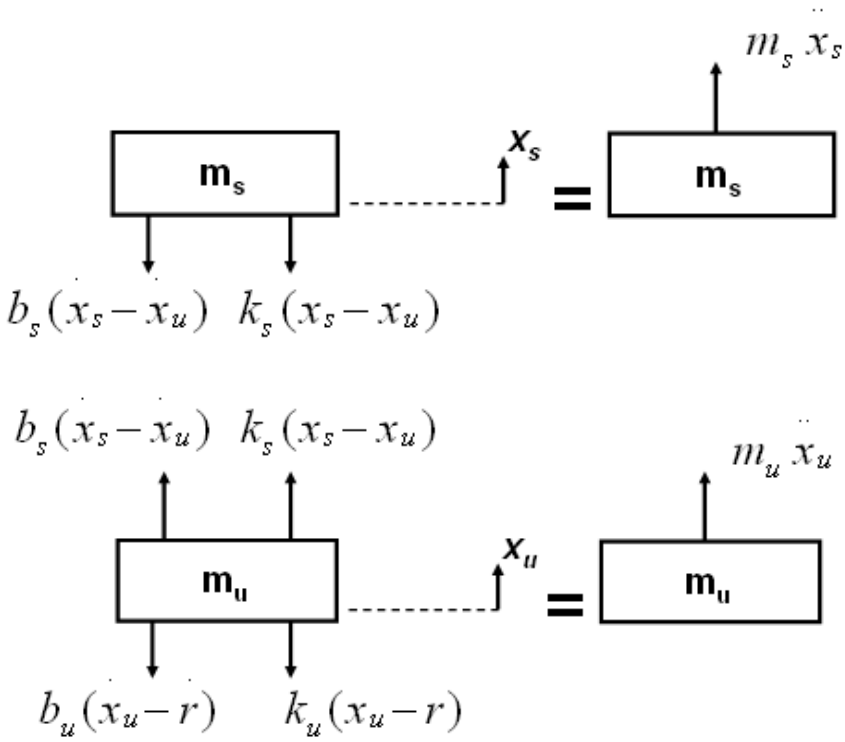
Bu modelde aracın gövdesinin ve aks/tekerleğin yaklaşık dörtte birine denk gelen asılı yük ve asılı olmayan yükler temsil edilmektedir. Yay ve sönümleyici sistemleri lineer bir katsayı ile belirtilmiştir. İki serbestlik dereceli bu sistemde aynı zamanda tekerleğin yaylanma katsayısı ve sönüm katsayıları da mevcuttur. Doğrusal olan bu

modeli temsil eden diferansiyel denklemler aşağıda görülmektedir. Modelin genel yapısı ve Serbest Cisim Diyagramları (SCD) Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' de görülmektedir.



Şekil 3.1: Çeyrek araç modeli

Asılı kütle ve asılı olmayan kütle birbirinden ayrı olarak incelenip, serbest cisim diyagramı Şekil 3.2'deki gibi gösterilebilir.



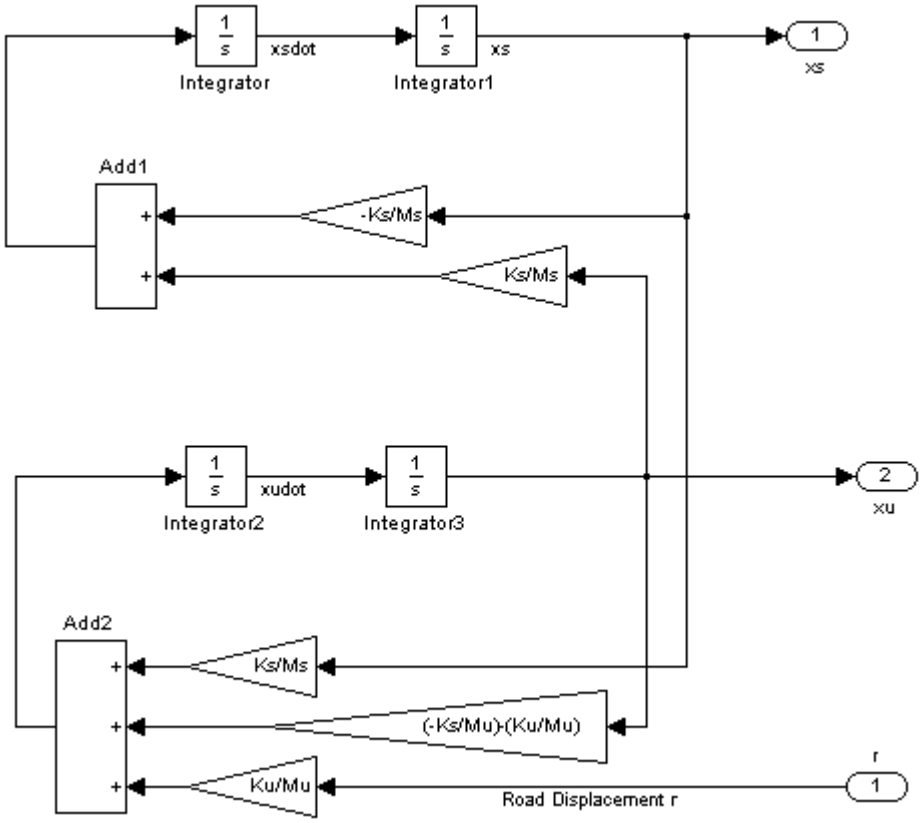
Şekil 3.2: Asılı kütle ve asılı olmayan kütleye ait serbest cisim diyagramı

Serbest cisim diyagramına göre sistemin ifade eden dinamik denklemler aşağıdaki gibi çıkarılabilir. [10]

$$m_s \ddot{x}_s = -b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_s(x_s - x_u) \quad \textbf{(3.1)}$$

$$m_u \ddot{x}_u = b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_s(x_s - x_u) - b_u(\dot{x}_u - \dot{r}) - k_u(x_u - r) \quad \textbf{(3.2)}$$

Modelin bilgisayar ortamındaki benzetiminde kullanılan Simulink™ diyagramı Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3: Çeyrek araç modeli MATLAB/SİMULİNK™ diyagramı

Görüldüğü gibi modele giriş yol deplasmanı şeklindedir. Çıkışlar ise asılı kütle deplasmanı ve ivmesi ile asılı olmayan kütle deplasmanıdır. Ayrıca model sabit süspansiyon parametreleri taşıması açısından lineer bir modeldir. Gerçekte mevcut süspansiyon sisteminden söz ederken tüm elemanlar için aynı lineerlik söz konusu değildir. Her ne kadar ön süspansiyondaki yaylar spiral olsa da ve dolayısı ile, sabit bir katsayı ile temsil edilse de diğer süspansiyon bileşenleri, tüm çalışma bölgelerinde doğrusal davranmamaktadır. Öncelikle ön ve arka sönümleyicilere ait parametreler kuvvet ve hız tabloları ile ifade edilip bu ilişki eğrisel özellik taşımaktadır. Aynı şekilde arka yayların kademeli bir yaprak yay olması da arka

süspansiyon sisteminin eğrisel davranmamasına neden olmaktadır. Bunun yanında, süspansiyon kinematik özellikleri nedeni ile de hem çeyrek araç modelinden ayrılmakta hem de trigonometrik bağıntılardan dolayı doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Kinematik özelliklerden kasıt, süspansiyonun araç gövdesi ve akslara olan kuvvet etkisi, çeyrek araç modelinde ve ilerideki diğer modellerde olduğu gibi dik bir şekilde değil, belirli açılar ile meydana gelmektedir. Bunun yanında bağlantı noktalarında bulunan kimi esnek elemanlarında yay ve sönüm etkileri bulunmaktadır. Ancak bu noktada belirtilmelidir ki burada amaç süspansiyon sistemini doğru bir şekilde yansıtacak bir model oluşturmak değil, kontrolcü tasarımı yapmak için yeterli bir model oluşturmaktır ki, çeyrek araç modeli gerek literatürde gerekse bu çalışmada görüldüğü üzere bu özellikler için yeterli bir modeldir.

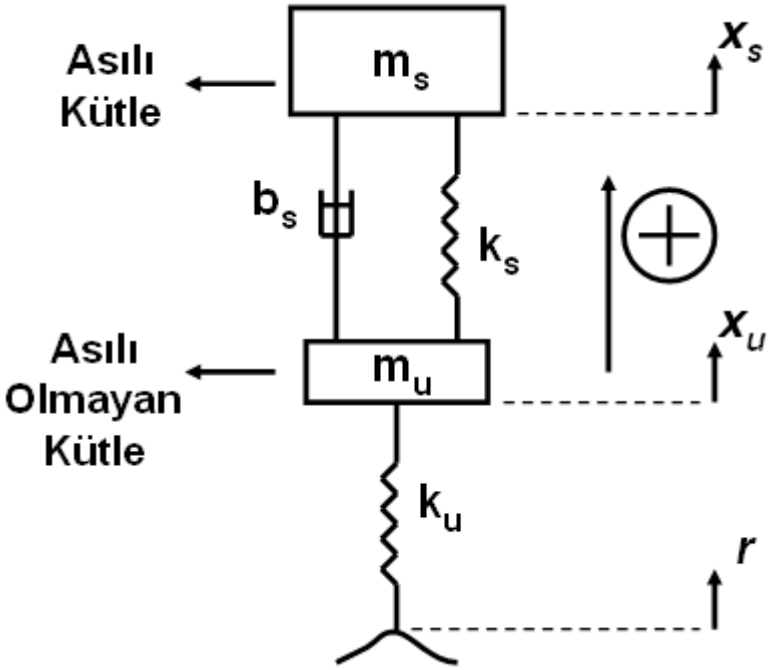
Kontrol sisteminin çeyrek araç modeli kullanılarak tasarımının ardından, modelin yay ve sönümleyici parametreleri tablolar ile değiştirilerek kontrolcü performansı bu eğrisel modellerde de sınanmıştır.

3.3 Çeyrek Araç Modeli Durum-Uzay modeli

7. bölümde de görüleceği üzere, Kalman filtresinin tasarımı için kullanılacak modelin durum-uzay gösterimi şeklinde olması gerekmektedir. Bu amaçla bir önceki bölümdeki çeyrek araç modeli biraz daha değiştirilerek durum uzay modeli oluşturulmuştur.

Bu modelde aracın gövdesinin ve aks/tekerleğin yaklaşık dörtte birine denk gelen asılı yük ve asılı olmayan yükler temsil edilmektedir. Yay ve damper sistemleri doğrusal bir katsayı ile belirtilmiştir. Eğrisel yay kuvvet-konum ve sönümleyiciye ait kuvvet-hız eğrileri de kullanılabilir. İki geometrik serbestlik dereceli bu sistemde aynı zamanda tekerleğin yaylanma katsayısı ve sönümleme katsayıları da mevcuttur. Eğrisel veriler kullanılmadığında doğrusal olan bu model ve modeli temsil eden diferansiyel denklemler aşağıda görülmektedir.[8, 9, 21]

Modelin genel yapısı Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4: Çeyrek araç modeli yapısı

Model,

$$\dot{\boldsymbol{x}} = A\boldsymbol{x} + Bu + G\omega(t)$$
$$\boldsymbol{y} = C\boldsymbol{x} + Du + \upsilon(t) \qquad \textbf{(3.3)}$$

durum-uzay gösterimiyle ifade edilmektedir. Burada durumlar,

$$\boldsymbol{x} \equiv (x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}, x_{r4}), \qquad \textbf{(3.4)}$$

$$x_{r1} = x_s - x_u, \quad x_{r2} = x_u - r, \quad x_{r3} = \dot{x}_s, \quad x_{r4} = \dot{x}_u \qquad \textbf{(3.4b)}$$

olarak belirlenmiştir. w(t), sisteme etkiyen yol girişini temsil ederken, v(t) ise sensörlerde bulunan gürültüyü ifade eder. O halde elde edilen durum uzay modeli aşağıdaki şekli alır.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-K_s}{M_s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_s}{M_u} & \frac{-K_u}{M_u} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{M_s} \\ \frac{1}{M_u} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.5)}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{-K_s}{M_s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_s}{M_u} & \frac{K_u}{M_u} & 0 & 0 \end{bmatrix};\ G = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T;\ D = \begin{bmatrix} \frac{-1}{M_s} \\ \frac{-1}{M_u} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.6)}$$

Görüldüğü gibi modele giriş yol deplasmanı şeklindedir. Sistemin durum değişkenleri ise asılı kütle deplasmanı ve düşey hızı ile asılı olmayan kütle deplasmanı ve düşey hızıdır.

Durum-uzay modeli, kontrolcü tasarımı için kullanışlı bir modeldir. Çünkü bu şekilde gerek transfer fonksiyonu yaklaşımı ile gerekse durum-uzay metodları ile kontrolcü tasarlanabilir. Nitekim 7. bölümde daha detaylı anlatılabileceği gibi, Kalman filtresi ve gözlemcisi durum-uzay modeli üzerinde tasarlanıp test edilmiştir.

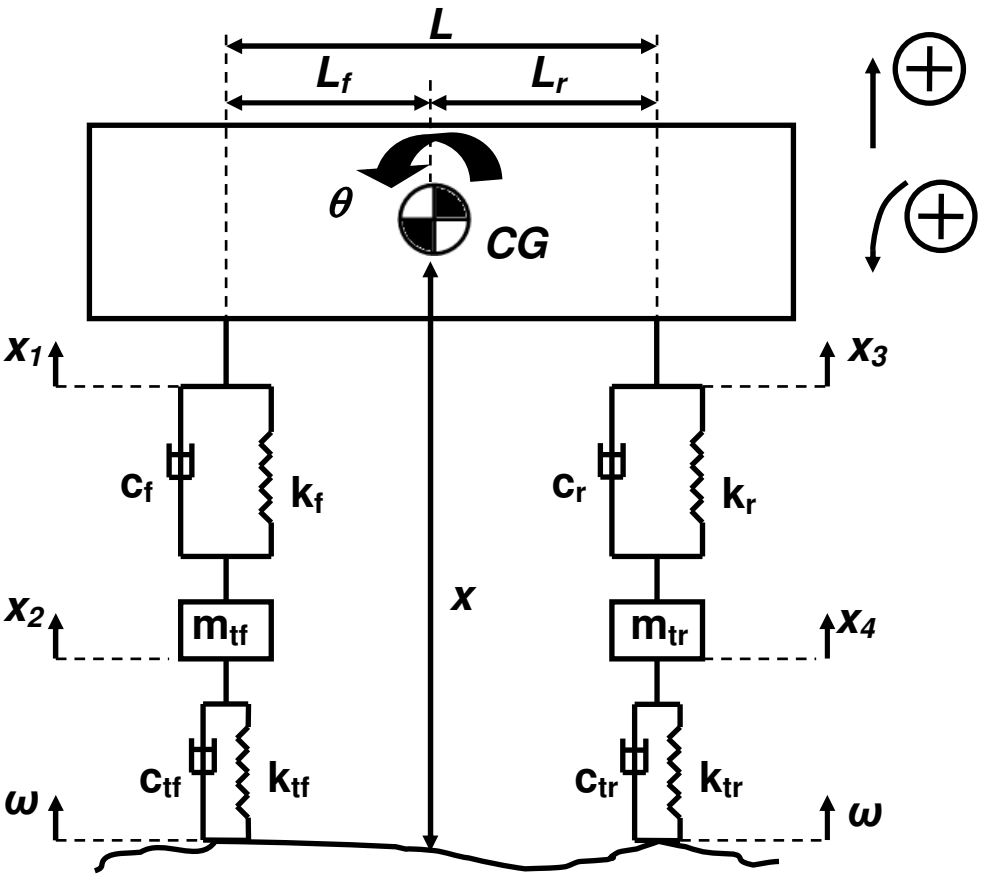
3.4 Yarım Araç Modeli

Yukarıda denklemleri verilen Çeyrek Araç Modeli sadece dikey yönde hareketleri temsil etmekte kullanılabilir. Ancak aracın süspansiyon ve tekerlekler üzerinde başka serbestlik dereceleri de bulunur. Buna göre araç ivmelenme ve frenleme gibi durumlarda ya da ön ve arka tekerleklerin farklı anlarda farklı yükseltiler üzerinden geçmesi sonucunda kafa vurma ya da yunuslama şeklinde adlandırılan ve aracın ağırlık merkezinden geçen bir eksen etrafında bir dönme hareketi yapmaktadır. Bu amaçla bu tür hareketleri temsil etmesi adına Yarım Araç Modeli kurulmuştur.[10]

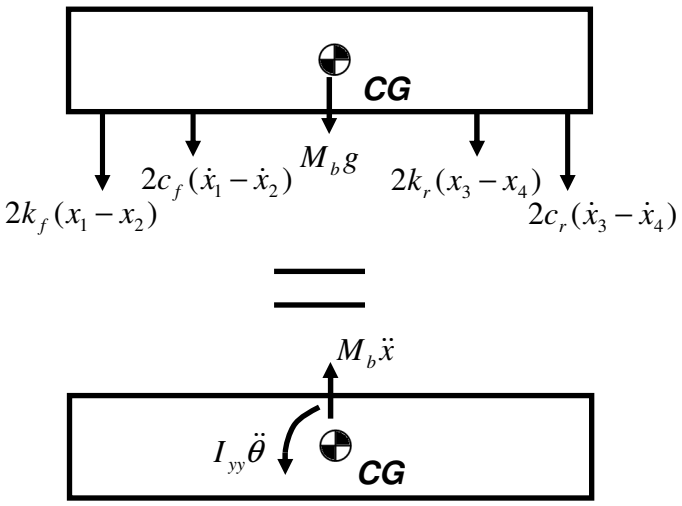
Yarım Araç Modelinde aracın gövdesi ile ön ve arka aksları temsil eden bir kütle, süspansiyon sistemin temsil eden yay damper sistemi ve tekerlekleri temsil eden bir başka yay sistemi bulunur. Bu modelde tekerleklerin damper etkisi ihmal edilmiştir.

Modelin genel görünümü ve kütlelerin hareket yönleri Şekil 3.5'de görülmektedir. Yarım Araç Modelinde süspansiyon parametrelerinin ve kütlelerin yanı sıra, araç ağırlık merkezinin yeri de ifade edilmektedir. Ayrıca aracın gövdesinin dönme eksenindeki ataleti de denklemlerde yer alır.

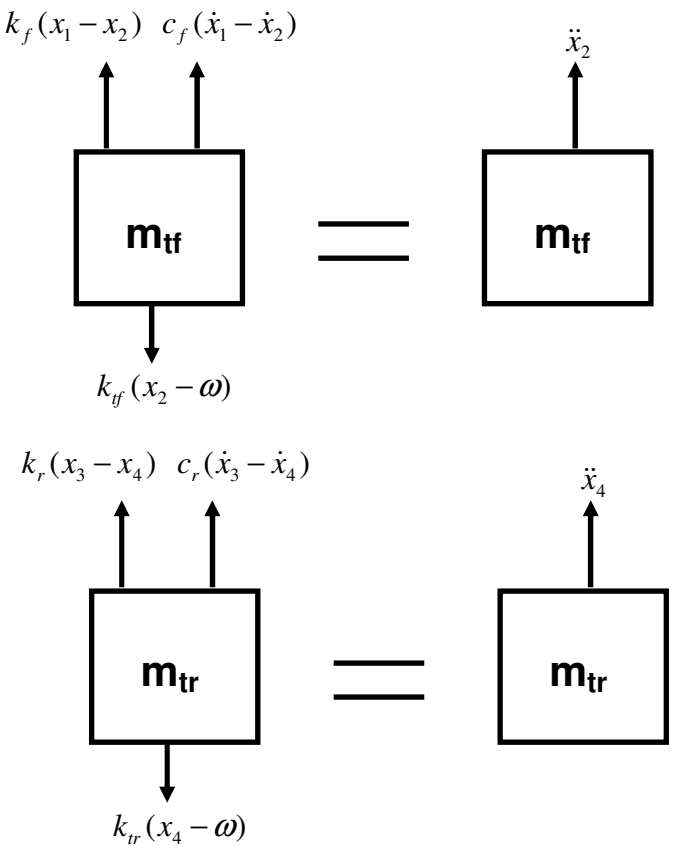
Bu modelin görünümü ve modele ait denklemler aşağıda verilmiştir. Aracın tekerlek damper katsayısı ihmal edilebilir mertebede olduğundan bu modelin denklemlerinde kullanılmamıştır. Modelin Serbest Cisim Diyagramı ise Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.5: Yarım Araç Modeli



Şekil 3.6: Yarım Araç Modelinde asılı kütleye ait serbest cisim diyagramı



Şekil 3.7: Yarım Araç Modelinde asılı olmayan kütlelere ait serbest cisim diyagramları

Şekil 3.6 ve 3.7 kullanılarak sistemin hareket denklemleri çıkarılabilir. Öncelikle asılı araç kütlesinin ağırlık merkezindeki hareketi (3.7)'de görülmektedir.

$$M_b\ddot{x} = -2k_f(x_1 - x_2) - 2c_f(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - 2k_r(x_3 - x_4) - 2c_r(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) \quad \textbf{(3.7)}$$

Asılı olmayan kütlelerin dinamik denklemleri serbest cisim diyagramları kullanılarak çıkarılmış ve (3.8, 3.9)'da görülmektedir.

$$M_{tf}\ddot{x}_2 = k_f(x_1 - x_2) + c_f(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_{tf}(x_2 - \omega) \quad \textbf{(3.8)}$$

$$M_{tr}\ddot{x}_4 = k_r(x_3 - x_4) + c_r(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - k_{tr}(x_4 - \omega) \quad \textbf{(3.9)}$$

Asılı kütlenin ağırlık merkezi etrafındaki momentlerin eşitliğinden,

$$I_{yy}\ddot{\theta} = \left[2k_f(x_1 - x_2) + 2c_f(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)\right]L_f - \left[2k_r(x_3 - x_4) + 2c_r(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)\right]L_r \quad \textbf{(3.10)}$$

Burada θ açısının küçük olduğu varsayımı ile,

$$x_1 = x - \theta.L_f$$
$$x_3 = x + \theta.L_r \quad \textbf{(3.11)}$$

İfadeleri çıkarılabilir. Bu ifadeler (3.7-3.10)'da yerlerine konulursa aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$M_b\ddot{x} = -2k_f(x - \theta.L_f - x_2) - 2c_f(\dot{x} - \dot{\theta}.L_f - \dot{x}_2) - 2k_r(x + \theta.L_r - x_4) - 2c_r(\dot{x} + \dot{\theta}.L_r - \dot{x}_4) \quad \textbf{(3.12)}$$

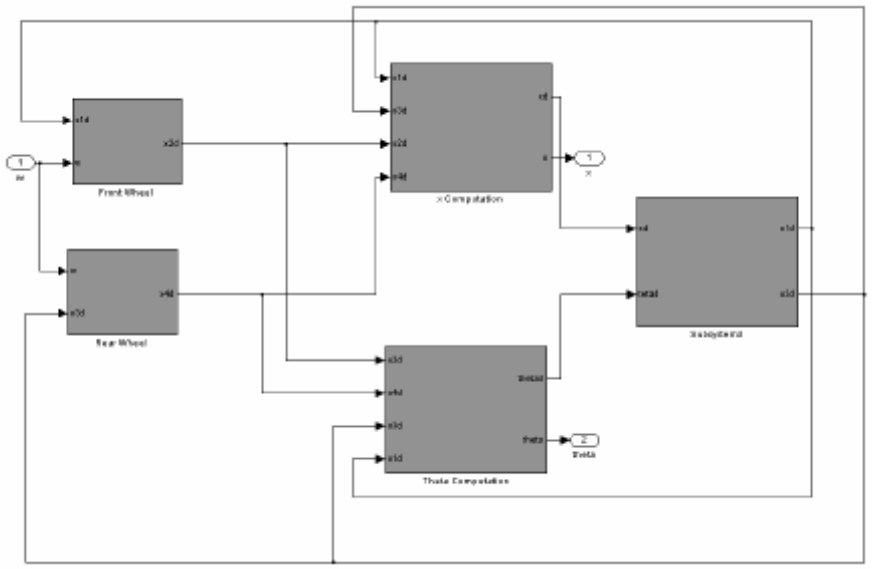
$$M_{tf}\ddot{x}_2 = k_f(x - \theta.L_f - x_2) + c_f(\dot{x} - \dot{\theta}.L_f - \dot{x}_2) - k_{tf}(x_2 - \omega) \quad \textbf{(3.13)}$$

$$M_{tr}\ddot{x}_4 = k_r(x + \theta.L_r - x_4) + c_r(\dot{x} + \dot{\theta}.L_r - \dot{x}_4) - k_{tr}(x_4 - \omega) \quad \textbf{(3.14)}$$

$$I_{yy}\ddot{\theta} = \left[2k_f(x - \theta.L_f - x_2) + 2c_f(\dot{x} - \dot{\theta}.L_f - \dot{x}_2)\right]L_f - \left[2k_r(x + \theta.L_r - x_4) + 2c_r(\dot{x} + \dot{\theta}.L_r - \dot{x}_4)\right]L_r \quad \textbf{(3.15)}$$

Modelde değişkenler statik denge konumundan farklar olarak alınmıştır. Dolayısı ile ağırlık kuvvetleri modele dahil edilmemiştir.

Modele ait SIMULINK™ diyagramı Şekil 3.8'de görülmektedir.

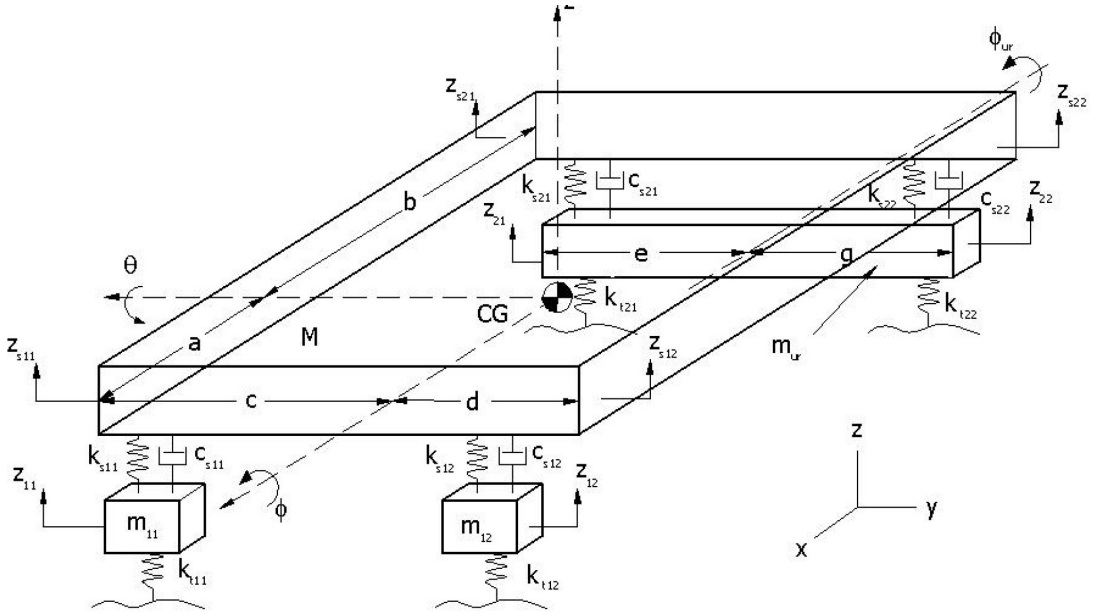


Şekil 3.8: Yarım araç modeli SİMULİNK™ diyagramı

3.5 Arkada Bağımlı Süspansiyona Sahip Tam Araç Modeli

Tam Araç Modeli aracın dört süspansiyonu ve her süspansiyondaki asılı olmayan kütleleri dikkate alan bir modeldir. Model dört farklı çeyrek araç modelinin birbirlerine olan etkisinin gözetildiği bir model olup bunun yanında iki farklı eksendeki dönme etkilerini de dikkate almaktadır. Yani frenleme ve ivmelenme sırasında oluşacak

kafa vurma hareketlerinin yanı sıra, dönme sırasında oluşan yalpalama hareketinin etkisinin de incelenebileceği bir modeldir. Bu açıdan aracın asılı kütlesinin bu iki eksendeki atalet momentlerinin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 3.9'da araç modelinin genel görünüşü ve hareket serbestlikleri ifade edilmiştir. Modelin benzetimi yapılırken her tekerleğe ayrı bir yol girişi girilmesi gerekmektedir. [8,9]



Şekil 3.9: Arkada bağımlı tam araç süspansiyon modeli [8, 9]

Modelin dinamik denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Öncelikle aracın ağırlık merkezinin öteleme ve dönme hareketlerini incelemek gerekmektedir. Bu amaçla ağırlık merkezindeki düşey hareket (3.16)'da gösterilmektedir.

$$M.\ddot{z} = -f_{s11} - f_{s12} - f_{s21} - f_{s22} - f_{d11} - f_{d12} - f_{d21} - f_{d22} \quad \textbf{(3.16)}$$

Ağırlık merkezindeki yunuslama hareketine ait dinamik denklemler (3.17)'de çıkarılmıştır.

$$I_{yy}.\ddot{\theta} = a.\left(f_{s11} + f_{s12} + f_{d11} + f_{d12}\right) - b.\left(f_{s21} + f_{s22} + f_{d21} + f_{d22}\right) \quad \textbf{(3.17)}$$

Ağırlık merkezindeki yalpalama hareketine ait dinamik denklemler (3.18)'de çıkarılmıştır.

$$I_{xx}.\ddot{\phi} = ac\left(f_{s11} + f_{s21} + f_{d11} + f_{d21}\right) - d.\left(f_{s12} + f_{s22} + f_{d12} + f_{d22}\right) \quad \textbf{(3.18)}$$

Bağımlı arka aksa ait dinamik denklemler (3.19) ve (3.20)'de gösterilmektedir.

$$M_{ur}.\ddot{z}_{ur} = f_{s21} + f_{s22} + f_{d21} + f_{d22} - f_{t21} - f_{t22} \quad \textbf{(3.19)}$$

$$I_{ur}.\ddot{\phi}_{ur} = -e.(f_{s21} + f_{d21} - f_{t21}) + g.(f_{s22} + f_{d22} - f_{t22}) \quad \textbf{(3.20)}$$

Modeldeki kinematik denklemleri bir matris halinde gösterilebilir (3.21).

$$\begin{bmatrix} z_{s11} \\ z_{s12} \\ z_{s21} \\ z_{s22} \\ z_{21} \\ z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \\ z \\ z \\ z \\ z_{ur} \\ z_{ur} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a & -c & 0 \\ -a & d & 0 \\ b & -c & 0 \\ b & d & 0 \\ 0 & 0 & -e \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta \\ \sin\phi \\ \sin\phi_{ur} \end{pmatrix} \quad \textbf{(3.21)}$$

Modelde kullanılan yay kuvvetlerinin ifadesi genel olarak (3.22)'de verilmiştir.

$$f_{sij} = k_{sij}(z_{zij} - z_{ij}) \qquad i, j = 1,2 \quad \textbf{(3.22)}$$

Yarı aktif sönümleyici kuvvetleri,

$$f_{dij} = c_{sij}(t)(\dot{z}_{zij} - \dot{z}_{ij}) \ , \quad i, j = 1,2 \ , \ \ c_{sij}(t) \in (c_{\min}, c_{\max}) \subset \Re^{+} \quad \textbf{(3.23)}$$

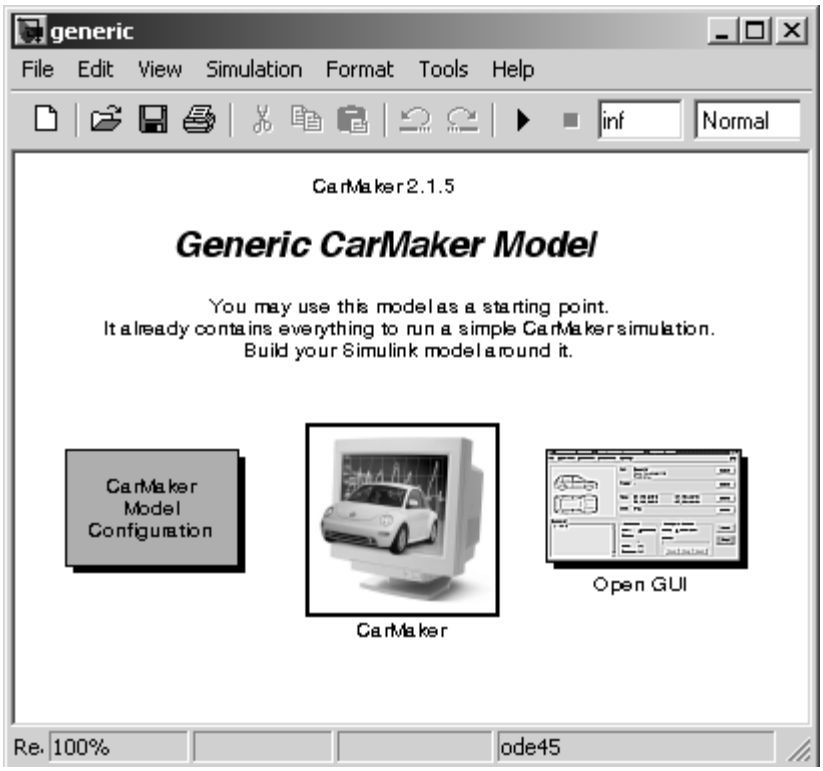
Tekerlekler yol arasındaki yay kuvvetleri,

$$f_{tij} = k_{tij}(z_{ij} - \omega_{ij}) \qquad i, j = 1,2 \quad \textbf{(3.24)}$$

Bu modelde kullanılan indislerde, "11" sağ ön çeyreği, "12" sol ön çeyreği, "21" sağ arka çeyreği, "22" sol arka çeyreği ifade etmektedir.

3.6 CARMAKER™ ortamında araç modellenmesi

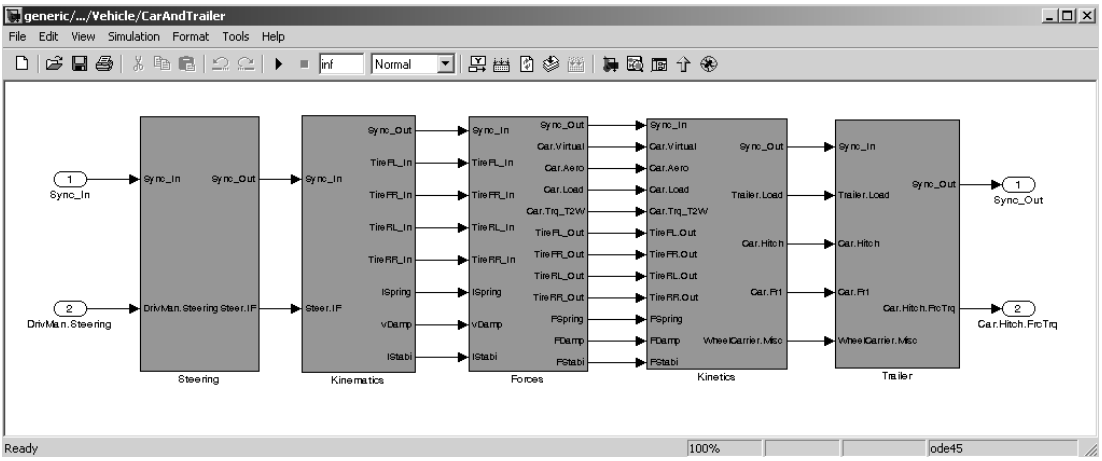
Yarı aktif süspansiyon sisteminin modellenmesinde kullanılan bir diğer metot ise CARMAKER™ paket programında gerçekçi ve yüksek serbestlik dereceli modellerin kullanılmasıdır. CARMAKER™ programının Simulink™ ile uyumlu olması da kontrolcülerin modele Simulink™ ortamında doğrudan bağlanabilmesi anlamına gelir. Şekil 3.10, CARMAKER™ araç modelinin Simulink™ göstermektedir.



Şekil 3.10: CARMAKER™ araç modelinin Simulink™ penceresi

Bu pencereden Simulink ortamındaki araç modeline ulaşılabilir. Ayrıca CARMAKER™ programı tek başına da açılıp, benzetimler Simulink™ 'ten bağımsız olarak da gerçekleştirilebilir.

CARMAKER™ araç modeli çok detaylı ve yüksek serbestlik dereceli olduğu için, gerçek bir yol taşıtına ait tüm bileşenleri içermektedir. Şekil 3.11'de görüleceği üzere, motor-aktarma organları, frenler, süspansiyon, tekerlekler ve sürücü modellerin birer alt model olarak yer almaktadır. Ancak yarı aktif süspansiyon sisteminde ilgilenilen sadece süspansiyon sistemine ait alt modellerdir. Geliştirilen kontrolcülerin benzetimleri, bu alt sistemlerin giriş ve çıkışlarına bağlanarak gerçekleştirilir [20].

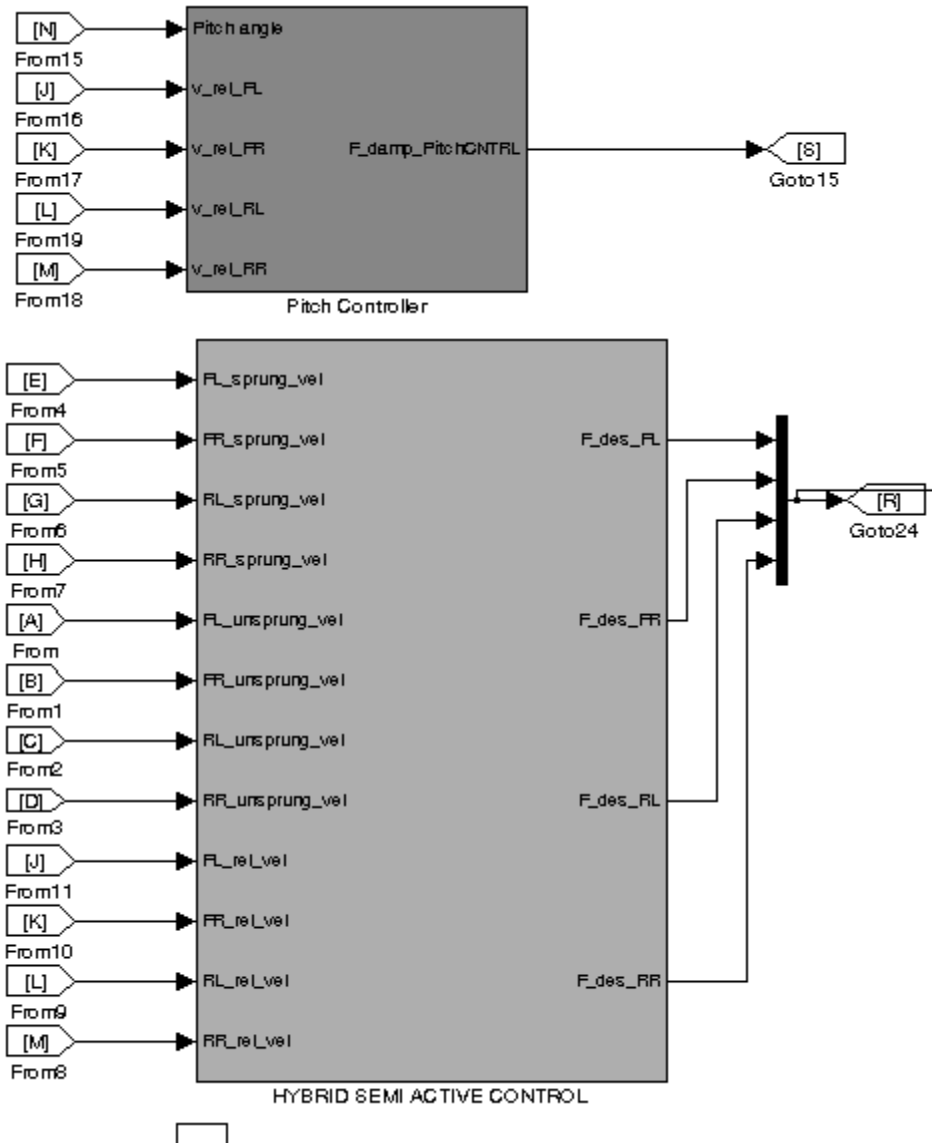


Şekil 3.11: CARMAKER™ araç modelinin alt bileşenleri

Simulink™ 'te hazırlanan yarı-aktif süspansiyon kontrolcüleri, alt sistem olarak CARMAKER™ modellerinin içerisine yerleştirilebilir. Ayrıca kontrolcüler için gerekli fiziksel değişkenler, gerçek araçlarda olduğu gibi araç modelinin üzerine sanal sensörler yerleştirilerek ölçülebilirler. Asılı ve asılı olmayan kütle ivmeleri, hızları ve deplasmanlarını bu şekilde elde edebilmek mümkündür.

Yarı aktif süspansiyon sistemi için tasarlanan Kalman Filtresi ve çeyrek araç modelinin her 4 çeyrek için olan durum-uzay modelleri, CARMAKER™ araç modeline girilmiş, bu şekilde yüksek serbestlik dereceli bir taşıt modelinde kontrolcü ve gözlemci performansı değerlendirilmiştir.

Modelden çıkış olarak ise sönümleyicilerin uyguladığı değişken sönümleme kuvveti alınır. Böylelikle sanal bir sürüş ortamında kontrolcüler test edilmiş olur.



Şekil 3.12: CARMAKER™ modeline ait yarı aktif süspansiyon kontrolcüsü

4. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNDE KULLANILAN KONTROL ALGORİTMALARI

4.1 Giriş

Araçta kullanılacak kontrol sistemi iki seviyeli bir yapıdır. Öncelikle alt seviye de her bir süspansiyonun bağımsız olarak kontrol edilebileceği bir alt seviyeli kontrol, ardından da gerek kontrol parametrelerini duruma uygun şekilde değiştirebilen veya geçici süre ile alt seviye kontrollerin yerini alan bir üst seviye kontrol yapısı bulunmaktadır. Bu çerçevede alt seviye kontrol yapıları aracın dört süspansiyonun hareketi doğrultusunda bir kontrol oluşturulurken, üst seviye kontrol aracın dikey yöndeki hareketinin yanı sıra kafa vurma ve yalpalama hareketlerinin de etkilerini gözetmektedir. [8, 10] Ancak burada da problem, kafa vurma ve yunuslama hareketlerinin aynı anda olduğu varsayıldığında yaşanacak durumdur. Bu amaçla Transient Active Body Control (TABC) algoritması tasarlanmış ve benzetimlerde sonuçları gözlemlenmiştir [10].

Oluşturulmuş bu kontrol yapısı öncelikle araç modelleri üzerinde test edilmiştir. Yapısı itibari ile üst seviye kontrol tasarımında, yarım araç ve tam araç modelleri kullanılırken, alt seviye kontrolcülerin etkileri sırası ile çeyrek yarım ve tam araç modellerinde değerlendirilmiştir. Kontrolcü tasarımı yapılırken simülasyonlarda, öncelikle daha önce bahsedildiği gibi sabit parametreli yarı-aktif damperlerin etkisi kullanılmıştır. Daha sonra bu damperler gerçek CVD verilerine dayanan tablolarla güncellenerek, araç üzerinde kullanılacak kontrol yapısı simülasyonlar üzerinde oluşturulmuştur. Bu noktada belirtilmelidir ki, sabit parametreli sönümleyiciden kasıt, belirli bir cmax ve cmin arasında değeri değişebilen ve sabit katsayı ile ifade edilebilen sönümleyicilerdir. Ancak ikinci safhada bu değerlerin yerine akım – kuvvet – hız ilişkisini ortaya koyan iki boyutlu tablolar kullanılmıştır [8, 9].

Kontrol yapısında alt seviye kontrol olarak kullanılan kontrol algoritması, Sky-hook denilen ve pratikte çokça yer bulmuş bir yapıdır. Bu yapıda, sönümleyiciler sanal bir kuvvetin etkisini oluşturmaya çalışmaktadırlar. Öncelikle her bir süspansiyonu bağımsız kontrol eden bu kontrol algoritması sayesinde, süspansiyonun sertliği tekerlek ve gövde hareketleri doğrultusunda değiştirilmektedir. Bu kontrol

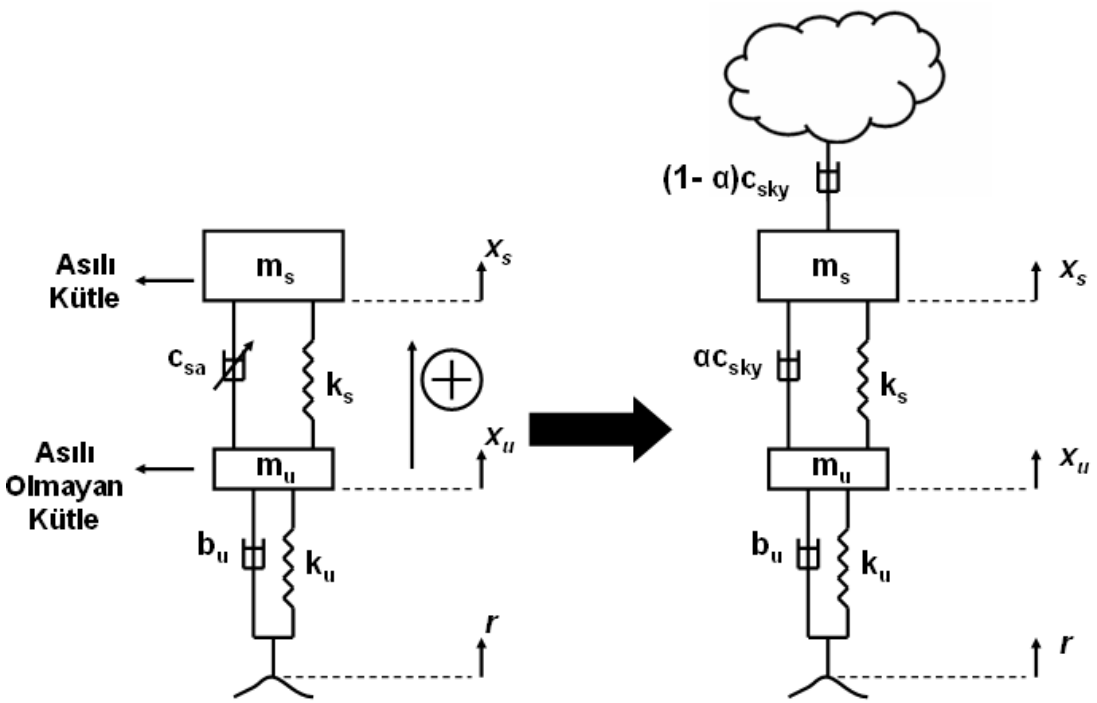
algoritmalarının temeli sanal bir sönüm etkisi yaratmayı hedefleyen bir kontrol anlayışı üzerine kurulmuştur. Bu noktada birden fazla kontrolcü yapısı oluşturulmuş ve her birinin performansı gerek simülasyonlarda gerekse araç testlerinde ortaya koyulmuştur. Kontrol yapısının ikinci kısmını oluşturan üst yapı kontrolcü ise aracın tüm süspansiyon davranışlarını izleyerek kafa vurma veya yalpalama gibi gövde hareketlerini kontrol etmektedir. Örneğin viraj anında aracın bir tarafa yatmasını önlemek amacıyla, yan tarafa ait süspansiyon sistemine ait altyapı kontrolcüler dönüş süresince devre dışı bırakılarak istenmeyen harekete engel olacak şekilde buradaki süspansiyonların sertleştirilmesi sağlanır.

Kontrol yapısının bu şekilde hiyerarşik bir şekil alması sonucu performans ölçütleri tam araç modeli üzerinden gidilerek genişletilebilir. Kontrolcünün görevi artık sadece dikey yöndeki hareketleri kontrol altına almakla sınırlı kalmamakta aynı zamanda aracın istenmeyen yalpalama ve yunuslama hareketlerine de müdahale etmektedir. Aslında sönüm oranının değiştirilmesi statik denge konumunu değiştirmemektedir. Örneğin fren anındaki kafa vurma hareketinin statik bir moment ile gerçekleştiği varsayılırsa aynı yay katsayısına sahip pasif bir süspansiyon modeliyle yarı-aktif süspansiyon sistemi sürekli rejimde aynı denge noktasına gelecek ve sonuçta aynı kafa vurma açısı oluşacaktır. Ancak sönümleme oranının artırılması pasif süspansiyonda oluşan aşımı azaltacaktır. Gerek fren gerekse yalpalama hareketlerinin sürekli rejime gelecek kadar uzun sürmediği düşünülürse yarı aktif süspansiyon sistemi ile bu hareketlerde önemli derece de azaltma sağlanacağı benzetimlerde de ispatlanmıştır [21].

Sonuç olarak alt seviye kontrolcüler olarak sırasıyla Sky-hook, Groundhook ve Hibrid kontrol yöntemleri denenmiştir ve bu kontrolcülere ait detaylı inceleme alt bölümlerde incelenecektir. Kontrol algoritmaları çeyrek araç modelleri üzerinde irdelenecektir.

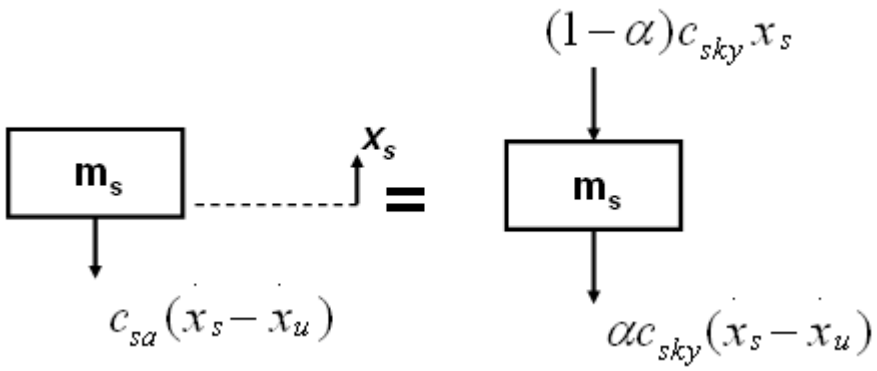
4.2 Skyhook Kontrol Algoritması

Şekil 4.1'de Skyhook kontrolün genel yapısı görülmektedir. Soldaki yarı-aktif sönümleyici eklenmiş gerçek süspansiyon yapısı ile sağ taraftaki ideal durum oluşturulmaya çalışılmaktadır. Sağ taraftaki ideal yapıda ise, aracın asılı kütlesi, sanal bir sönümleyici ile sabit bir noktaya bağlanmakta ve böylece asılı kütlenin hareketi iki sönümleyic ile sönümlenmeye çalışılmaktadır. Sabit bir noktaya da bağlanan gövdenin hareketi, sadece tekerleklere bağlanmış durumdan daha iyi sonuç verecektir. Ancak böyle bir bağlantı mümkün olamayacağından aynı etkiye yarı aktif süspansiyon sistemi ile yaklaşılmaktadır [3, 21, 14].



Şekil 4.1: Skyhook Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar

Şekil 4.2'de ise ideal durumda ve gerçek durumda, sadece sönümleyici kuvvetlerinin kütlelere etkisi görülmektedir. Sol tarafta gerçek sönümleyici ile elde edilebilecek kuvvet, sağ tarafta ise ideal durumun meydana getirdiği kuvvetler bulunmaktadır. Bu iki kuvvet eşitlenirse, gerçek sönümleyicide oluşturulması gereken kuvvet elde edilmiş olur.



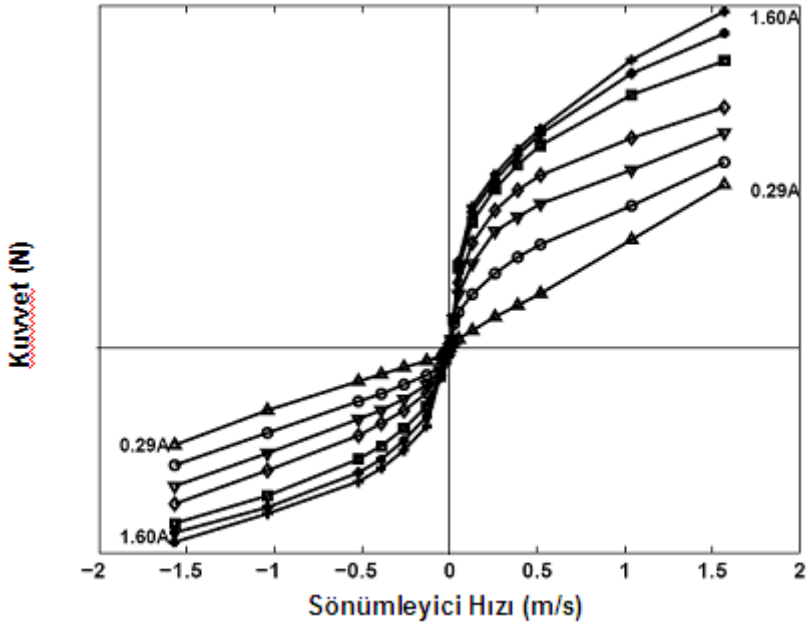
Şekil 4.2: Skyhook Kontrol algoritması: Damper kuvvetleri

Matematiksel olarak ifade edersek sabit bir noktaya bağlanmış kütlenin üzerindeki damper kuvvetleri şu denklemlerle ifade edilebilir.

$$F_{damper} = -(1-\alpha)c_{sky}\dot{x}_s - \alpha c_{sky}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = -c_{sa}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \quad \textbf{(4.1)}$$

$$c_{sa} = \frac{(1-\alpha)c_{sky}\dot{x}_s + \alpha c_{sky}(\dot{x}_s - \dot{x}_u)}{(\dot{x}_s - \dot{x}_u)} \quad \textbf{(4.2)}$$

Böylece (ii)'de elde edilen yarı aktif süspansiyon katsayısı ideal durum konfigürasyonu sağlanır. Ancak yarı aktif sönümleyicilerin, hareketle aynı yönde kuvvet oluşturamamasından dolayı yani sadece bir sürtünme ya da sönüm elemanı olmalarından dolayı yukarıda elde edilen denklemin bazı koşulları bulunmaktadır.



Şekil 4.3: Yarı aktif sönümleyicinin çalışma bölgeleri

Bilindiği üzere sönümleyici, Şekil 4.3'de görülen grafiğin sadece ikinci ve üçüncü bölgelerinde çalışmaktadır. Pozitif yani çekme durumunda negatif kuvvet ya da negatif yani basma durumunda pozitif kuvvet üretememektedir. Bir başka deyişle birinci ve dördüncü çeyreklerde kuvvet etkileri yoktur. Bu çalışma koşullarının bilinmesi, Skyhook kontrolün denklemlerini tamamlayıcı nitelikte olan eşik değerlerinin anlaşılmasında faydalı olacaktır [3, 14, 8, 9, 10].

Buna göre,

$$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \geq 0 \Rightarrow c_{sa} \quad \textbf{(4.3)}$$

$$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \Rightarrow c_{\min} \quad \textbf{(4.4)}$$

koşulları oluşturularak, Skyhook kontrolü yarı aktif sönümleyicilerin çalışabileceği durumlara uygun hale getirilmiştir. Buna göre (1) koşulu geçerli olduğunda,

yukarıdaki denklemler hesaplanan c_{sa} sönümleme katsayısı kullanılırken, (2) koşulu geçerli olduğunda, damperin verebileceği en küçük sönümleme katsayısı kullanılır. Bunun nedeni incelendiğinde bu koşulların meydana getirdiği farklı durumlar incelenerek ortaya koyulabilir.

Görüldüğü üzere yarı aktif sönümleyicinin yapısı yüzünden tamamen ideal Skyhook modeline ulaşamamaktayız. Bu durum ancak kuvvet üretebilen bir aktif sönümleyici varlığında sağlanabilir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere Skyhook modeli gövdeyi, hem sabit bir noktaya hem de tekerlek kütlesine olmak üzere iki farklı sönümleyici ile bağlamaktadır. Literatürde bulunan bazı ideal Skyhook modellerinde gövde ve sönümleyici arasındaki bu ikinci sönümleyici kullanılmaz ve sadece gövde salınımları dikkate alınır. Oysa kullanılan kontrolcüde yaklaşılmak istenen lineer Skyhook modelinde tekerlek hareketleri de kontrol altındadır. α çarpanı sayesinde ideal durumda sönüm kuvveti hem tekerleklere hem de gövdeye etkir. Yani sadece gövde hareketi değil aynı zamanda tekerlek kuvvetleri de dikkate alınmaktadır. İdeal duruma yaklaşıldığında ise oluşturulan sönüm katsayısı csa ile bu etki de yaratılmış olur. α katsayısı aslında konfor ve yol tutuş arasında geçişi sağlayan bir katsayı niteliğindedir.

Skyhook kontrolün basitleştirilmiş bir alternatifi de İki Durumlu Skyhook (Two State Skyhook)'dur. Bu kontrol yapısında sadece sönümleyicinin maksimum ve minimum kuvvetler vermesi sağlanmaktadır. Buna göre, aynı eşik değerleri bu kontrolcü yapısı için de yazılmıştır. Bu kontrol yapısı da koşulları itibari ile gövde deplasmanın azaltılmasına yönelik oluşturulmuştur [3].

$$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \geq 0 \Rightarrow c_{maks} \qquad \textbf{(4.5)}$$

$$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \Rightarrow c_{\min} \qquad \textbf{(4.6)}$$

4.3 Groundhook Kontrol Algoritması

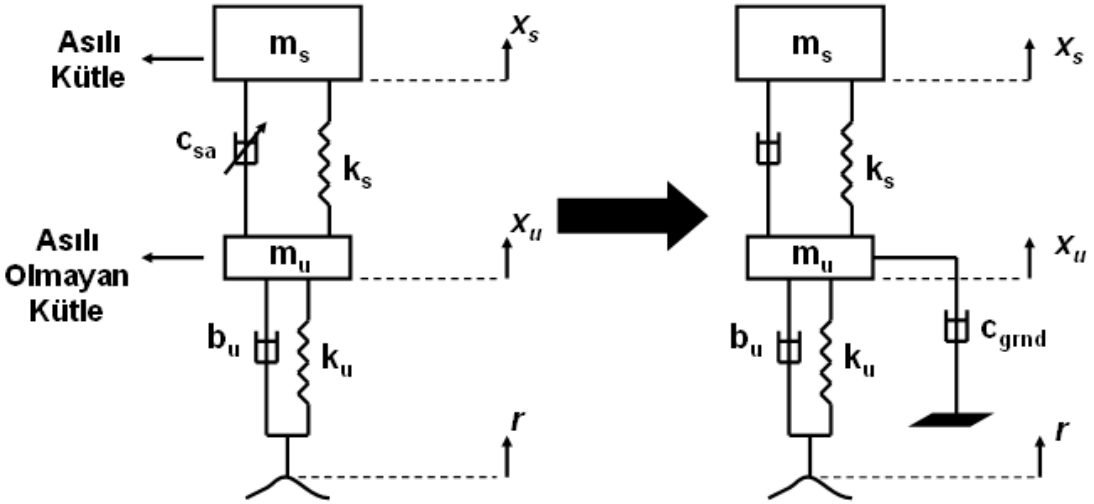
Groundhook kontrol de Skyhook modeline benzer bir şekilde oluşturulmuş ve Şekil 4.4'de görüldüğü üzere yine bir ideal durum kuvvetlerinin yarı-aktif süspansiyon ile oluşturulmasını hedeflemektedir. Buna göre Groundhook yapısında tekerleklerin sabit bir noktaya bağlanması ifade edilmektedir. Böylece Skyhook'un aksine konfor şartları değil, yol tutuşu özellikleri geliştirilmek istenmektedir. Bu yapıda da, ideal durumun gösterdiği tüm durumlar, yarı-aktif bir sönümleyici ile oluşturulamaz. Bu yüzden Groundhook kontrolde de benzer şekildeki eşiklere göre damper oranı

değiştirilmektedir. Ancak Groundhook kontrol için kullanılan eşik değerler, ideal durumun Skyhook'a göre farklı olmasından dolayı, değişmiştir [6, 8, 9].

$$-\dot{x}_u(\dot{x}_s-\dot{x}_u)\geq 0 \Rightarrow c_{sa} \qquad \textbf{(4.7)}$$

$$-\dot{x}_u(\dot{x}_s-\dot{x}_u)\leq 0 \Rightarrow c_{\min} \qquad \textbf{(4.8)}$$

Groundhook algoritmasının çeyrek araç modeli üzerinde gösterimi Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



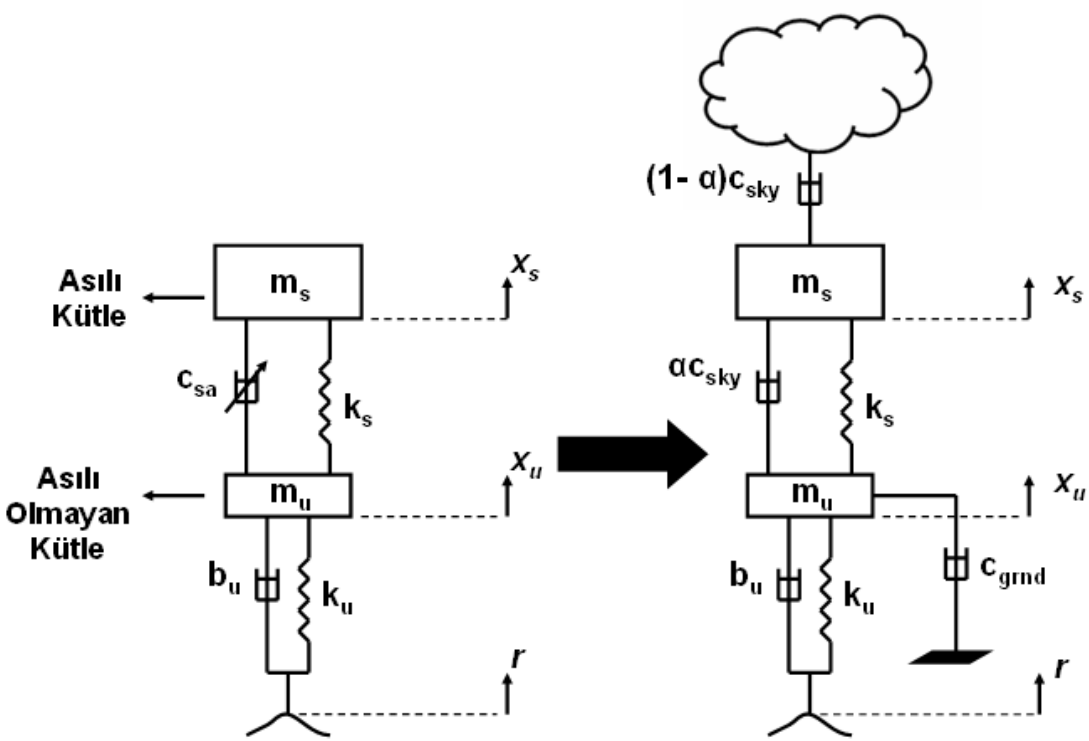
Şekil 4.4: Groundhook Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar

Groundhook kontrolde, eşiklerden biri için önerilen ve csa olarak gösterilmiş katsayı Skyhook kontrol algoritmasındaki gibi, bir sönümleme katsayısıdır. Bu katsayı kullanılan sönümleyicinin sönümleme özelliklerine göre seçilebilir. Ayrıca bu katsayı sönümleyicinin maksimum sönümleme katsayısı olarak da seçilebilir. Böylelikle, Two State Skyhook gibi Two State Groundhook kontrol de en yüksek ve en düşük sönüm kuvvetleri için çalıştığından iki kademeli bir kontrol yapısı oluşturur.

4.4 Hibrid Kontrol Algoritması

Alt seviye şeklinde tabir edilen kontrol yapısının üçüncüsünü Hibrid kontrol adı altında Skyhook ve Groundhook kontrollerini birleştiren bir kontrol yapısı meydana getirir. Buna göre bu yapıda Şekil 4.5' da görüldüğü üzere ideal durum için hem asılı hem de asılı olmayan kütlelerin sabit bir noktaya sanal bir sönümleyici ile bağlantılı olması durumu oluşturulmaktadır. Buna göre istenen iki kuvvet bir β katsayısı

birleştirilmektedir. Bu katsayının değiştirilmesi ile de konfor ve yol tutuşu özellikleri arasında geçiş sağlanabilmektedir.



Şekil 4.5: Hibrid Kontrol algoritması: Gerçek ve ideal durumlar

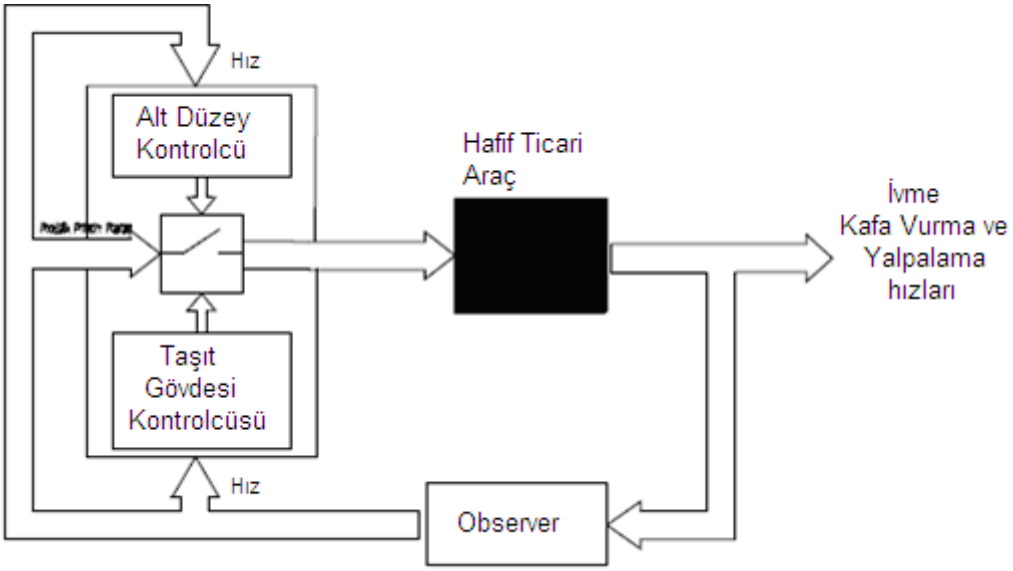
Sonuç olarak Hibrid modelde hem Skyhook hem de Groundhook kontrolcüleri çalışmakta ve oluşturulan kuvvetler gövde ve tekerleklere dağıtılmaktadır.

4.5 Geçici Rejimde Aktif Gövde Kontrolü (GRAGK)

GRAGK üst seviye olarak tanımlanabilen yarı aktif süspansiyon kontrolcüsüdür. Aracın yunuslama ve yalpalama hareketlerini azaltmak amacıyla, alt seviye olarak Hibrid kontrol algoritmasını kullanan, üst seviye olarak da belli durumlara göre davranan kural tabanlı kontrolcü kullanan kontrol algoritmasıdır [8].

GRAGK algoritmasında yunuslama ve yalpalama kontrolcüleri ayrı ayrı tasarlanmıştır. Bu kontrolcüler basit on-off kontrolcülerdir. Aracın yalpa ve yunuslama dinamiğine göre geliştirilen üst düzey kontrolcü, alt düzey Hibrid kontrolcü ve yalpa-yunuslama kontrolcüleri arasında geçişi kontrol eder. Üst düzey kontrolcü belli yalpa ve yunuslama açısı eşik değerlerine göre çalışır. Bu eşik değerler CARMAKER™ araç modeliyle gerçekleştirilen standart manevralarla (ISO

lane change, J-turn, Fishhook) belirlenmiştir. Eşik değerler aşılmadığı sürece alt düzey Hibrid kontrolcü etkin durumdadır.

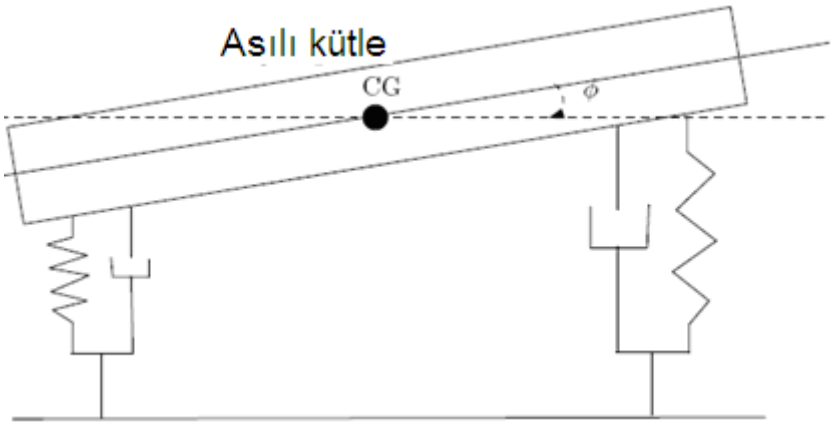


Şekil 4.6: GRAGK algoritmasının genel blok diyagramı [8]

Üst düzey kontrol algoritması, alt düzey ve yalpa-yunuslama kontrolcüleri ile her tekerlek için gereken sönümleme kuvvetini hesaplar. Bu kuvvetler her CVD için akım değerlerine dönüştürülüp istenilen sönümleme sağlanmış olur. Bu dönüşüm Sönümleyici üretici firması tarafından verilen sönümleyici tabloları yardımıyla yapılır.

4.5.1 Yalpa ve Yunuslama kontrolcüleri

Yalpa ve yunuslama kontrolcülerinin amacı sürüş sırasında oluşan rahatsız edici, taşıt güvenliğini ve konforu etkileyen yalpalama ve yunuslama açılarını yarı aktif süspansiyon sistemi kullanarak kararlı hale getirmektir.



Şekil 4.7: Yalpalama dinamiği [8]

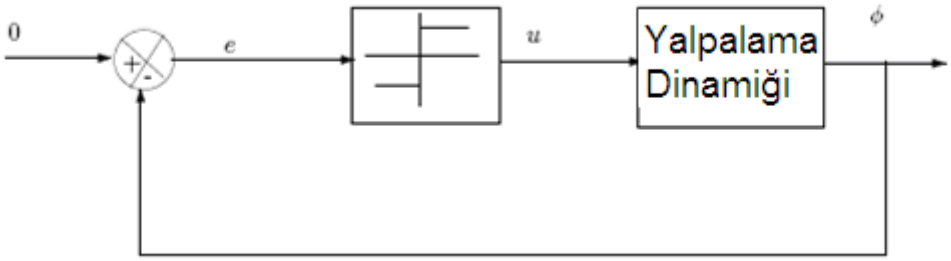
Şekil 4.7'deki aracı ele alırsak, aracın yalpa dinamiği,

$$I_{xx}\ddot{\phi} + K_r\phi = u_r \qquad \textbf{(4.9)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $\mathbf{u_r = c_f\, d_r - d_f\, d_l}$, $\mathbf{f_{dl} = f_{d12} - f_{d22}}$, $\mathbf{f_{dr} = f_{d11} - f_{d21}}$, $\mathbf{K_r}$ ise Yalpa hareketinin birleşik yay etkisi. Kontrol girişi u_r, Şekil 4.8'de gürülen on-off kontrolcüden hesaplanmaktadır. Bu kontrol matematiksel olarak

$$u_r = -sign(e) \qquad \textbf{(4.10)}$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.8: Yalpalama kontrolcü blok diyagramı [8]

Burada $e = 0 - \phi$ olacaktır. İşaret fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$sign(e) = \begin{cases} 1 & \text{eger } e > 0 \\ -1 & \text{eger } e < 0 \\ 0 & \text{eger } e = 0 \end{cases}$$

Kontrol algoritması ayrık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u_r > 0 \text{ ise } f_{dr} = f_{dr\max}\ ,\ f_{dl} = f_{dl\min}$$
$$u_r < 0 \text{ ise } f_{dl} = f_{dl\max}\ ,\ f_{dr} = f_{dr\max}$$
$$u_r = 0 \text{ ise } f_{dl} = f_{dr}$$

Ayrıca,

$$f_{dij\max} = C_{\max}(\dot{z}_{sij} - \dot{z}_{ij}),\ f_{dij\min} = C_{\min}(\dot{z}_{sij} - \dot{z}_{ij})\ ,\ i = 1,2 \text{ ve } j = 1,2 \text{ için}$$

4.5.2 Yunuslama kontrolcüsü

Yalpa kontrolcüsüne benzer olarak yunuslama kontrolcüsü de geliştirilmiştir. Aracın yunuslama dinamiği hareket denklemleri yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_{yy}\ddot{\theta} + K_P\theta = u_p \quad \textbf{(4.11)}$$

$$u_p = a.f_{df} - b.f_{db}\ ,\ f_{df} = f_{d11} + f_{d12}\ ,\ f_{db} = f_{d21} + f_{d22} \quad \textbf{(4.11b)}$$

Kontrolcünün geri kalan kısmı yalpa kontrolcüsü ile benzerdir.

4.5.3 Üst düzey kontrolcü (Supervisory Control)

Üst düzey kontrolcü basit bir anahtarlama yapmaktadır. Bu anahtarlama alt düzey kontrolcüler ile yalpa-yunuslama kontrolcüleri arasındaki geçişi sağlar. Üst düzey kontrolcü yalpa ve yunuslama açılarına ait eşik değerleri kullanır. Eğer yalpalama ve yunuslama açıları bu eşik değerleri aşarsa, üst düzey kontrolcü alt düzey Hibrid algoritmasını etkisiz kılıp, yalpa ve yunuslama kontrolcülerini etkin hale getirir. Bunun tersi de geçerlidir. Üst düzey kontrolcü matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$Eger \quad |\dot{\phi}| > \dot{\phi}_{present}$ ve $|\dot{\theta}| > \dot{\theta}_{present}$ ise $\qquad u_s = u_r$

$Eger \quad |\dot{\phi}| < \dot{\phi}_{present}$ ve $|\dot{\theta}| < \dot{\theta}_{present}$ ise $\qquad u_s = u_p$

$Eger \quad |\dot{\phi}| > \dot{\phi}_{present}$ ve $|\dot{\theta}| > \dot{\theta}_{present}$ ise $\qquad u_s = u_r (Eger\ |\dot{\phi}| > |\dot{\theta}|)$ veya

$u_s = u_p (Eger\ |\dot{\theta}| > |\dot{\phi}|)$ aksi halde $u_s = u_l$

Burada,. $\mathbf{u_p}$,yunuslama kontrolcüsü, $\mathbf{u_r}$,yalpa kontrolcüsü ve $\mathbf{u_l}$, alt düzey kontrolcüdür.

Yarı aktif süspansiyonlar yapıları gereği, aktif gövde kontrolünde kullanıldığında sistemin sadece geçici rejiminde etkili olabilirler. Sürekli rejim cevabı için aktif süspansiyon kullanmak daha etkili olacaktır. Bu sebepten geliştirilen GRAGK algoritması, sistemin geçici rejim cevabını kontrol etmek üzere geliştirilmiştir.

5. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ İÇİN KALMAN FİLTRESİ TASARIMI VE OFFSET GİDERİLMESİ

5.1 Giriş

4. Bölümde görüldüğü gibi, yarı aktif süspansiyon sistemlerinde kullanılan kontrol algoritmaları temelde, asılı ve asılı olmayan kütlenin hızlarını baz alarak kontrolü sağlarlar. Bu hızlar, araçta kullanılan ivmeölçerler verileri işlenerek elde edilirler. Ayrıca bu ivmeölçer verileri yüksek frekanslı gürültü içerirler, ve bu gürültü hızların temiz ve düzgün bir sinyal olarak kullanılmasını engeller. Bu bakımdan düzgün bir filtreleme ve ofset giderici bir kontrol çevrimi tasarlanması gerekmektedir.

Bu bölümde, ivmeölçer sinyallerinin filtrelenmesi ve hızların çıkarılması için kullanılan Kalman filtresinden bahsedilecektir. Ayrıca sinyallerdeki DC offset'in giderilmesi için geliştirilen çevrim anlatılacaktır [8,9].

5.2 Kalman filtresi tasarımı

Kalman filtresi dinamik sistem modeli kullanarak durum değişkenlerini tahmini olarak elde eden ve ölçüm modeli kullanarak da bu tahmini doğrulayan bir tahmin-doğrulama (predictor-corrector) algoritmasıdır. Ancak Kalman filtresi bazı özellikleri bakımından birçok gözleyiciden daha farklı bir yapıya sahiptir. Kalman filtresi yaklaşımında durum değişkenlerini tahmininin;

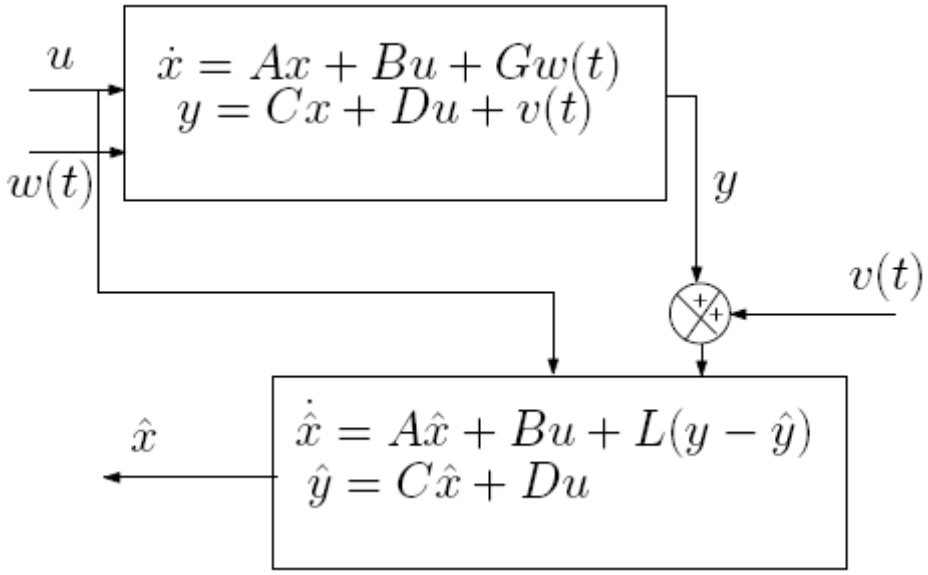
1. Önceki durum tahmini ve ölçüm bilgisinin doğrusal bir kombinasyonu olması.
2. Gerçek durum ile arasında bir bias bulunması
3. Gerçek duruma göre minimum varyans'a sahip olması.

Çalışmada kullanılan Kalman filtresi 3. bölümde anlatılan, durum uzay gösterimine sahip çeyrek araç modeli kullanılarak tasarlanmıştır.

Aşağıda görülen dinamik sistemi alırsak,

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = A\hat{\boldsymbol{x}} + Bu + L(y - \hat{y})$$
$$\hat{\boldsymbol{y}} = C\hat{\boldsymbol{x}} + Du \qquad \textbf{(5.1)}$$

Burada $\hat{x}$, gözleyici durumlarını gösterirken, $\hat{y}$, gözleyici çıkışlarını ve L ise gözleyici kazanç matrisini belirtir. Çeyrek araç modeli ve gözleyici blok diyagramı Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1: Observer ve süspansiyon sistem modeline ait blok diyagram

Gözleyici tasarımında, yol girişi **w(t)** ve sensör gürültüsü **v(t)** hakkında aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

1. Her ikisi de Gaussiyen tipte beyaz gürültü şeklindedir.
2. $E[\omega(t)] = E[\upsilon(t)] = 0$
3. $E[\omega(t)^T \upsilon(t)] = Q = Q^T \geq 0$
4. $E[\upsilon(t)^T \upsilon(t)] = R = R^T > 0$
5. $E[\omega(t)^T \upsilon(t)] = N = 0$

Gerçek durumlar ile tahmin edilen durumlar arasında hata aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}} \qquad \textbf{(5.2)}$$

Hatanın dinamiği açılarak yazılırsa,

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{e}} &= \dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\hat{\boldsymbol{x}}} \\ &= A(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}) - LC(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}) + G\omega(t) - L\upsilon(t) \\ &= (A - LC)\boldsymbol{e} + d(t)\end{aligned} \quad \textbf{(5.3)}$$

Ayrıca,

$$d(t) \triangleq G\omega(t) - L\upsilon(t) \quad \textbf{(5.4)}$$

Kalman filtresinde gözleyici kazanç matrisi, hatanın kovaryansını en küçük hale getirecek şekilde tasarlanır. Matematiksel olarak ifade edilirse aşağıdaki index en küçük hale getirilecektir.

$$J_e \triangleq E\left[\boldsymbol{e}^2(t)\right] \quad \textbf{(5.5)}$$

Kalman algoritmasını kullanarak optimal L matrisi aşağıdaki formülasyon ile bulunabilir.

$$L = P_e C^T R^{-1} \quad \textbf{(5.6)}$$

Burada P_e aşağıdaki cebirsel Riccati cebirsel denkleminin positive definite çözümüdür.

$$P_e A^T + A P_e - P_e C^T R^{-1} C P_e + Q = 0 \quad \textbf{(5.7)}$$

Gerçek zamanlı uygulamalarda kullanmak üzere Kalman Filtresi ayarlanırken, hatanın 2. normunu ($\|e\|_2$) minimize etmek üzere Q ve R matrisleri değiştirilerek ile çevrimdışı benzetimlerde ayarlanabilmektedir.

5.3 Offset giderici çevrim tasarımı

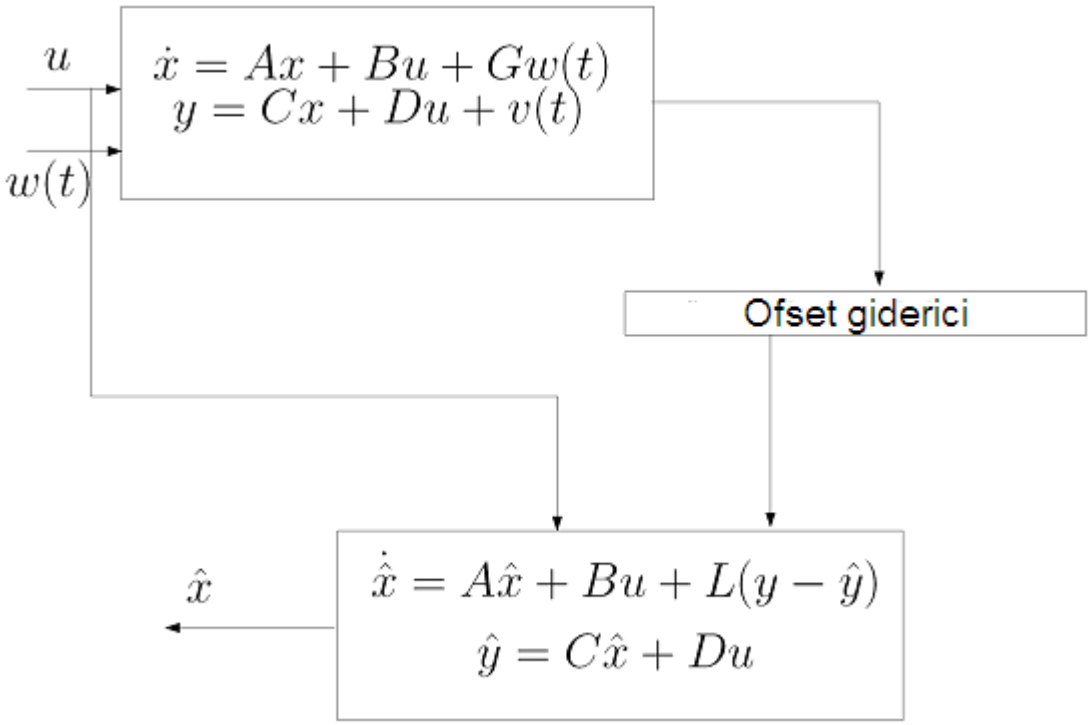
İvmeölçer sinyalleri sadece yüksek frekanslı gürültü değil aynı zamanda bir miktar DC ofset içerirler. Bu problem konvansiyonel Kalman filtresi kullanılarak çözülemez. İki kademeli Kalman filtresi tasarımı(Two stage Kalman Filter) bu problemi çözebilir. Ancak böyle bir uygulamada gözleyicinin mertebesi artacak ve bu da tahmin edilen durum değişkenlerinde önemli bir faz farkına yol açacaktır [9].

Bu problemi gidermek için tasarlanan ofset giderici çevrim, küçük zaman aralıklarda ivme verisini kaydeder. Bu zaman aralıkları 1-5 saniye arası değişebilir ve sabit

olarak sisteme girilir. Her beş saniyede kaydedilen ivme verisinin sabit bir ofsete sahip olduğu varsayımı ile integrali alınır ve verinin kaydedildiği zaman aralığa bölünür. Böylelikle belirlenen zaman aralığında sinyaldeki ofset bulunup gerçek sinyalden çıkarılır. Sonuç olarak Kalman filtresine gönderilen ivmeölçer sinyalleri ofset giderilmiş olarak işlenir.

Bu çevrimin aslında basit olarak bir düşük geçirgen filtre prensibi ile çalıştığı görülecektir.

Şekil 5.2, Sistem modelini Kalman filtresi, ofset giderici çevrim ile beraber göstermektedir.



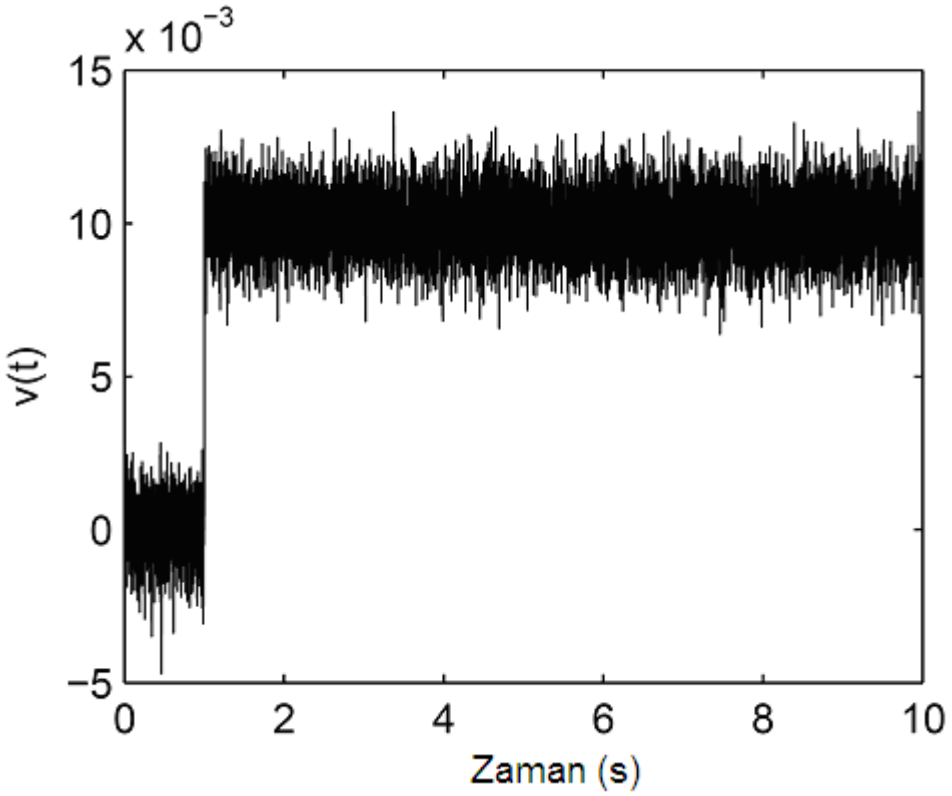
Şekil 5.2: Observer, sistem modeli ve ofset gidericinin blok diyagramı [9]

5.4 Kalman Filtresi ve ofset giderici çevrim için yapılan benzetimler

Yukarıda belirlenen şekilde tasarlanan Kalman filtresinin gerçek araç testlerinde kullanılmadan önce çevrimdışı benzetimlerle test edilmesi gerekmektedir.

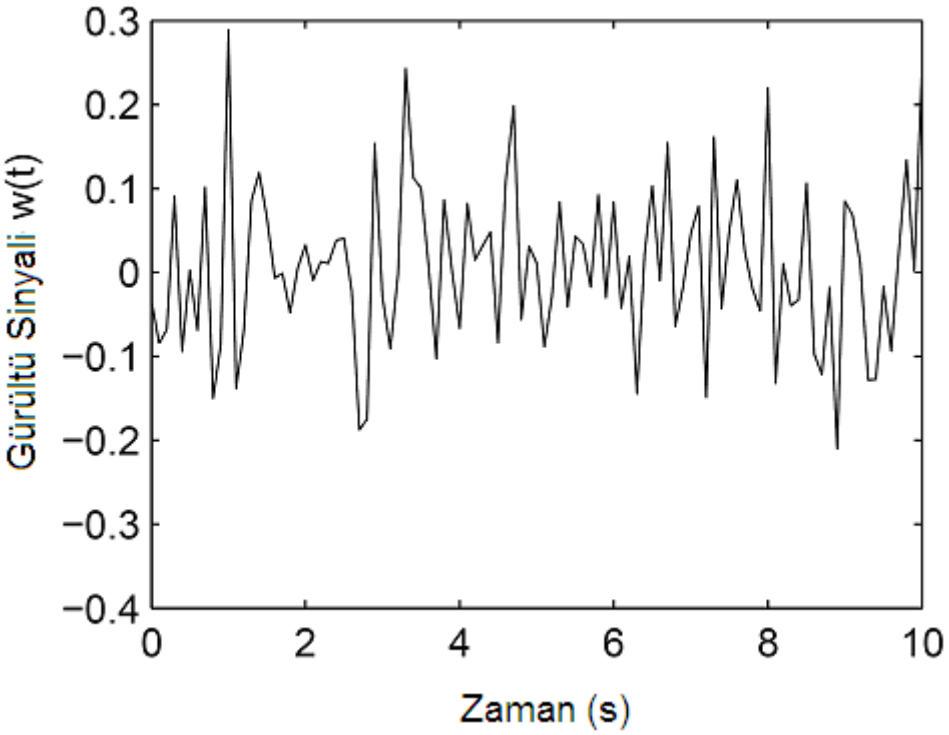
Gözleyici, çeşitli yol girişleri (**w(t)**) ve sensör gürültülerinde ayarlanmıştır. Benzetimlerde kullanılan yol girişleri Şekil 5.3'de görüleceği üzere sabit frekanslı sinyal, rastlantısal gürültü ve değişken frekanslı sinyal girişleridir.

Bilindiği gibi her sensörün verdiği elektriksel çıkışta bir miktar ofset olmaktadır. Bunun sebebi sensörün tasarımıyla ilgili olduğu kadar, elektriksel devreden kaynaklanan hatalar da olabilir. Bu çalışmada kullanılan ivmeölçerler yapıları gereği DC olarak çalışan sensörlerdir. Ayrıca içerdikleri mikro düzeydeki kütle yay sisteminden dolayı yüksek frekansta gürültü içeren bir sinyal üretirler. Bu sinyalin biligisayar ortamında benzetimini yapmak için, bir miktar DC ofset içeren gürültülü bir sinyal kullanılmıştır. Bu gürültü, gerçek araç üzerindeki ivmeölçer gürültülerine eşdeğer olarak seçilmiştir [9]. Sensör sinyaline yaklaşık olarak 1. saniyeden sonra bir ofset eklenmiştir.



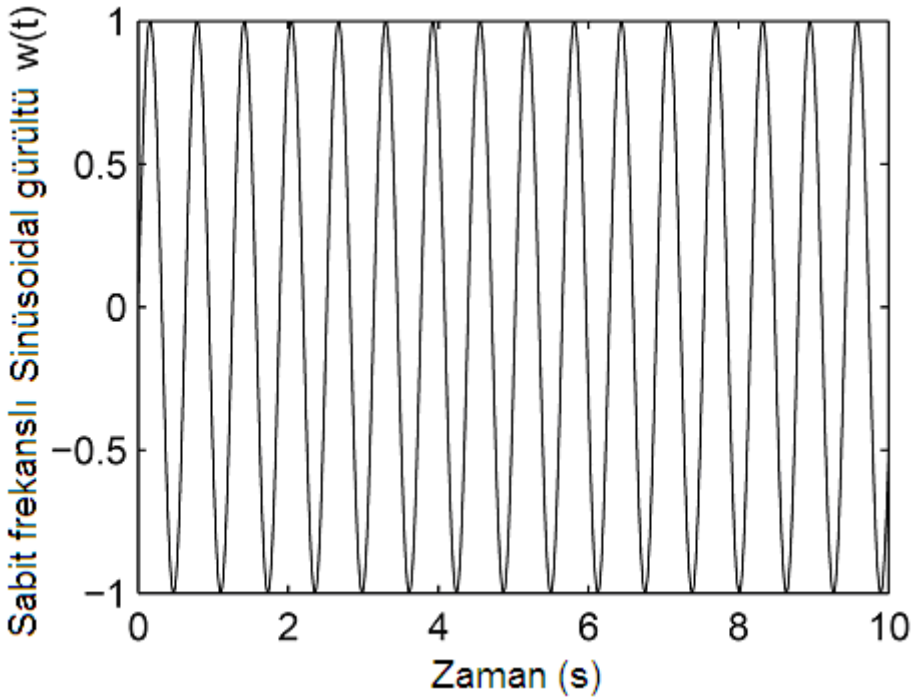
Şekil 5.3: Sensör gürültüsü simülasyon girişi

Şekil 5.4 benzetimlerde kullanılan örnek yol girişlerinden ilkini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi sinyal rastgele olarak belirli bant genişliğinde değişen bir özelliğe sahiptir. Sinyalin bant genişliği 2-30 Hz arasında seçilmiştir.

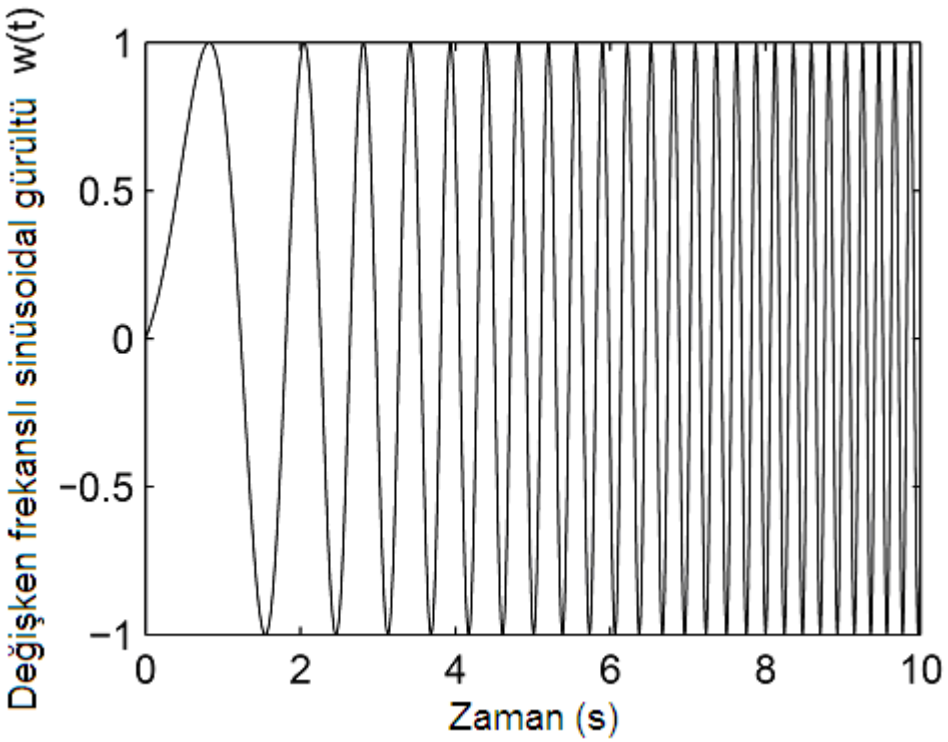


Şekil 5.4: Rastgele gürültü sinyali olarak seçilen yol girişi, w(t)

Şekil 5.5'de ise sabit frekanslı bir sinüs dalgası gözükmektedir. Burada örnek olarak gösterilen sinyalde frekans olarak 0.5 Hz seçilmiştir.



Şekil 5.5: Sabit frekanslı sinüs dalgası olarak seçilen yol girişi, w(t)



Şekil 5.6: Değişken frekanslı sinüs dalgası olarak seçilen yol girişi, w(t)

Değişken frekanslı sinüs sinyali, 0.1 Hz ile 15 Hz arasındaki tüm frekansları süpürmektedir. Bu sebeple gerek değişik kontrolcülerin, konfor ve yol tutuş özelliklerinin belirlenmesi, gerekse gözleyici performansının gözlemlenmesi açısında en uygun test sinyalidir. Değişken frekanslı sinüs sinyalinde 1-2 Hz arasındaki konfor özelliklerini ve 9-11 Hz arasındaki yol tutuş özelliklerini aynı anda değerlendirmek mümkündür.

Gözleyici performansının benzetim sonuçları için Ek-A'da gösterilmektedir.

6. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN BENZETİM SONUÇLARI

6.1 Giriş

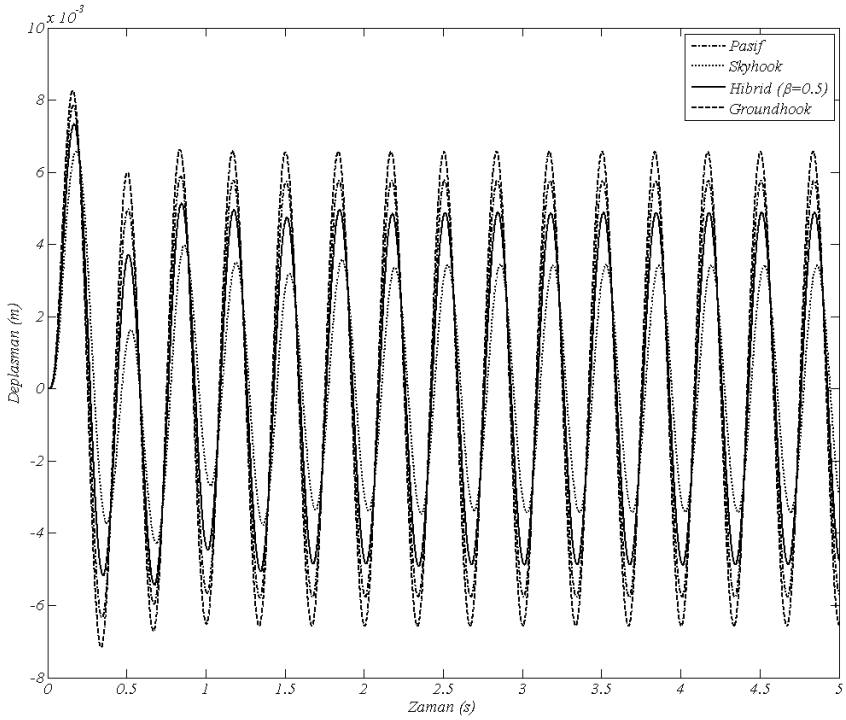
Çeyrek araç modeli üzerinde yapılan çalışmalarda, performans ölçütlerine uygun olarak, asılı kütle deplasmanı ve asılı olmayan kütle deplasmanı baz alınarak inceleme yapılmıştır. Bu açıdan modellere giriş olarak sinüs sinyali, süpürülmüş sinüs sinyali uygulanmıştır. Sinüs sinyalinin genliği 0.01 m, frekansı ise 3 ile 10 Hz arasında değişmektedir. Bunun yanında girişler, çeyrek araç modeli için, yol deplasmanı olarak modellere etkimektedir.

Bu noktadan sonra önce zaman domeninde, daha sonra frekans domeninde benzetim sonuçları incelenecektir.

Benzetimlerde karşılaştırma yapmak adına, Ford Transit Connect aracının, mevcut pasif süspansiyon sistem parametreleri pasif model için kullanılmaktadır. Geliştirilen kontrol algoritmaları bu pasif model ile karşılaştırılmış ve sonuçta elde edilen iyileştirmeler bu çerçevede değerlendirilmiştir. Bu simülasyonlarda çeyrek araç modelinde 1-20 Hz frekanslarında ve 10 mm genlikte yol deplasmanı modele girilmekte bunun sonunda çeyrek araç modelinin 4 adet durum değişkeni incelenmektedir. Grafiklerde Skyhook, Pasif ve 0.5 β katsayısına sahip Hibrid kontrolcü görülmektedir.

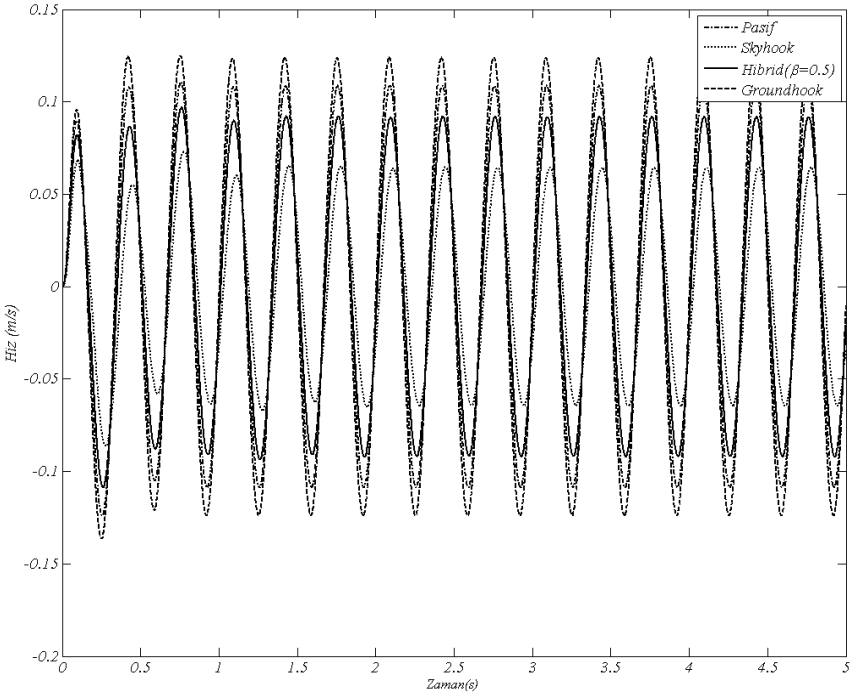
Görüldüğü üzere Skyhook kontrolcünün konfor için yarattığı iyileştirme ,yol tutuşu için olumsuz sonuç vermektedir.Bu da daha önce bahsedilen konfor ve yol tutuşu özelliklerinin birbiri ile ters orantılı olması durumunu gösteren bir örnektir.

Bu benzetimde kullanılan c_{sa} büyüklüğü maksimum sönümleme oranı olarak alınmıştır. Benzetimlerde, sönümlemenin tekerlek ve gövde arasında ne kadar dağıtıldığının ölçüsü α değeridir. α değeri, doğrusal Skyhook kontrolcüsünde yer alan bir ağırlıklandırma katsayısıdır. Bu değer yukarıdaki benzetimlerde 0.5 alınarak sönümleyici kuvveti asılı ve asılı olmayan kütlelere eşit olarak dağıtılmıştır.

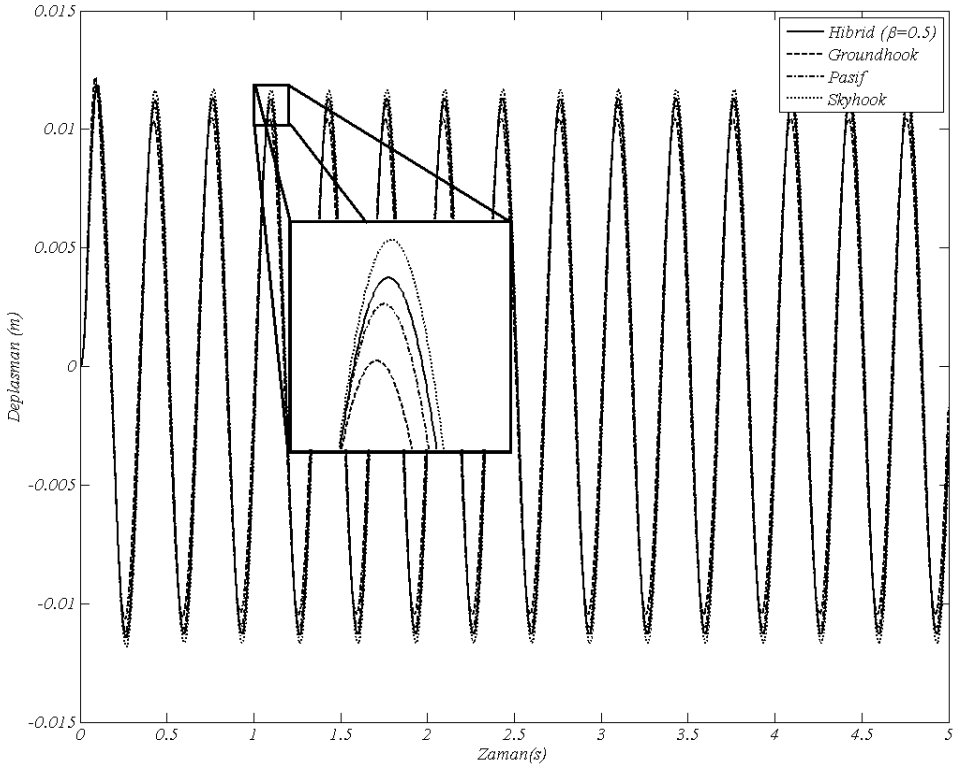


Şekil 6.1: 0.01 m genlikli, 1 Hz frekanslı yol girişi için asılı kütle deplasmanı

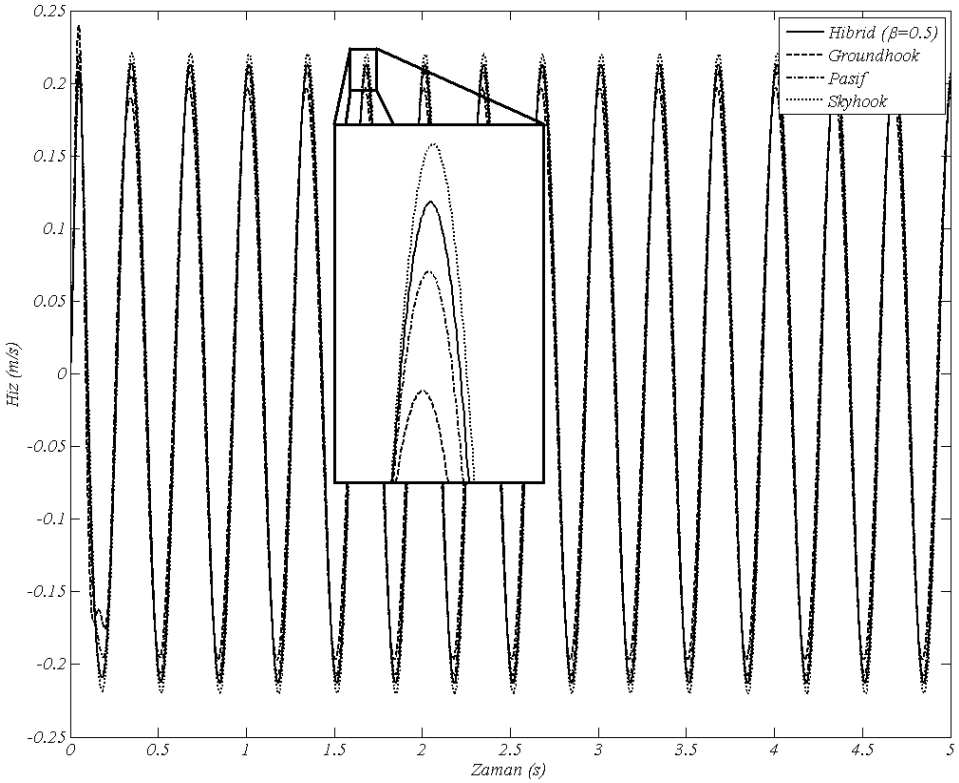
Şekil 6.1-6.4, 0.01 m genliğe sahip, 3 Hz sabit frekansla etkiyen sinüs yol girişi için sistemin benzetiminin sonuçlarını göstermektedir. Asılı kütle deplasmanı hızı için β=0.5 olan Hibrid kontrolcü ile α=0.5 olan Skyhook kontrolcüler pasif durumdan daha az bir deplasman oluşturmuşlardır.



Şekil 6.2: 0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı kütle hızı



Şekil 6.3: 0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı olmayan kütle deplasmanı



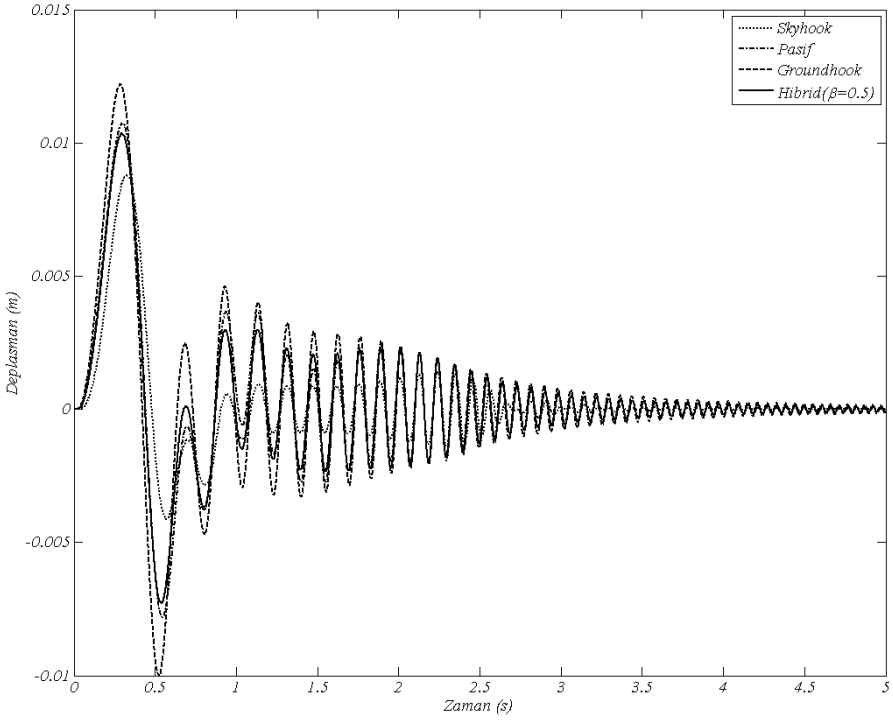
Şekil 6.4:0.01 m genlikli, 3 Hz frekanslı yol girişi için asılı olmayan kütle hızı)

Hibrid kontrolde β değişkeni Groundhook kuvvet ve Skyhook kuvveti beli bir oranda birleştiren bir değerdir. Buna göre kontrol yapısının bir ucunda Skyhook bir ucunda Groundhook kontrol vardır. β değişkeni ile bu iki kontrol ağırlıklandırılır. Oluşturulan kontrol yapısında yapılan simülasyonlar sonucu β değişkeninin optimum değeri bulunarak bu değişken için sabit bir değer kullanılmıştır. Benzetimlerde ve gerçek zamanlı testlerde genellikle 0.5 değeri kullanılmıştır.

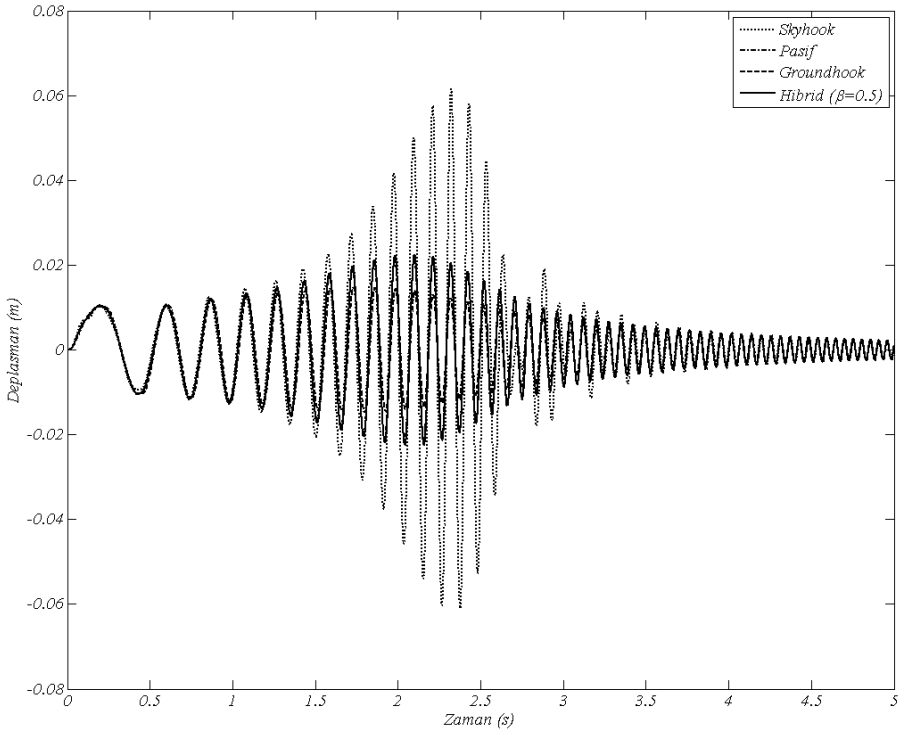
Bu bölümde kullanılan benzetim modeli, durum-uzay gösterimine sahip modeldir.

Burada verilecek bir diğer benzetim sonucu ise Hibrid kontrolcüde yer alan β katsayısının optimizasyonu ile ilgilidir. 3 Hz ve 10 Hz frekanslara ait sabit sinüs dalgası olarak verilen yol girişi için benzetim sonuçları Şekil 6.7 ve 6.8 de gösterilmektedir.

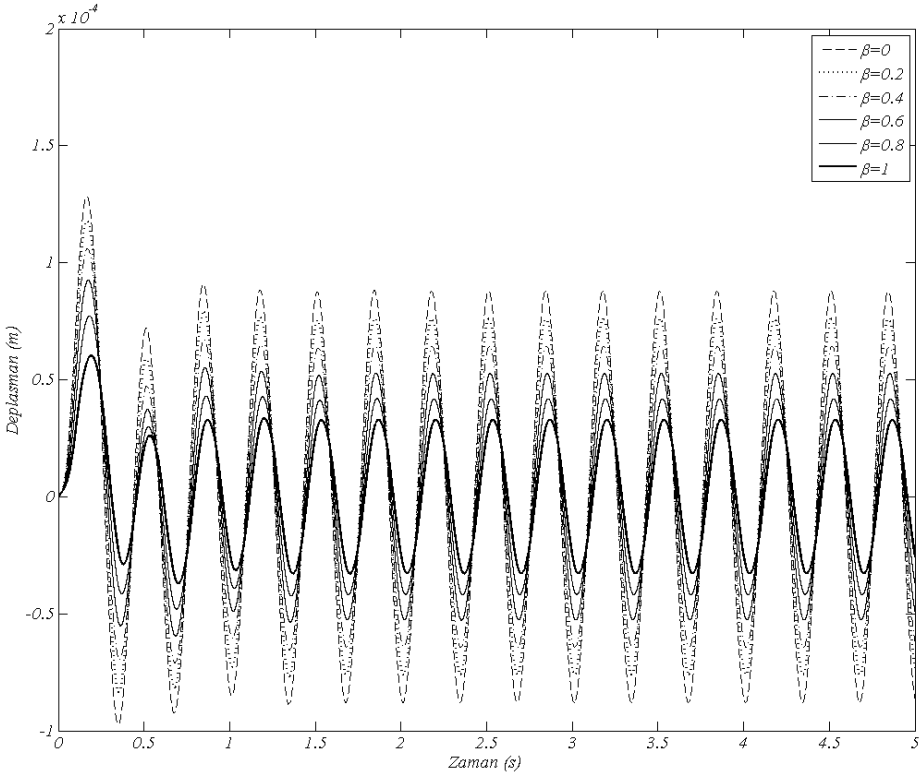
Şekil 6.7 ve 6.8'de görüleceği üzere, β katsayısı 1 iken kontrolcü Skyhook gibi davranmakta, öte yandan 0 iken Groundhook gibi davranmaktadır. Bu da gerek yol tutuş gerekse konfor özelliklerinin en uygun hale getirilmesi açısından, Hibrid kontrolcünün avantajlı olduğunu göstermektedir.



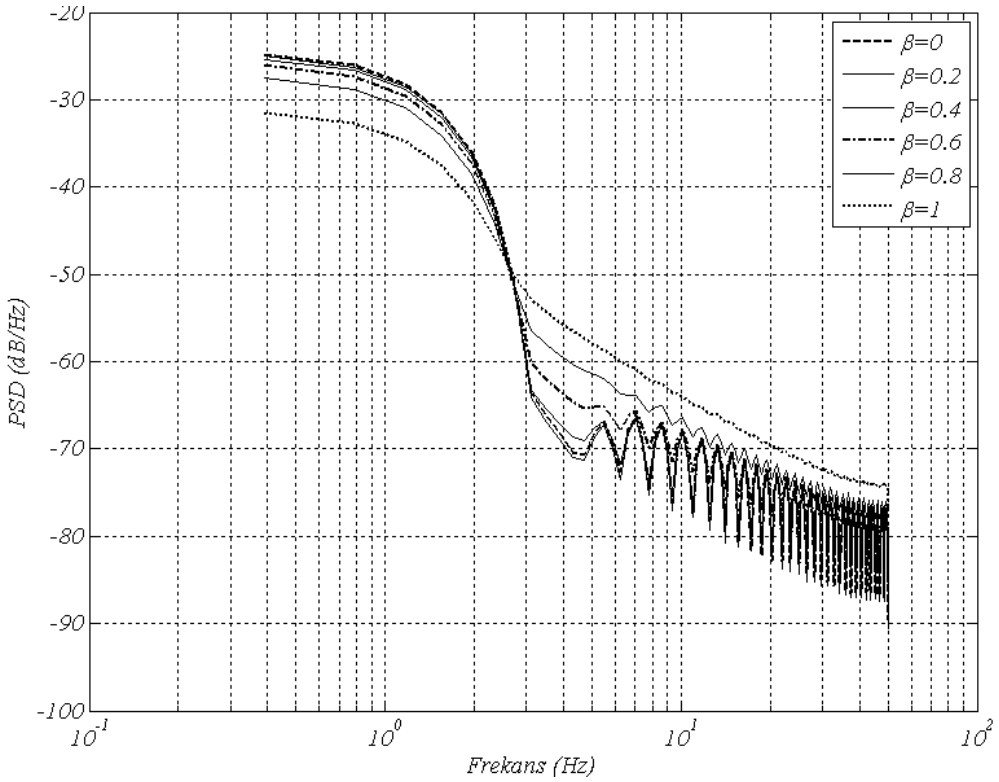
Şekil 6.5:1-20 Hz arası süpürülmüş sinüs sinyali yol girişi için asılı kütle deplasmanı



Şekil 6.6:1-20 Hz arası süpürülmüş sinüs sinyali yol girişi için asılı olmayan kütle deplasmanı



Şekil 6.7: 3 Hz için asılı kütle deplasmanının değişik β değerlerine göre değişimi



Şekil 6.8: 10 Hz için asılı kütle ivmesinin değişik β değerlerine göre değişimi

Şekil 6.8'de 10 Hz frekansa sahip sinüs sinyali ile yapılmış benzetime ait asılı kütle ivmesinin PSD diyagramı görülmektedir. PSD sinyali yüksek frekanslı veya karışık frekanslı yol sinyallerine ait sonuçların incelenmesinde daha objektif sonuçlar vermektedir. Asılı ve asılı olmayan kütlelere ait rezonans tepeleri PSD diyagramında görülebilmektedir.

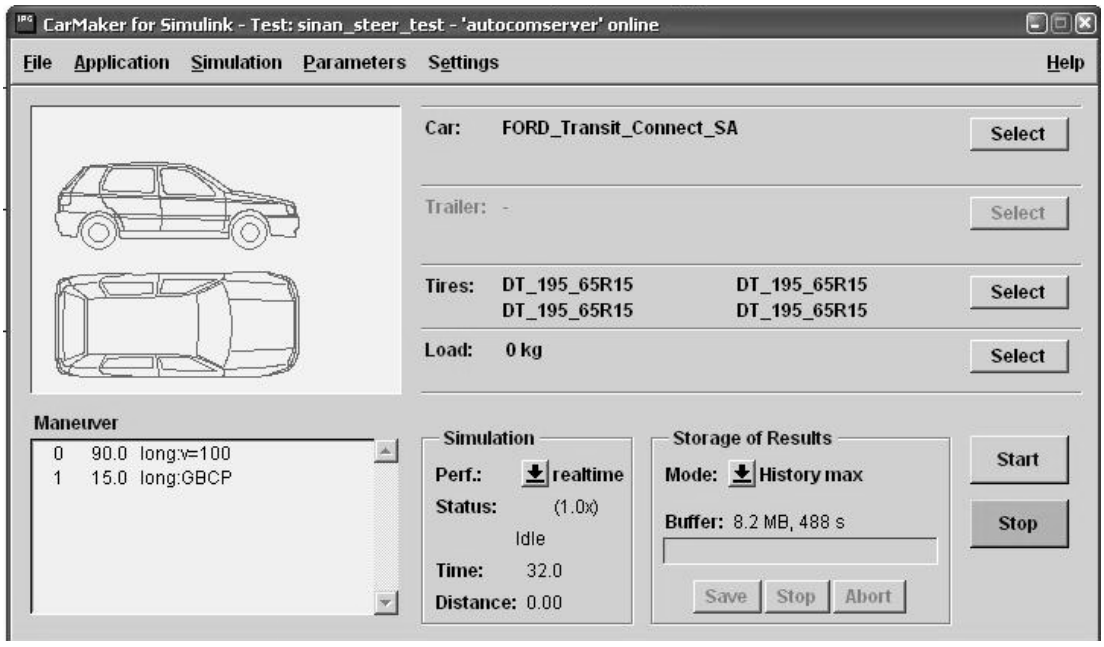
Şekilde de görüldüğü gibi β'nın sıfır olduğu durumda yarı aktif süspansiyon kontrolcüsü tam bir Groundhook kontrolcü gibi davranmakta ve tekerlek ivmesindeki iyileşmeye karşılık gövde ivmesinde bir miktar kötüleşme görülmektedir. β bir olduğunda ise sistem tam tersi bir şekilde davranmakta ve gövde ivmesinde önemli bir düşüş görülmektedir.

6.2 CARMAKER™ modeli ile yapılan benzetimler

Çeyrek araç modeli ile yapılan simülasyonlar, tasarlanan gözleyici performansının belirlenmesi, kontrol algoritmalarının test edilmesi açısından faydalıdır. Ancak gerçek araçta her dört çeyrek de birbirini etkilediği için, kontrol algoritmalarının doğrulanması ve Kalman filtresinin performansının daha doğru şekilde ölçülebilmesi için gerçekçi ve yüksek serbestlik dereceli modellerin kullanılması gerekir [8,20]. CARMAKER™ modelleri bu bakımdan kullanışlı bulunmuştur. Şekil 6.9 CARMAKER™ programına ait bir görüntüyü göstermektedir.

CARMAKER™ araç modelleri 3. bölümde anlatıldığı gibi yüksek serbestlik derecesi içerir. Bu sebeple içerdiği yüksek serbestlik derecesinden dolayı, gerçek bir araca çok yakın testler yapılabilmesine olanak verir. Aynı anda 4 tekerleğe ait kontrolcünün çalışması, birbiri ile etkileşim halinde iken kontrolcülerin nasıl çalışacakları hakkında detaylı bilgi verebilmektedir.

CARMAKER™'da simülasyon yapılırken öncelikle araç parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. Ford Transit Connect aracının parametreleri daha önce FORD-OTOSAN firması tarafından temin edildiği için bu parametreler CARMAKER™'a girilmiştir.

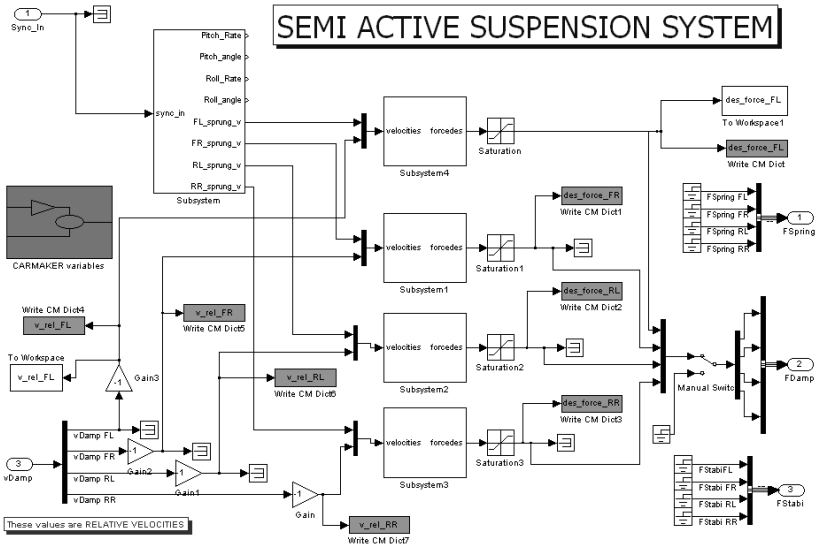


Şekil 6.9: CARMAKER™ programının ana penceresinin görünümü

Girilen parametreler,

1. Aracın geometrik boyutları,
2. Dört çeyreğe ait asılı olmayan kütle, tekerlek ve gövde ağırlıkları
3. Dört çeyreğe ait x, y ve z yönlerindeki atalet momentleri
4. Ön ve arka yay eğrileri
5. Ön ve arka sönümleyici eğrileri
6. Ön ve arka Bump-stop eğrileri
7. Anti roll bar esneklik ve diğer parametreler
8. Direksiyon mili/kremayer çevrim oranı
9. Aerodinamik parametreler
10. Tekerlek ölçüleri

Girilen bütün bu parametrelerden başka motor ve aktarma organları, fren sistemi ve direksiyon esneklik matrisi gibi diğer değişkenlerde girilebilir. Ancak yarı aktif süspansiyon sisteminde esas olarak aracın şasi özellikleriyle ilgilendiğimiz için, motor-aktarma organları, fren ve diğer değişkenlere ait veriler CARMAKER™ 'da hazır olarak bulunan araçtan alınmıştır.



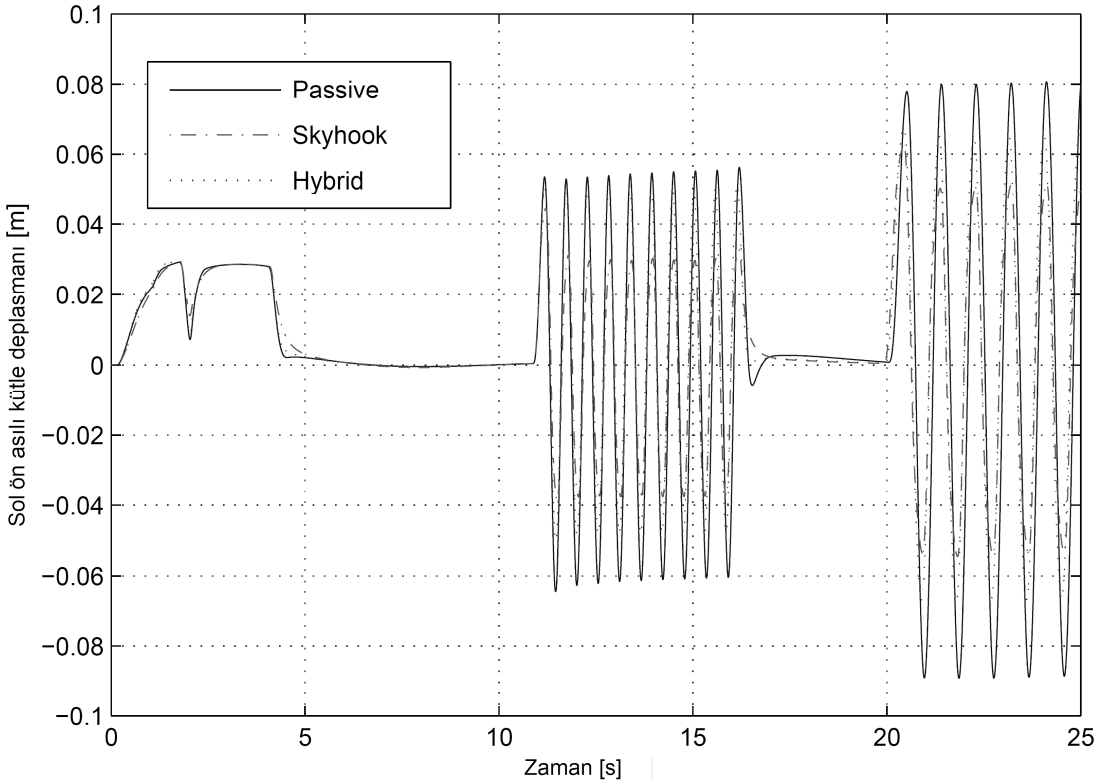
Şekil 6.10: CARMAKER™ programında oluşturulan yarı aktif süspansiyon kontrolcüsü blok diyagramının görünümü

Araç parametreleri girildikten sonra, aracın test edileceği ve sanal sürüşün gerçekleşeceği yol belirlenir. Bu çalışma kapsamında yapılacak sanal testler için değişik yollar yaratılmıştır. Bu yollar genellikle değişik frekanslara sahip yol engellerinden oluşmuştur.

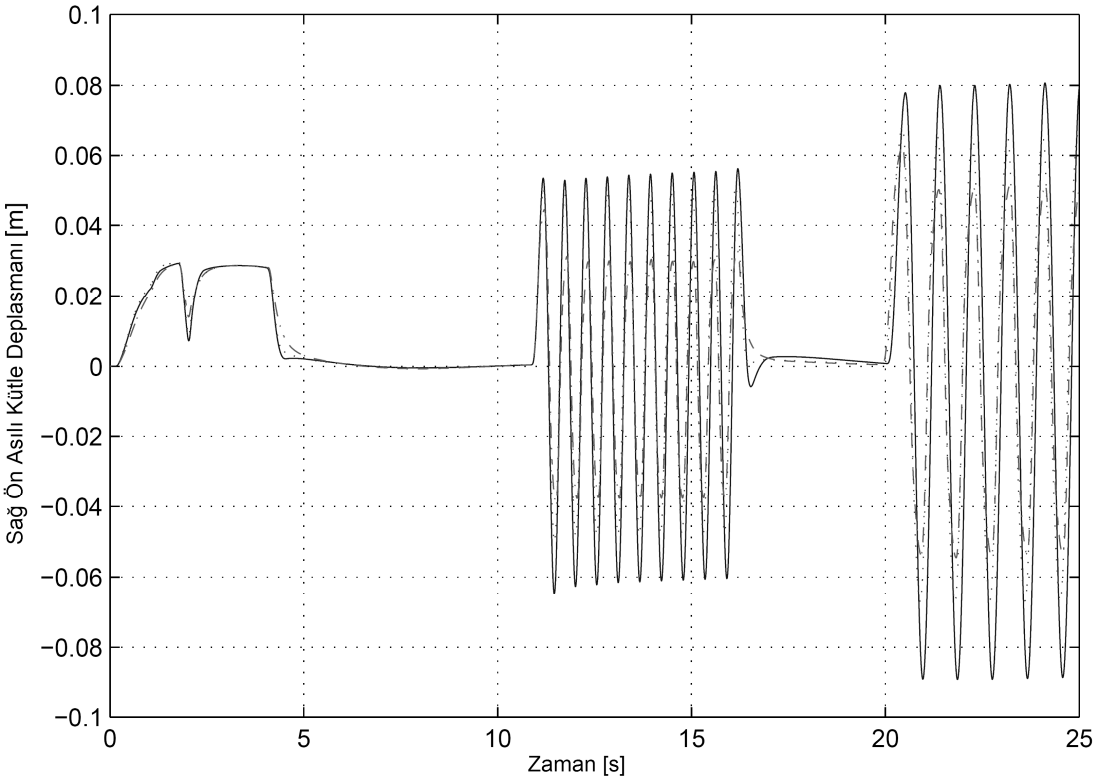
Son olarak, sürüş sırasında aracın durumu ve yapacağı manevralar belirlenir. Yapılan testler 20 ila 40 km/s sabit hızda gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 6.11-6.14, 30 km/s sabit hızda yapılan, 0.01 m genliğe sahip engellere sahip bir yolda gerçekleştirilen CARMAKER™ benzetim sonucunu göstermektedir. Bu simülasyonda 0.5 β katsayısına sahip Hibrid kontrolcü, Skyhook ve pasif süspansiyon test edilmiştir. Şekil gövde deplasmanını göstermektedir.

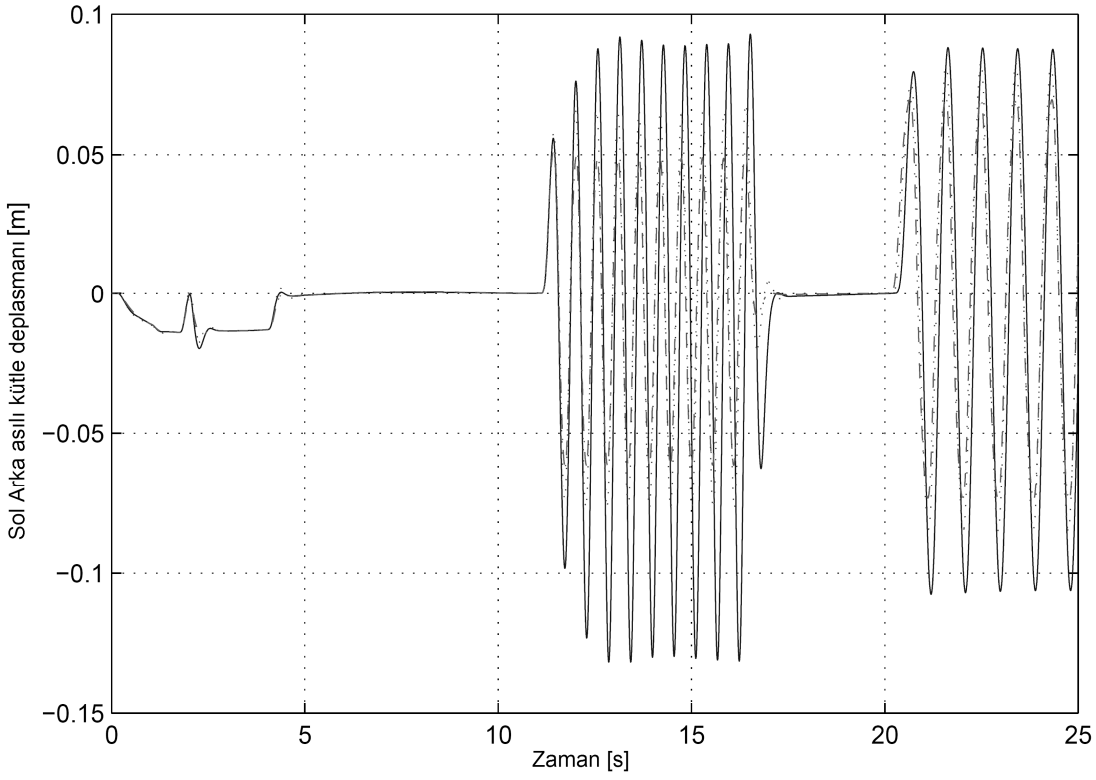
Gövde deplasmanında en iyi sonucu Skyhook, sonrasında Hibrid vermektedir.



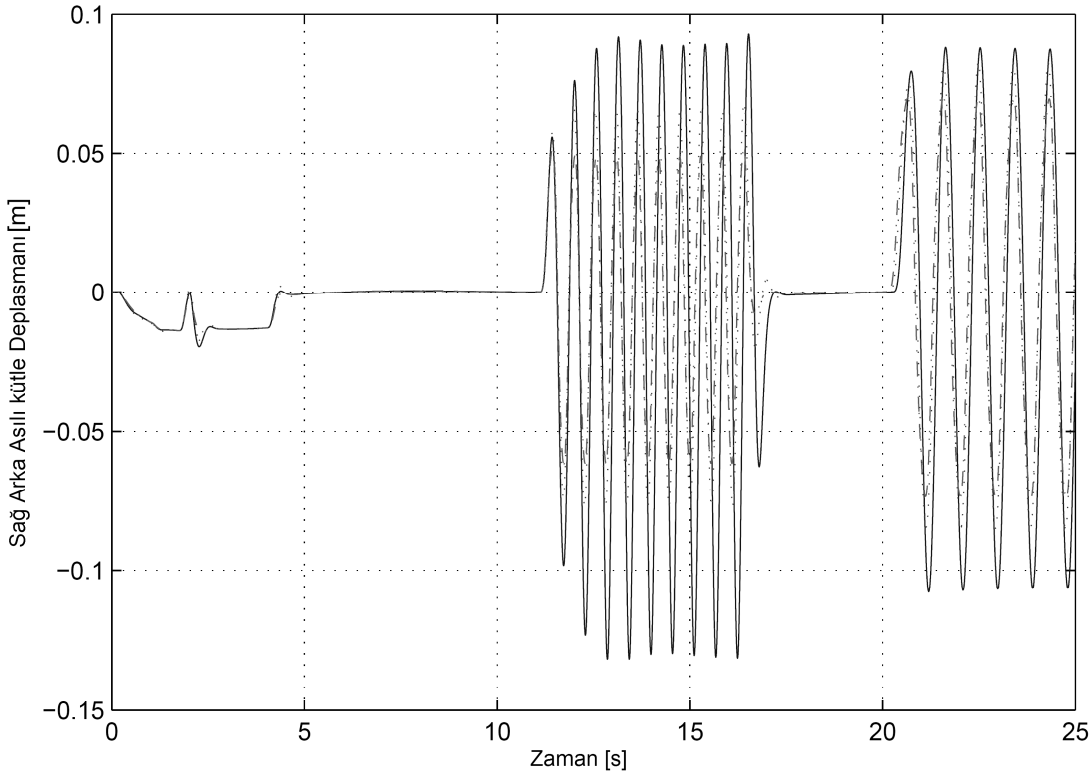
Şekil 6.11: Sol ön asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.12: Sağ ön asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu



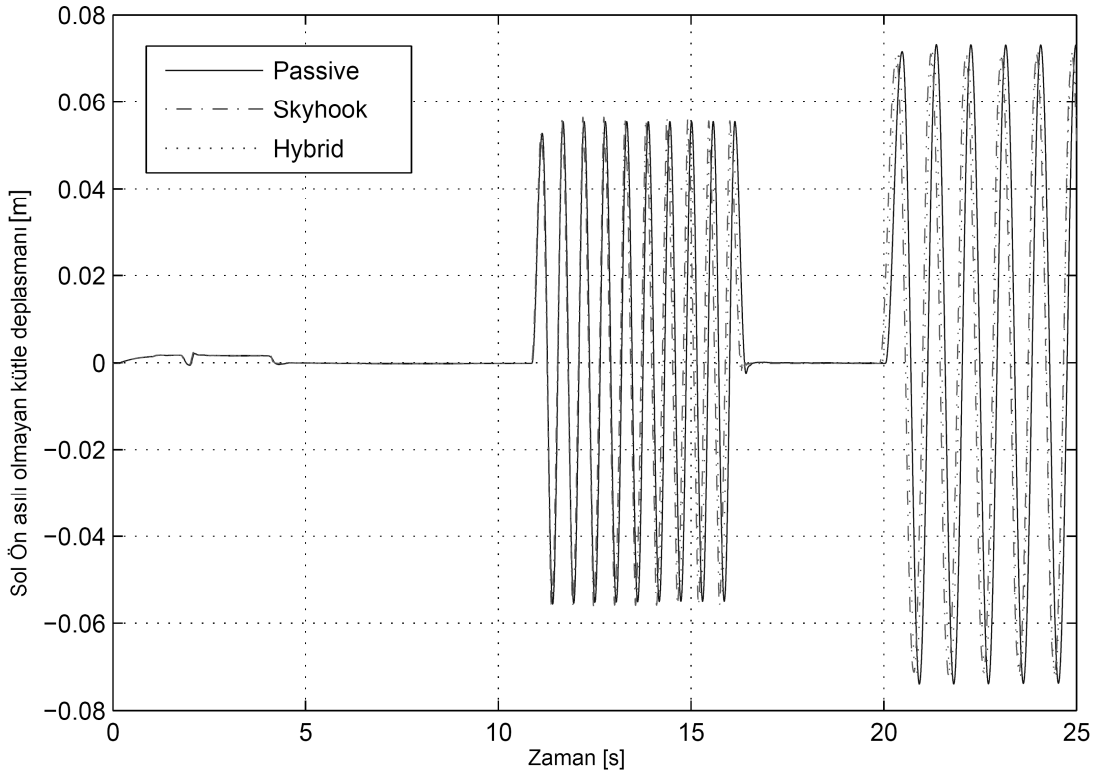
Şekil 6.13: Sol arka asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu



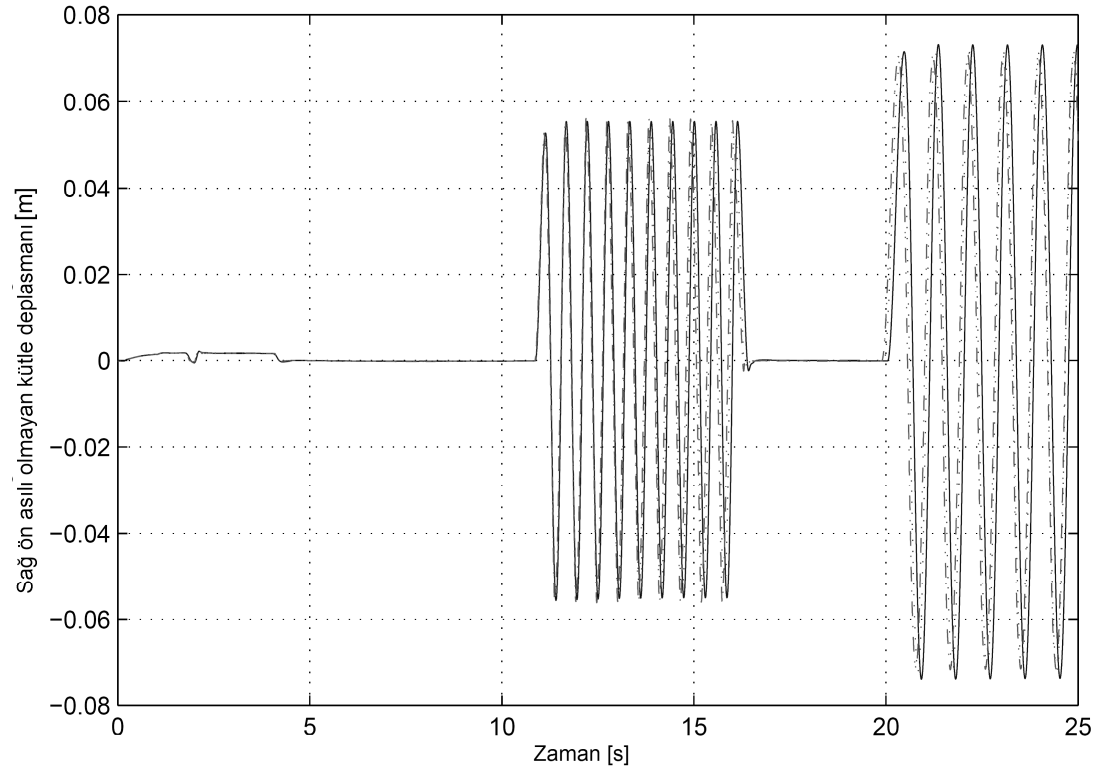
Şekil 6.14: Sağ arka asılı kütle deplasmanı için CARMAKER™ simülasyonu

Şekil 6.15-6.18 yukarıdaki benzetimin asılı olmayan kütle deplasmanı için olan sonuçlarını vermektedir. Sonuçlar asılı kütle deplasmanı kadar belli olmasa da, zirve noktalarında Hibrid'in Skyhook'dan daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu da Hibrid kontrolün optimize edilmiş olduğunu doğrulamaktadır.

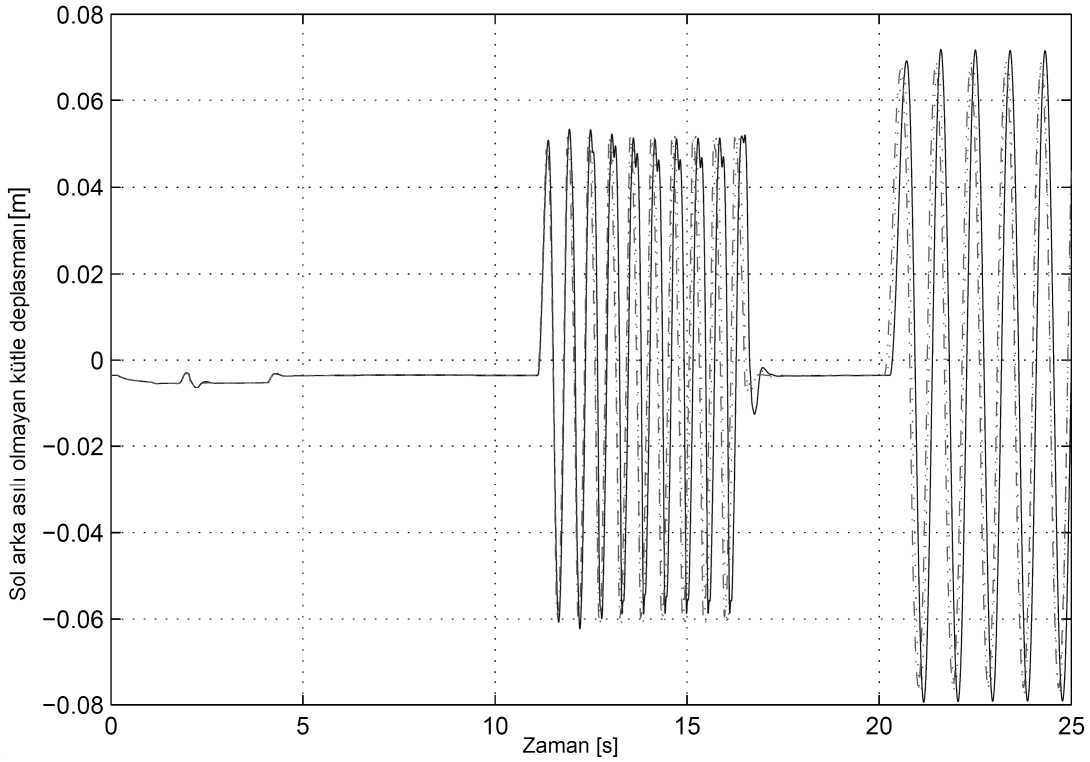
Aracın her dört çeyreğinde de, asılı olmayan kütle deplasmanında azalma vardır.



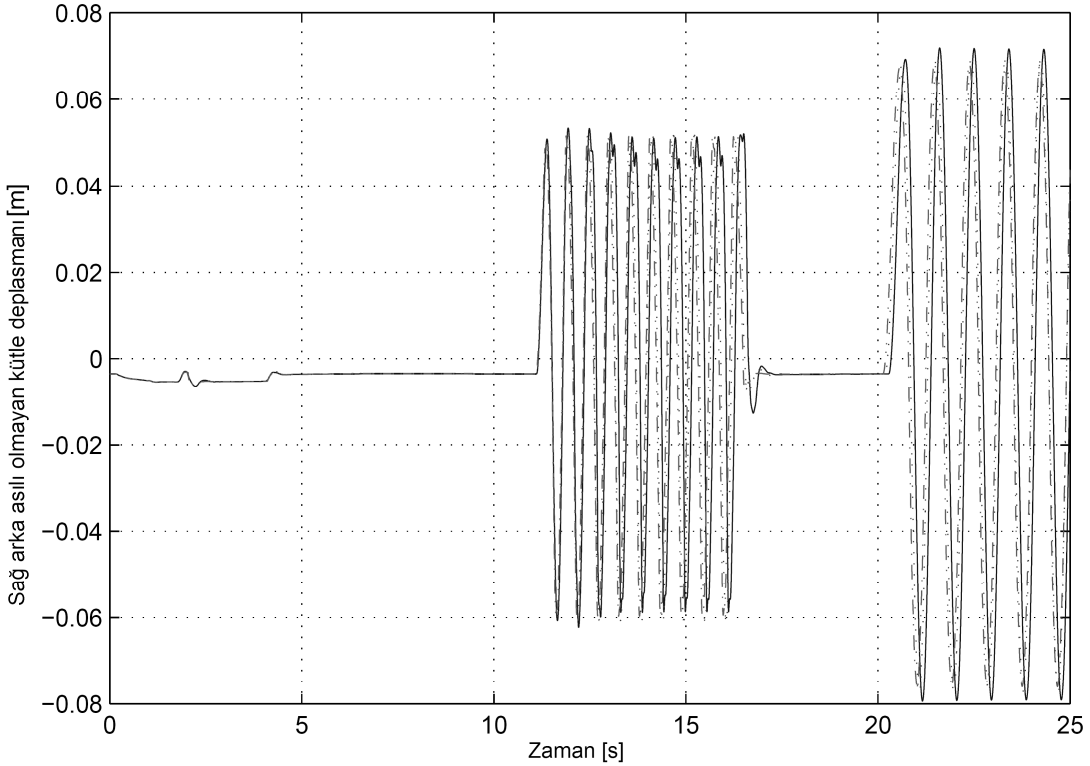
Şekil 6.15: Sol ön asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.16: Sağ ön asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.17: Sol arka asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu



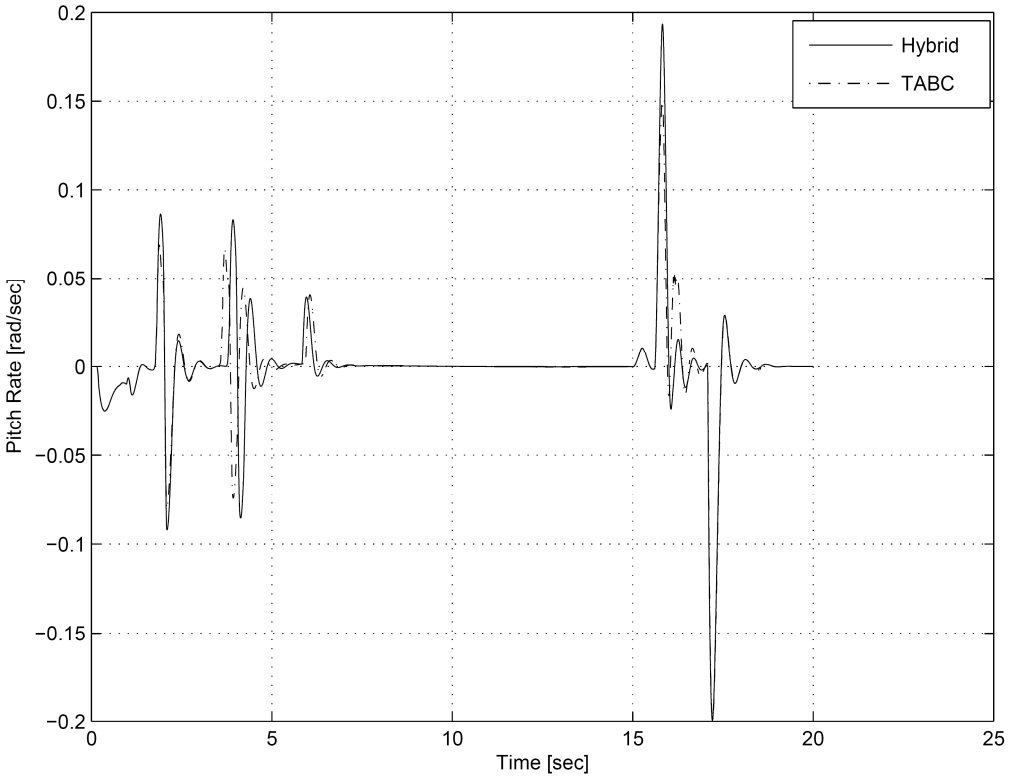
Şekil 6.18: Sağ arka asılı olmayan kütle için CARMAKER™ simülasyonu

5.bölümde anlatılan TABC algoritması da CARMAKER™ ortamında test edilmiştir. Aracın tüm şasi hareketlerini ele alan bu algoritma çeyrek araç modelinde test edilemeyeceği için, CARMAKER™ ideal bir test ortamı olmuştur.

Şekil 6.19, Hibrid algoritmasıyla TABC algoritmasının ani frenleme manevrası için yunuslama açısal hızı bakımından karşılaştırılmasını göstermektedir.

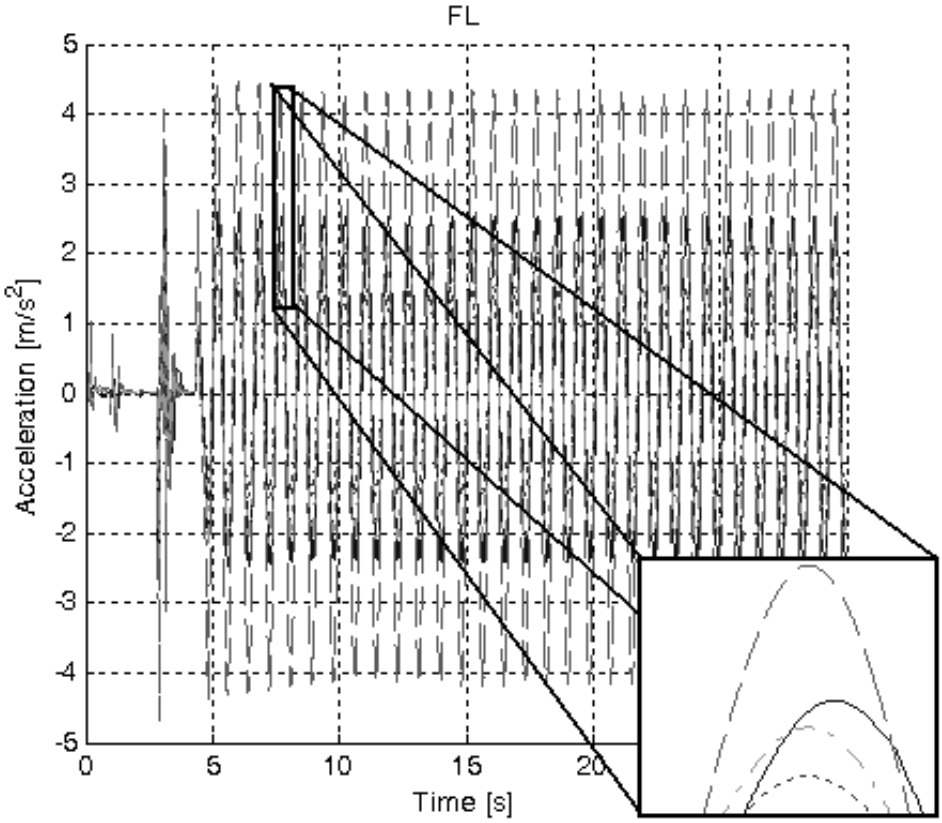
Görüldüğü gibi TABC algoritması Hibrid algoritmasına nazaran büyük bir azalma sağlamaktadır.

Yarı aktif süspansiyon sistemi, gövde ve tekerlek arasındaki bağıl hıza göre çalıştığı için bu bağıl hızın az olduğu yerlerde yeterli kuvvet sağlanamaması sebebiyle aktif gövde kontrolü uygulamalarında aktif süspansiyonlar kadar etkili olamamaktadır. Yapılan testlerde yalpalama hareketinde aracın her bir çeyreğinde bağıl hız az olduğu için yarı aktif süspansiyon sistemi en fazla pasif süspansiyona yakınsamaktadır. Ancak ani frenleme gibi yunuslama hareketinin fazla olduğu manevralarda ise bağıl hız artmakta bu sebepten gövde hareketleri daha etkili bir şekilde kontrol edilmektedir.

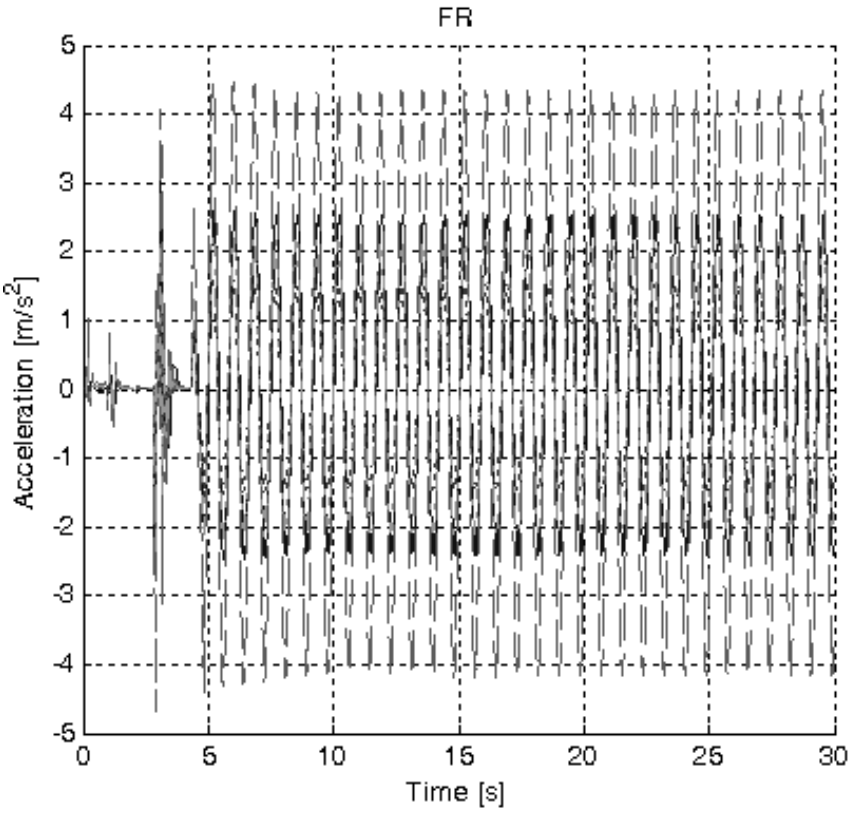


Şekil 6.19: TABC algoritmasının ani frenleme için CARMAKER™'da yapılan simülasyonu

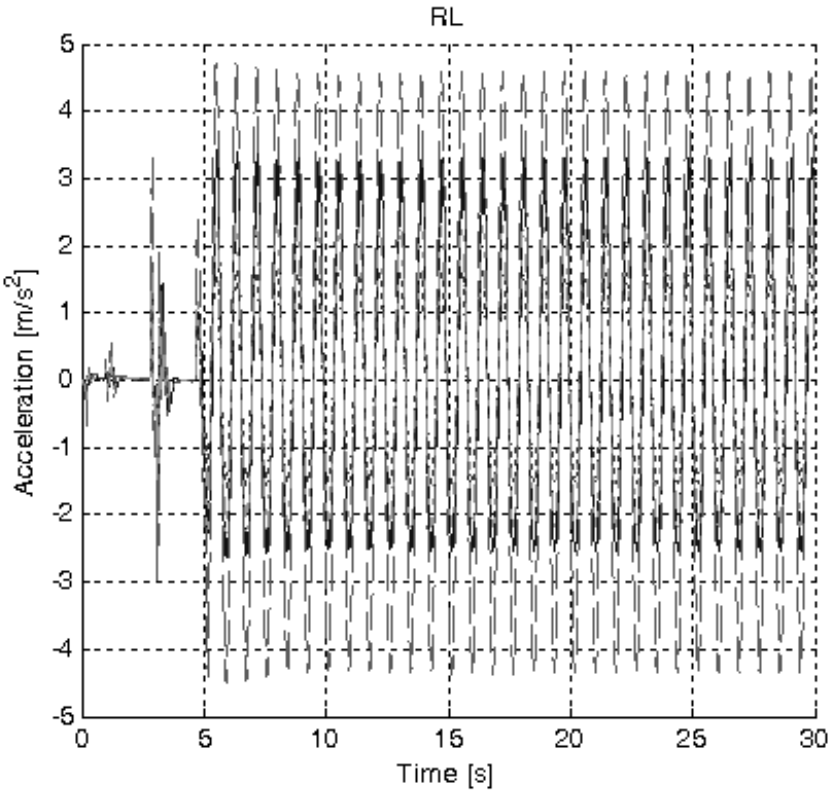
CARMAKER™ ortamında yapılan bir diğer benzetim ise daha değişik bir yol koşulunda yapılmıştır. Sonuçları Şekil 6.20-6.23'de görülen simülasyon sonuçlarında önceki sonuçlara benzer bir sonuç elde edilmiştir. Konfor özellikleri bakımından Skyhook daha iyiyken yol tutuş bakımında sırasıyla Groundhook ve Hibrid algoritmaları öne geçmektedirler.



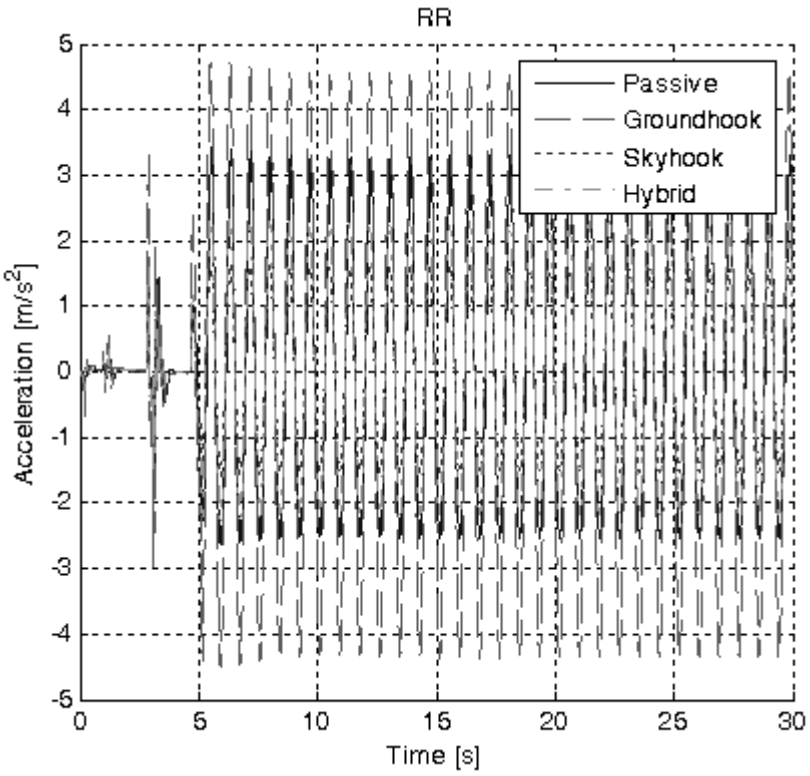
Şekil 6.20: Sol ön Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.21: Sağ ön Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.22: Sol arka Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu



Şekil 6.23: Sağ arka Asılı kütle ivmesi için CARMAKER™ simülasyonu

7. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN TEST EDİLECEĞİ PROTOTİP ARACIN TOPLANMASI VE MODİFİYE EDİLMESİ

7.1 Giriş

Yarı-aktif süspansiyon sisteminin test edileceği prototip araçta, kontrol sisteminin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yazılımsal ve donanımsal bir altyapı oluşturmak gerekmektedir. Bu altyapı, aracın gerek sensör gerekse eyleyici bileşenlerini içermekte aynı zamanda sistemin kontrolünü sağlayacak algoritmanın gerçekleştirilebileceği yazılımsal bir zemin oluşturmalıdır. Bu çerçevede bu tür bir prototiplendirme için en uygun sistem dSPACE/MicroAutobox olarak belirlenmiştir. Bu yapı hızlı prototiplendirme özelliği ve MATLAB/SİMULİNK™ uyumu ile gerçek zamanlı kontrol uygulaması için istenilen sistemin gerçekleştirilmesinde son derece kolaylık sağlamaktadır.

Bunun yanında, yarı-aktif süspansiyon sisteminin, gereksinim duyduğu ciddi bir sensör altyapısı bulunmaktadır. Kontrol algoritmalarının ihtiyaç duyduğu büyüklüklerin gerçek zamanlı olarak ölçümü yapılıp, değerlendirilip, gerekli kontrol sinyallerinin oluşturulması için gene bu sistemin uygunluğu vurgulanmalıdır.

Sistemin önemli bir parçası da, yarı-aktif sönümleyicilerdir. Her ne kadar birkaç alternatifi bulunan bir donanım olsa da burada, araca konstrüktif olarak uygunluk, damperlerin araç üzerine kolay montajı, ve diğer süspansiyon aksamları ile olan uyumluluğu başlıca seçim kriteri olmuştur. Bu nedenle seçilen sönümleyiciler, konstruktif olarak, Ford Transit Connect aracının üzerindeki pasif sönümleyicilere en yakın olan modelden seçilmiştir.

Bir başka önemli unsur da aracın mevcut sensör altyapısından faydalanabilmektir. Her ne kadar araç üzerinde süspansiyon sistemini direk ilgilendiren bir sensör yapısı bulunmasa da, araç hızı, fren ve gaz pedalı konumları bilgileri, üst kontrolcü yapısından dolayı, kontrol sisteminin içine dahil edilmesi gereken büyüklüklerdendir.

Bu bölümde Yarı-aktif Süspansiyon Sistemi'nin gereksinim duyduğu donanımsal altyapı ve bunun araç üzerinde oluşturulması işleminden bahsedilecektir. Kontrol yapısının bu alt yapı üzerinde oluşturulması ise bir sonraki bölümde incelenecektir.

7.2 Yarı Aktif Süspansiyon Sistemi sensör altyapısı

Yarı-aktif süspansiyon sisteminin gereksinim duyduğu fiziksel büyüklükler, her tekerlekteki asılı ve asılı olmayan kütle hızlarıdır. Bu hızların ölçülebilmesi için süspansiyonun bağlı olduğu noktalarda, gövde ve şasi hizasına ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Gövdenin ve tekerleklerin dört köşedeki hızlarının hesaplanmasında bu ivmeölçerlerden faydalanılacaktır.

İvmeölçerlerin yanı sıra aracın gövde ve tekerlek arasındaki mesafeyi ölçen lineer potansiyometreler de kullanılmıştır. Bu sayede gövdenin yöneliminin hesaplanması istenmiştir.

Aracın dikey yöndeki hareketlerinin yanı sıra aracın yanal hareketlerinin de bilinmesi aracın yalpa açısının kontrolünde gereklidir. Bu çerçevede, aracın ağırlık merkezine bir yanal ivme ölçer, bir savrulma açısal hız sensörü ve yunuslama açısal hız sensörü yerleştirilmiştir.

Sonuç olarak aracın üzerinde süspansiyon sistemi için:

- 9 adet ivmeölçer

- 4 adet lineer potansiyometre

- 1 adet savrulma açısal hız sensörü

- 1 adet yunuslama açısal hız sensörü

eklenmiştir. Bunun yanı sıra araçta,

-Gaz Pedalı Konumu

-Fren Pedalı Konumu

-Araç Hızı

Bilgileri okunmaktadır. Bu bilgilerin üst seviyeli kontrolün geliştirilmesinde

gerekeceği belirtilmelidir.

7.2.1 İvmeölçerler

Araç üzerinde bulunan dokuz adet ivmeölçer, Crossbow CXL10LP1 – R model olup ±10 g ölçüm aralığı bulunmaktadır. Sensör girişi regüleli olduğundan 8 ila 30 V

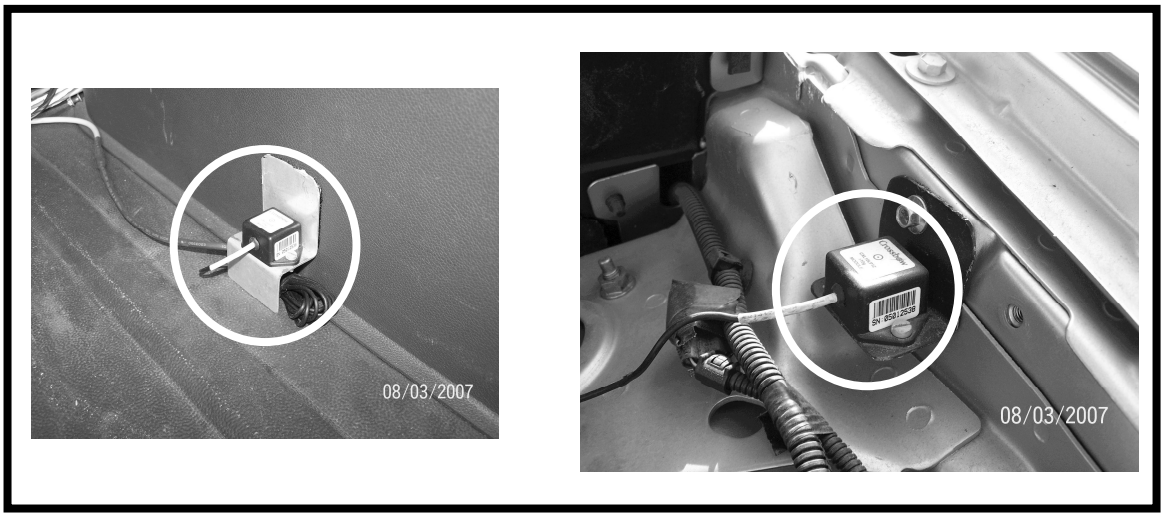
arasında besleme voltajı uygulanabilmektedir. İvmeölçere ait bir resim Şekil 7.1' de görülmektedir. Sensörün band genişliği 100 Hz kadardır. İvmeölçer sensörün en önemli özelliği DC özellikte olmasıdır. Yani sensör hareketsiz durumda da çıkış üretebilmektedir. Bu durumda 0 g çıkışı yaklaşık 2.5 V kadardır. Çözünürlüğü ise 0.2 V/g' dir. Bu durumda sensör hareketsiz halde 2.7 V civarında bir çıkış vermektedir [18].

Yanal ivme için kullanılan ivmeölçerin montajı yapılırken ekseni aracın yanal ekseni ile çakıştırıldığından, sensörün hareketsiz durumunda 0 g yani 2.5 V okunmaktadır.



Şekil 7.1: Prototip araçta kullanılan Crossbow ivmeölçerler

İvmeölçerlerin araç üzerinde yerleri, aracın dört köşesinde gövde ve aks üzerinde tekerlek hizasında, ölçüm eksenleri yere dik olacak şekilde ve mümkün olan en düz noktaya koyulacak şekilde seçilmiştir. Gövde ivmeölçerleri, ön tarafta süspansiyon üst noktası hizasına bir braket yardımı ile monte edilmiştir. Arka gövde ivmeölçerleri ise zemine, süspansiyon hizasında monte edilmiştir. Alt ivmeölçerler ise arka tarafta, aks üzerine kaynatılan bir braket ile sabitlenmiştir. Ön aksda ise tekerlek hizasına montajı yapılmıştır. Yanal ivmeölçer ise, aracın ağırlık merkezine yakın bir noktaya, yapılan bir braket ile savrulma açısal hız sensörü ile beraber bağlanmıştır. Şekil 7.2' de ivmeölçerlerin araç üzerindeki yerleri görülmektedir.



Şekil 7.2: İvmeölçerlerin araç üzerindeki yerleri (Ön ve arka gövde ivmeölçerleri)

Araç üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin yere göre dikliği ölçülmüş ve braketler ona göre düzenlenmiştir. Bunun sebebi en ideal düşey ivme ölçümü için ivmeölçerlerin yer ile olan açılarının 90 dereceye mümkün olduğu kadar yakın olması gerektiğidir.

7.2.2 Lineer Potansiyometreler

Lineer potansiyometreler aracın dört köşesinde asılı ve asılı olmayan kütleler arasına monte edilmiştir. Bu sensörler ile aracın dört köşesinde tekerlek ve gövde arasındaki mesafeler ölçülecektir. Bu sensörün de regüleli bir beslemesi bulunmaktadır. Sensör maksimum ve minimum noktaları arasında 0-5 V arasında lineer değişen bir çıkış vermektedir. Penny Giles SLS 190 Lineer Potansiyometre Şekil 7.3' de görülmektedir [17]. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de ise Lineer potansiyometrelerin araç üzerindeki konumları görülmektedir.

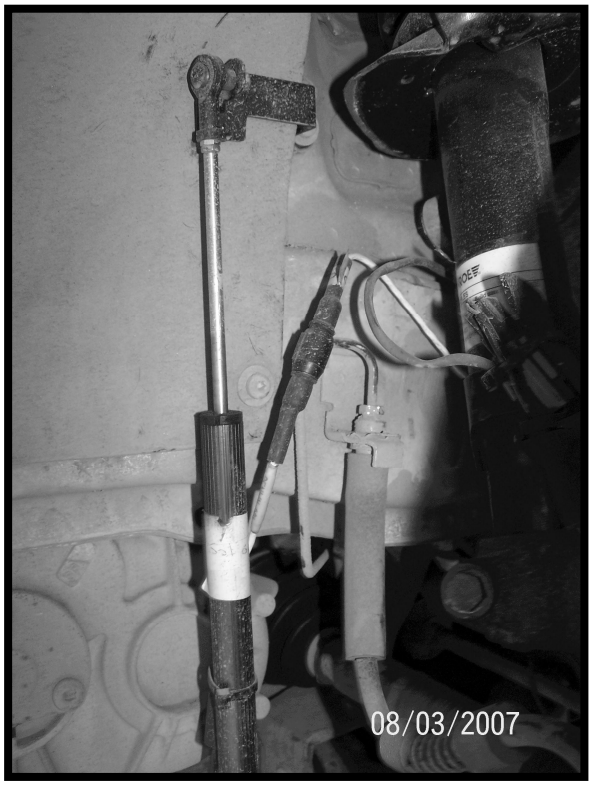


Şekil 7.3: Lineer potansiyometre

Lineer Potansiyometreler, 2.fazda ivmeölçer sinyallerini ve Kalman filtresi çıkışlarını doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Ancak asılı ve asılı olmayan kütle arasındaki düşey deplasmanın tam olarak ölçülebilmesi için lineer potansiyometrenin sadece düşeyde hareket etmesi gerekmektedir. Bu amaçla lineer potansiyometrelerin montajının düzgün olması gerekir.



Şekil 7.4: Arka lineer potansiyometrenin araç üzerindeki yeri



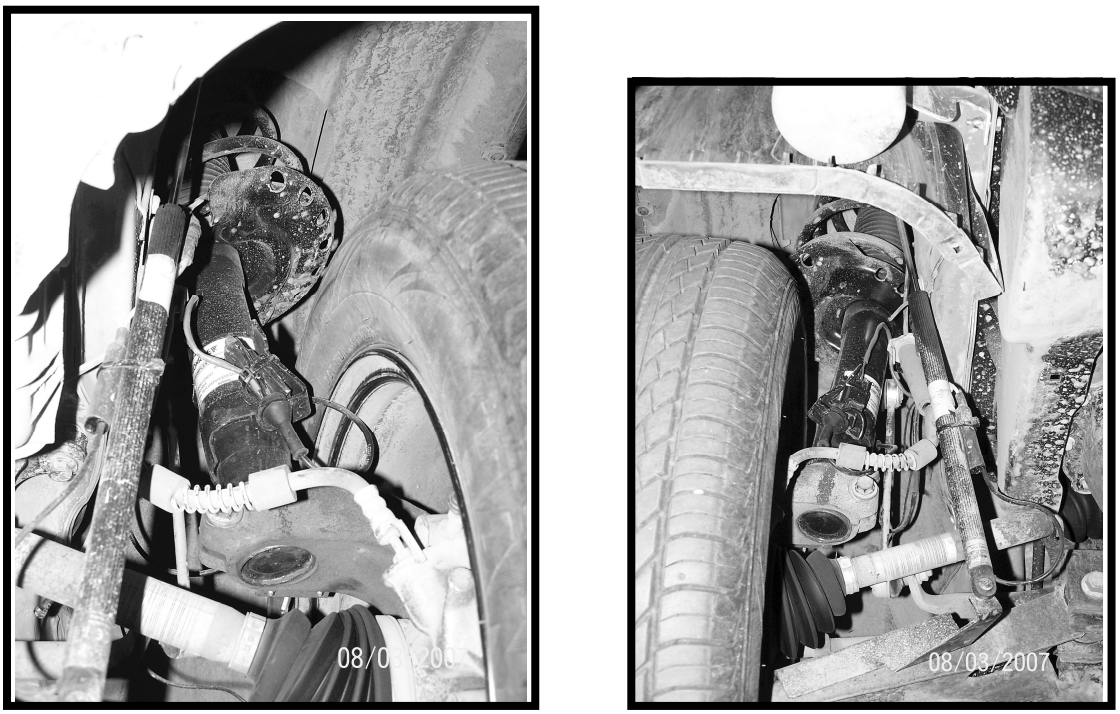
Şekil 7.5: Ön lineer potansiyometrenin araç üzerindeki yeri

7.2.3 Yarı aktif süspansiyon sönümleyici donanımı

Araç üzerinde 4 adet yarı aktif sönümleyici bulunmaktadır. Bu sönümleyiciler CVD tipinde olup 0.3 – 1.6 A akım değerleri arasında sönümleme özellikleri değiştirilebilmektedir. Çalışmada Tenneco firmasına sönümleyiciler kullanılmıştır [19]. Damperlerin üzerinde +/- olmak üzere ikili bir konnektör bulunmaktadır. Yarı-aktif bu sönümleyicilerin araç üzerine yerleştirilmiş hali Şekil 6.6'de görülmektedir.

Sönümleyicilerin önemli bir özelliği doğrudan akım değerleri ile değil PWM (Pulse Width Modulation) sinyali ile sürülmelidir. İleride dSPACE/RapidPro bölümünde daha detaylı olarak anlatılacağı üzere, Sönümleyiciler RapidPro ünitesinin PWM çıkış veren uçlarına bağlanmış ve istenen akım değerleri PWM sinyalinde ilgili büyüklükler değiştirilerek elde edilmektedir.

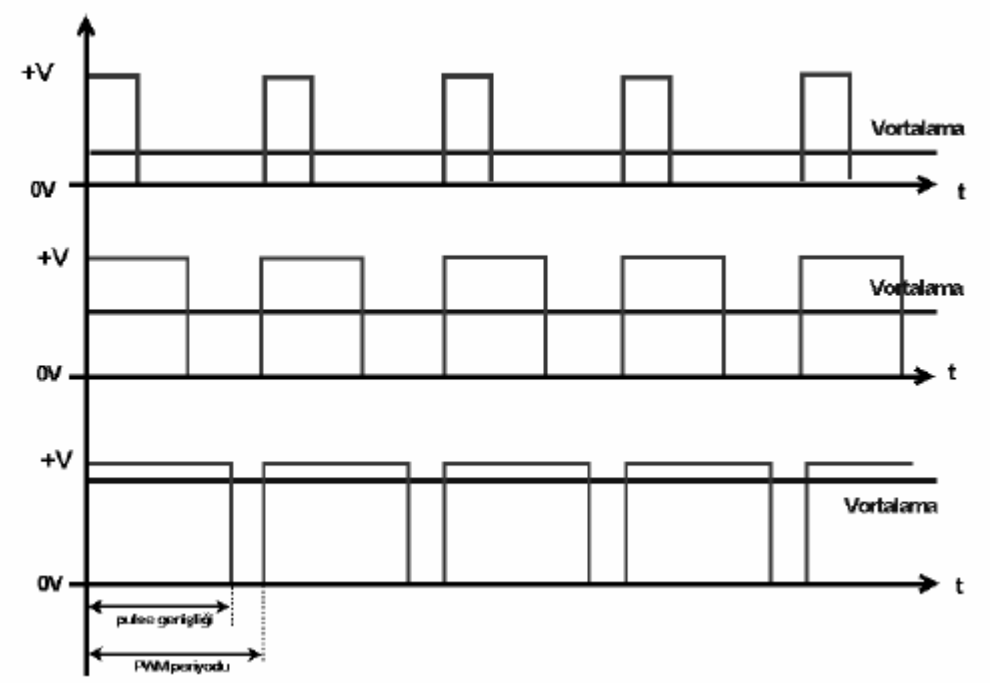
PWM sinyali, sabit bir periyotta yani sabit bir pulse genişliğinde, sinyalin 1 veya 0 aldığı zamanın değiştirilmesi ile ortalamada istenen sinyalin elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 7.7'de PWM sinyalinin zaman eksenindeki görünümü ve karakteristik özellikleri görülmektedir. Buna göre sabit frekanslı bir PWM'in Pals genişliği (Pulse Width/Duty Cycle) değiştirilerek ortalamada istenen genlikte bir sinyal elde edilebilmektedir.



Şekil 7.6:Ön CVD'nin araç üzerindeki bağlantı yerleri

PWM sinyali ile sürülen damperlerde, duty-cycle belli değerler arasında değiştirilerek 0.3 ve 1.6 A arasında bir akım değeri elde edilmektedir.

Sönümleyicilerin 0.3 A ve 1.6 A arasında değişen bir akım girişi bulunmaktadır. Ancak akımın 0 olması Sönümleyicinin ortalama bir kuvvet eğrisi üzerinde çalışmasına neden olur. Sönümleyicinin özelliğinden kaynaklanan bu durumun nedeni kontrol sisteminde bir hata olması durumunda, damperlerin ortalama pasif değerde ne çok yumuşak ne de çok sert halde çalışmasını sağlamaktır.



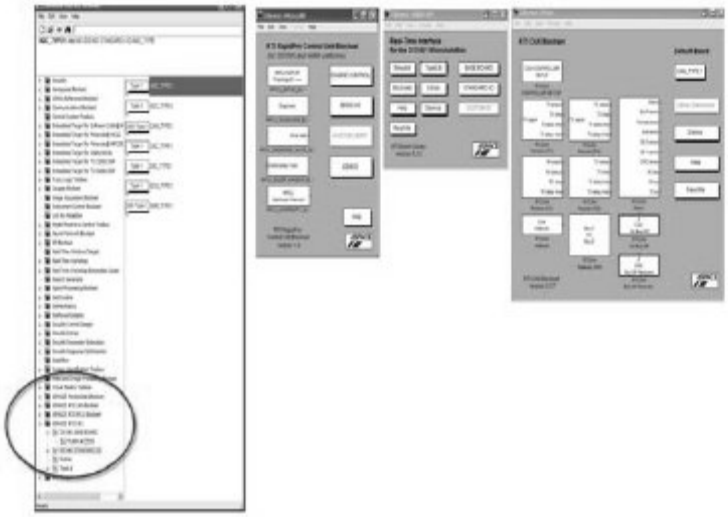
Şekil 7.7: PWM sinyalinin genel görünüşü

Sönümleyicilerin Ford Transit Connect aracına monte edilmesi sırasında sönümleyiciler üzerinde bazı konstrüktif değişikliklere gidilmiştir. Örneğin arka sönümleyicinin aracın şasisine uyumla hale gelmesi için üst bağlantı burcu, mevcut pasif süspansiyonun burcu ile değiştirilmiştir. Bunun dışında ön sönümleyicilerin bağlantı noktaları uyumlu olmasına rağmen, ön helezon yay, yeni sönümleyicinin tablasına tam olarak oturmamaktadır. Bu nedenle, aracın ön helezon yayları, imalatçı firmaya, yeni sönümleyicilere uygun şekilde yeniden imal ettirilmiştir.

7.3 Dspace donanımları

Aracın sensör okuma ve kontrol sinyallerinin oluşturulması dSPACE sistemi tarafından gerçekleştirilmektedir. Öncelikler bu sistemde kullanılan dSPACE sistemi iki ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar DS1401 ya da daha genel tanımı ile Microautobox ve RapidPro üniteleridir. Bu ünitelerden MicroAutoBox'ın, üzerinde ADC, DAC, CAN, Serial gibi çeşitli I/O lar bulunmakta ve gerek okuma gerekse sinyal üretme konsunda son derece geniş bir seçenek sunmaktadır. Bunun yanında RTIlib (Real Time Interface Library) sayesinde de özellkle MATLAB/Simulink™ altında kontrol edilebilir bir hale gelmiş ve hızlı prototip oluşturma oldukça kolaylaşmıştır. Şekil 7.8'de Simulink'de bulunan dSPACE kütüphaneleri görülmektedir. RapidPro ünitesi ise içinde değiştirilebilir modüller bulunan bir DSP (Digital Signal Processing) ve kontrol ünitesidir. Üzerinde MOTOROLA MPC 565 bir

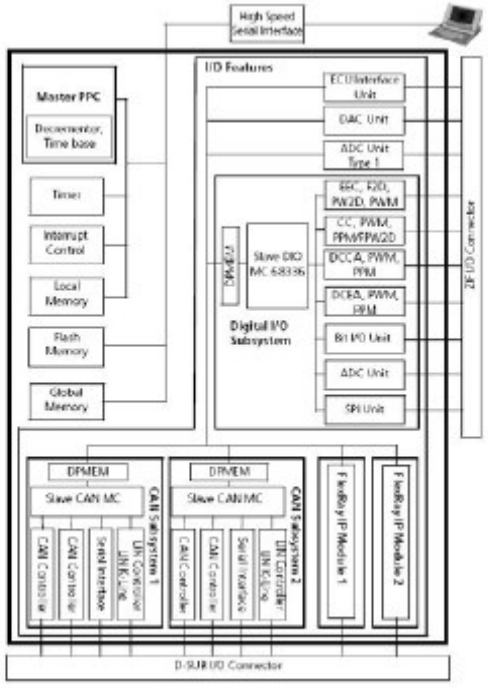
işlemci bulunan ünite, hem sensör beslemesi oluşturmak, hem de ADC sayılarını artırmak için kullanılırken, ayrıca damperleri süren PWM sinyallerini oluşturan modüllerde RapidPro üzerindedir. [16]



Şekil 7.8: dSpace-RTlib kütüphaneleri

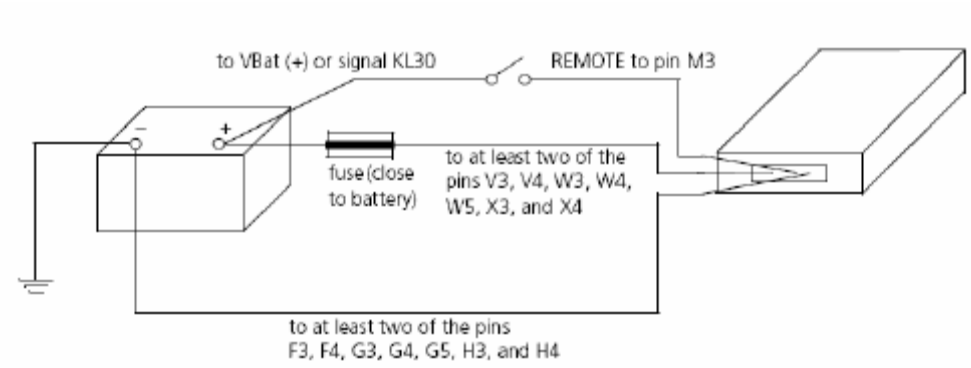
7.3.1 dSpace DS1401 MicroAutoBox

Modülün genel yapısı Şekil 7.9'da görülmekte olup sistemin I/O konnektörünün pinoutu EK-D bölümünde verilmiştir. MicroAutoBox üzerinde 0-5 V aralığında 12 bitlik 16 kanal ADC (Analog Digital Converter) bulunmakta, bunun yanında 8 adet DAC çıkışı, bir dual CAN kanalı, bir adet RS232 ara yüzü, ve çeşitli I/O kanalları (16 giriş ve 10 çıkış) bulunmaktadır.



Şekil 7.9: MicroAutobox genel yapısı

MicroAutoBox'ın güç girişi 6..40 V arası regülelidir. Ancak kurulan sistemde MABX araç aküsüne (12 V), tüm sistemi açma kapamaya yarayan güç kutusu aracılığı ile bağlıdır. Ayrıca bu kutuda, 10 A'lik bir sigorta da bulunmaktadır. Sistemin bağlantı şeması Şekil 7.10' da görülmektedir.



Şekil 7.10: Akü-MABX bağlantı şeması

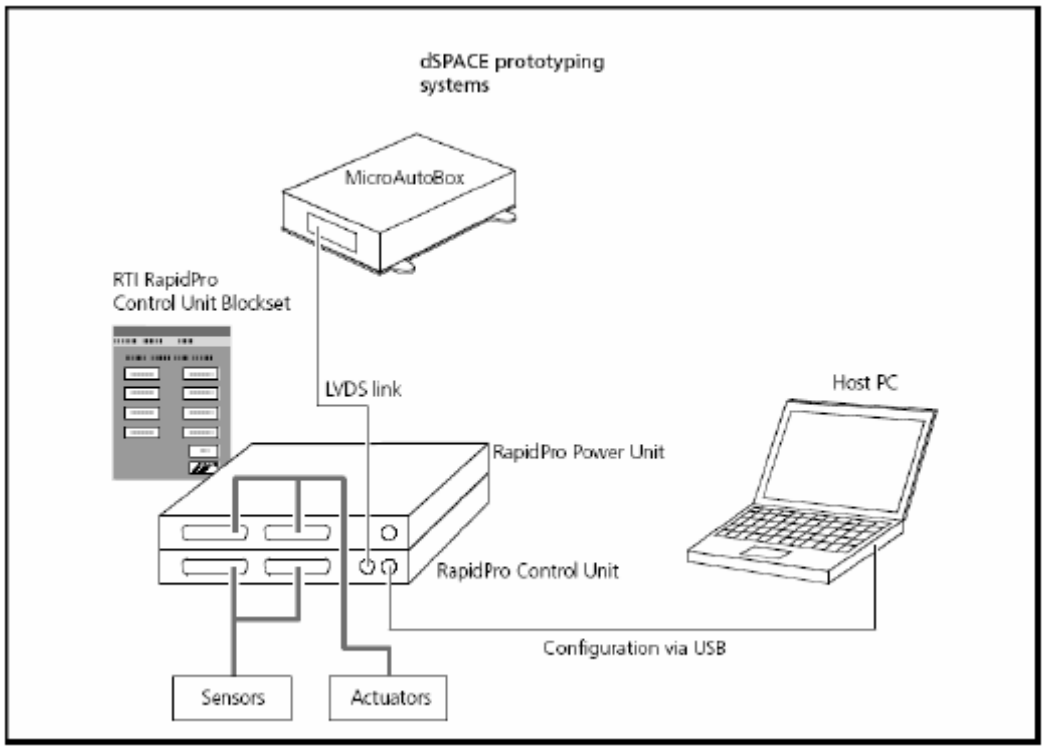
MABX üzerindeki ADC lerden bir kısmı, yarı-aktif süspansiyon ile ilgili sensörlerden bazıları için kullanılmaktadır. Araç üzerindeki ivmeölçerlerin tümü, savrulma açısal hız sensörü,yunuslama açısal hız sensörü, lineer potansiyometreler MABX üzerindeki ADC lere bağlanmıştır.

MABX ADC' leri 4 konverterde (con.) 4 kanal olmak üzere toplam 16 adettir. Yukarıda belirtilen tüm sensörler single ended olarak sinyal uçları MABX'a toprak uçları da ortaklanarak MABX'ın ortak toprak hattına bağlanmıştır. Sensörlerin beslemeleri RapidPro ünitesinden alınmaktadır.

7.3.2 dSpace RapidPro

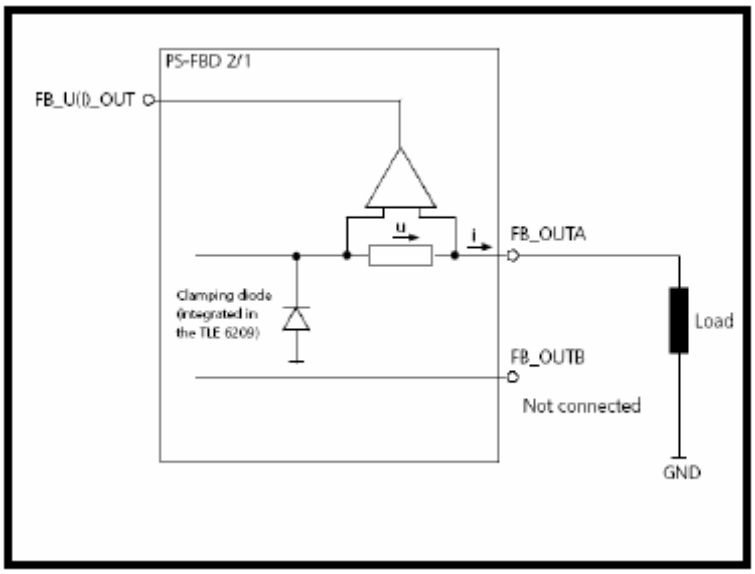
RapidPro ünitesi, üzerinde modüler bir şekilde bulunan besleme, I/O ve sürücü kartları ile MABX'ı tamamlayıcı niteliktedir. İki ürün de birbirleri ile koordineli şekilde çalışmakta ve bir LVDS (yüksek hızlı seri iletişim) kablosu ile birbirine bağlıdır. Donanımın genel görünümü Şekil 7.11'de verilmiştir.

Ünitenin sensör beslemeleri ve ADC' leri Kontrol Ünitesinde (Control Unit) bulunurken, damper sürme işlemi için Güç Ünitesi (Power Unit) kullanılmaktadır. Control Unit üzerinde toplam 4 kanalda, 16 adet diferansiyel ADC, dolayısı ile 32 adet ADC sinyal girişi bulunmaktadır. Bunun dışında PWM sürücülerinin oluşturduğu akımın ölçülmesinde kullanılan 4 adet dedicated ADC daha bulunur.



Şekil 7.11: RapidPro MABX sensör bağlantı şeması

RapidPro üzerindeki, PWM sürücüleri Power Unit üzerinde bulunmakta olup 4 adettir. PS-FBD 2/1 Module adı vrilen bu modül, biri az önce bahsedilen dedicated ADC, bir FB_OUTA ve bir de FB_OUTB olmak üzere üçer sinyali barındıran 4 kanaldan meydana gelmektedir. Buradaki ADC kanalı ünitenin içerisinde olup, dolayısı ile ilgili bir pini bulunmamaktadır. PS-FBD 2/1 modülünü yarı-aktif sönümleyicilere bağlamak için önerilen konfigürasyon Şekil 7.12'de görülmektedir.



Şekil 7.12: PS-FBD 2/1-CVD bağlantı şeması

Buna göre modülün B portu boş bırakılırken A portu damperin + ucuna, damperin – ucu da RapidPro' nun toprağına bağlanmıştır.

Önemli bir not toprak hattı için verilemelidir: Sistemin (MABX, RapidPro, sensör besleme, sensör ADC-, damper, AKÜ vs.) tüm toprak hattı ortaklanmıştır.

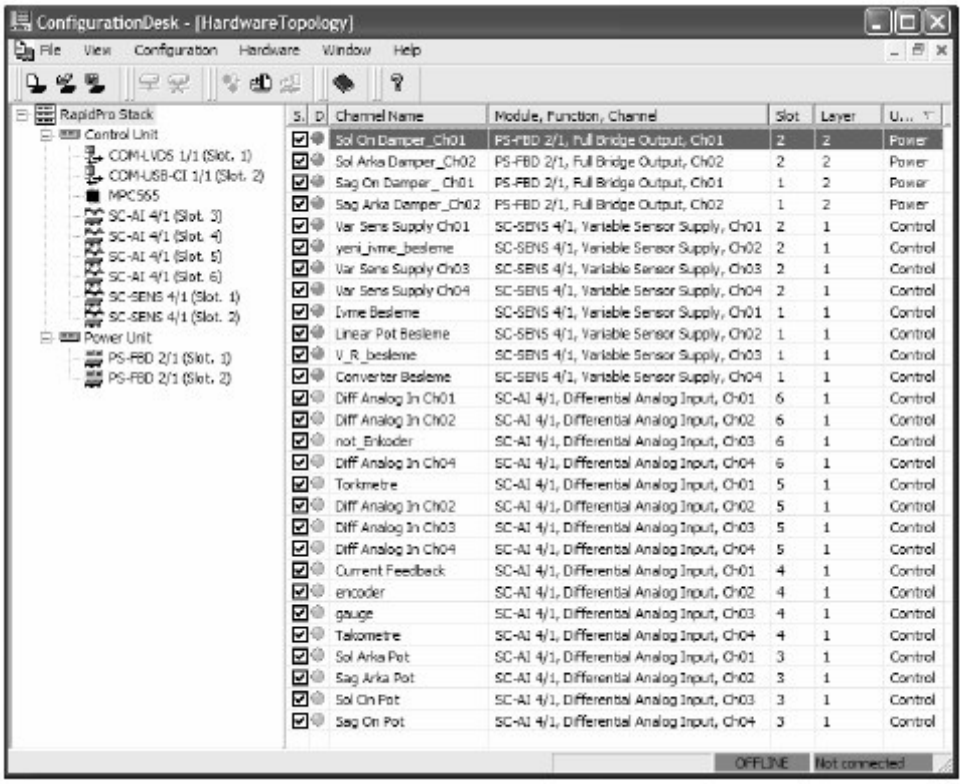
RapidPro üzerinde bulunan bir diğer bağlantı da sensör beslemeleridir. Sensör beslemeleri Control Unit üzerinden yapılmaktadır.

RapidPro sistemi ile belki de en önemli özellik, ADC kanallarının ya da sensör beslemelerinin yazılım ile değiştirilebilir olmasıdır. ConfigurationDesk adlı yazılım ile gerek ADC kanallarının giriş voltaj ayarlamaları gerekse, besleme voltajları ayarlanabilir özelliktedir.

7.3.3 RapidPro ve MABX yazılımları

Şekil 7.8'de görülmekte olan Simulink blok seti, MABX ve RapidPro donanımları ile Simulink modelleri arasında bir arayüz oluşturmaktadır. Örneğin, ADC bloğu modele eklenerek ve ilgili kanalın seçilmesi ile sensörden gelen verilerin modele eklenmesi sağlanmaktadır. Yine ilgili PWM bloğu ile istenen duty cycle ve PWM frekansı Simulink modeli üzerinden bloğa girilerek istenen değerler elde edilmektedir. Blockset içinde kullanılan bloklar bir sonraki bölümde, kurulan model anlatıldığında detaylı olarak incelenecektir.

RapidPro ile ilgili bir başka konfigürasyon yazılımı ConfigurationDesk[7] 'tir. Şekil 7.13'de bu yazılımın genel görünümü görülmektedir. ConfigurationDesk™ ile yapılan ayarlama az önce bahsedilen ADC ve besleme voltaj ayarlamalarıdır.



Şekil 7.13: Configuration Desk™ arayüzü

[7] ConfigurationDesk, Dspace firmasının ticari ürünüdür.

Sensör besleme kanalları 2..20V arasında ayarlanabilir mertebededir. ADC' ler ile ilgili ise, kanal girişi +/- 0.1V ile +/- 50V arasında değiştirilebilmektedir. Bunun yanında ADC girişine birinci dereceden alçak geçirgen bir filtre yerleştirilerek kesim frekansı 10Hz ile 1kHz arasında değiştirilebilmektedir.

Tam köprü çıkışında ise, PWM ile ilgili bazı parametreler ve akım ölçümünde kullanılan akım limiti, bu ADC' için kullanılan alçak geçirgen filtre'nin kesim frekansı gibi büyüklükler bulunmaktadır. Bu sinyalin konfigürasyon penceresi Şekil 7.14'de görülmektedir.

RapidPro ünitesi üzerindeki iki konnektör ile, ünite MABX' e (LVDS bağlantı ile) ve PC'ye (USB bağlantı ile) bağlanmaktadır. Bunun yanında ünitenin besleme ucları da gene sub-d konnektörde bulunan besleme noktalarına bağlanmaktadır. 12 V'luk bağlantı MABX' de olduğu gibi bir aküden alınmaktadır.



Şekil 7.14: Configuration Desk PWM çıkışı için konfigürasyon penceresi

7.4 Araçta yapılan donanımsal değişiklikler

Yarı aktif süspansiyon sisteminin içerdiği birçok sensörden ve kablolamada yapılan hatalardan dolayı sensör bağlantılarının düzenlenmesi için bir ara devre tasarlanmıştır. Ayrıca araç üzerindeki testlerde daha rahat çalışabilmek ve testleri daha hızlı ve etkili yapabilmek için dSpace birimleri daha uygun bir şekilde araç üzerinde paketlenmiştir.

7.4.1 Sensör bağlantılarının düzenlenmesi için PCB tasarlanması

Yarı aktif süspansiyon sistemi birçok farklı sensör içermektedir. Her bir sensörün farklı besleme voltaj değerleri ve kablolaması olduğu düşünüldüğünde sensör bağlantılarının düzenli olması gerektiği anlaşılır. Kablolamada ve bağlantılarda meydana gelebilecek bir aksaklığın erken biçimde fark edilmesi ve düzeltilmesi için düzgün bir bağlantı şemasının olması gerekir.

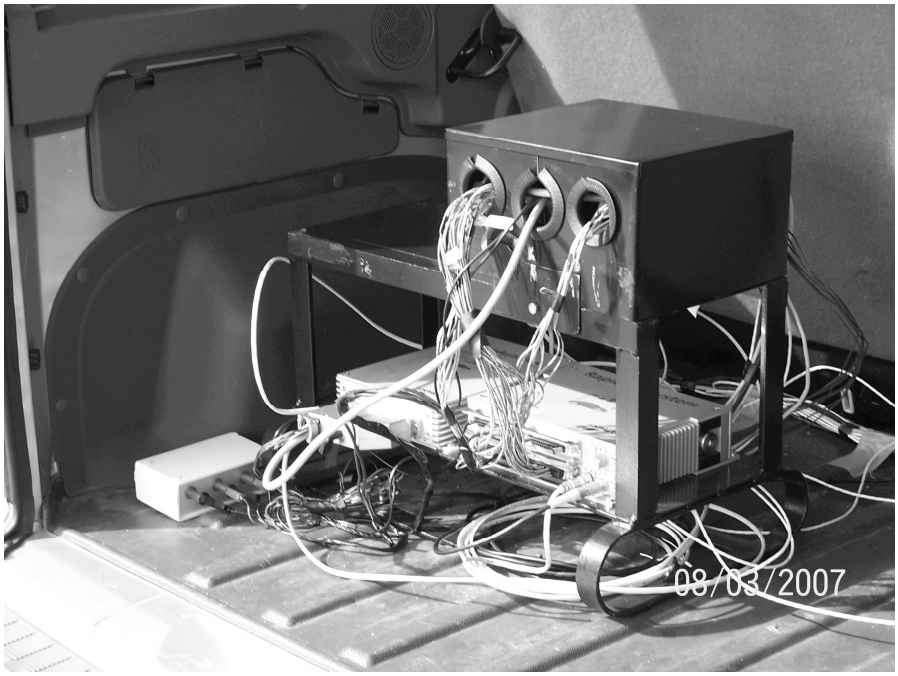
Bu amaçla dSpace birimleri RapidPro ve MABX ile sensör bağlantıları arasında bir ara PCB devresi oluşturulmuş. Bu devre bir ara devre teşkil eder ve sensör bağlantılarının beslemesi ve toprak bağlantısını dağıtır.

Ayrıca sensör bağlantıları yeniden düzenlenmiş ve tüm sensörler MABX ADC'lerini kullanacak şekilde ayarlanmıştır. Sadece 4 adet akım CVD akım kontrolcüsü RapidPro ADC'lerini kullanmaktadır.

7.4.2 dSpace birimlerinin araç üzerinde paketlenmesi

Araç üzerindeki testlerde kullanılan dSpace MABX ve RapidPro donanımlarının test süresince sarsıntılardan etkilenmemesi ve etkili bir şekilde çalışabilmesi araç üzerinde aracın arkasına bir çerçeve yerleştirilmiştir. PCB kartının da yerleştirildiği bu çerçeve kontrol donanımının daha düzenli olmasını ve aracın daha iyi bir görünüme sahip olmasını sağlamaktadır.

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16 aracın arkasına yerleştirilmiş çerçeveyi göstermektedir.



Şekil 7.15: dSpace ve PCB'nin araç üzerinde paketlenmesi 1



Şekil 7.16: dSpace ve PCB'nin araç üzerinde paketlenmesi 2

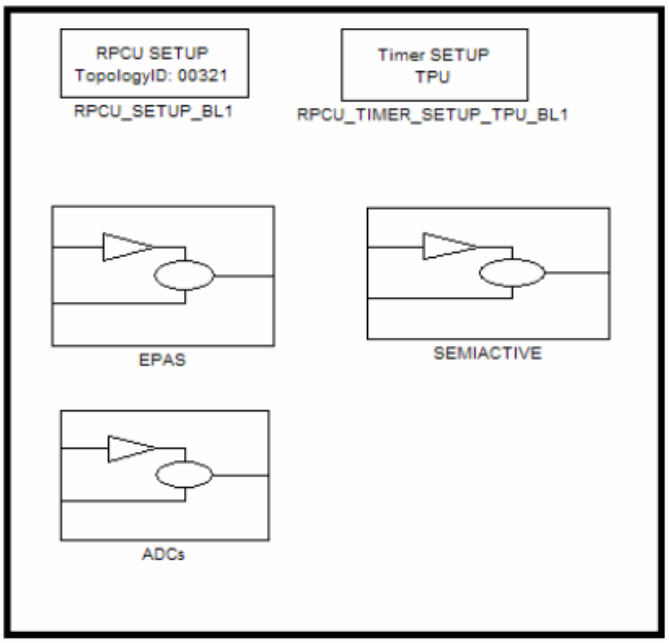
8. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNE AİT KONTROL MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

8.1 Giriş

Bu bölümde, araçta dSPACE üniteleri üzerinde gerçek zamanlı olarak çalışmakta olan Simulink modelinin daha detaylı incelemesi yapılacaktır. Öncelikle yarı-aktif süspansiyon sistemi üzerindeki sensör okuma ve beslemeleri, daha sonra bu sensör okumaları ile yapılan sinyal işleme işlemleri, ardından Bölüm 4'de verilen kontrolcülerin nasıl hayata geçirildiği anlatılacaktır. Ardından yapılan gerekli modifikasyonlar ile damperlere PWM sinyali ile akım gönderilmesi, ve bu akımın kapalı çevrim bir PI kontrol yapısı ile kontrol edilmesi bu bölümün konuları arasındadır.

8.2 Model konfigürasyonu

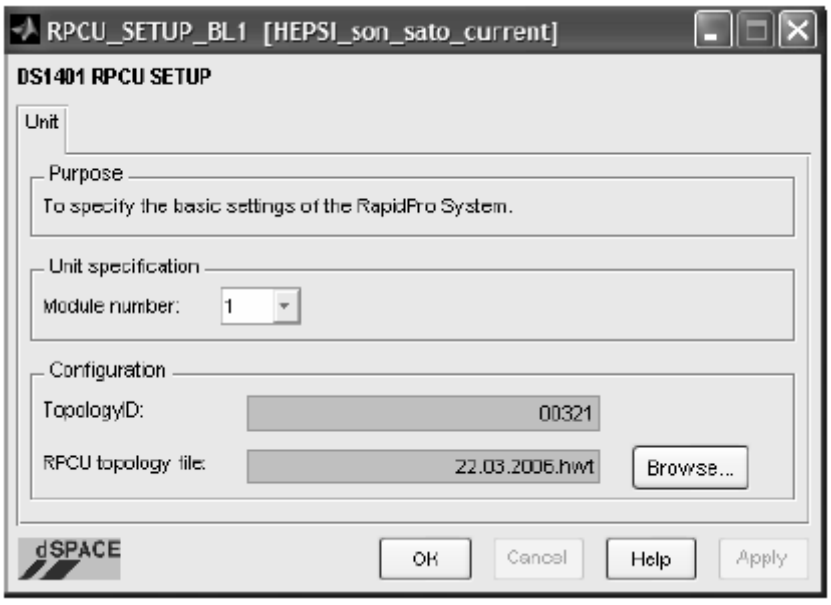
Yukarıda bahsedilen tüm bu işlemler tek bir Simulink™ modelinde birleştirilmiştir.



Şekil 8.1: Yarı aktif süspansiyon kontrol modelleri

Şekil 8.1' de araç üzerinde bulunan modelin en genel görünümü bulunmaktadır. Burada sensor okuma-sinyal işleme ve yarı aktif süspansiyon sistemi kontrolcülerine ait alt sistemler yeralmaktadır. Sistemin alt sistemlerinin yanı sıra, RapidPro ile ilgili iki adet konfigurasyon bloğu bulunmaktadır. Bunlardan ilki RapidPro ünitesine ait konfigürasyon bloğu olup, RapidPro ünitesindeki ADC, sensör besleme, PWM çıkışları vs. gibi donanımsal ayarların saklandığı *.hwt Topoloji dosyasının modele tanıtılması için kullanılmaktadır. Bu dosyanın amacı, belirlenen ADC voltaj seviyesi, sensör besleme voltaj değeri gibi ayarları bir dosya üzerinde depolamaktır. Daha önce Bölüm 7' da bahsedildiği üzere bu tür ayarlar Configuration Desk üzerinden ayarlanıp *.hwt dosyası oluşturulmaktadır. Bu bağlantıların sadece RapidPro ile ilgili olduğu ve MicroAutobox üzerindeki bağlantıların *.hwt dosyasından bağımsız olduğu belirtilmelidir. Zira MicroAutobox ADC lerinin voltaj seviyeleri ayarlanabilir değildir.

RapidPro üzerindeki bağlantılar, ivmeölçer ve lineer potansiyometre beslemeleri, lineer potansiyometrelerin bağlı olduğu diferansiyel ADC' ler ve sönümleyici sürücü bağlantıları (Tam Köprü bağlantıları)' dır. Modelde konfigurasyon dosyasının seçilmesine olanak veren blok Şekil 8.2' de görülmektedir.

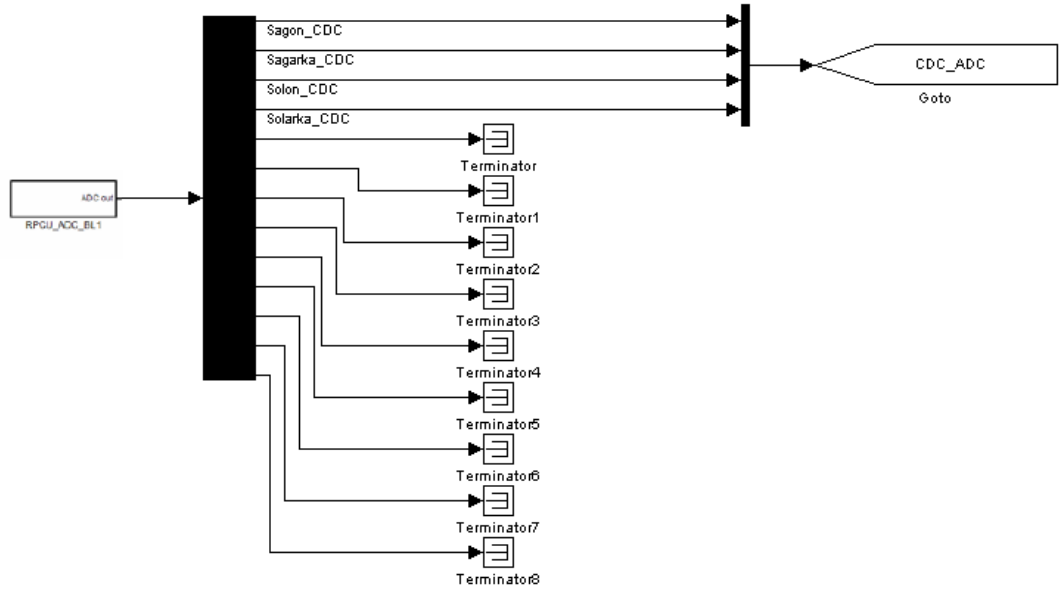


Şekil 8.2: *.hwt dosyasının seçilmesini sağlayan ekran

Modelin setup'ı ilgili bir başka blokda Timer Setup bloğu olup bu blok zamana bağımlı olan PWM gibi bir sinyalin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Kısaca bu blok ile Timer Processor Unit (TPU)'in zaman ayarlamaları yapılmaktadır.

8.3 Yarı Aktif Süspansiyon Sensör beslemeleri ve Sensör okumaları

Şekil 8.3' de ADC Subsystem'inin iç yapısı ve RPCU_ADC bloğunun ilgili ayarları görülmektedir. Bu blokta ADC bloğundan çıkan sinyaller GOTO blokları sayesinde modeldeki ilgili yerlere gönderilmektedir. ADC bloğunda ayarlanması gereken sinyallerin kanal numaralarının sıralarıdır. Öncelikle kullanılan ADC sayısı ve bunların blokdan hangi sıra ile okunacakları RPCU_ADC bloğunun parametrelerine girilmesi gereken büyüklüklerdir. Bunların dışında daha ileri seviye ayarlar da bulunmakta olup bu uygulamada bu ayarların değiştirilmesine gerek duyulmamıştır. RapidPro diferansiyel ADC'lerine bir başka ayar da Configuration Desk™ üzerinden yapılmaktadır. Buna göre ADC'lerin voltaj seviyeleri buradan ayarlanır. Ayrıca ADC kanalları üzerinde band genişliği değiştirilebilen bir de birinci derece alçak geçirgen filtre bulunmaktadır.



Şekil 8.3: RapidPro ADC bloğu

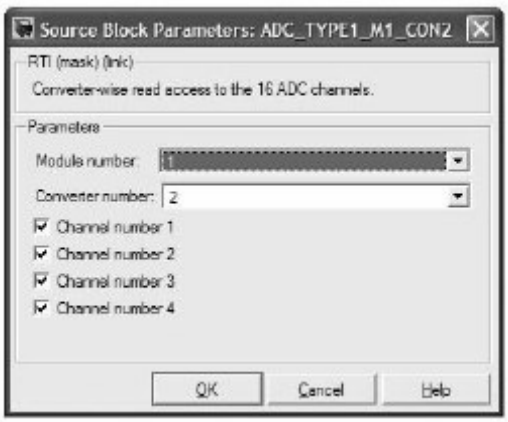


Şekil 8.4: RapidPro ADC bloğu setup ekranı

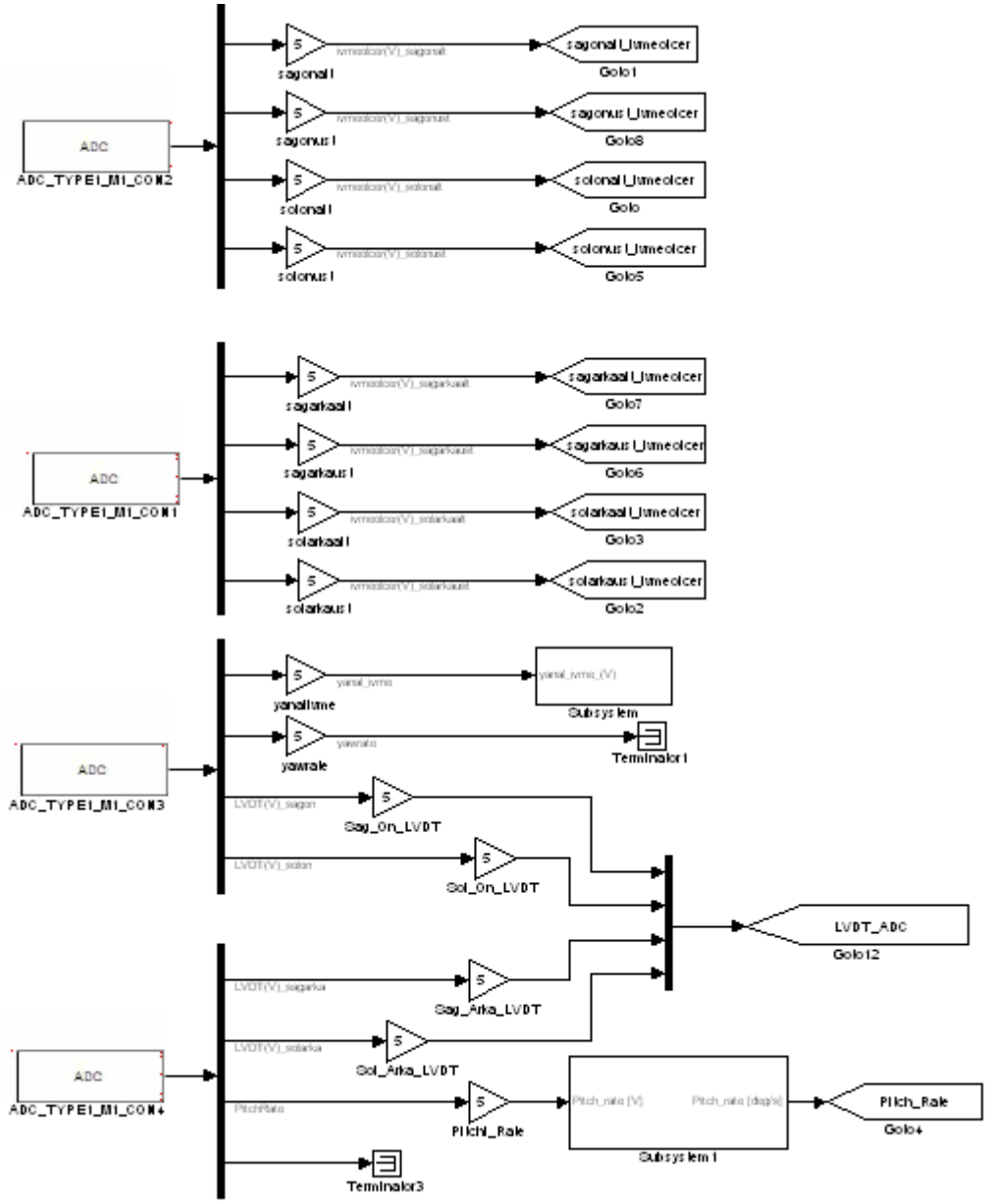
Modelde RapidPro ADC'lerinden alınan sinyalin büyüklüğü voltaj cinsinden olmayıp, sinyalin değeri 0 ve 1 arasına ölçeklendirilmiştir. Buna göre –5V için modelde 0 değeri, +5V için de 1 değeri okunmaktadır. Sinyalin gerçek voltaj değerini bulmak için 0-1 arasındaki bu x sinyaline V(t) = 10 * x(t) – 5 denklemi uygulanarak 0-1 arasındaki değeler, gerçek voltaj karşılıklarına denk geleceklerdir.

Donanımsal olarak bağlı olmayan tam köprü çıkışları da aynı mantık ile ölçeklendirilerek modelde kullanılmaktadır.

MABX için ADC bloğu ise daha farklı bir yapıdadır. Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da ivmeölçer, lineer potansiyometre savrulma, yunuslama açısal hızı okumalarının yapıldığı bloklar ve MABX ADC bloklarının setup ekranı görülmektedir.



Şekil 8.5: MABX ADC'leri bloğu setup ekranı



Şekil 8.6: MABX ADC bloğu

MABX ADC bloğuna ait setup ekranında yapılması gereken, hangi sensörün hangi modül ve kanala bağlı olduğunun seçimidir. Bu konfigürasyon da sensörlerin donanımsal olarak hangi modül ve hangi kanalın pinlerine bağlı olduğu ile ilgilidir. Sonuç olarak 15 sensör için 4'er kanallı 4 modül kullanılmış ve ilgili bloklar modele yerleştirilmiştir.

Buna göre MABX ADC' leri 0-5V aralığında çevrim yapmaktadırlar. Bu sinyalde model içerisinde 0-1 aralığına ölçeklendirilmiştir. Buna göre bu sinyalin 5 ile çarpılması sonucunda, gerçek voltaj değerine ulaşılmaktadır.

Şu ana kadar sensör okumaları tamamen voltaj büyüklüklerine çevrilmiş olarak elde edilmiştir. Ancak modelde özellikle kontrol algoritmasına direk giren ivmeölçerlerin büyüklüklerinin fiziksel değerlerine çevrilmesi gerekmektedir. Buna göre her sensörün Voltaj – Fiziksel Büyüklük ilişkisini veren çözünürlük (sensitivity) değerlerinin de modele eklenmesi gerekmektedir.

İvmeölçerler DC tipinde olduğundan yani 0 g'de de belirli sabit bir gerilim verdiğinden, hareket olmadığında dahi belirli bir çıkışı bulunmaktadır. Bu değer her ivmeölçer için farklı olsa da 0 g için yaklaşık 2.5 V dur. Ancak ivmeölçer normal pozisyonunda üzerinde 1 g yani yerçekimi bulunduğundan ivmeölçerin hareketsiz durumda ölçtüğü değer yaklaşık 2.7 V' dur. Bu durumda gerçek hareketin ivme değeri bulunurken ölçülen sinyalden bu 2.7'lik offset çıkarılır ve sonra sensörün çözünürlüğü olan 0.2 g/V ile çarpılarak kaç g'lik bir ölçüm yapıldığı bulunur. Daha sonra bu değer de 9.81 ile çarpılarak ölçüm m/s2 cinsinden elde edilmiş olur.

Bu işlem yanal ivmeölçer içinde geçerlidir. Ancak yanal ivme ölçer yerleştiriliş itibari ile yere dik durumdadır. Bu durumda hareketsiz halde üzerinde herhangi bir g bulunmaz ve ölçülen değer yaklaşık 2.5 V 'dur. Bu halde yanal ivmeölçer sinyali değerinden 2.5 V çıkarılıp, 0.2 g/V ve daha sonra da 9.81 m/s2 ile çarpılırsa yanal ivme değeri elde edilmiş olur.

Gerekli ölçeklendirme yapıldıktan sonra ivmeölçer sinyalleri Kalman filtresine ve ofset giderici çevirme gönderilir.

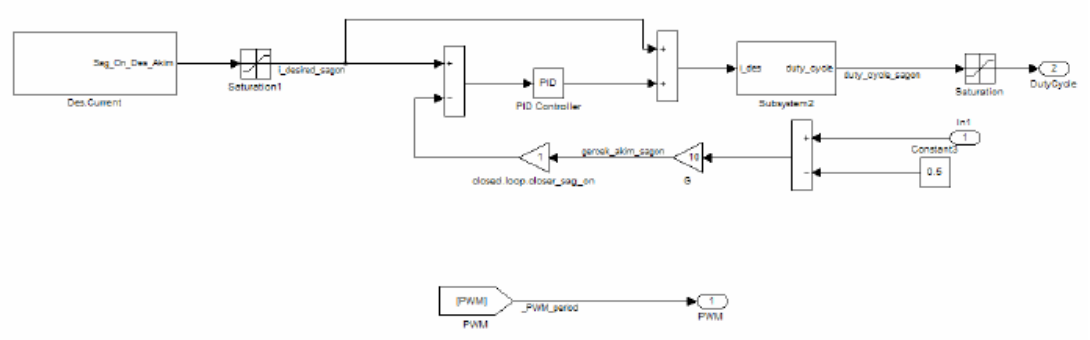
Simulink modelinde sensör beslemeleri ile ilgili bir blok bulunmamaktadır. Besleme değerleri ConfigurationDesk™ de ayarlanıp modele *.hwt dosyası ile iletilmektedir.

8.4 Yarı Aktif Süspansiyon sistemi sönümleyici sürücü blokları

Daha önce belirtildiği üzere sönümleyicilerin sürülmesinde PWM sinyalinden faydalanılacaktır. Buna göre kontrolcüden gelen bir akım PWM sinyalinin duty-cycle büyüklüğüne dönüştürülüp gerekli akım değerleri elde edilmektedir. Ancak bu durum yapısı itibari ile açık bir çevrimdir. Gerek fiziksel yük altında gerekse elektriksel yük altında, istenen bu akım duty cycle ilişkisi beklenildiği gibi gerçekleşmeyebilir. Bu durumda yapılması gereken kapalı çevrim bir sistemin oluşturulmasıdır. Bu noktada kullanılacak kontrolcü tipi PI kontroldür. Şekil 8.7' de sönümleyiciye istenen akım değerleri doğrultusunda akım gönderen blok görülmektedir.

Öncelikle istenen akımın beklenen aralıkta olması sağlanması için bir satürasyon bloğu kullanılmış ve minimum ve maksimum değerleri 0 ve 1.6 A arasında

seçilmiştir. Sönüm kuvveti 0.3-1.6 A arasında değişiyor olmasına rağmen bazı durumlarda sönümleyiciye giden akımın kesilmesi istenebilir. Bu açıdan akım değerleri 0 A 'e kadar genişletilmiştir.



Şekil 8.7: Sönümleyicilerin sürüldüğü Simulink™ bloğu

Akım değerine karşılık gelen duty-cycle değerini elde etmek için bir dizi test yapılmıştır. Buna göre duty cycle değeri belirli aralıklarda %0'dan başlayarak rampa girişi olarak uygulanmıştır. Buna karşılık akım değerinin duty cycyle ile lineer bir şekilde değiştiği görülmüştür. Buna göre duty cycle = 0.5 x istenen akım şeklinde bir ilişki olduğu bulunmuştur.

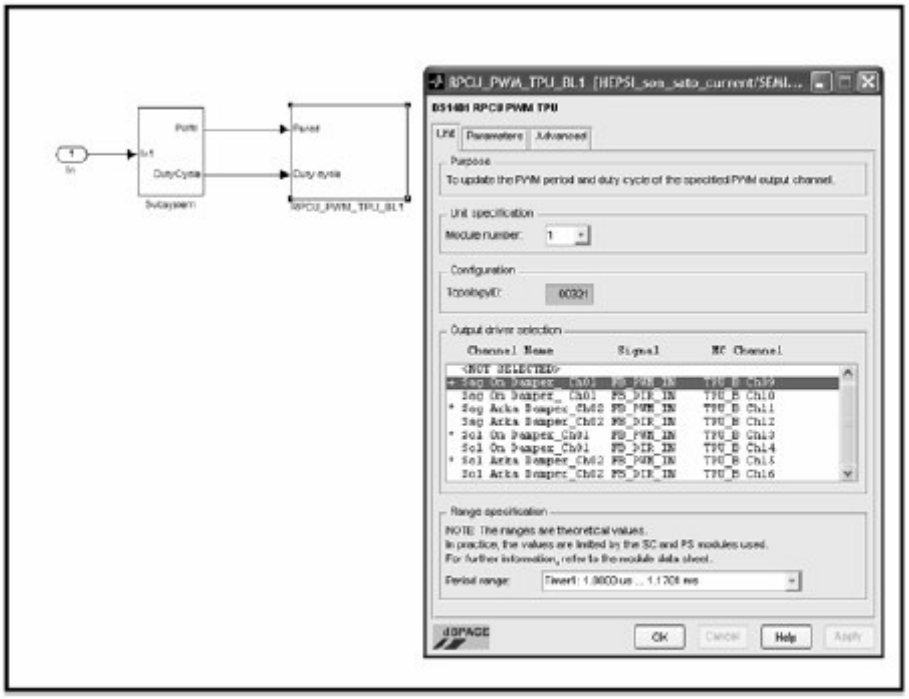
Bu noktadan sonra çevrim kapatılarak istenen akım ve gerçek akım arasındaki fark akım hatası olarak PI kontrolcüye geri gelmektedir. Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken bir durum, bu çevrimi klasik geri besleme çevriminden ayırmaktadır. Zira, istenen akım ve gerçek akım arasındaki fark, yani akım hatası pozitif ya da negatif olabilirken duty cycle sadece pozitif değerler almaktadır. Yani akım negatif bir hata PI katsayıları ve akım-duty cycle katsayısı ile çarpıldıktan sonra negatif bir değer alabilir. Ancak duty cycle tanımı gereği sadece pozitif değerler almaktadır. Bu durumda yapılan çevrime pozitif bir ileri besleme çevrimi eklemektir.

Bu durumda, duty cycle = (istenen akım + kontrolcü çıkışı) x akım-duty cycle katsayısı şeklinde bir ilişki çıkmaktadır.

Daha önce de bahsedildiği üzere RapidPro tam köprü sönümleyici sürücülerinde adanmış ADC' ler bulunmaktadır. Bunlar PWM sinyali sayesinde oluşturulan akımın değerinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Buna göre, az önce bahsi geçen, sönümleyicilere gönderilen akımın ölçülmesinde bu ADC'ler kullanılmaktadır. Bu ADC'ler Şekil 8.7' deki blok sayesinde okunmakta ve sönümleyici bloğunda yerini almaktadır. Diğer sensör ADC'lerinde olduğu gibi bunların da çıkışı 0-1 aralığında

olduğundan düzeltme işlemi burada da gerçekleştirilerek akım ölçümü yapılmaktadır.

Son olarak da duty cycle değeri yüksek akımın sönümleyicilere iletilmesinin engellenmesi açısından satüre edilmiştir. Satürasyonun üst limiti, sönümleyicilerin en üst akım değeri olan 1.6 A' e karşılık gelen değer olarak girilmiştir.



Şekil 8.8: RapidPro PWM bloğu

Şekil 8.8'de PWM üreten blok ve ilgili ayarları görülmektedir. Buna göre, hesaplanan duty cycle'ın yanı sıra bloğa PWM periyodu da girilmektedir. Sönümleyicileri sürmek için yeterli PWM frekansı 2 kHz 'dir. Bu nedenle PWM periyoduna 0.0005 saniye sabit bir değer girilmektedir. Şekil 8.7 ve Şekil 8.8' de yapılan modeller tüm sönümleyiciler için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

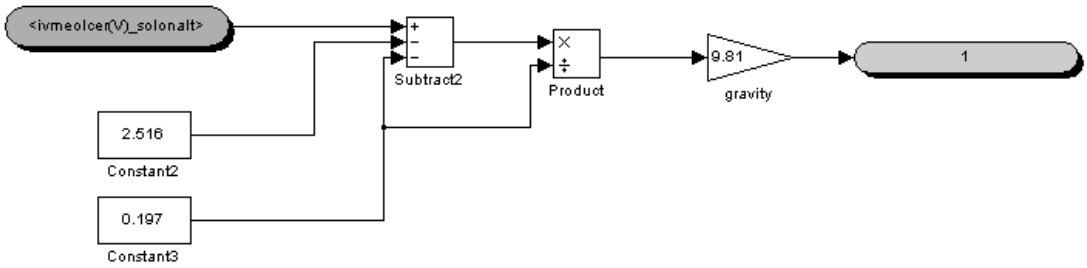
Sönümleyici sürme işleminde kullanılan PI kontrolcünün ayarlanması ve kontrolcü katsayılarının belirlenmesi işlemi deneme yanılma yöntemi ile yapılmıştır.

8.5 Sensör Sinyallerinin ofset giderici çevrim ve Kalman filtresinden geçirilmesi

Voltaj olarak alınan ivmeölçer sinyalleri öncelikler ölçeklendirilip ve 0 g voltaj değeri çıkarılıp, m/s2 birimine çevrilmesi gerekmektedir. Bu amaçla her bir ivmeölçer için bir alt sistemde bu işlemler gerçekleştirilmektedir.

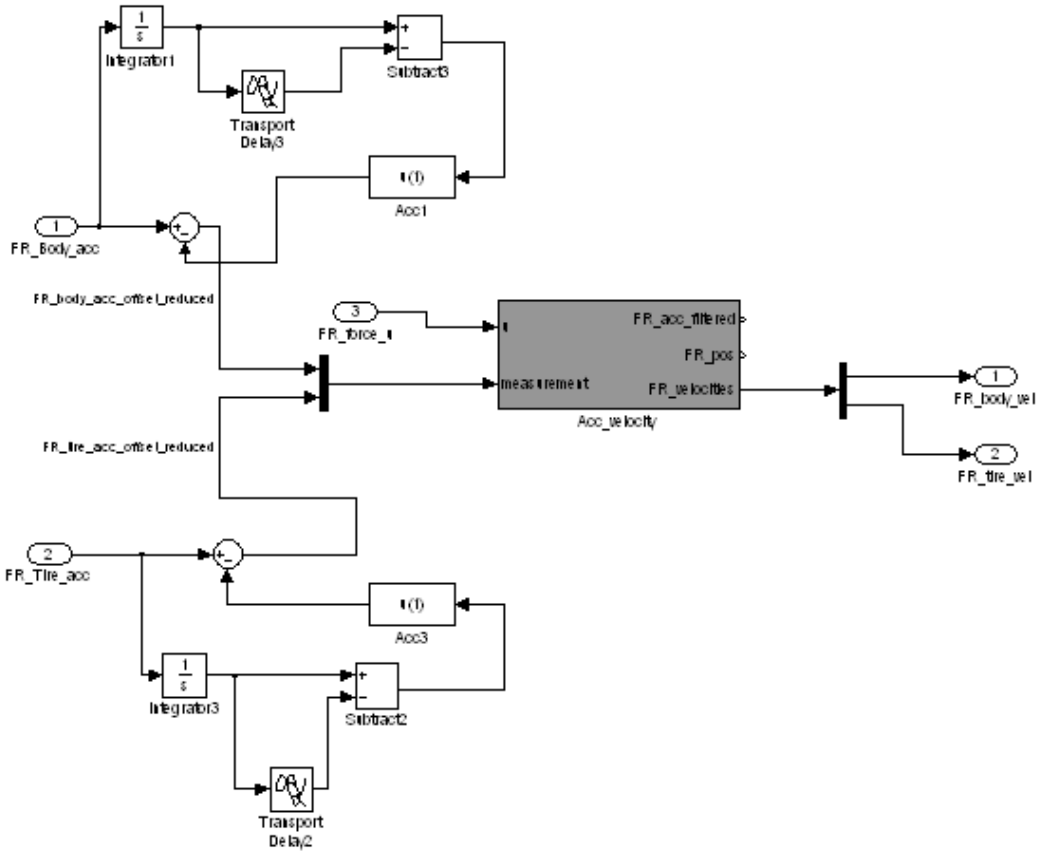
Her ivmeölçerin fabrika çıkışı 0 g voltaj seviyesi farklı olduğu için, üretici firmadan elde edilen voltaj değerleri modele girilmiştir.

Şekil 8.9 bu amaçla kullanılan alt sistemi göstermektedir.



Şekil 8.9: İvmeölçer bloğu

Simülasyonlarla doğrulanan Kalman Filtresi ve Ofset giderici çevrim Simulink™ blokları her 4 tekerlek için ana yarı aktif süspansiyon modeline yerleştirilmiştir. Yukarıda görülen gövde ve tekerlek ivme sinyalleri doğrudan ilgili çeyreğin Kalman filtresine gitmektedir. Şekil 8.10 Kalman filtresi bloğunu göstermektedir.



Şekil 8.10: Kalman Filtresi ve ofset giderici çevrime ait Simulink™ bloğu

Kalman filtresi çıkışları olan filtrelenmiş gövde ve tekerlek hızları doğrudan kontrolcüye gönderilip ilgili kuvvetin hesaplanması sağlanır.

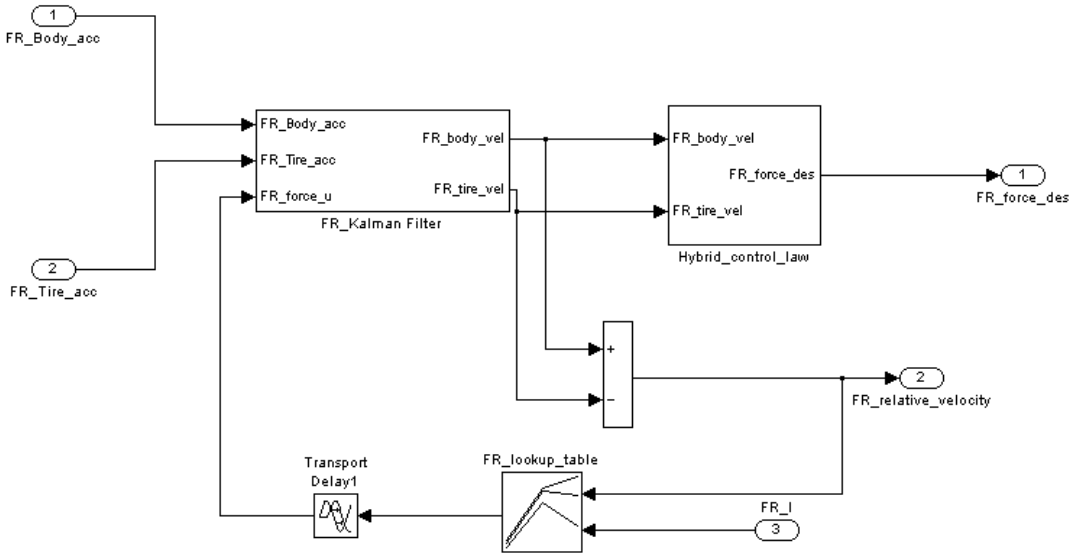
Kalman filtresi bir cebirsel çevrim olarak algılandığı için gerçek zamanlı testlerde herhangi bir hatayı önlemek için modelin kuvvet geri besleme hattına 0.00001 saniyelik bir gecikme konmuştur. Böylelikle Simulink™ bloğu doğru bir şekilde çalıştırmaktadır.

8.6 Hibrid Kontrolcünün modele eklenmesi

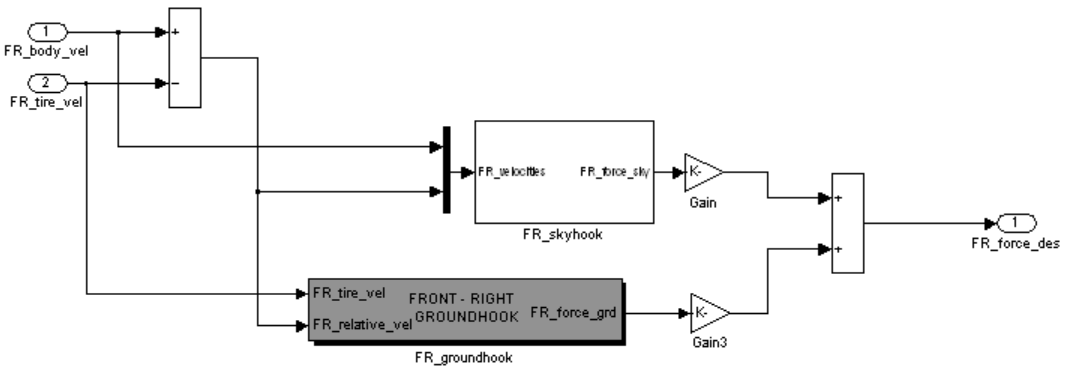
Yarı aktif süspansiyon sisteminde kontrolcü olarak Hibrid kontrolcü kullanılmıştır. Hibrid kontrolcü Skyhook ve Groundhook arasında geçiş yapabildiği için uygun bir çözüm bulmaktadır. Ayrıca β katsayısının ControlDesk™'ten kontrol edilebilmesi daha rahat test ortamı yaratmaktadır.

Şekil 8.10'daki bloğun çıkışındaki hızlar, doğrudan hibrid kontrolcüye gönderilmektedir. Hibrid kontrolcü bloğu içerisindeki ayrı ayrı Skyhook ve Groundhook bulunmaktadır. Ayrı ayrı hesaplanan kuvvetler belirtilen β katsayısına

göre ağırlıklandırılır ve ters sönümleyici tablosuna gönderilir. Şekil 8.11, Kalman filtresi ve kontrolcü bloklarını beraber göstermektedir.



Şekil 8.11: Kalman filtresi ve kontrolcü blokları



Şekil 8.12: Hibrid kontrolcü bloğu

9. YARI AKTİF SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN YOL VE DENEY DÜZENEĞİ TESTLERİ VE SONUÇLAR

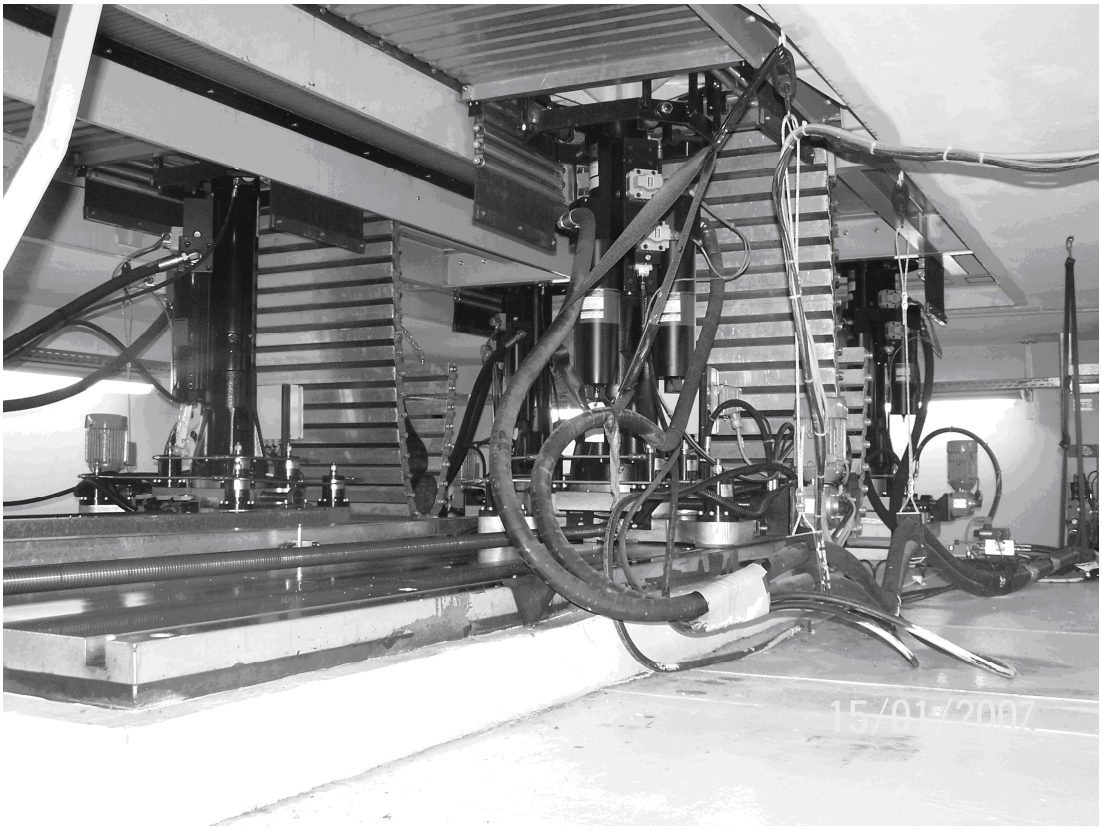
9.1 Giriş

Oluşturulan yarı-aktif süspansiyon sisteminin belirlenen performans ölçütlerini karşılaması için objektif ve sübjektif bazı testlere tabi tutulması gerekmektedir. Burada objektiften kasıt, tekrar edilebilir ve pasif sistemle karşılaştırılabilir testlerin gerçekleştirilmesidir. Bu testler, aynı zamanda oluşturulan farklı kontrolcü yapıları için de tekrar edilerek her kontrolcünün olumlu ve olumsuz yanlarının ortaya koyulması açısından faydalıdır. Bunun yanında, bu testler sayesinde oluşturulan araç modellerinin de sınanması sağlanabilmektedir. Bu şekilde araç modellerine ait parametreler, test sonuçlarının benzetim sonuçları ile karşılaştırılması sonucunda düzenlenebilmektedir.

Sözü geçen bu testler, FORD-OTOSAN tesislerinde bulunan Squeak and rattle test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği dört hidrolik silindir aracılığı ile, süspansiyonları yarı-aktif hale getirilmiş FORD Transit Connect aracının tekerleklerine dikey yönde belirli deplasmanlar vermektedir. Aracın üzerinde bulunan sensörler sayesinde de aracın hareketlerine ait veriler toplanmaktadır. Şekil 9.1' deki fotoğraflarda test düzeneği ve test çalışmaları görülmektedir.

Yarı-aktif süspansiyon sisteminin test edilmesinde izlenen bir başka yol ise, sistemin çeşitli yol testlerinde denenmesidir. Burada ise aracın gerek düz yolda gerekse belirli manevralar sonucunda performansı incelenmiştir. Ancak bu testlerin tekrarlanma ve karşılaştırma açısından yeterli olmadığından, hissiyat ve sübjektif değerlendirme bu testlerde ön plana çıkmaktadır. Ancak bu eksiklik, aracın belirlenen bir test parkurunu sabit hızlarda geçmesi sureti ile önemli derecede azaltılmıştır. Sözü geçen test parkuru, FORD-OTOSAN tesislerinde bulunmakta olup, iki tekerleğin de üzerinden geçeceği, belirli frekanslarda ve yüksekliklerde kasislerden meydana gelmiştir. Yol üç farklı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, aracı yalpalama hareketine zorlayan, düşük frekanslı ve yüksek genlikli kesim yer alır. İkinci bölümde ise parke taşlarından meydana gelmiş bir bölüm bulunmaktadır. Son bölümde ise, daha yüksek frekanslı ve düşük genlikli sabit olmayan aralıkta

engeller bulunan kesim vardır. Bu şekilde bu yolun her bölümü üzerinden belirli hızlar ile geçilerek sistemin hem sübjektif hem de objektif değerlendirilmesi yapılmaktadır.



Şekil 9.1: Squeak and rattle test düzeneğine ait hidrolik sistemin görünüşü

Test sonuçları hem zaman hem de frekans domeninde incelenmiştir. Özellikle geniş bir frekans bandında oluşan sonuçlarda frekans domeninde inceleme yapmak daha faydalı olmaktadır. Frekans incelemesinde kullanılan sinyallerin Power Spectrum Density (PSD)'leridir.

PSD fonksiyonu (Pxx) sonlu bir zaman serisinin otokorelalasyon (rxx) fonksiyonun Fourier transformu olup stokastik sinyalin frekans bileşenlerindeki gücünü temsil etmektedir. Otokorelasyon fonksiyonu ise bir sinyalin kendi ile olan korelasyonunun bir ifadesidir. Matematiksel olarak,

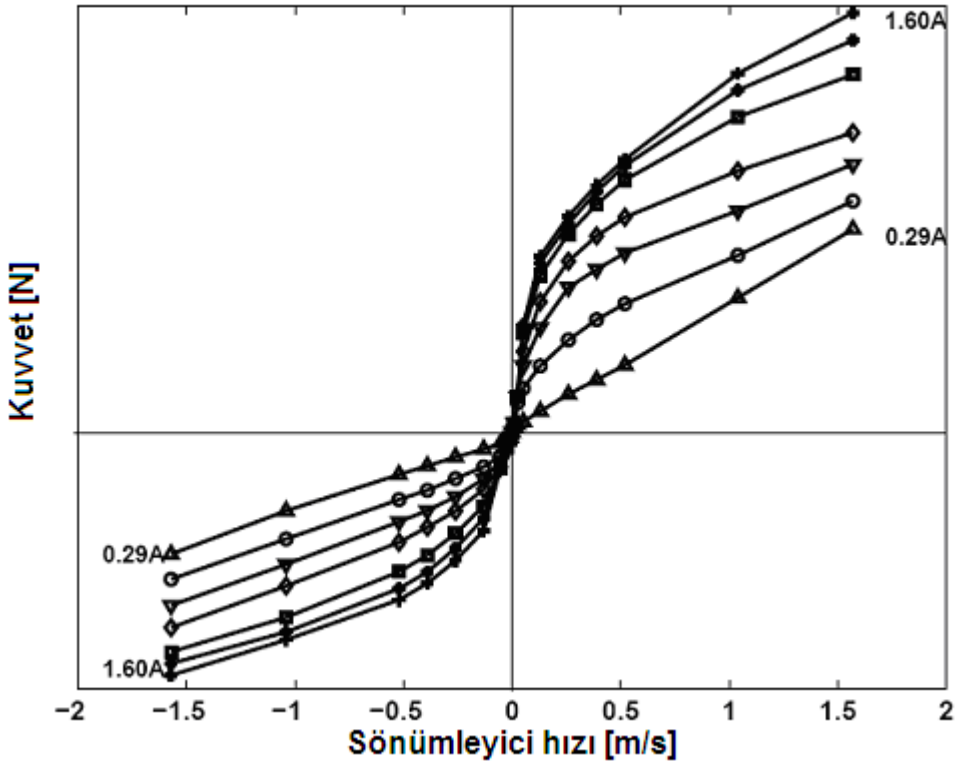
$$P_{XX}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(k) e^{-j2\pi fm} \qquad \textbf{(9.1)}$$

$$\hat{r}_{xx}(m) = \frac{1}{N-|m|} \sum_{k=0}^{N-|m|-1} x(k)x(k+m), k = 0.....,N-1 \qquad \textbf{(9.2)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada r_{xx} otokorelasyon fonksiyonunu, P_{xx} ise PSD fonksiyonunun ifade eder.

PSD pozitif gerçel sayılardan meydana gelirken, birimi Watt / Hz ‘ dir. Burada incelenecek olan sinyallerin PSD leri ise dB/Hz ‘ e çevrilerek verilmiştir. Elde edilen sonuçlar pasif model ile karşılaştırılır iken yapılan bir yaklaşımda pasif modeli temsil edecek sabit akım değerinin kullanılmasıdır. Bu noktada pasif ve yarı aktif sönümleyicilerin F-V eğrilerine bakmak gerekir. Şekil 9.2’de pasif sönümleyici ve yarı aktif sönümleyicinin çeşitli sabit akımlardaki davranışları görülmektedir.

Görüldüğü üzere pasif sönümleyicinin davranışı yaklaşık i = 0.6 A için CVD gibidir. Tam bir karşılaştırma olmasa da CVD’nin bu akım değerinde alınmış veriler pasif süspansiyon olarak değerlendirilecek ve karşılaştırma bu şekilde sunulacaktır. Bu bölümde öncelikle, Squeak & Rattle test düzeneğinde yapılan testler daha sonra da test yolunda yapılan testler incelenecektir



Şekil 9.2: Arka sönümleyici için akımlara göre kuvvet-hız eğrileri

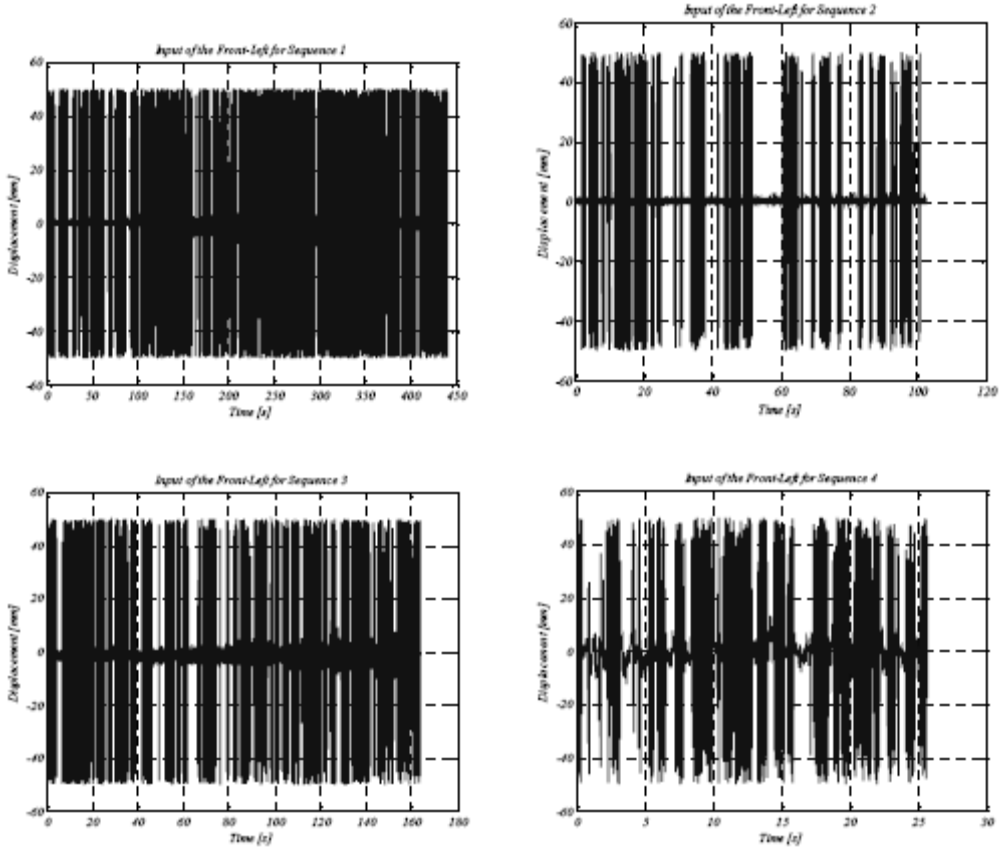
9.2 Yarı Aktif Süspansiyon Sistemi Squeak & Rattle testleri

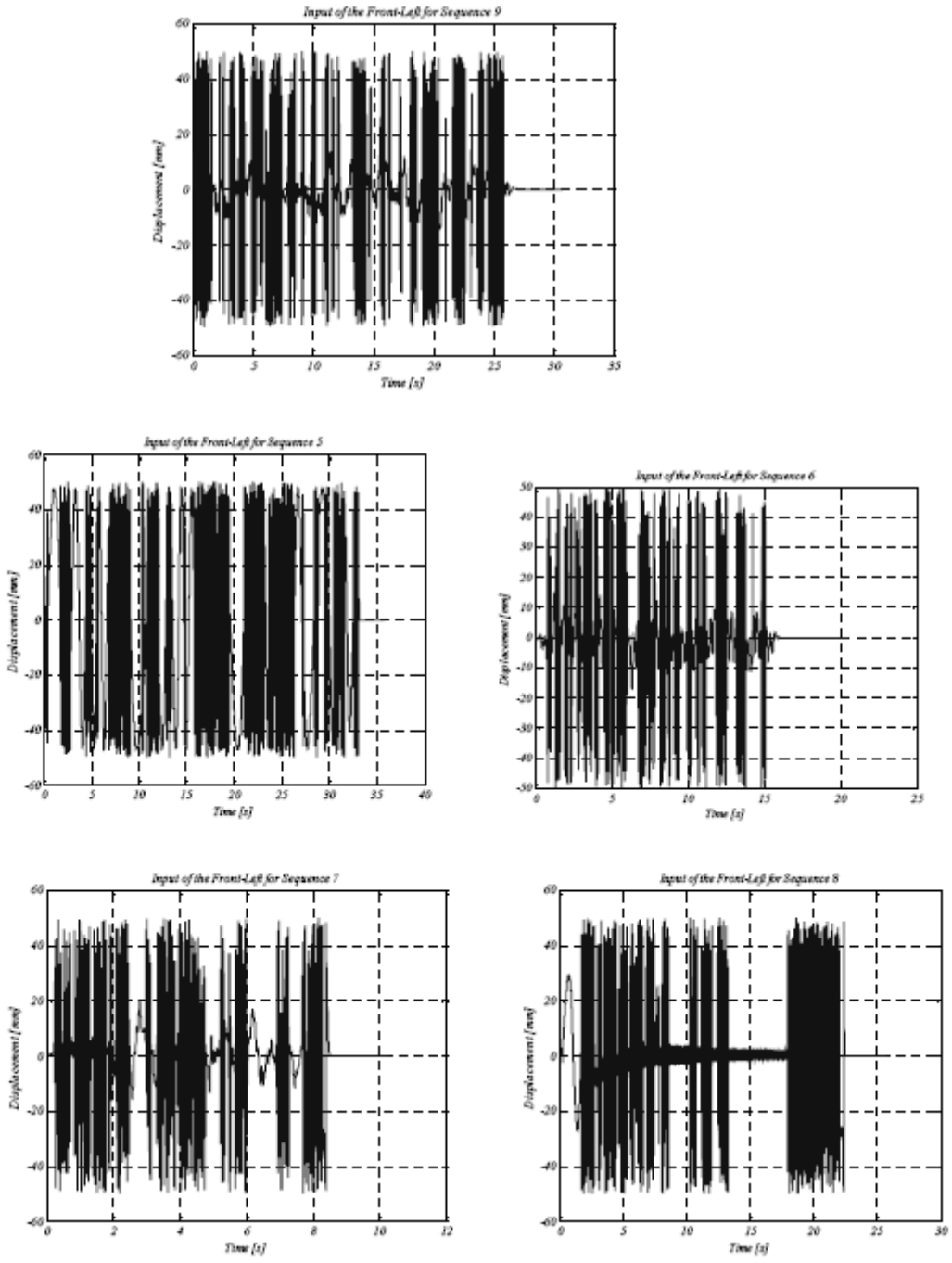
Squeak and Rattle Test düzeneği çok hassas derecede deplasman veren dört silindirden meydana gelen ve yaklaşık 100 Hz' e kadar bir band genişliği olan bir test düzeneğidir. Değişik süspansiyon ayarlarının tekrarlanabilir veriler ile test edilebilmesi için bu test düzeneği kullanılmıştır.

Test düzeneğinde dokuz farklı sekans ve bu sekansların birbirine eklenmesinden oluşan yaklaşık 7 dakikalık uzun bir sekansdan oluşmaktadır. Sekansların süreleri şu şekildedir:

1- 415 saniye	4- 25 saniye	7- 10 saniye
2- 105 saniye	5- 35 saniye	8- 25 saniye
3- 165 saniye	6- 20 saniye	
9- 30 saniye		

Her sekansa ait silindirlerden birinin deplasman verileri ise Şekil 8.3'de verilmiştir.

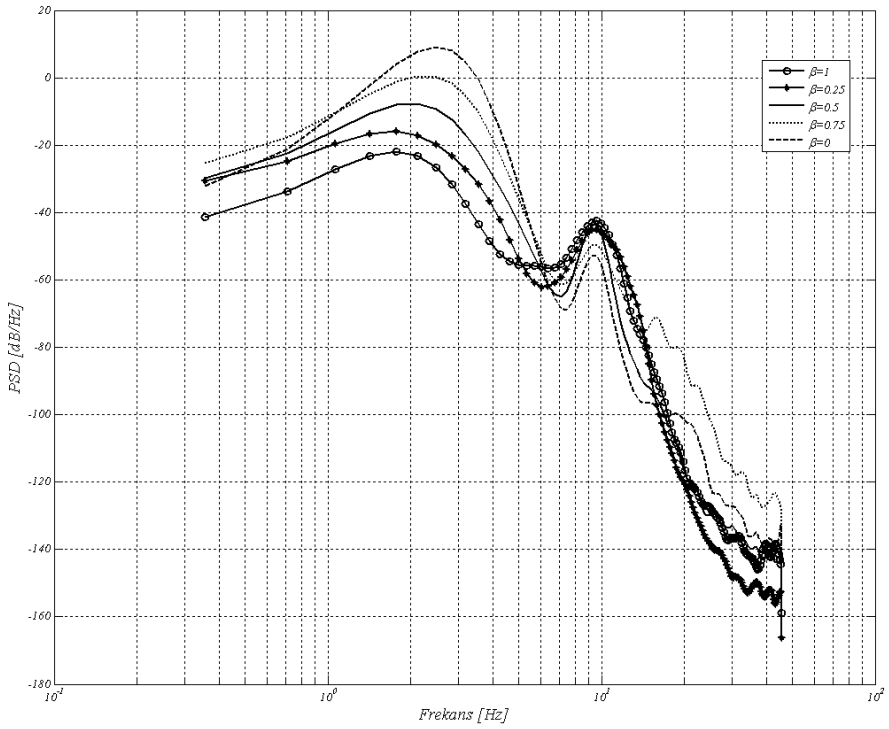




Şekil 9.3: Silindirlerden birine ait her sekansın deplasmanı

Testler, süspansiyon sistemi değişik konfigürasyonlara getirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu konfigürasyonlar, Skyhook, Groundhook, Hibrid, Sert ve yumuşak süspansiyonlardır.

Bilindiği gibi Hibrid kontrolcünün performansı doğrudan doğruya β katsayısının eniyilemesi ile ilgilidir. Bu bakımdan testler sırasında Hibrid kontrolcü değişik β katsayısı ile denenmiş ve en uygun değeri belirlenmiştir.



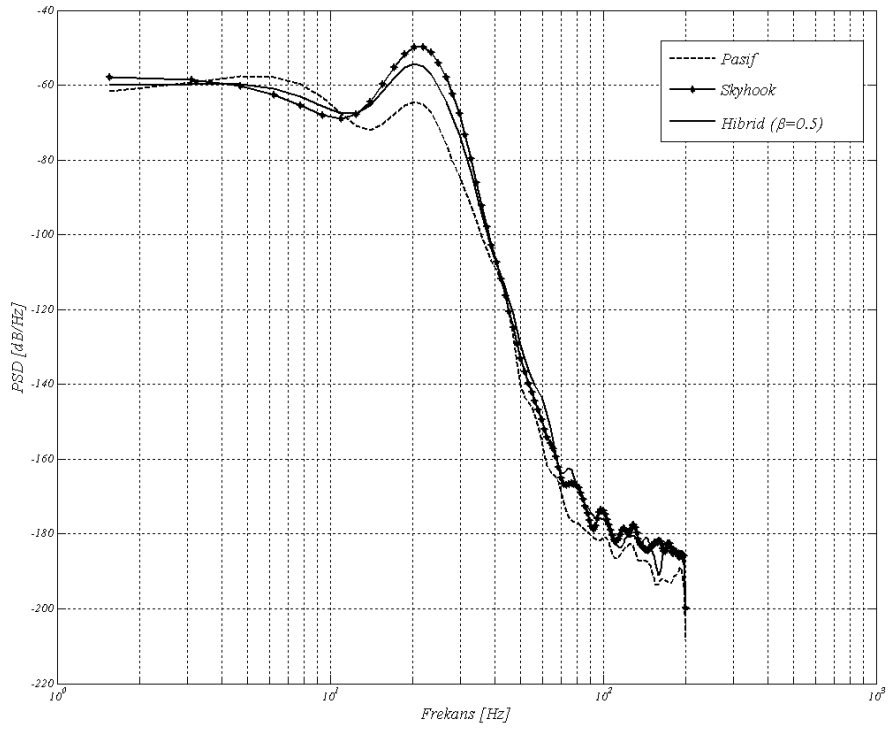
Şekil 9.4: Değişik β katsayılarında test edilmiş Hibrid kontrolcü

Şekil 9.4'den de görüleceği gibi, β=0.5 iken gerek tekerlek gerekse gövde ivmelerinde azalma sağlanmaktadır ve ikisinde de iyi bir performans elde edilmektedir. Bu sebeple bundan sonra yapılan tüm testlerde β katsayısı 0.5 olarak alınmış ve karşılaştırmalar buna göre yapılmıştır.

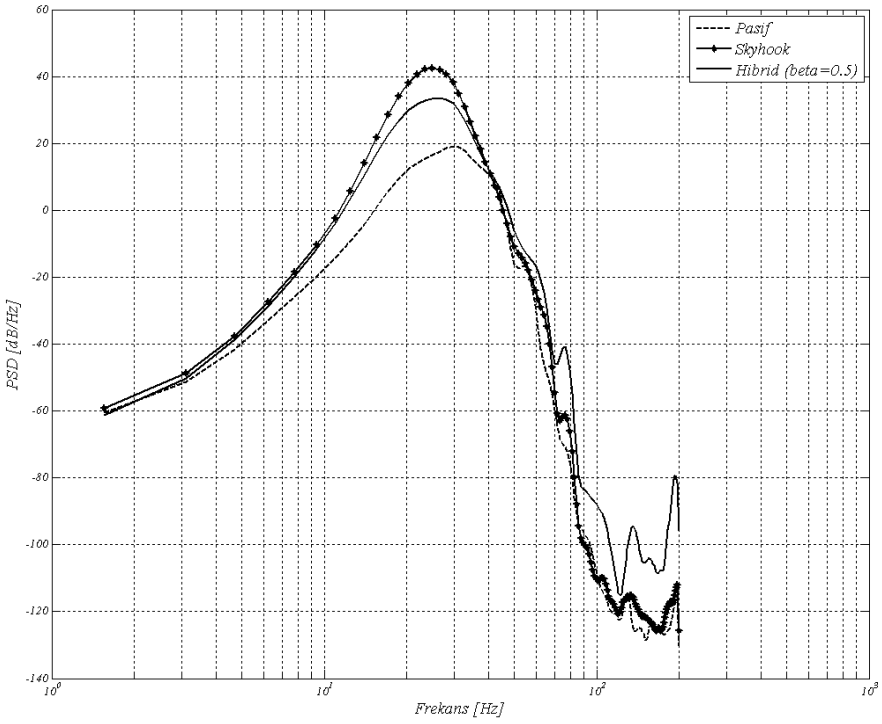
Şekil 9.5 ve Şekil 9.6'da Pasif, Skyhook ve Hibrid kontrolcülü durumlar için asılı ve asılı olmayan ivmelerin PSD'leri görülmektedir. Şekillerdeki sonuçlar sol arka çeyreğe aittir. Beklendiği üzere Skyhook kontrolcü asılı kütle ivmesini pasif duruma göre iyileştirirken, asılı olmayan kütle ivmelerinde artıma neden olmaktadır. Bu karşılaştırma, bir frekans süpürme testi olan 8.Sekans için gerçekleştirilmiştir ve testlerin tümünde elde edilen sonuçlar birbirleri ile tutarlıdır.

Daha önceki testlerde 0.5 olarak belirlenen β katsayısına göre çalışan Hibrid kontrolcü ise Skyhook'dan daha optimum sonuçlar vermiş ve tekerlek ivmesinde bir miktar iyileştirme sağlamıştır.

Diğer çeyreklere ait sonuçlar EK-C'de görülebilir.

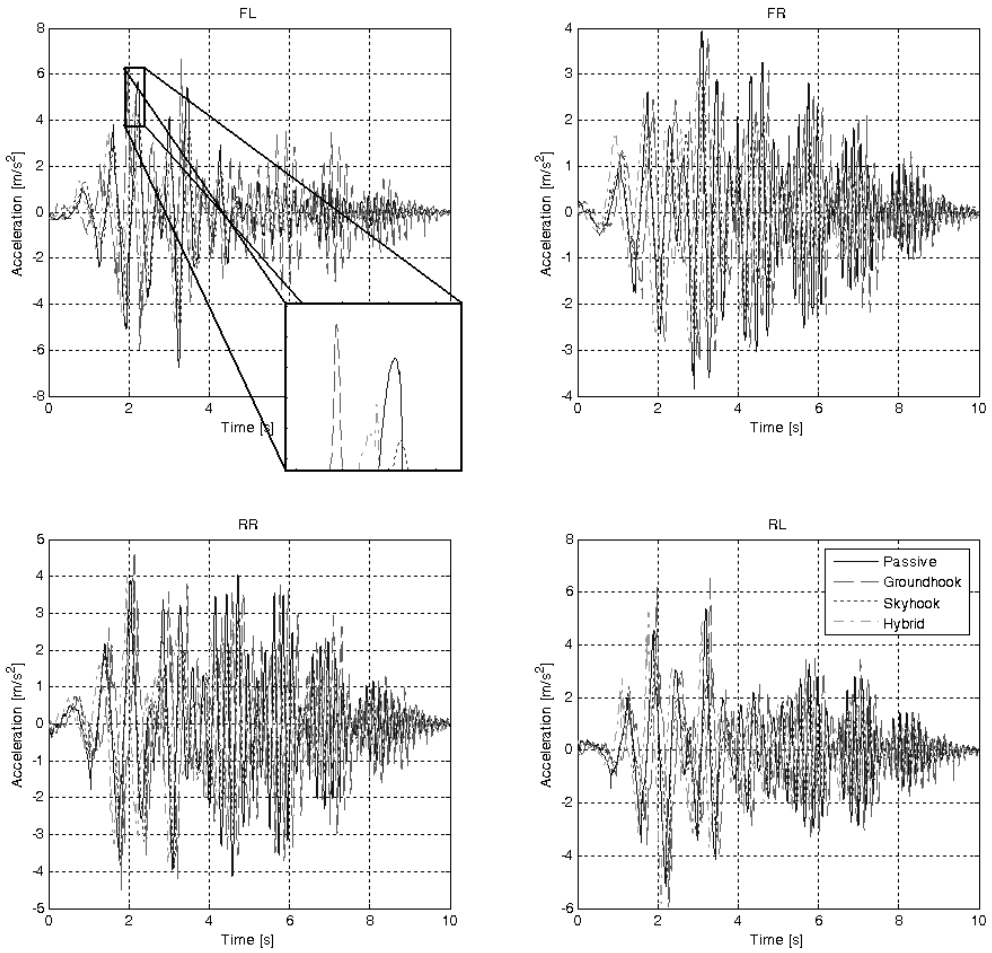


Şekil 9.5: 8. sekans için gövde ivmeölçerinin PSD'leri



Şekil 9.6: 8. sekans için gövde ivmeölçerinin PSD'leri

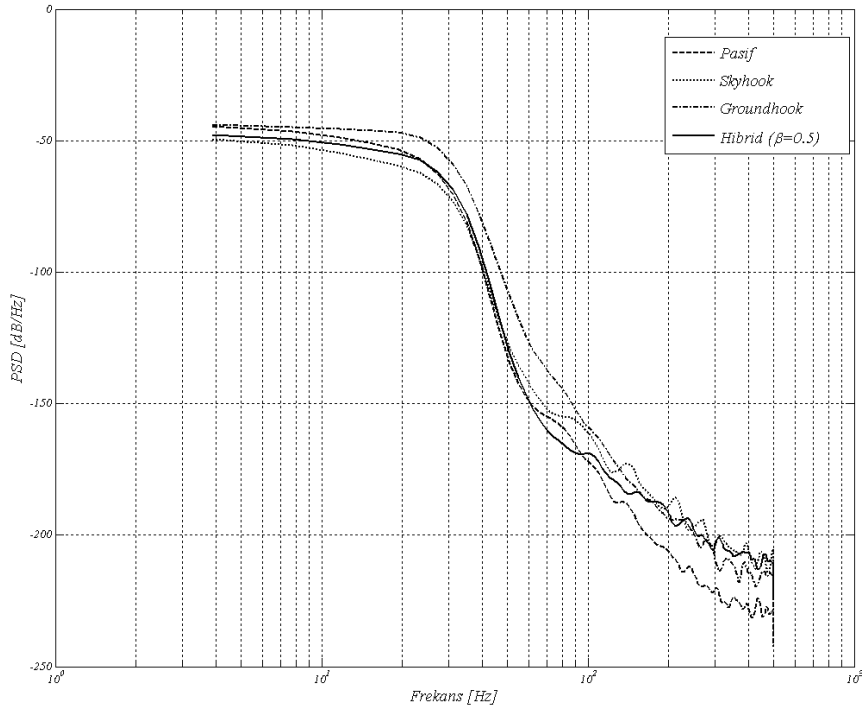
Şekil 9.7'de aynı sekansa ait gövde ivmeölçer verisinin zaman domeninde durumu görülmektedir. PSD'leri sonuçlarla tutarlı sonuçlar gerçekleştirilmiştir.



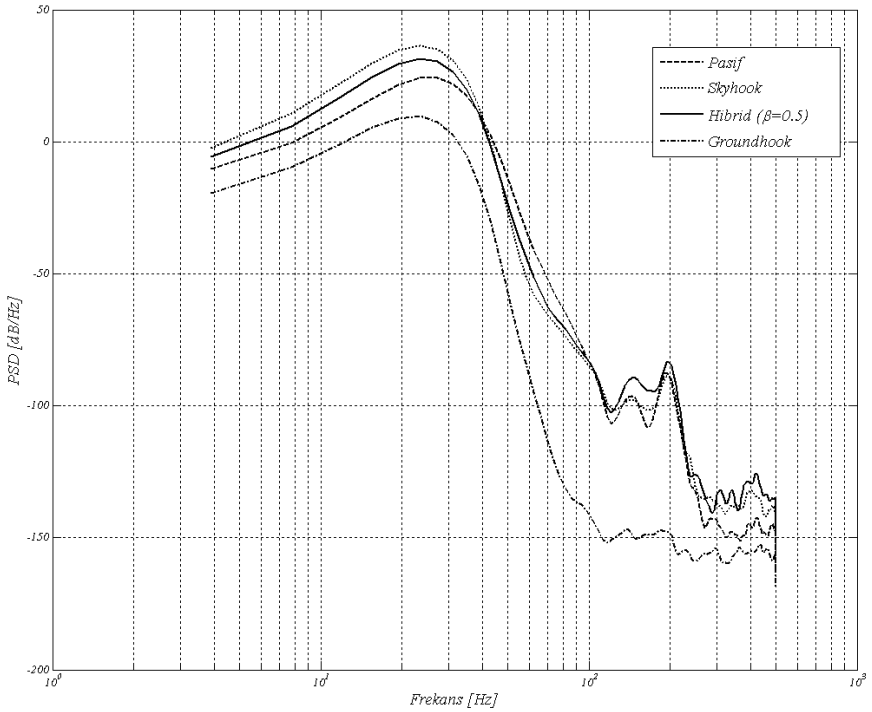
Şekil 9.7: 8.sekansa ait zaman domeninde gövde ivmeölçeri sonuçları

Benzer sonuçlar 7.sekansta yapılan testlerde de görülmektedir (Şekil 9.8-9.9). Ancak yedinci sekansta silindirin çalışma frekansı değişik olduğu için bilhassa gövde ivmeölçerlerinde sonuçlar belirgin değildir. Ancak gövde ivmesine ait rezonans tepesinde Skyhook ve β katsayısı 0.5 iken ki ,Hibrid kontrolcüde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma her dört çeyrek için de geçerlidir.

Tekerlek ivmesinde Hibrid kontrolcü Skyhook kontrole göre daha iyi bir performans vermektedir. Ancak beklendiği gibi tekerlek ivmesinde en iyi sonuç Groundhook tarafından sağlanmaktadır.



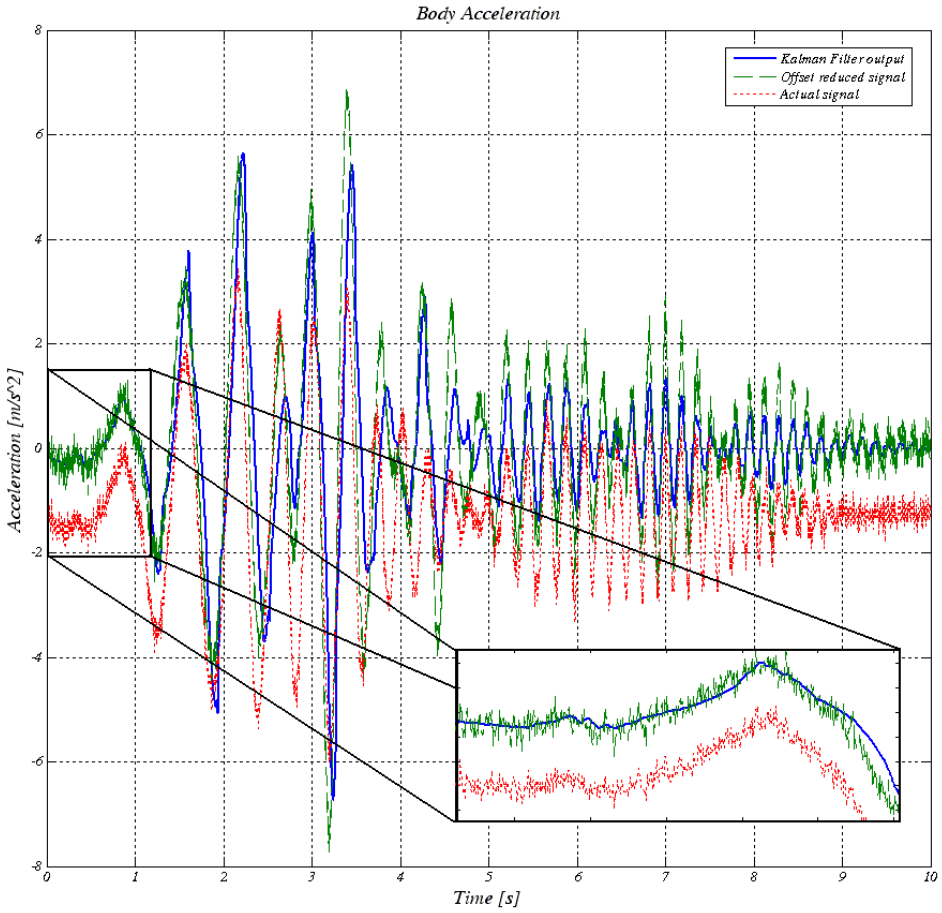
Şekil 9.8: 7.sekansa ait gövde PSD'leri



Şekil 9.9: 7.sekansa ait tekerlek PSD'leri

Testler sırasında Kalman filtresi ve ofset giderici çevrime ait değişkenler de ölçülmüştür. Bu değişkenler, İlki ölçeklendirilmiş ivme sinyali, DC ofset giderilmiş ivme sinyali ve Kalman filtresi çıkışı olmak üzere 3 adettir.

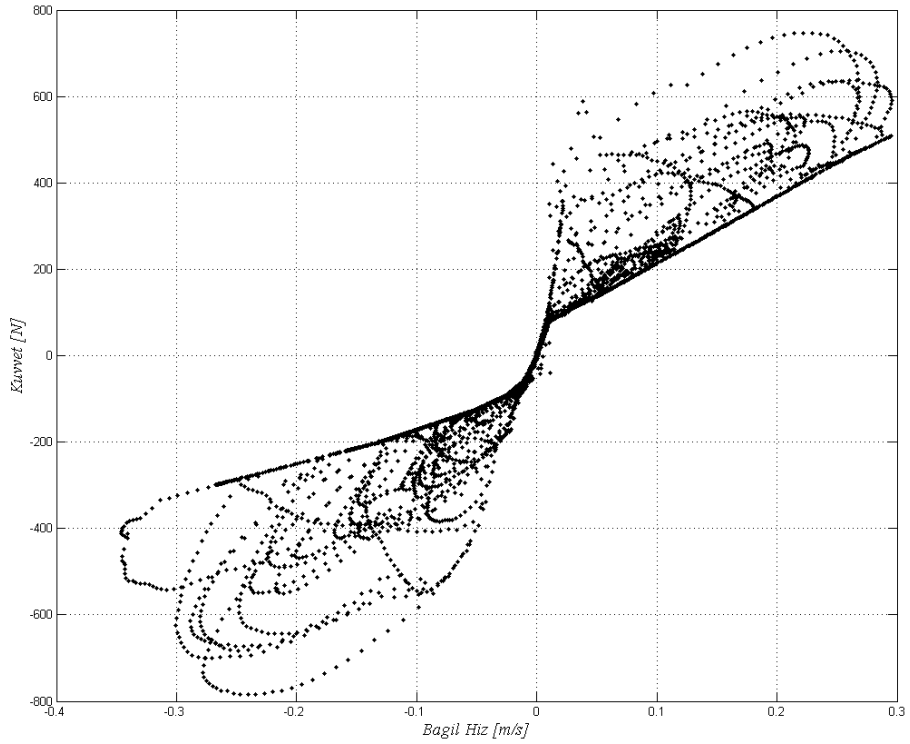
Şekil 9.10 8.sekans için bu üç değişkenin sol ön çeyrek için karşılaştırılmasını göstermektedir.



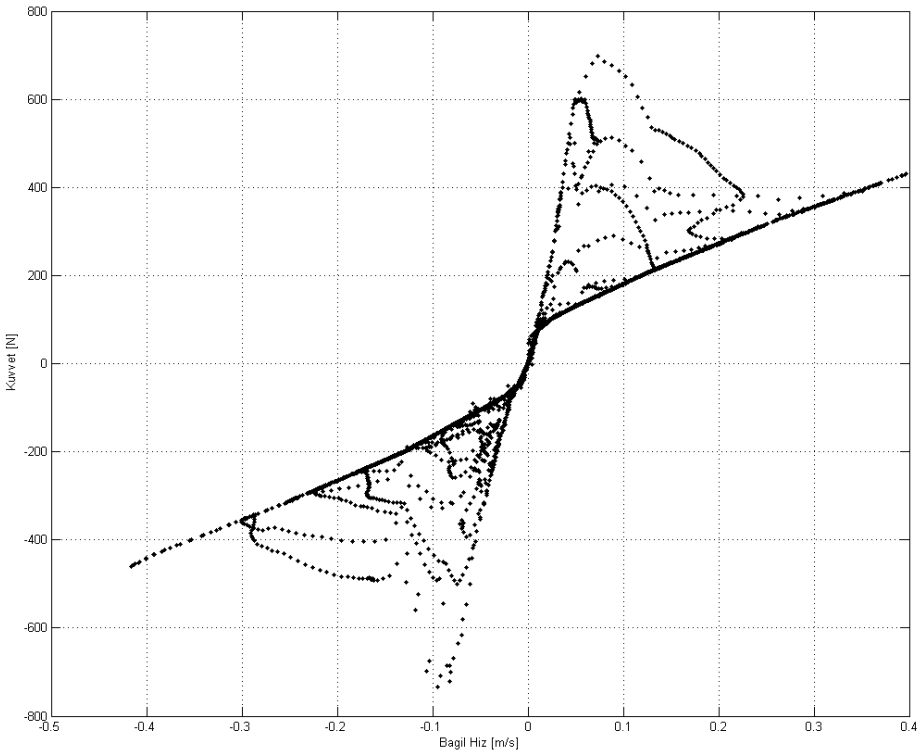
Şekil 9.10: Sol ön çeyrek için Kalman filtresi çıkışları ve Ofsetli ivme sinyali

Kalman filtresi ve ofset giderici çevrimin ait doğru bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Mavi sinyal filtrelenmiş sinyali göstermektedir.

Bölüm 3'de görüldüğü üzere yarı aktif sönümleyicilerin çalışma bölgelerinin 1. ve 3. bölgeler olduğu bilinmektedir. Testler sırasında sönümleyicinin çalışma aralığının incelenmesi, kontrolücünün doğru bir şekilde çalışıp çalışılmadığını kontrol edilmesi bakımından önemlidir. Şekil 9.11 ve 9.12 Skyhook kontrol sırasında sol arka ve sağ ön sönümleyicinin çalışma bölgesinin göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, sönümleyici minimum ve maksimum sönüm seviyeleri arasındaki bölgede çalışmakta ve ayrıca yarı-aktif sistemin gereği birinci ve üçüncü bölgelerde yer almaktadır. Ayrıca sönümleyicinin fiziksel sınırları da çalışma bölgesinden anlaşılabilmektedir.



Şekil 9.11: Test sırasında sol arka yarı aktif sönümleyicinin çalışma aralığı

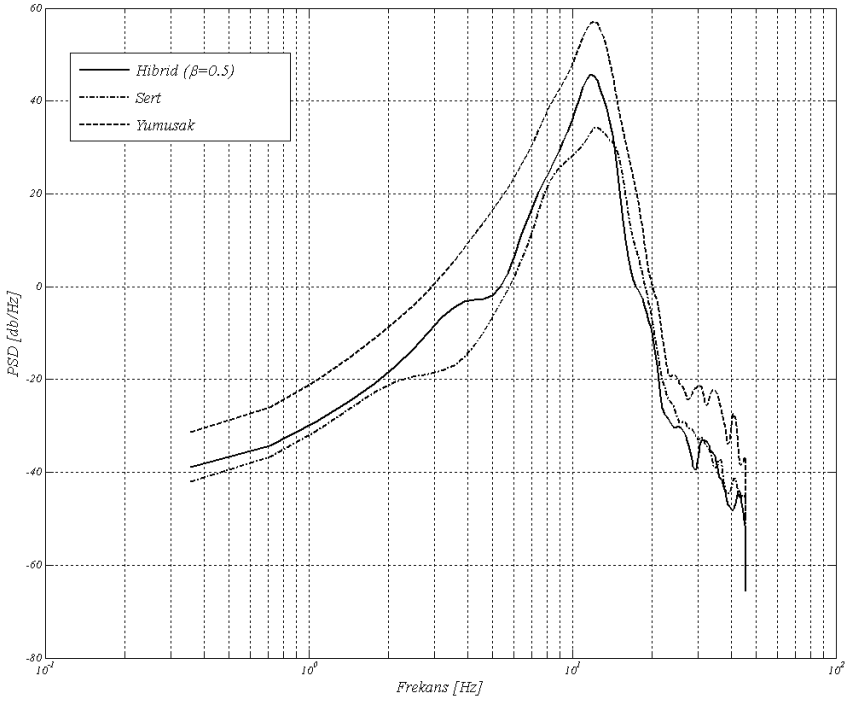


Şekil 9.12: Test sırasında sağ ön yarı aktif sönümleyicinin çalışma aralığı

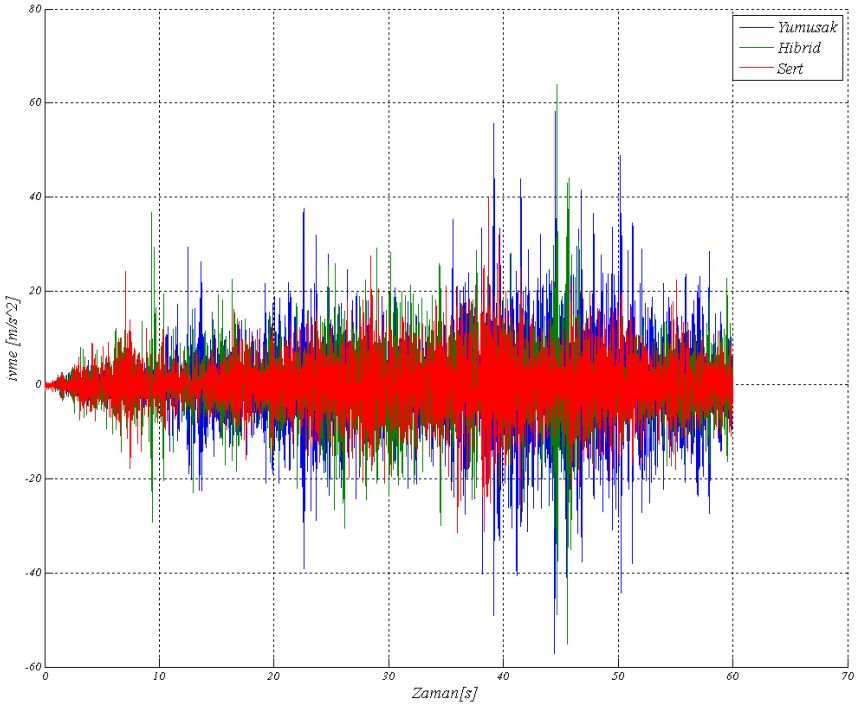
9.3 Yarı aktif süspansiyon sistemi yol testleri

Sistemin performansı Squeak & Rattle testlerinin yanı sıra, yol testleri ile de ortaya koyulmuştur. Buna göre giriş bölümünde izah edilen test yolunda da değişik kontrolcüler ile sonuçlar elde edilmiştir. Bu testlerin sonuçları da bu bölümde incelenecektir.

Bu noktada önce kontrolcülerin cevapları damperin en sert ve en yumuşak hali ile karşılaştırılmıştır. Pasif süspansiyon ile olan karşılaştırma bu kısmın ardından gelecektir. Elde edilen sonuçların tümü üçlü test yolundan sabit bir araç hızı ile geçilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar hem frekans hem de zaman domeninde incelenmiştir. Testlerin aynı anda başlayamamasından dolayı zaman domenindeki sonuçlar tam olarak üst üste çakışmamakta ancak ivmelerin genlikleri hakkında bir fikir vermektedir. Buna göre Şekil 9.13'de Hibrid cevabı Sol Ön Alt ivmeölçer için en sert (I = 1.6 A) ve en yumuşak (I = 0.3 A) süspansiyon ayarları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre tekerlek hareketi kontrolcülü durumda yumuşak süspansiyona yakın bir hareket yapmakta ve yol tutuştaki artış sert süspansiyondaki gibi olmamaktadır.



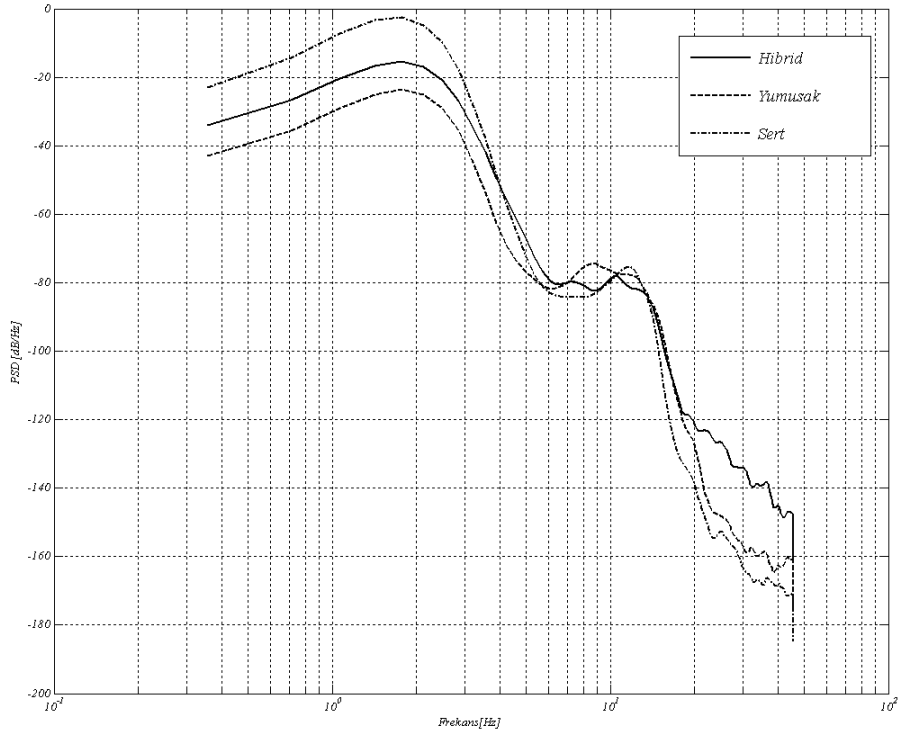
Şekil 9.13: Sert, yumuşak ve Hibrid süspansiyon için sol ön alt ivme PSD



Şekil 9.14: Sert, yumuşak ve Hibrid kontrolcülü durum için sol ön alt ivme zaman domeni

Şekil 9.14'de ise aynı teste ait tekerlek ivmelerinin zaman domenindeki karşılaştırmaları gösterilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere, ivmeölçerler verilerinin değerlendirilmesinde frekans domeninde PSD kullanmak daha etkili bir yoldur. Sinyallerin içeriğinin çok fazla frekans bileşeninden oluşmasından dolayı zaman domenindeki gösterimler karmaşık olabilmektedir.

Şekil 9.15'de ise bu kez aynı test sırasında aynı köşenin üst ivmeölçerinden gelen verilerin zaman cevapları ile sinyalin PSD'leri incelenmiştir. Buna göre, kontrolcülü sinyal gövde ivmelerinde sert süspansiyona göre önemli derecede azalma sağlamıştır. Ancak gövde ivmesinin genliği en az yumuşak süspansiyonda oluşmuştur. Bu beklenen bir durumdur. Zira bu kontrolcü tekerlek hareketlerini artırırken, gövde hareketlerini iyileştirmiştir. En sert ve en yumuşak süspansiyon bu iyileşme ve kötüleşmenin alt ve üst sınırlarını belirlemektedir. Yarı-aktif süspansiyon kontrol yapısının avantajı bu minimum ve maksimum bölgesinde değişik bölgelerde çalışabilmesidir.

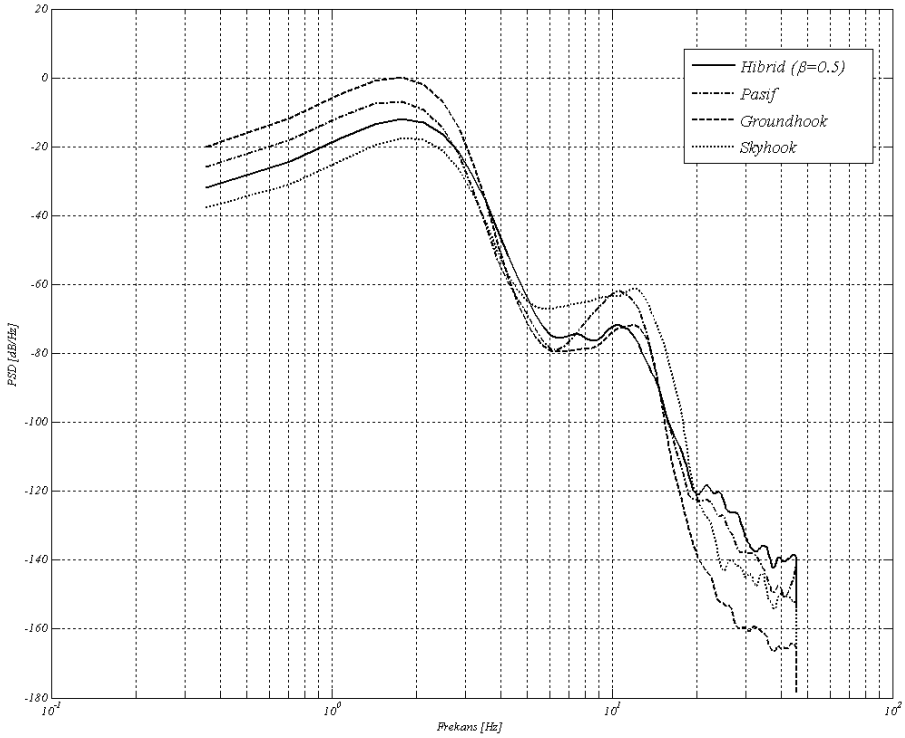


Şekil 9.15: Sert, yumuşak ve Hibrid süspansiyon için sol ön üst ivmeölçer PSD

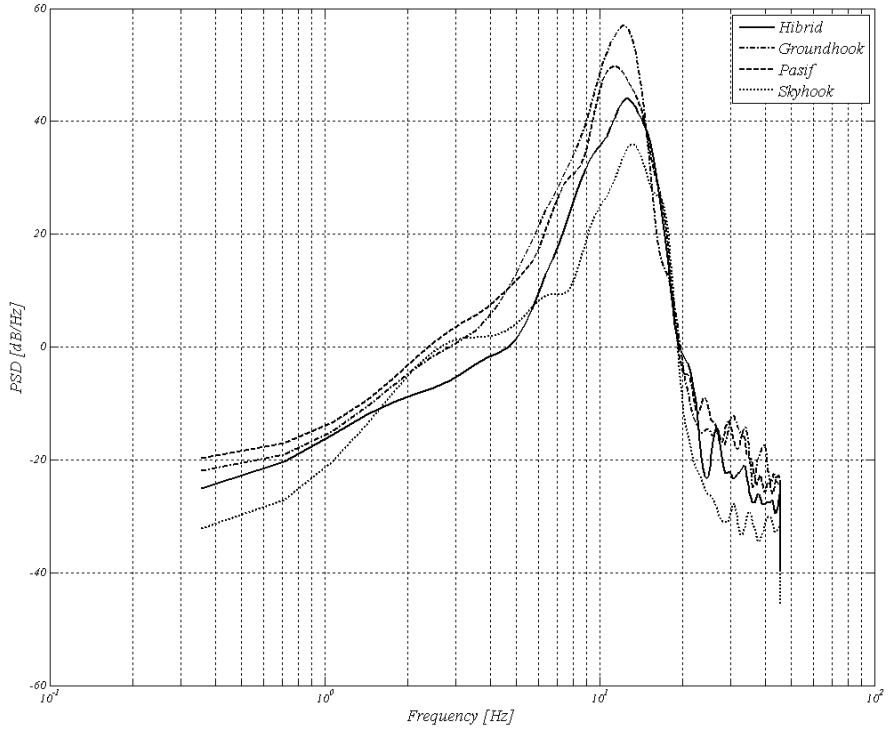
Bu noktadan sonra, Şekil 9.16 ve 9.17'de aynı çeyrek için diğer kontrolcülerin karşılaştırılması verilmiştir. Daha objektif bir değerlendirme için sinyallerin sadece PSD'lerine yer verilmiştir.

Şekil 9.16'da gövde ivmeölçerinde alınan sinyal görülmektedir. Şekilde görülen 4 adet sinyal, pasif süspansiyon ve Skyhook, Groundhook, Hibrid kontrolcülere aittir. Benzetimlerde görülen durumun aynısı gerçek zamanlı testlerde de görülmektedir. Yaklaşık 1-2 Hz civarında tepe noktasında en az genlik görüldüğü gibi Skyhook'a aittir. β katsayısı 0.5 olarak ayarlanmış Hibrid kontrolcü ise Skyhook'tan biraz daha fazla genliğe sahipken, pasif süspansiyondan daha iyi bir performans göstermiştir. Beklendiği gibi Groundhook konfor özellikleri bakımında kötü bir performans vermiş ve pasif süspansiyondan daha yüksek bir genliğe sahip olmuştur.

Hibrid kontrolcünün β katsayısı Skyhook ve Groundhook etkisini eşit olarak verecek şekilde ayarlanmış ve optimum değer olarak 0.5 bulunmuştur. Değişik β katsayıları ile yapılan benzetimlere yukarıda değinilmiştir.



Şekil 9.16: Sol ön gövde ivmesine ait PSD



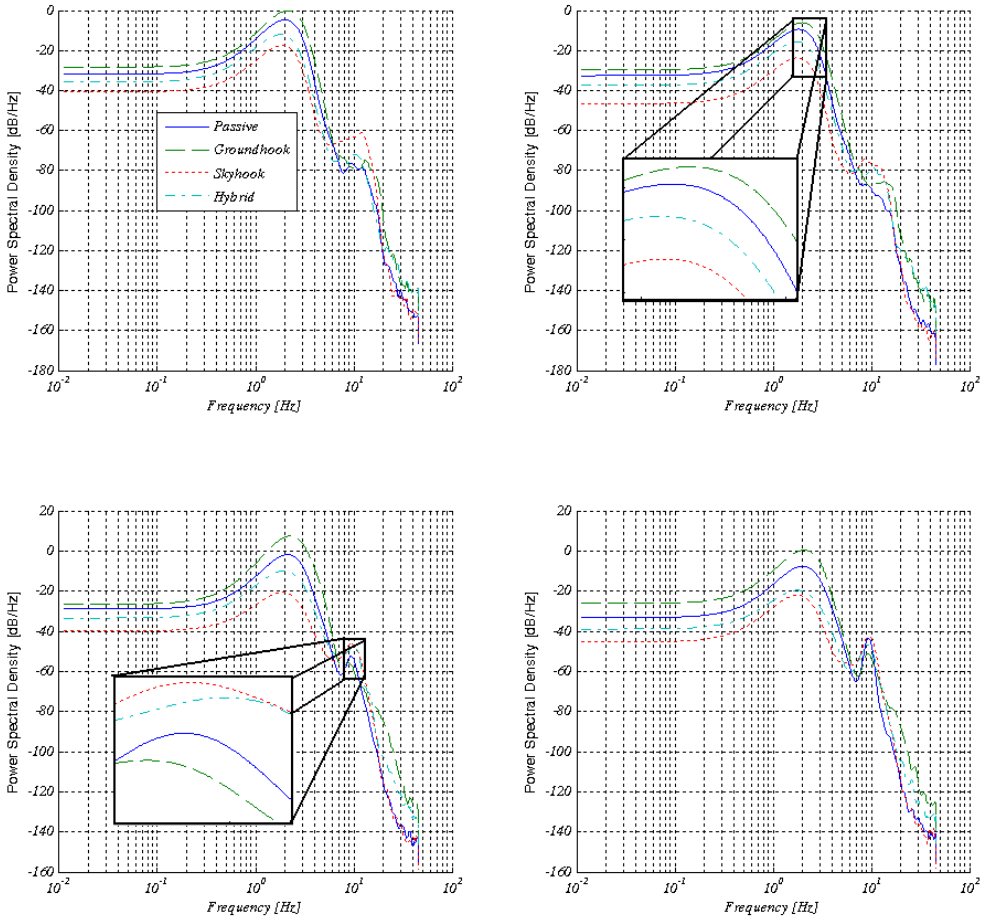
Şekil 9.17: Sol ön tekerlek ivmesine ait PSD

Şekil 9.17'de ise sol ön tekerlek ivmesine ait değişik kontrolcülerin sinyalleri görülmektedir. Kontrolcülerin performanslarının karşılaştırılması, tekerlek ivmesinin

tepe noktası olan 10-11 Hz civarındaki genliklere bakarak olmaktadır. Şekil 9.15'deki durumun tam tersi olan durumda, Groundhook kontrolcüsü yol tutuşu maksimize ettiği için en az genliğe sahiptir. Skyhook ise konfor özelliklerindeki artışı, tekerlek ivmesindeki ve deplasmanındaki azalma ile karşıladığı için en yükse tekerlek ivmesi genliğine sahiptir. Hibrid kontrolcü ise Skyhook'daki kötü yol tutuş özelliklerine pasif süspansiyona yaklaştırarak kısmi bir iyileşme sağlamıştır.

Başka bir yol testine ait 4 çeyreğe ait sonuçlari Şekil 9.18'de görülmektedir. Kontrolcülere ait performanslar benzer şekilde görülmektedir.

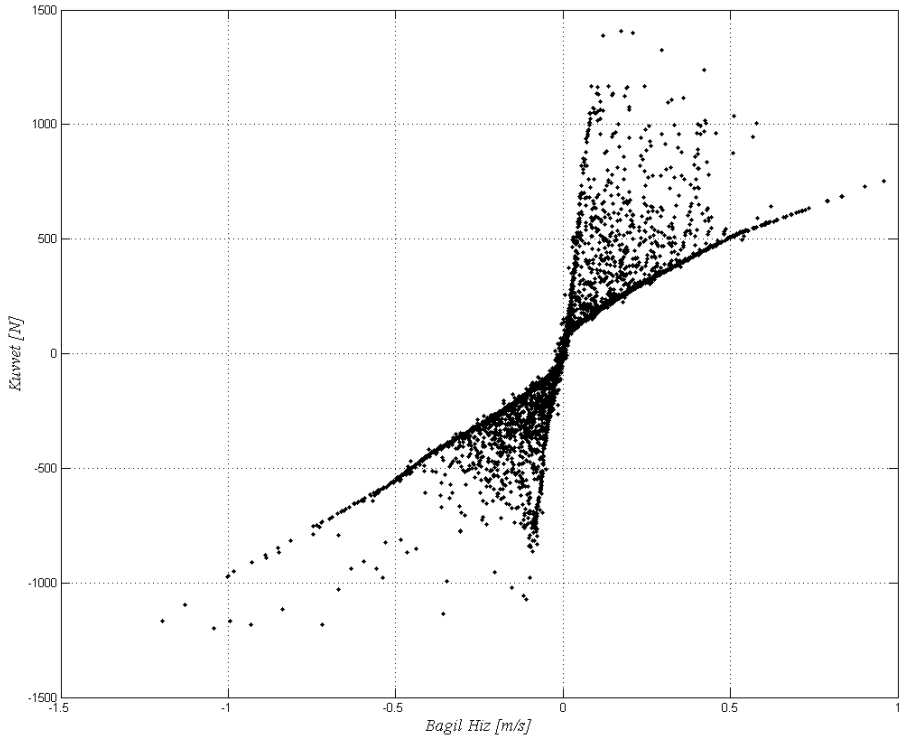
Yol testlerine ait diğer sonuçlar, EK-C'de görülebilir.



Şekil 9.18: Dört çeyreğe ait yol testi sonuçları

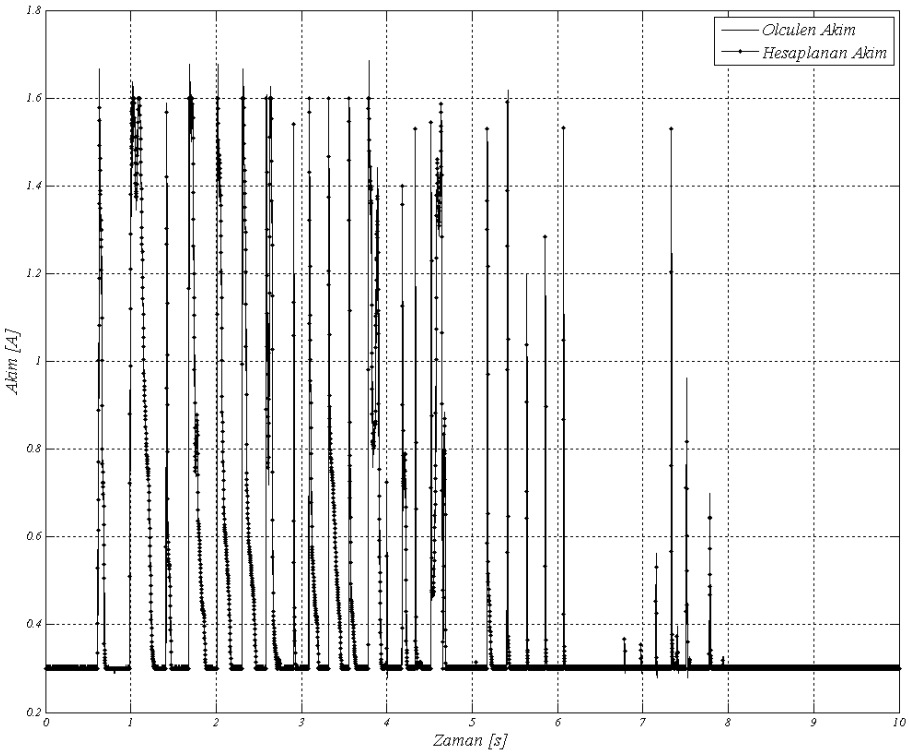
Testler sırasında sönümleyicinin çalışma aralığının incelenmesi, kontrolücünün doğru bir şekilde çalışıp çalışılmadığını kontrol edilmesi bakımından önemlidir. Şekil 9.19'de bu amaçla çıkarılmış bir sönümleyiciye ait kuvvet hız diyagramı

görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, sönümleyici minimum ve maksimum sönüm seviyeleri arasındaki bölgede çalışmakta ve ayrıca yarı-aktif sistemin gereği birinci ve üçüncü bölgelerde yer almaktadır. Bu da kontrol sisteminin doğru bir şekilde çalıştığını göstermektedir.



Şekil 9.19: Sönümleyiciye ait çalışma bölgeleri

Değinilmesi gereken bir diğer nokta da, sönümleyicinin çalışması sırasında sönümleyicide bulunan solenoid valfin çalışmasıdır. Burada önemli nokta, doğrusal Skyhook ve Hibrid gibi sürekli değşken sönümleme kuvveti hesaplayan algoritmalarda valfe verilen akımın da sürekli olması gerektiğidir. Ayrıca valften okunan akım değerinin, ters tablolar yardımı ile belirlenen akım değerini takip etmesidir. Şekil 9.20, Skyhook kontrolcünün çalışması esnasında, iki akım değerinin değişmesini göstermektedir. Şekilden yukarıda bahsedilen iki şartın da sağlandığı görülmektedir. İstenilen sönüm kuvveti sürekli olarak değiştiği için, valfe gönderilen akım da aynı şekilde sürekli olarak değişmektedir. Aynı zamanda iki akım değeri bazı tepe noktaları hariç, birbirini oldukça yakın bir şekilde takip etmektedir. Bu tepe noktalarındaki hatalar ise ölçüm sistemindeki bazı hatalardan ve gürültüden kaynaklanabilmektedir.



Şekil 9.20: Sönümleyici akımının değişimi

10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sisteminin tasarımı yapılmıştır. Tasarıma öncelikle, bilgisayar ortamında yapılacak benzetimlerde kullanılacak araç modelleriyle başlanmıştır. Çeyrek araç modeli, aracın her bir dört çeyreğindeki düşey hareketi incelerken, yarım araç modeli aracın ağırlık merkezindki yunuslama hareketini, tam araç modeli ise yunuslamanın yanında savrulma ve yalpalama hareketlerini de inceler. Ayrıca CARMAKER™ gibi paket programlardaki yüksek serbestlik dereceli modeller aracın her türlü hareketini modellemektedirler. Çalışma kapsamında öncelik, aracın düşey hareketlerini kontrol etmek olduğu için çeyrek araç modeli üzerinde durulmuştur. Çeyrek araç modelinin kullanılmasının bir diğer avantajı ise, Kalman filtresi testlerinde durum-uzay ifadesinin kullanılabilmesidir. CARMAKER™ araç modeli ise aracı global olarak test etmek için bazı benzetimlerde kullanılmıştır.

Sensör sinyallerinin işlenebilmesi için kullanılacak Kalman Filtresi tasarımında MATLAB/SİMULİNK™ programı kullanılmış, buradaki komutlarla bir komut dizisi yazılarak, Kalman filtresine ait kazanç matrisinin çıkarılması sağlanmıştır. Kalman filtresinin performansını test etmek için çeyrek araç modelinin durum uzay gösterimi kullanılmış ve belirli yol girişi sinyalleri ile gözleyici ve gerçek hız verileri test edilmiştir. Yine sensör sinyallerindeki gürültü ve ofset değerlerini de simüle edecek sinyaller yaratılmış, Kalman filtresinin performansı gözlenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, gözleyicinin hız ve konum çıkışları, modelden alınan çıkışlarla çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Modellere prototip aracın gerçek kütle ve yay verileri girilerek, benzetimler yapılmıştır. Model performansını test etmek için öncelikle, pasif süspansiyon durumunda yapılan testler daha sonra kontrolcü algoritmalarını da içerecek şekilde genişletilmiştir. Testlerde belirli frekanslarda girilen yol sinyalleri, Skyhook, Groundhook, Hibrid ve Pasif durumların her birince denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarında, Skyhook kontrolün beklenildiği gibi konfor özellikleri bakımında en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Hibrid kontrolcü ise konfor olarak Skyhook'tan daha kötü bir performans gösterirken, yol tutuş özelliklerinde daha iyi bir performans göstermiştir.

Prototip araç üzerinde yapılan yol ve S&R testlerinde ise benzetimlerde kullanılan algoritmalar, araç üzerinde Dspace sistemi yardımıyla denenmiştir. Yol testleri sırasında zaman domeninde inceleme yapmak, karmaşıklığı arttıdığı için PSD kullanılmıştır. PSD gösterimi kontrolcü performansı karşılaştırırken daha zaman domenindeki sonuçlara göre daha sade ve rahat okunabilen sonuçlar vermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, 1-3 Hz civarındaki tepe noktalarında Skyhook kontrolcü en iyi sonucu verirken, Groundhook en kötü sonucu vermiştir. 10-12 Hz civarındaki tepe noktasıda ise tam tersi sonuçlar elde edilmiştir. Testlerde ayrıca değişik β katsayılarında Hibrid kontrolcünün performansı gözlemlenmiştir. β katsayısına 0 ile 1 arasında değişik değerler verilerek yapılan testlerde görüldüğü gibi 0'a yaklaştıkça Groundhook kontrolcüye yakın sonuçlar alınmıştır. Benzer olarak β katsayısı 1'e yaklaştıkça, aracın konfor özellikleri artmış ve kontrolcü Skyhook'a yakın bir davranış göstermiştir.

Yol testleri sonuçalarının karşılaştırmasının objektif olması amacıyla her test mümkün olduğunca eşit koşullarda yapılmaya çalışılmıştır. Ancak engelli bir yolda giderken araç hızını sabit tutmanın zorluğu, gerekse şöfor özelliklerinin değişmesi, testlerin istenilen koşullarda yapılmasını kimi zaman engelleyebilmiştir. Ayrıca ileride yapılacak yol testlerinin daha objektif olabilmesi için, aracın sensör donanımının paketlemesinin daha iyi yapılması ve bilhassa ivmeölçerin elektriksel izolasyonunun sağlanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında Hafif ticari bir araç için yarı aktif süspansiyon sisteminin tasarımı yapılmıştır. Modeller oluşturulup kontrolcüler geliştirildikten araç enstrümantasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler başarıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla uygunluk göstermiştir. Ayrıca aracın konfor ve yol tutuş özelliklerindeki değişim subjektif olarak yol testlerinde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak tez kapsamında yapılan çalışmalar, yarı aktif süspansiyon sisteminin hafif ticari araçlarda değerlendirilmesi ve test edilmesi açısından faydalı olmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **Rajamani, R.,** 2006. Vehicle Dynamics and Control. Springer, New York.

[2] **Isermann, R.,** 2005. Mechatronic Systems Fundamentals. Springer , New York.

[3] **Karnopp, D.C., Crosby, M.J. and Harwood, R.A.**, 1974. Vibration control using semi-active force generators, ASME Journal of Engineering Industry, **96,** 619-626.

[4] **Hedrick, J.K., Billington, G.F. and Dressbach, D.A.**, 1974. Analysis, design and optimization of high speed vehicle suspensions using state variable techniques, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **96,** 193-203.

[5] **Hrovat, D.**, 1997, Survey of advanced suspension development and related optimal control applications, Automatica, **33**, 1781-1816.

[6] **Valasek, M., Novak, M., Sika, Z. and Vaculin, O.,** 1997. Extended Groundhook New Concept of Semi-active Control of trucks suspensions, Vehicle System Dynamics, **29,** 289-303..

[7] **Fischer, D. And Isermann, R.,** 2004. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions, Control Engineering Practice, **12,** 1353-1367..

[8] **Emekli, M.E., Sankaranarayanan, V., Güvenç, B.A., Güvenç, L., Öztürk, E.S., Ersolmaz, Ş.S., Eyol, I.E. and Sinal, M.,** 2007.Transient active body control of a Ford Transit Connect using Semi-active suspensions, SAE 2007 Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, Rosemont, USA**,** October 12-15..

[9] **Sankaranarayanan, V., Emekli, M.E., Güvenç, B.A., Güvenç, L., Öztürk, E.S., Ersolmaz, Ş.S., Eyol, I.E. and Sinal, M.,** 2007.Observer based Semi-active suspension control applied to a light commercial vehicle, 2007 IEEE-ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich, Switzerland**,** September 04-07..

[10] **Güvenç, B.A., Kural, E., Keşli, B., Gülbudak, K., Güngör, S. and Kanbolat, A.,** 2006. Semi Active suspension control system development for a light commercial vehicle, 2006, Proceedings of the IFAC Conference on Mechatronic Systems, Heidelberg, Germany**,** September 12-14.

[11] **Yi, K. and Song, B.S.**, 1994. Observer design for semi-active suspension control, Vehicle System Dynamics, **32**, 129-148.

[12] **Nakai, H., Oosaku, S. And Motozono**, **Y.,** 2000. Application of Practical observer to semi-active suspensions, ASME Transaction on Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **122**, 282-289.

[13] **Goncalves, F.D.**, 2001.Dynamic analysis of semi-active control techniques for vehicle applications, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.

[14] **Savaresi, S.E., Silani, E., Bittanti, S., Porciani, N.,** 2003.On performance evaluation methods and control strategies for semi-active suspension systems, 2006, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control.

[15] **Gillespie, T.,D.,** 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale.

[16] www.dspace.de

[17] http://www.pennyandgiles.com/products/products.asp

[18] http://www.xbow.com/Products/ProductDetails.aspx?sid=167

[19] www.tenneco.de

[20] www.ipg.de

[21] **Bauer, H.** ed. in Chief, 2005. Bosch Automotive Handbook. Robert Bosch Gmbh, Stuttgart.

[22] http://www.opel.de/lexicon/techlexicon.act

[23] http://delphi.com/manufacturers/auto/other/ride/magneride/

[24] www.zf-sachs.de

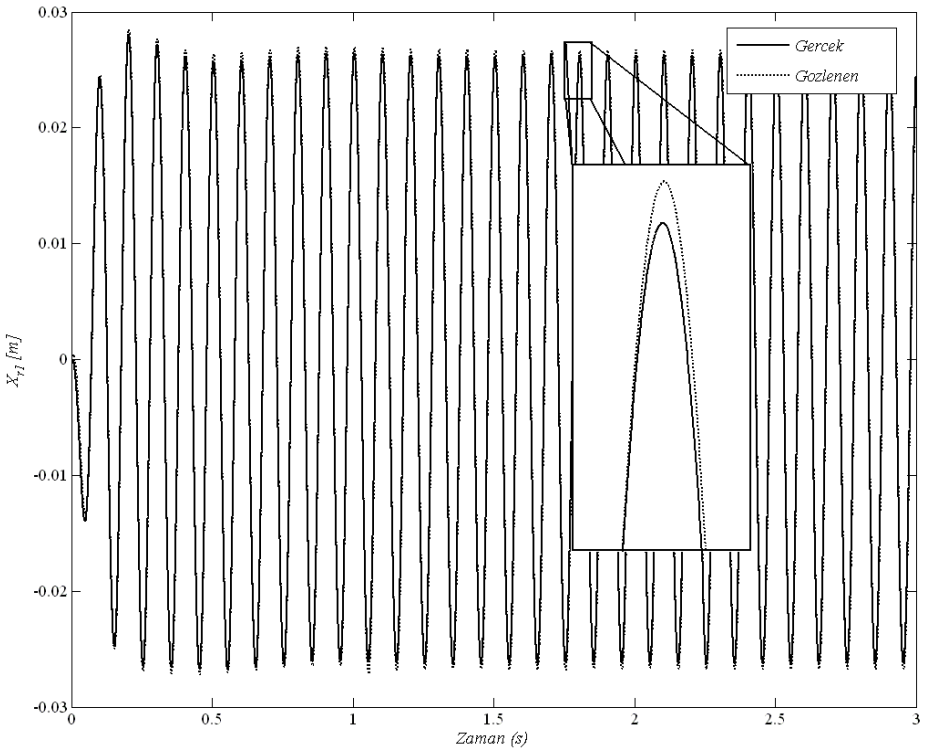
[25] www.ipg.de

EK-A KALMAN FİLTRESİNE AİT BENZETİM SONUÇLARI

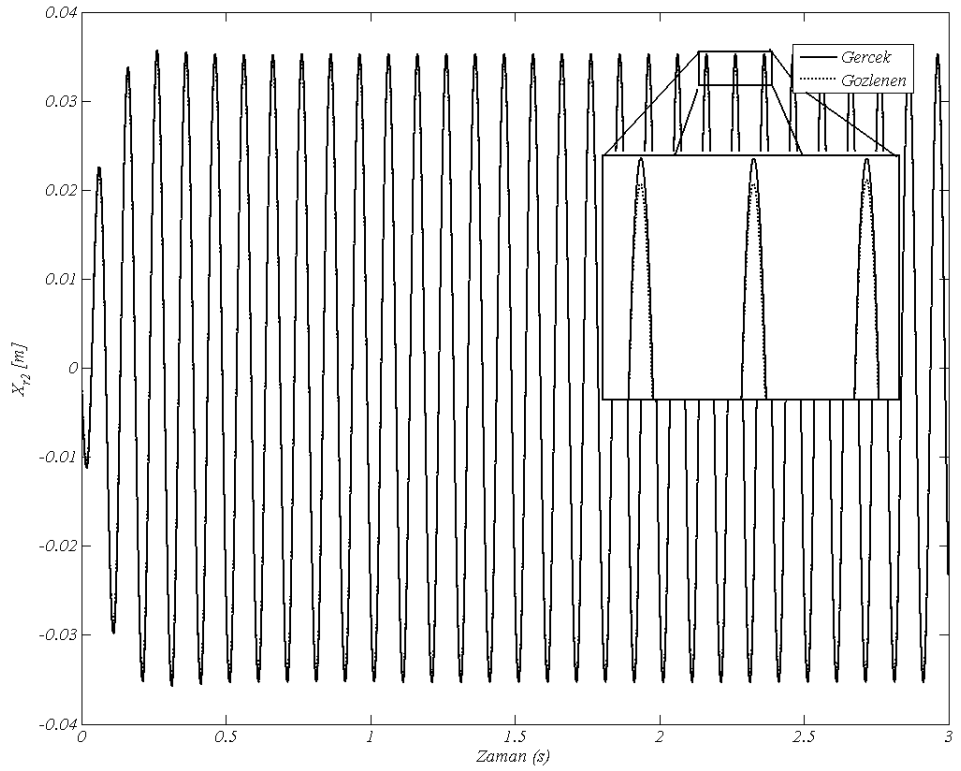
Ek-A, pasif süspansiyon modeli için gözleyicinin çalışma performansını ile ilgili benzetim sonuçlarını içermektedir. Şekiller, gözleyicinin her 4 durum değişkenini de, sabit ofset ve sensör gürültü olması halinde, iyi bir şekilde tahmin ettiği göstermektedir. 3. bölümde detaylı olarak anlatılan durum değişkenleri aşağıda belirtilmiştir.

$$x_{r1} = x_s - x_u, \quad x_{r2} = x_u - r, \quad x_{r3} = \dot{x}_s, \quad x_{r4} = \dot{x}_u$$

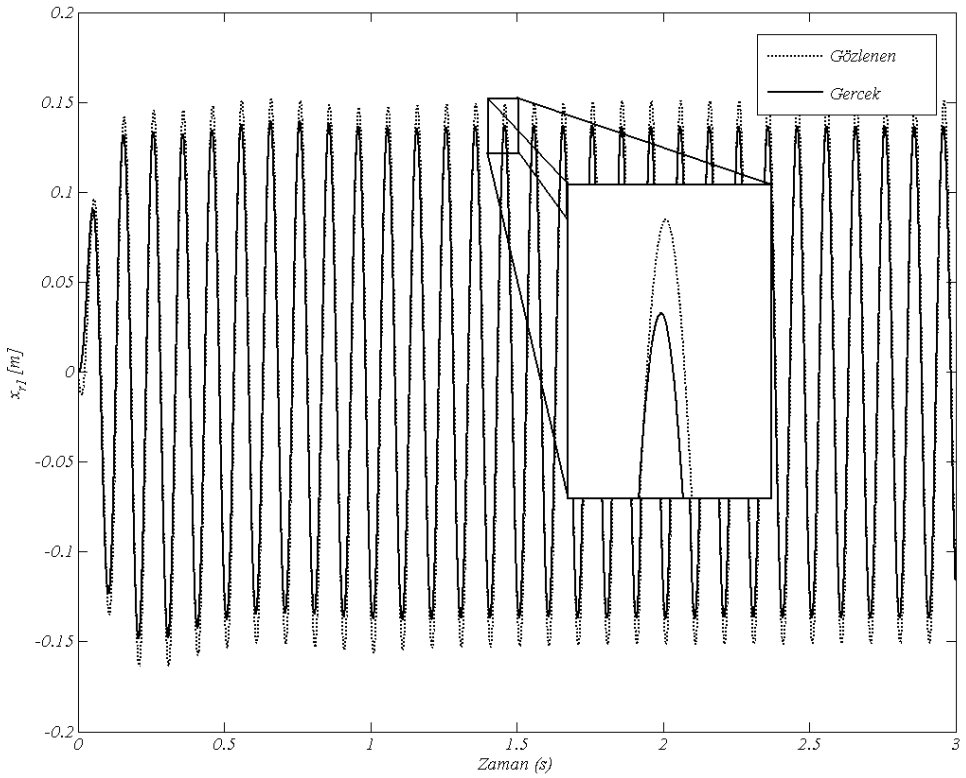
Benzetimler 10 Hz frekansa sahip 0.015 m genlikli sinüs dalgası şeklinde yol girişi girilerek gerçekleştirilmiştir.



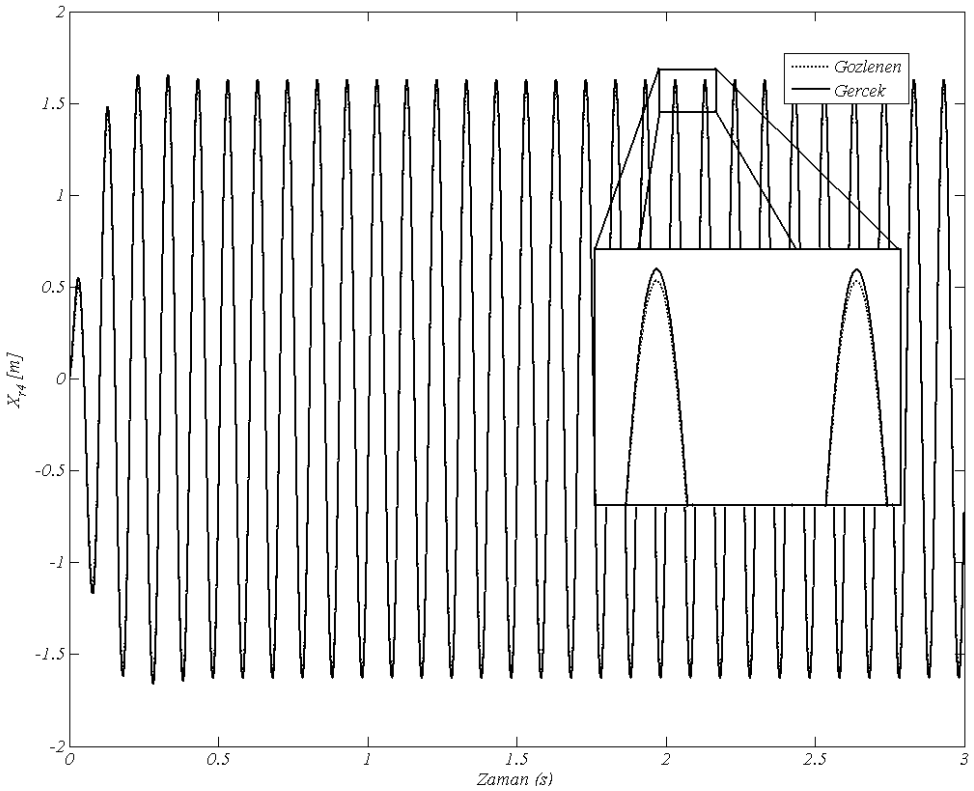
Şekil A.1: X_{r1} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer



Şekil A.2: X_{r2} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer)



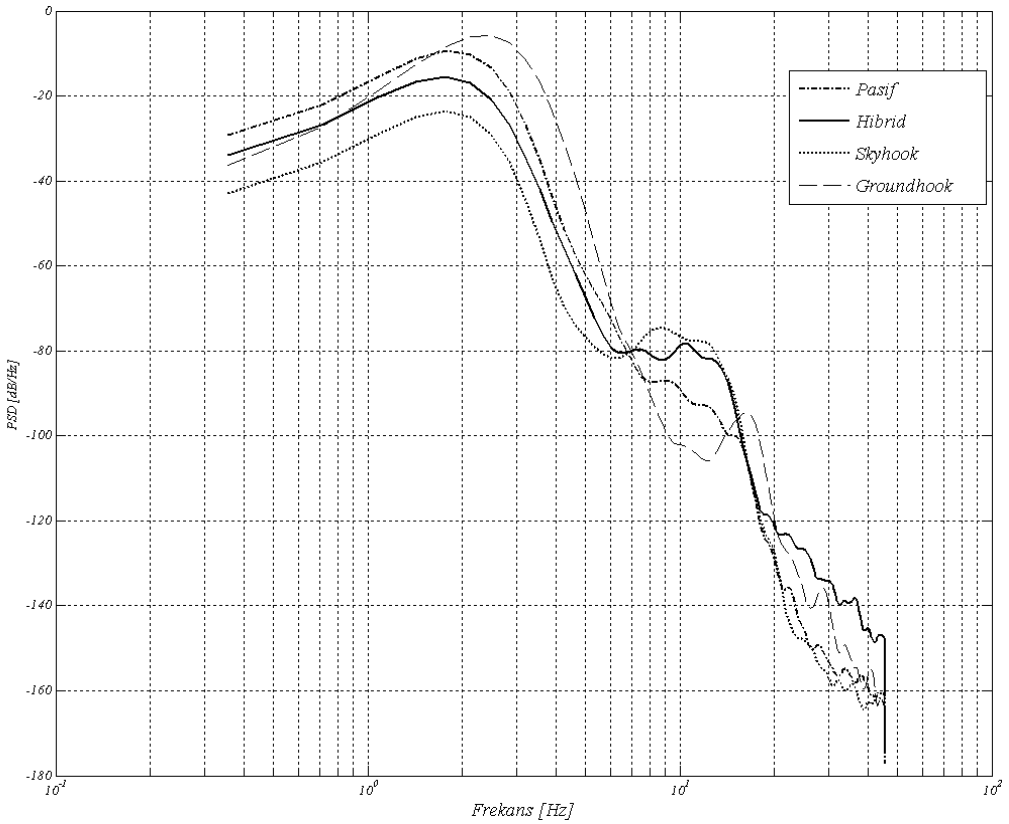
Şekil A.3: X_{r3} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer



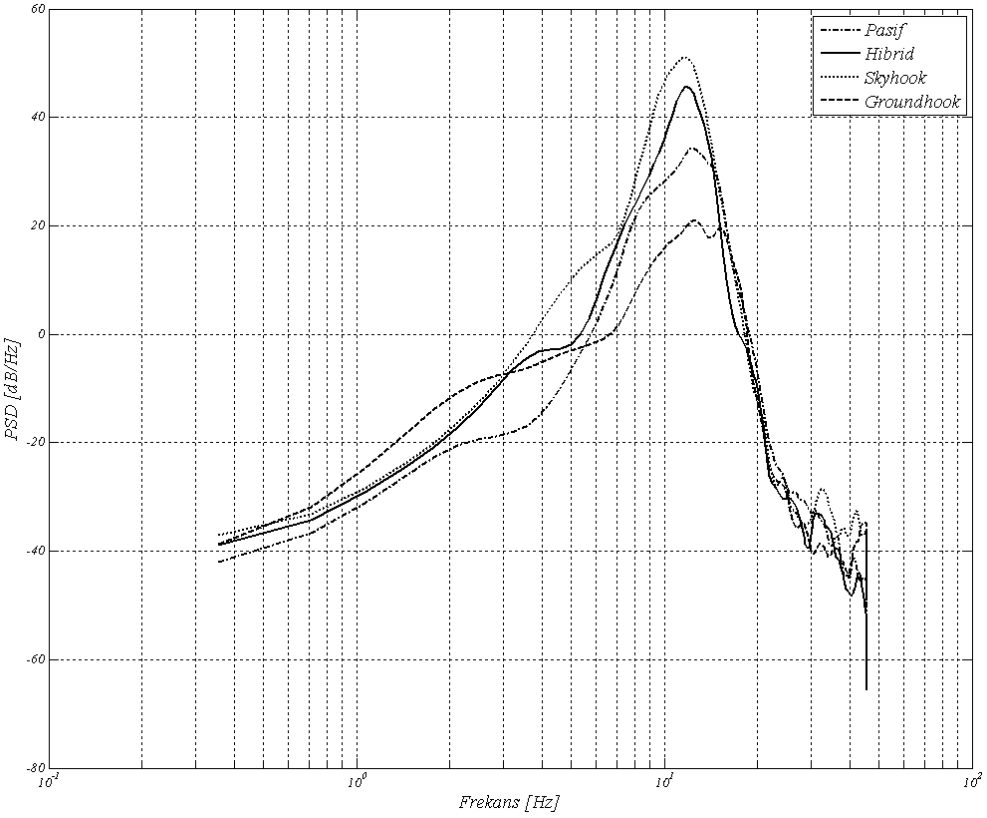
Şekil *A.4*: *X_{r3} durum değişkeni için gözleyici değeri ve gerçek değer*

EK-B PROTOTİP ARACA AİT YOL TESTİ SONUÇLARI

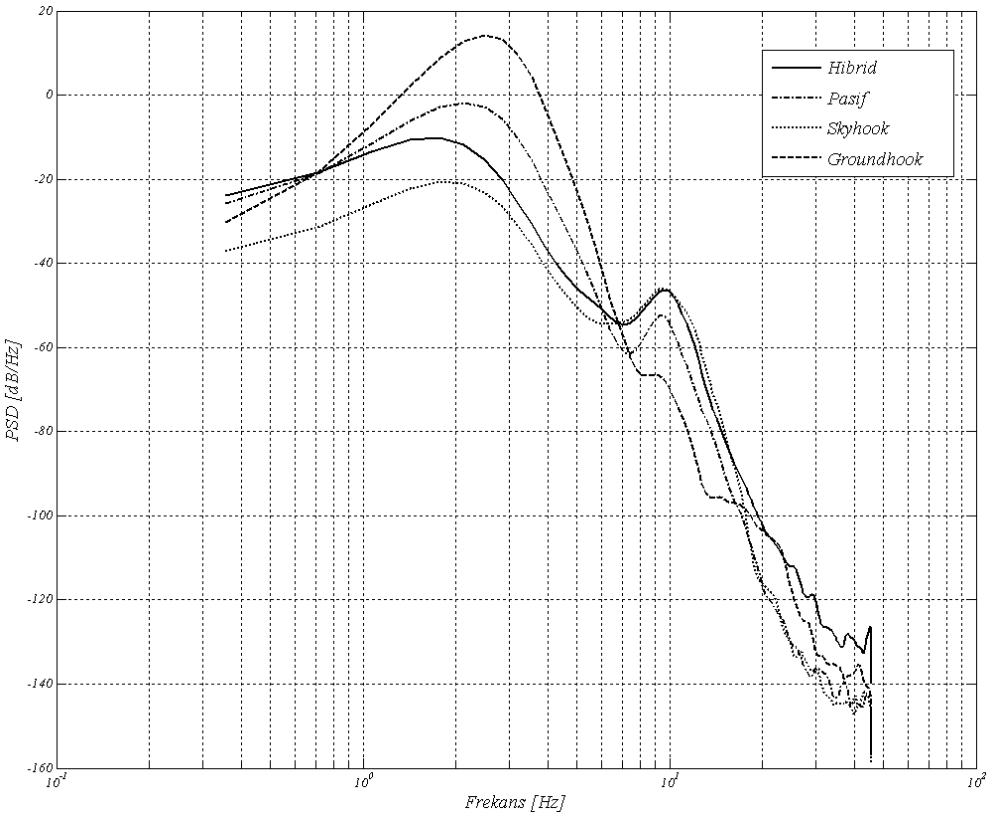
Aşağıdaki şekillerde dokuzuncu bölümde sadece sol ön çeyreğe ait gösterilen sonuçların diğer çeyreklere ait gövde ve tekerlek PSD'leri görülmektedir. Grafiklerden görüleceği üzere, tüm diğer çeyreklerde kontrolcü davranışları beklendiği gibi olmuştur. Testlerde karşılaştırılan konfigürasyonlar Pasif süspansiyon, Skyhook, Groundhook ve Hibrid kontrolcü algoritmalarıdır. Ayrıca Hibrid kontrolcünün tüm testlerinde β katsayısı 0.5 olarak alınmıştır.



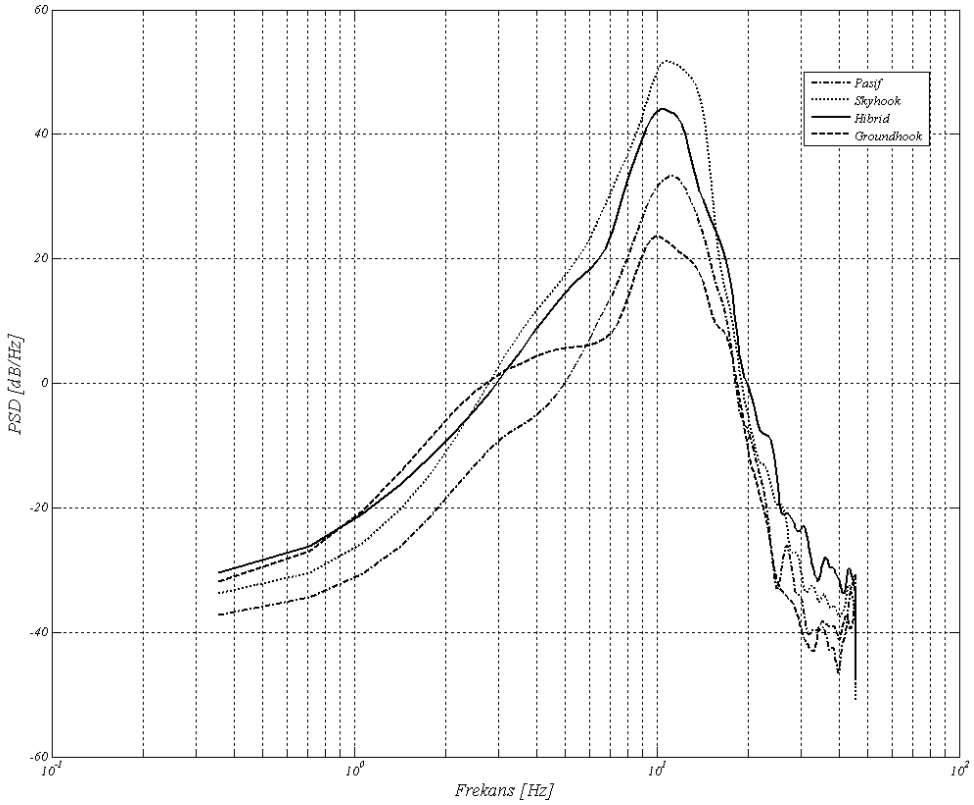
Şekil B.1: Sağ ön gövde ivmeölçeri PSD sonucu



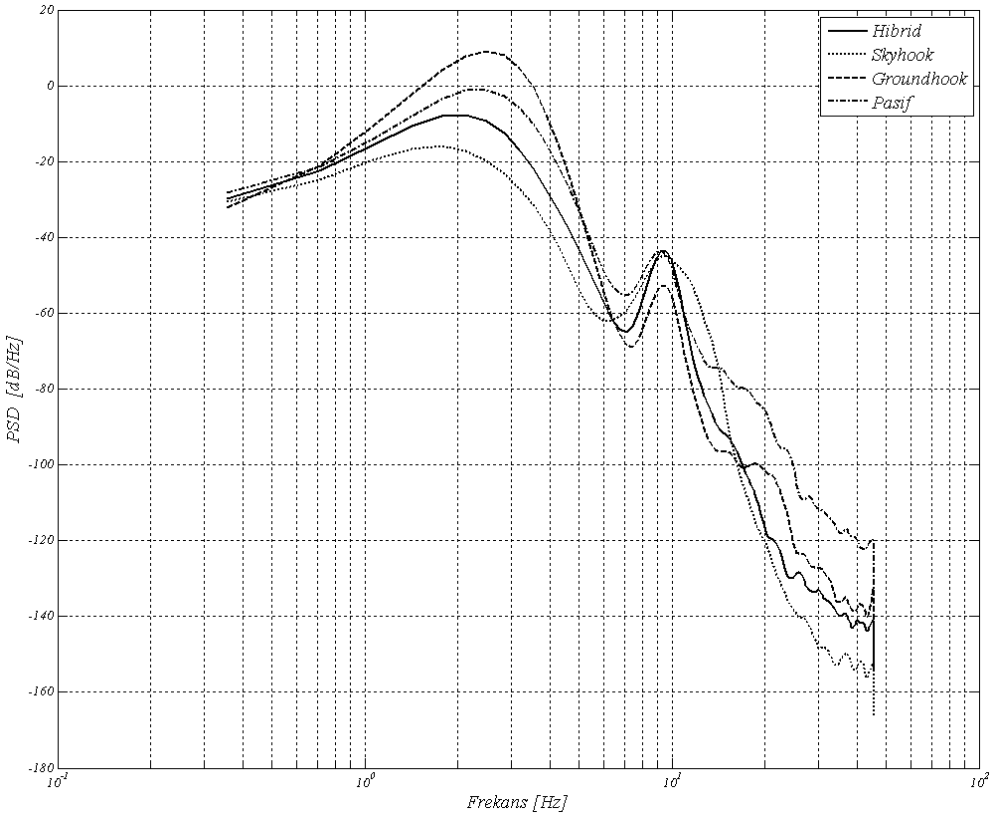
Şekil B.2: Sağ ön tekerlek ivmeölçeri PSD sonucu



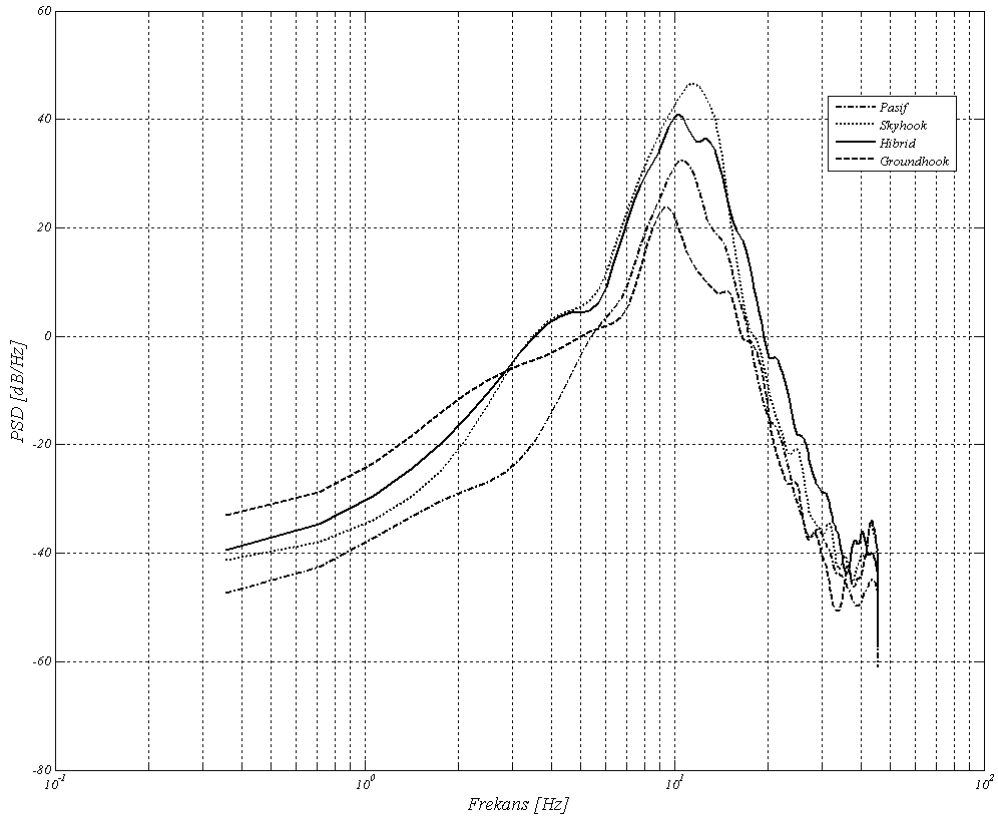
Şekil B.3: Sol arka govde ivmeölçeri PSD sonucu



Şekil B.4: Sol arka tekerlek ivmeölçeri PSD sonucu



Şekil B.5: Sağ arka gövde ivmeölçeri PSD sonucu



Şekil B.6: Sağ arka tekerlek ivmeölçeri PSD sonucu

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Engin Emekli 1984 yılında Bursa'da doğdu. İlköğrenimin ardından Bursa Şükrü Şankaya Anadolu Lisesinde öğrenimine devam etti. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesini kazandı. 2006 yılında İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü Sistem Dinamiği ve Kontrol kolundan mezun oldu. Eylül 2006 tarihinde İ.T.Ü. Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans programına kabul edilmiştir. ASME, IEEE ve SAE tarafından düzenlenen uluslararası konferanslarda yarı aktif süspansiyon konusunda çeşitli bildirileri yayınlanmıştır. Halen FORD-OTOSAN A.Ş.' de Ürün Geliştirme Mühendisi olarak çalışmaktadır.