

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERÇEK ZAMAN KONTROLLÜ MANYETO
REOLOJİK SÖNÜMLEYİCİLERİN ZIRHLI ASKERİ
ARAÇLARA ADAPTASYONU

SABRİ SALTİK

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

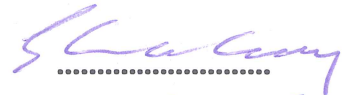
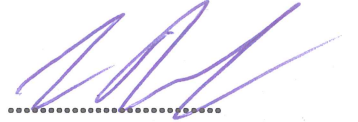
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERÇEK ZAMAN KONTROLLÜ MANYETO REOLOJİK
SÖNÜMLEYİCİLERİN ZIRHLI ASKERİ ARAÇLARA
ADAPTASYONU

SABRİ SALTİK

Prof. Dr. Zafer DÜLGER
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Sedat KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Suat SARIDEMİR
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 13.02.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez kapsamında, son dönemlerde standart binek araçlar da sıkca kullanılmaya başlanan MR (magyeto reolojik) sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemlerin ZPT (zırhlı personel taşıyıcı) sınıfı araçlara entegre edilmesi ve kontrol algoritmasının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır.

Tezimi hazırlamam hususunda, tecrübeleriyle bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Zafer Dülger'e, mesleki eğitim ve hayallerime destek veren aileme, tez çalışmaları kapsamında fikir alışverişinde bulunduğum Doç. Dr. Hakan Köylü hocama, tez kapsamında yaptığımız testler için labratuar imkanlarını kullandığım Gebze Teknik Üniversitesine, testler esnasında bana hertürlü desteği veren ve tecrübelerini paylaştan Yrd. Doç. Dr. Ali Suat Yıldız'a, tezimin hayata geçmesi konusunda bana inanan ve maddi desteğini esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğüne ve Otokar fabrikası yöneticileri ile çalışma arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Şubat - 2017

Sabri SALTİK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Kapsam ve Amaç.....	3
1.2. Literatür Değerlendirmesi	4
2. ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI	6
2.1. Süspansiyon Sistemleri	6
2.1.1. Pasif süspansiyon sistemleri	6
2.1.2. Yarı aktif süspansiyon sistemleri.....	7
2.1.3. Aktif süspansiyon sistemleri.....	8
2.2. Yarı Aktif Süspansiyon Sistemleri.....	8
2.3. MR Sönümleyiciler	9
2.3.1. MR akışkanlar.....	9
2.3.2. MR sönümleyicilerin yapısı.....	10
2.3.3. MR sönümleyiciler ve uygulamaları.....	11
2.3.4. MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemleri.....	11
2.3.5. MR sönümleyici matematik modelleri	12
2.3.5.1. Parametrik modeller	13
2.3.5.2. Parametrik olmayan modeller	15
2.4. Taşıtların Matematik Modelleme Yöntemleri.....	16
2.4.1. Çeyrek taşıt modeli.....	16
2.4.2. Yarım taşıt modeli	17
2.4.3. Tam taşıt modeli	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1. Araç Matematik Modeli	20
3.2. MR Sönümleyicilerin Kontrol Yöntemleri.....	24
3.2.1. Hibrit (skyhook-groundhook) kontrol	25
3.2.2. LQG kontrol.....	26
3.2.3. Kırpmalı (anahtarlamalı) kontrol	28
3.3. Simülasyon Çalışmaları.....	30
3.3.1. Yol girdisi	30
3.3.2. Yarım taşıt simülasyonları	32
4. TEST VE DOĞRULAMA	34
4.1. Deney Düzenegi	34
4.2. Deney Parametreleri	37
4.3. Deney Düzenegi Algoritması	39
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
5.1. Simülasyon Çıktıları.....	43

5.2. Deney Bulguları	45
5.2.1. Doğrulama deneyleri.....	45
5.2.2. Karşılaştırma deneyleri	47
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	56
EKLER	59
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	66
ÖZGEÇMİŞ	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Pasif süspansiyon sistemi şematik gösterimi	7
Şekil 2.2.	Yarı aktif süspansiyon sistemi şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.3.	Aktif süspansiyon sistemi şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.4.	MR akışkan formları	9
Şekil 2.5.	MR sönümleyici yapısal bileşenler	11
Şekil 2.6.	MR yarı aktif süspansiyon çalışma döngüsü	12
Şekil 2.7.	Bouc-Wen modeli şematik gösterimi	14
Şekil 2.8.	Bingham modeli şematik gösterimi	15
Şekil 2.9.	MR sönümleyici polinomial model şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.10.	Çeyrek taşıt modeli	17
Şekil 2.11.	Yarım taşıt modeli	18
Şekil 2.12.	Tam taşıt modeli	19
Şekil 3.1.	ZPT(zırhlı personel taşıyıcı)	20
Şekil 3.2.	ZPT pasif yarım taşıt modeli.....	21
Şekil 3.3.	ZPT yarı-aktif yarım taşıt modeli	23
Şekil 3.4.	ZPT yarı-aktif çeyrek taşıt modeli	24
Şekil 3.5.	Skyhook gösterimi	25
Şekil 3.6.	Groundhook gösterimi	25
Şekil 3.7.	Hibrit kontrol gösterimi	26
Şekil 3.8.	LQG kontrolcu çeyrek taşıt modeli.....	27
Şekil 3.9.	Kırpmalı kontrol voltaj kuvvet grafiği.....	29
Şekil 3.10.	Yol profil sinyali	30
Şekil 3.11.	Perryman IV tipi engel.....	31
Şekil 3.12.	Kayalık zemin	31
Şekil 3.13.	Dik engel.....	31
Şekil 3.14.	Pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt simulink modeli	32
Şekil 3.15.	Yarı aktif süspansiyon sistemli (kırpmalı kontrol) yarım taşıt simulink modeli.....	33
Şekil 3.16.	Yarı aktif süspansiyon sistemli (hibrit kontrol) yarım taşıt simulink modeli.....	33
Şekil 4.1.	Çeyrek taşıt deney düzeneği	35
Şekil 4.2.	Servo motor ve sürücüsü.....	35
Şekil 4.3.	Deney düzeneği kontrol gurubu.....	36
Şekil 4.4.	MR sönümleyici ve seviye sensörleri	36
Şekil 4.5.	Test düzeneği-yaylar	37
Şekil 4.6.	Basma test düzeneği.....	38
Şekil 4.7.	Deney düzeneği blok diagramı	40
Şekil 4.8.	Deney düzeneği mantık döngüsü	41
Şekil 4.9.	Kırpmalı kontrol simulink modeli	41
Şekil 4.10.	Hibrit kontrol simulink modeli	42
Şekil 5.1.	Gövde yerdeğiştirme karşılaştırmalı simülasyon çıktısı.....	43
Şekil 5.2.	Gövde ivmelenme karşılaştırmalı simülasyon çıktısı	44
Şekil 5.3.	Ön aks yerdeğiştirme karşılaştırmalı simülasyon çıktısı	45
Şekil 5.4.	0 volt durumu gövde deplasman grafiği	46

Şekil 5.5.	0 volt durumu aks deplasman grafiği.....	46
Şekil 5.6.	2 volt durumu gövde deplasman grafiği	47
Şekil 5.7.	2 volt durumu aks deplasman grafiği.....	47
Şekil 5.8.	Deney düzeneği gövde yerdeğiştirme	48
Şekil 5.9.	Deney düzeneği aks yerdeğiştirme	49
Şekil 5.10.	Deney düzeneği süspansiyon yerdeğiştirme	49
Şekil 5.11.	Deney düzeneği teker sapması.....	50
Şekil 5.12.	Deney düzeneği taşıt gövdesi ivmelenme.....	51
Şekil 5.13.	Deney düzeneği tekerlek ivmelenme	51
Şekil 5.14.	Deney düzeneği MR damper kuvveti	52
Şekil 5.15.	Deney düzeneği MR voltaj değerleri	53



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Standart MR akışkan sıvı örnekleri	10
Tablo 2.2. LuGre modeli parametreleri tanımları	14
Tablo 2.3. Çeyrek taşıt modeli semboller	17
Tablo 2.4. Yarım taşıt modeli semboller.....	18
Tablo 3.1. ZPT parametreleri	20
Tablo 3.2. J indeks bileşenleri.....	27
Tablo 4.1. Deney düzeneği bileşenleri ve görevleri.....	37
Tablo 4.2. Yay katsayı denklem parametreleri	38
Tablo 4.3. Çeyrek taşıt deney düzeneği yay sabitleri.....	39
Tablo 4.4. Çeyrek taşıt deney düzeneği parametreler	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C_s	: Taşıt modelinin sönüm katsayısı, (Ns/m)
C_{sky}	: Gök kanca sönüm katsayısı, (Ns/m)
C_{gnd}	: Yer kanca sönüm katsayısı, (Ns/m)
C_{hyb}	: Hibrit sönüm katsayısı, (Ns/m)
f	: Gerçek MR sönümleyici kuvveti, (N)
F_F	: Sürtünme kuvveti, (N)
F_H	: MR sıvı manyetik alana bağlı direnç kuvveti, (N)
F_{MR}	: Optimal MR sönümleyici kuvveti, (N)
F_{Toplam}	: Toplam piston kuvveti, (N)
I_x, I_y, I_z	: Eksenel ataletler, (kgm^2)
k	: Süspansiyon yay katsayısı, (N/m)
k_t	: Teker sönüm katsayısı, (N/m)
M_s	: Çeyrek Taşıt modelinin kütle matrisi, (kg)
$M_{dx,dy,dz}$: Dış kuvvetten dolayı oluşan momentler, (Nm)
m_s	: Yaylanan(araç gövdesi) kütle ağırlığı, (kg)
m_u	: Yaylanmayan(aks) kütle ağırlığı, (kg)
μ	: Dinamik viskozite katsayısı, (kg/ms)
ρ	: Öz kütle, (kg/m^3)
θ	: Yunuslama açısı, ($^\circ$)
τ	: Yüzey gerilimi, (kg/s^2)
V	: Uygulanan gerilim, (Volt)
V_{maks}	: MR sönümleyicide oluşabilecek maksimum gerilim, (Volt)
W	: Filtreler, (birimsiz)
$x(t)$: Konum vektörü, (m)
$\dot{x}(t)W$: Hız vektörü, (m/s)
$\ddot{x}(t)$: İvme vektörü, (m/s^2)
$z(t)$: İç dinamik değişken, (m)
σ_0	: Gerilim ile değişen z 'nin rijitliği, (N/(m.V))
σ_1	: İç değişkenin sönüm katsayısı, (N.s/m)
σ_2	: Viskoz sönüm katsayısı, (N.s/m)
σ_a	: İç değişken z 'nin rijitliğin, (N/m)
σ_b	: Voltaja bağlı viskoz sönüm katsayısı, (N.s/(m.V))
a_0	: Oran sabiti, (1/m)
α_h	: Hibrit kontrol geçiş katsayısı,
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$: Yardımcı filtre sinyal katsayıları,

Kısaltmalar

ECU	: Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)
ER	: Elektro Reolojik
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslar Arası Standadizasyon organizasyonu)

MR	: Manyeto Reolojik
LQG	: Linear Quadratic Gaussian (İkinci Dereceden Doğrusal Gauss Fonksiyonu)
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişkenli Diferansiyel Çevrimi)
PSD	: Power Spectral Density (Spektral Güç Yoğunluğu)
ZPT	: Zırhlı Personel Taşıyıcı



GERÇEK ZAMAN KONTROLLÜ MANYETO REOLOJİK SÖNÜMLEYİCİLERİN ZIRHLI ASKERİ ARAÇLARA ADAPTASYONU

ÖZET

Tez kapsamında, gerçek zaman kontrollü manyeto reolojik sönümleyicilerin zırhlı askeri araçlara adaptasyonu işlenmiştir. Askeri araçlar alt sistem (süspansiyon..v.s.) seviyesinde endüstriyel araçlardan çok farklı değillerdir, ancak çalışma şartları ve çevre koşulları bakımından daha zor şartlarda hizmet vermektedirler. Bu bağlamda Yapılan inceleme ve araştırmaların ardından, MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemlerinin zırhlı askeri araçlara adaptasyonu için gerekli alt sistemler ve çalışma döngüsü belirlenmiştir. Sonrasında aracın saha çalışma şartları baz alınarak, tam zamanlı kontrol algoritmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyeto Reolojik, MR, MR Sönümleyici, Yarı Aktif Süspansiyon, Zırhlı Personel Taşıyıcı.

ADAPTATION OF REAL TIME CONTROLLED MAGNETO RHEOLOGICAL DAMPER TO ARMORED MILITARY VEHICLES

ABSTRACT

In the scope of the thesis, adaptation of real time controlled magneto rheological damper to armored military vehicles was mentioned . Normally about subsystem of military vehicles (suspension..etc.) are not very different from the an industrial vehicle, only about working conditions and environmental conditions serve in harder conditions. In this scope after literature search, required subsystems and working cycle was defined. And then real time control algorithms were compared and observed depend on the field condition which vehicle working on it.

Keywords: Armored Personnel Carrier, Magneto Rheological, MR, MR Damper, Semi Active Suspension,.

GİRİŞ

Son yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin kökenini incelediğimizde genellikle askeri ihtiyaçlardan kaynaklandığı görülmektedir. Takip eden yıllar içinde ilgili teknolojilerin stratejik önemini yitirmesiyle, dönem içinde gündelik hayata girdiğini görmekteyiz (Ör. İletişim, havacılık, malzeme...) ancak otomotiv sanayisinde bu gelişimler tam ters yönde akmaktadır. Otomotiv sanayisi, askeri araç sınıflarından zırhlı kara platformlarıyla iç içedir ve bu askeri ihtiyaçlar için sürekli bir gelişim halindedir. Zırhlı araçlar, zırhlı birliklerin konvansiyonel savaş (Taaruz, savunma ve geri hareketler) ile meskun mahallerde muharebe, savaş dışı hareket (İç güvenlik hareketi) görevlerini yerine getirmek ve askeri bir platformda olması gereken altı temel özelliği; beka, ateş gücü, hareket kabiliyeti, komuta kontrol-haberleşme, entegre lojistik destek ve ergonomi ihtiyaçlarını azami şekilde karşılamak üzere tasarlanmış araçlardır. Bu temel özellikleri kısaca özetlersek.

Beka, temel yaklaşım olarak, birinci öncelikle mürebatın hayatta kalmasını sağlamak, ikinci öncelikle sistem ve alt sistemlerin fonksiyonlarını en üst düzeyde tutmak, zırhlı araç tasarımındaki temel tasarım kriterleridir, Bu kapsamda, tehdit mühimmatın birincil etkisini azaltmak amacıyla balistik koruma (zırh koruma), tehdit uyarı sistemleri ve etkili gözetleme sistemleri ile ikincil etkilerine karşı da (yangın söndürme sistemleri v.b.) gelişmiş sistemler zırhlı araçlarda kullanılmaktadır.

Harekat kabiliyeti, aracın muharebe sahasında hızlı intikalini ve yüksek manevra yeteneğini teşkil eden en önemli özelliklerinden birisidir. Motor gücü, transmisyon ve süspansiyon sistemleri, zırhlı aracın sahip olması beklenen taktik istekleri karşılamak üzere seçilir.

Ateş gücü, zırhlı araçların hedefleri tanıma, teşhis ve etkili menzilde imha kabiliyetinin üstün olması beklenir. Dolayısıyla, zırhlı araçlar, hedef sahasında etkili gündüz ve gece gözetleme sistemleri, hedefin imhasını sağlayacak uygun araç üstü silahlar ve silahların hedefe stabilize olmalarını sağlayan hassas atış kontrol

sistemleri ile donatılırlar. Silahların hareketli hedefe stabilize olmasında, hassas atış kontrol sistemlerinin yanı sıra; aracın hareket kabiliyeti kapsamında ele alınabilecek olan süspansiyon sisteminin mevcudiyeti ve hassasiyeti de öne çıkmaktadır. Bu kapsamda süspansiyon sistemi, zırhlı aracın hem sabit hem de zorlu arazi koşullarında hareket halindeki hedefi imha kabiliyetine önemli katkıda bulunmaktadır.

Komuta kontrol bilgi sistemi ve haberleşme, ilgili yaklaşım kapsamında, muharebe meydanının tam ve yeterli taktik-lojistik durum bilgisinin, emir, mesaj ve alarmlarının; ilgili görev kuvveti seviyesine kadar tüm muharebe unsurlarının kullanımına uygun olarak planlanması, işlenmesi, değerlendirilmesi ve araçlara dağıtılmasını sağlamaktır.

Entegre lojistik destek, zırhlı araçların ömür devri maliyetlerinin düşürülmesi, ürün desteklenebilirliğinin, işletme ve bakım faaliyetlerinin etkinliğinin artırılması, zırhlı araç tasarımının temel hedeflerindedir.

Ergonomik açıdan ise zırhlı araç içindeki sistemlerin ergonomik olarak tasarlanması görev yapacak mürettebatın etkinliğini, dolayısıyla zırhlı aracın muharebe sahasındaki etkinliğini artırmaktadır.

MR sönümleyiciler yukarıda bahsedilen özelliklerden ateş gücü, hareket kabiliyeti ve ergonomi ile doğrudan ilişkili durumdadır. Bu etkileşimler dokümanın ilerleyen kısımlarında daha detaylı işlenecektir.

1. GENEL BİLGİLER

Askeri teknolojilerde ateş gücü ve hareket kabiliyeti, düşman unsurlara üstünlük sağlama konusunda en önemli özelliklerdir. Günümüz araçlarının muharebe performansları, güç ağırlık oranları gibi temel özellikleri birbirine çok yaklaşmıştır. Bu noktadan itibaren aracın alt sistem performansları belirleyici ve öne çıkarıcı faktörü oluşturmaktadır. Stabilizasyon sistemi, süspansiyon sistemi bu sistemlere örnektir. Bu tez kapsamında süspansiyon teknolojilerinde son zamanlarda sıkça kullanılmaya başlanan MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemleri incelenmiştir.

1.1. Kapsam ve Amaç

Tez kapsamında otomotiv sektöründe kullanım alanı genişleyen MR sönümleyicilerin son versiyonu olan gerçek zamanlı kontrol edilebilen yeni nesillerinin, askeri kara platformlarına adaptasyonu için sistem girdilerinin belirlenmesi, çalışma için takip edilecek yolun tariflenmesi, gerekli araçların açıklanması, uygulama sonrası platformda karşılanılacak kazanç ve kayıpların raporlanması şeklinde olacaktır.

MR sönümleyiciler adaptasyon bakımından direk olarak uygulanabilir bir sistem olmamakla beraber bir adaptasyon ve test süreci sonrası araçlara entegre edilebilmektedir. Sistemin kontrol algoritması entegre edilecek platforma göre değişkenlik göstermektedir. Bu tez kapsamında gerekli hesaplamalar, prosesler kısacası yol haritası belirlenerek gerçek zaman kontrollü MR sönümleyicilerin askeri kara platformlarına adaptasyonu en doğru şekilde tariflenmesini sağlamaktır. Tezin kapsamında askeri kara platformlarının gereksinimleri, yol karakterleri, süspansiyon sistemleri, MR sönümleyicilerin sınıflandırılması, yapılarının incelenmesi, MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemlerinin bileşenleri, kullanım opsiyonları ve kontrol yöntemleri incelenecektir.

Kapsam alt başlıklarının incelenmesi müteakip kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan simülasyon ve doğrulama testleri için gerekli modellemeler yapılacaktır. İlgili modellemeler;

- a) Kara platformunun yarım taşıt modeli
- b) Hedef parkur profilinin modeli
- c) Kontrol parametreleri
- d) Test düzeneği çeyrek taşıt modeli.

Doğrulama testlerinin gerçekleştirilmesine müteakip sonuçların raporlanması ve kıyaslanmalar yapılarak kontrol metodlarının avantaj ve dezavantajları ortaya konacaktır.

1.2. Literatür Değerlendirmesi

MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemleri hakkındaki çalışmalara baktığımızda 1980'lerin sonundan itibaren çalışmaların başladığını ve bu sistem incelenirken sistemin temel bileşeni sönümleyiciden çok bunun en verimli nasıl kontrol edileceği üstüne çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

MR sönümleyiciler, MR sönümleyici yarı aktif süspansiyon sistemleri ve bunların kontrol yöntemleriyle alakalı çalışmalar aşağıdaki gibidir.

MR sönümleyicilerin kullanımı yaygınlaşmasıyla modelin optimize edilmesi veriminin artırılması gibi çalışmalarda yapılmıştır. Çalışmalarla beraber sönüm kuvveti, manyetik alan, tepki süresi gibi fonksiyonlar arasındaki bağlantılar optimize edilerek sistemin verimliliği artırılmıştır [1].

Benzer bir çalışmada ülkemizde yapılmıştır. Çalışma kapsamında kamyon ve kamyonet gibi ticari araçlarda kullanılabilecek MR sönümleyiciler üstünde durulmuştur, çalışma kapsamında çevresel faktörler değiştirilerek farklı şartlar altında sönümleyicideki yük dağılımı incelenmiştir. Karşılaştırmalar da sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır [2].

MR sönümleyici teknolojisi başlangıç seviyesindeyken ürünler göreceli olarak çok büyük ve kontrol olarak basit elemanlardı, ancak ürünün kendi içindeki evrim

sürecinde daha küçük ve özel amaçlara uygun tasarım çalışmalarında yapıldı. Çalışma sonucunda mevcut otomotiv sönümleyici hacimlerinde yüksek oranda sönüm kuvveti üretilebilmiştir [3].

Benzer bir çalışma otomotiv sektörü dışında medikal sektörde de karşımıza çıkmaktadır. Bacak protezlerinde kullanılan sönüm sistemlerinde MR sönümleyicilerin kullanılabilmesiyle alaklı çalışma yapılmış ve bu konuda gelişimin önü açılmıştır [4].

Ürünün gelişimi ve endüstriyel alanda da yayılması hızlanmıştır. Otomotiv sektöründe ana kalem olarak süspansiyon sistemlerinde kullanılsada çeşitli alt sistemlerde de yaygınlaşmıştır. Bu sistemlerin başında motor titreşim takozları ve koltuk amortisör sistemleri gelmektedir [5,6].

Ürün kendi içinde gelişirken diğer bir konu olan kontrol metodlarında büyük ilerleme yaşanmıştır. Yarı aktif süspansiyon sistemleri MR damperlerden de önce kullanılmaktaydı ve birçok kontrol metodu geliştirilmişti. Kontrol metodları genellikle sönüm kuvvetini kontrol ederek sistemi hedeflenen aralıkta tutmaya odaklanmıştır ve araç bazında bakıldığında sürüş konforunu artırma, yunuslama ve yuvarlanma hareketlerini kontrol altına alarak en verimli kontrol yöntemine ulaşılmaya çalışılmıştır [7,8].

MR sönümleyicilerin yarı aktif sistemlere entegre edilmesiyle beraber bu sistemlerin kontrol algoritmalarında gelişmeler başladı. Kontrol yöntemi olarak diğer yarı aktif sistemlere benzerlikler göstermektedir ancak tepki hızı bakımından sağladığı avantaj kontrol metodlarında gerçek zamanlı kontrole imkan sağlayarak yol adaptasyonu artırılmıştır [9-11].

MR damperli yarı aktif sistemlerin askeri araçlarda denenmeye çok yakın bir zamanda başlanmıştır. Askeri araçlarda personel konforu ve aracın azari şartlarındaki kararlılığı çok önemlidir. MR sistemlerin evrimindeki ilerleme ve gerçek zamanlı kontrol edilebilme imkanı, sistemin askeri araçlarda kullanılabilmenin önünü açmıştır. 2000 den bu yana paletli araçlar dahil 4x4 ve 6x6 araçlarda performans testleri yapılmıştır ve olumlu sonuçlar alınmıştır [12-14].

2. ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI

2.1. Süspansiyon Sistemleri

Kara platformlarında süspansiyon sistemi tasarlanırken tasarım isteklerine cevap verecek en uygun sürüş konforu ve araç kontrolü hedeflenir. Süspansiyon tasarımında temel girdiler yol(zemin) pürüzlülüğünden gelen uyarılar ve dinamik yükler oluşturmaktadır [15].

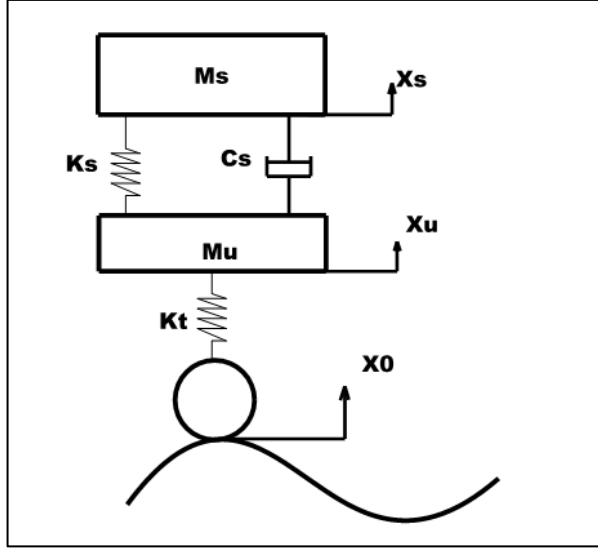
Ayrıca taşıt hareket halindeyken yol pürüzlülüğünden başka, dönen elemanların dengesizliği ve tekerlek çevresinin pürüzlülüğünden de titreşim uyarıları gelir ve bu uyarılar yüksek frekanslarda önemli boyutlara ulaşırlar. Bu uyarılar, tekerlekler aracılığıyla aks, yay ve sönüm elemanları üzerinden gövdeye geçerler [16].

Doğru tasarlanan bir sistem bu uyarıların doğuracağı etkilerin (gerilimler, anlık şoklar, dengesizlik v.s.) araç gövdesine, yolcuya veya hedeflenen bir alt sisteme en az şekilde tesir etmesini sağlar.

Süspansiyon sistemleri kontrol yöntemleri bakımından 3 alt gruba ayrılır.

2.1.1. Pasif süspansiyon sistemleri

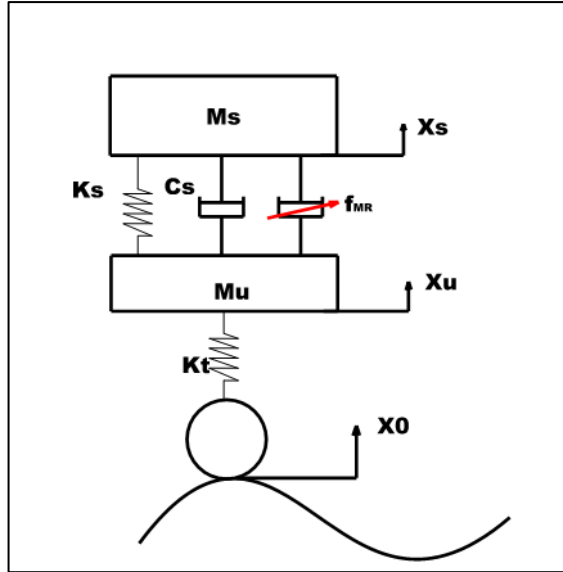
Pasif sistemler standart, endüstriyel araçların tamamına yakınında kullanılmaktadır. Tasarımcılar, pasif sistemlerde (Şekil 2.1) tüm titreşim ve uyarılar için optimum yay ve sönüm kuvvetini hesaplayarak sistemlerini tasarlarlar.



Şekil 2.1. Pasif süspansiyon sistemi şematik gösterimi

2.1.2. Yarı aktif süspansiyon sistemleri

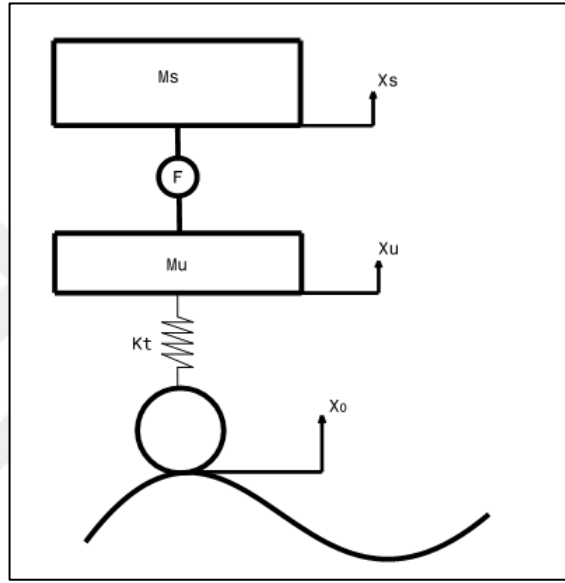
Yarı aktif sistemlerde (Şekil 2.2) temel prensip yay kuvveti veya sönüm kuvvetini ihtiyaç doğrultusunda değiştirilmesine dayanmaktadır. En yaygın ve pratik olan kullanım ise sönüm kuvvetiyle oynamaktır. Sönüm kuvvetini kontrol etmek için kullanılan temel yöntem sönümleyici içindeki akışı kontrol etmektir. Değişen debiyle orantılı olarak sönüm kuvveti değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2.2. Yarı aktif süspansiyon sistemi şematik gösterimi

2.1.3. Aktif süspansiyon sistemleri

Aktif süspansiyon sistemleri (Şekil 2.3) etki-tepki prensibine göre çalışır. Yani titreşimi (ve dolayısıyla ivmeyi) meydana getiren yoldan gelen kuvvete karşı onunla eş zaman ve şiddette kuvvet uygulayabilerseniz titreşimi önleyebilirsiniz. Bunun için aktif sistemler, hidrolik veya elektriksel eyleyiciler (aktüatörler) kullanırlar [17]. Aktif sistemlerin sensör ve kontrol algoritmaları çok hızlı tepki verecek şekilde tasarlanmışlardır ve bu sistemlerin güç gereksinimleri çok yüksektir.



Şekil 2.3. Aktif süspansiyon sistemi şematik gösterimi

2.2. Yarı Aktif Süspansiyon Sistemleri

Yarı aktif süspansiyon sistemleri ilk olarak 1950'ler de hayatımıza girdi, ilk modeller manüel kontrollü çok basit uygulamalardı. Endüstriyel anlamda 1987'den itibaren yarı aktif süspansiyon sistemleri elektronik olarak kontrol edilmeye başlandılar (1987 Mitsubishi Galant). Yarı aktif süspansiyon sistemleri genellikle sönümleyici sertliğini değiştirerek değişen yol şartlarına bağlı olarak gerekli kuvvetlerin oluşturulmasını sağlamak üzerine tasarlanmışlardır. Çeşitli yarı aktif sistemler mevcuttur, burada sönümleyici sertliği için kontrol edilen hidrolik mekanizmalar veya pnömatik sistemler olabileceği gibi elektrik akımının şiddeti ile kontrol edilebilen elektro reolojik (ER) veya manyeto reolojik (MR) sönüm elemanları da

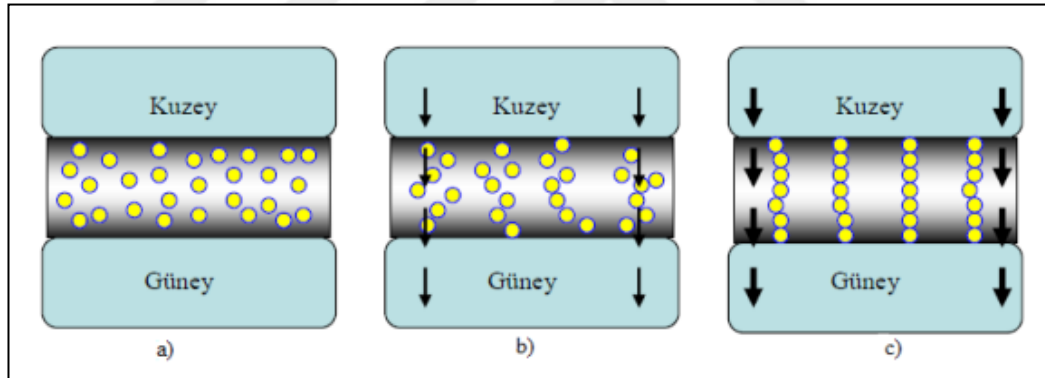
süspansiyon sisteminin kontrol edilmesine ilişkin uygulamalarda kullanılmaktadır [18].

2.3. MR Sönümleyiciler

MR sönümleyiciler birçok sektör de kullanılmaktadır (medikal, inşaat, beyaz eşya..) ancak bu sistemler en yaygın şekilde otomotiv sektöründe karşımıza çıkmaktadır. MR sönümleyicilerin otomotiv sektörüne girişindeki en büyük etkenler, hızlı cevap süresi, sistemin basitliği ve az yer kaplaması olmuştur.

2.3.1. MR akışkanlar

MR akışkanların ilk keşif ve gelişimi Jacob Rabinow tarafından 1940'ların sonlarında (1948-1951) olmuştur (US National Bureau of Standards). MR akışkanlar, uygun taşıyıcı bir sıvı içerisinde mikro-ölçekli mıknatıslanabilir parçacıkların karışımıyla oluşurlar.



Şekil 2.4. a) Serbest form, b) Dizilim başlangıcı, c) Dizilimin son hali

MR akışkanlar, manyetik alan olmayan durumlarda viskosite yönünden sentetik yağlarla benzer karakterdedirler. Ancak, manyetik alanın var olduğu durumlarda (Şekil 2.4) metal parçacıkları manyetik alan doğrultusunda zincir şeklinde hizalanırlar. Bu katılma olgusu, akışkanın akışını kısıtlar. Sonuç olarak akışkanın viskosite endeksi yükselmiş olur. Değişimin ölçüsü, uygulanan manyetik alanın büyüklüğü ile ilgilidir ve bu olay sadece birkaç mili-saniye içinde gerçekleşir [19].

Tipik bir MR akışkanı hacimsel olarak %20-40 saf demir parçacıkları içerir. Bu parçacıklar taşıyıcı sıvı (mineral yağ, sentetik yağ yada su) içinde asılı olarak

dururlar. Ancak bu askıda kalma sürekli değildir, bir süre sonra çökme başlar (karışımın cinsine bağlı olarak süre değişir). Çeşitli eklentiler ile bu taşıyıcı akışkanlar yerçekimsel çökmeye karşı direnci artırılıp, partiküllerin asılımı desteklenir. Ayrıca bu katkılar sayesinde sistem içindeki mekanik aşınımı azaltılır ve yağlayıcı etkisi artırılmaktadır [20]. MR akışkanların manyetik alana bağlı olarak verdikleri kuvvet değerleri taşıdığı partiküllerin mıknatıslanma kabiliyetlerine bağlıdır. Demir ve kobalt alaşımli partiküllerin mıknatıslanma kabiliyetleri en iyi olanlardandır (yaklaşık 2,4 tesla). En genel partikül ise demir tozudur (mıknatıslanma sınırları 2,15 tesla).

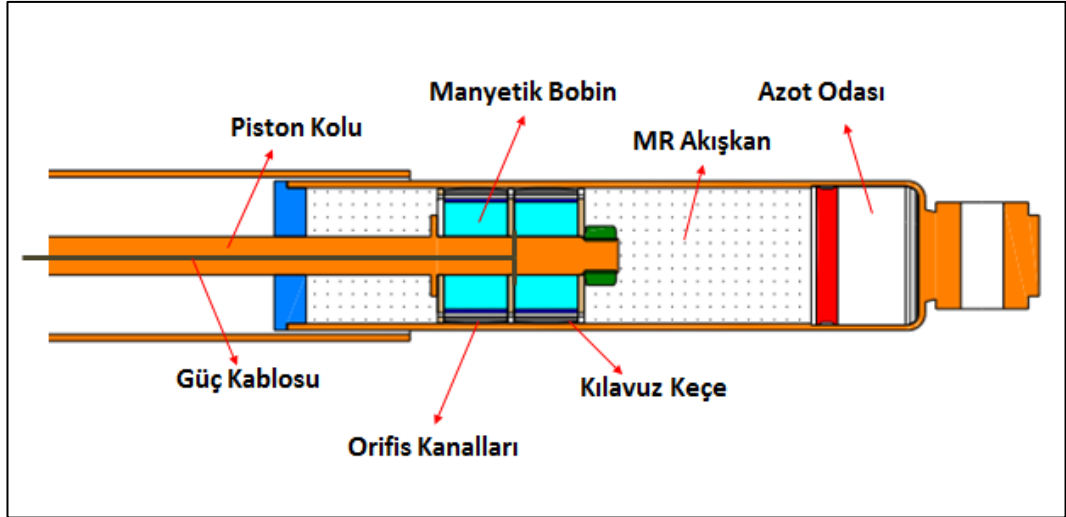
Taşıyıcı sıvı içindeki partiküllerin çapı 3-5 mikron civarındadır. Büyük partiküller MR akışkanın işlevselliğini artırır, buna karşın boyutların büyümesi bu partiküllerin taşıyıcı sıvı içersinde asılı kalmasını zorlaştırır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 2.1) ticari olarak üretilen birkaç MR akışkanların özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Standart MR akışkan sıvı örnekleri

MR akışkan	MRF-132LD	MRF-240BS	MRF-336AG
Akışkanın temeli	sentetik yağ	su	Silikon yağ
İşlem sıcaklığı (C°)	-40/150	0/70	-40/150
Yoğunluk (g/cc)	3,055	3,818	3,446
Katının ağırlıksal oranı	%80,74	%83,54	%82,02
Isıl genişleme katsayısı (hacim,1/ C°)	0,55-0,67 x10 ⁻³	0,223x10 ⁻³	0,58x10 ⁻³
Özgül ısı (@25C°) (J/g C°)	0,80	0,98	0,68
Isıl iletkenlik (w/mC°)	>150	>93	>200
Viskozite(@10s ⁻¹ /50s ⁻¹) (Pa x sec)	0,94/0,33	13,6/5,0	8,5/-

2.3.2. MR sönümleyicilerin yapısı

MR sönümleyiciler yapısal bakımdan ve geometrik boyutlar olarak standart pasif sönümleyicilere çok benzerler. Yapısal farklılık piston kısmına yerleştirilen bobinle kendini göstermektedir (Şekil 2.5). MR sönümleyiciler de kullanılan keçe vb hareketli elemanlar sürtünmeye karşı standart sönümleyicilere göre daha dayanıklıdır.



Şekil 2.5. MR sönümleyici yapısal bileşenler

2.3.3. MR sönümleyiciler ve uygulamaları

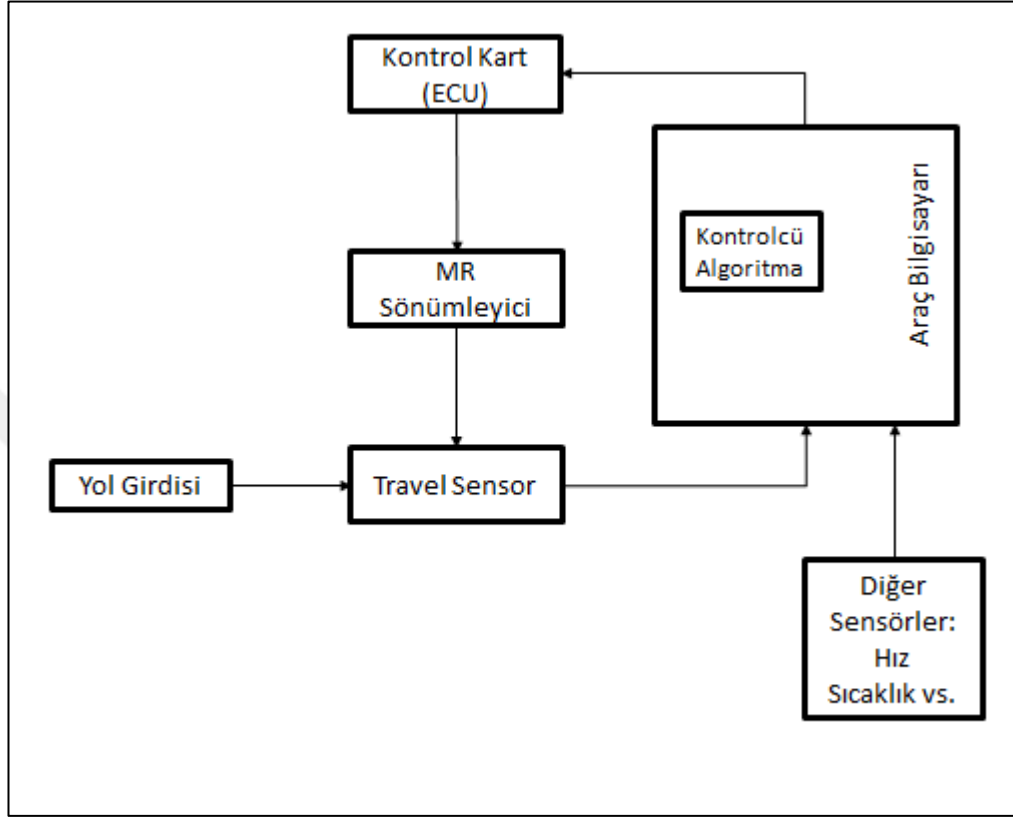
MR sönümleyiciler birçok alanda kullanılmaktadırlar, inşaat, tıp, imalat sektörü v.b. Ancak otomotiv anlamında Manyeto Reolojik (MR) akışkanlı sönümleyiciler 1990 ların sonlarında hayatımıza girmiştir (General Motors 1998). Günümüzdeyse MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemleri çok hızlı yaygınlaşmakla beraber birçok markanın da standart araç paketlerinde yer almaya başlamışlardır. Yaşanan bu gelişmelere paralel olarak askeri araçlarda test edilmeye başlamıştır ve bu çalışmalar sonucunda araçların arazi performanslarında yaklaşık %70'e varan iyileşmeler gözlemlenmiştir [21].

2.3.4. MR sönümleyicili yarı aktif süspansiyon sistemleri

MR Sönümleyicili yarı aktif sistemler diğer yarı aktif sistemlerle benzer yapıya sahiptir, sistem bir tek sönümleyici kısmında farklılık göstermektedir. Sistemin temel bileşenleri;

- MR sönümleyici
- Kontrol kartı (ECU)
- Araç bilgisayarı
- Yerdeğiştirme sensörü (Travel sensor)
- Kontrolcü yazılımı
- Diğer sensorler.

Bu sistemde en önemli iki bileşenden biri MR sönümleyici, diğer bileşen ise kontrolcü algortimasıdır. Bu iki bileşen sistemin performansını belirler. Sistemin çalışma döngüsü Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. MR yarı aktif süspansiyon çalışma döngüsü

2.3.5. MR sönümleyici matematik modelleri

MR sönümleyicilerin kullanım alanları ve verimleri gün geçtikçe artmaktadır. Değişen ihtiyaç ve çevre şartlarından gelen değişkenleri de işin içine kattığımızda sistemin en doğru şekilde ifade edilmesi bir zaruret halini almıştır. Bu doğrultuda da MR sönümleyicilerin doğru ve gerçeğe en yakın şekilde ifade edilmesi gereklidir. MR sönümleyicilerin kuvvet çıktısı sadece elektiksel güç girdisine bağlı değildir, sistem olarak düşünüldüğünde kuvvet çıktısı, elektiriksel girdiler, mekaniksel girdiler ve çevresel girdilerin etkilediği doğrusal olmayan bir fonksiyon olarak belirlenir. MR sönümleyiciler de temelde 3 tip kuvvet oluşur bunlar;

- F_F =Piston ve silindiri arasındaki sürtünme kuvveti
- F_H =MR sıvının manyetik alan sebebiyle akışa karşı gösterdiği direnç kuvvetidir.

- F_T = Sıvı içindeki sürütünme kuvvetidir.

Bu durumda toplam kuvvet Denklem (2.1)'de gösterildiği gibi tariflenir;

$$F_{\text{Toplam}} = F_F + F_H + F_T \quad (2.1)$$

Şeklinde açıklanabilir. Bu eşitlikteki F_F ve F_T sönümleyicinin yapısıyla alakalıdır ancak F_H MR sıvının karakteriyle alakalı bir değişkendir.

Özellikle F_H 'ın gösterdiği değişkenlik sebebiyle MR sönümleyicilerin matematiksel modeli üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Literatürdeki modelleri iki ana başlık altında toplayabiliriz.

2.3.5.1. Parametrik modeller

Parametrik modellerde MR sönümleyici fiziksel elemanlar (yay, sönüm elemanı v.s.) kullanılarak modellenmektedir. Ancak modellemede tanımlanamayan parametrelerin tespiti ve optimisasyonlar için deneysel çalışmalar yapılarak eksik veriler tanımlanır. Bunlardan bazıları.

a) LuGre modeli: LuGre modeli MR sönümleyicinin en az sayıda parametre kullanarak sönümleyicinin ifade edilmesine olanak sağlar. Bu yöntem kontrol uygulamasını kolaylaştıran bir methodur.

LuGre modeline göre MR sönümleyicinin ürettiği kuvveti aşağıdaki Denklem (2.2) ve (2.3) ile tanımlanmaktadır [22];

$$f = \theta_a z + \theta_0 z v + \theta_1 \dot{z} + \theta_2 \dot{x} + \theta_b \dot{x} v \quad (2.2)$$

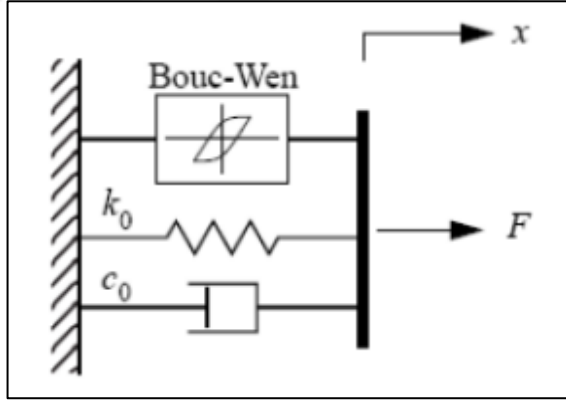
$$\dot{z} = \dot{x} - a_0 |\dot{x}| z \quad (2.3)$$

İlgili parametreler sönümleyicinin bulundurduğu MR sıvı tipine göre değişkenlik gösterdiğinden ilgili sabitler deneysel olarak hesaplanır. Bu sabitlerin tanımları ve değerleri aşağı da Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. LuGre modeli parametreleri tanımları

Sembol	Anlamı	Birimi
$z(t)$	İç dinamik değişken	m
$\dot{x}(t)$	MR sönümleyici hızı	m/s
V	Uygulanan voltaj gerilimi	V
θ_0	Gerilim ile değişen z 'nin rijitliği	N/(m.V)
θ_1	İç değişkenin sönüm katsayısı	N.s/m
θ_2	Viskoz sönüm katsayısı	N.s/m
θ_a	İç değişken z 'nin rijitliğini	N/m
θ_b	Voltaja bağlı viskoz sönüm katsayısı	N.s/(m.V)
a_0	Oran sabiti	1/m

b) Bouc-wen modeli: Bouc-Wen modeli MR sönümleyicilerde gerçeğe en yakın değerleri verir ve bu sebeple en fazla kullanılan modellerden biridir. Ancak kullanılan parametrelerin fazlalığından kaynaklı gerçek zamanlı uygulamalarda problemler yaşanmaktadır [23]. Bu model histeresis kuvvet-hız karakteristiği bir dizi diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Aşağıdaki Şekil 2.7' de şematik gösterimi verilen Bouc-Wen modeli MR sönümleyicinin ilgili eşitliği Denklem (2.4) ve (2.5) ile gösterilmektedir [24].



Şekil 2.7. Bouc-Wen Modeli şematik gösterimi

$$F=c_0\dot{x}+k_0(x-x_0)+az \quad (2.4)$$

$$\dot{z}=-\gamma z|\dot{x}||z|^{n-1}-\beta\dot{x}|z|^n+\delta\dot{x} \quad (2.5)$$

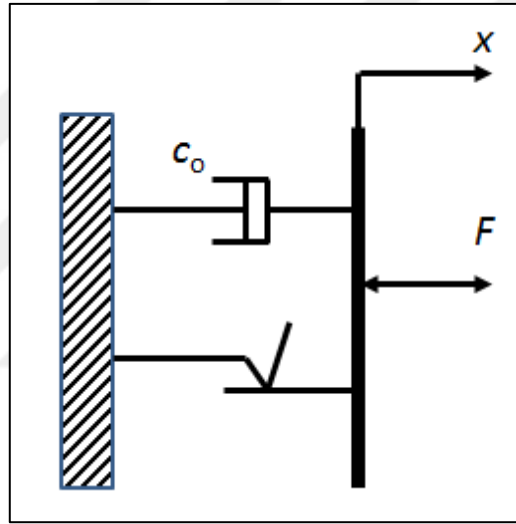
Bu eşitlikteki parametrelerden β , n ve δ değerleri her bir MR sönümleyici için genetik algoritma yöntemiyle elde edilirler.

c) Bingham modeli: Bingham modelinde (Şekil 2.8) lineer olmayan sıvılarda kayma gerilmesi modellenerek kullanılır. Bu gerilim aşağıdaki Denklem (2.6) ve (2.7) ile gösterilmektedir;

$$\tau = \tau_y + \mu_0 \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

$$F = F_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + c_0 \cdot \dot{x} + f_0 \quad (2.7)$$

Bingham modelinde sıfırdan farklı hızlarda Denklem (2.7) de gösterilen F kuvveti kullanılır. Ancak bu modelde sıcaklığa veya çalışmaya bağlı yağ incelmesi veya kalınlaşması durumlarında problemler yaşanmaktadır [25].



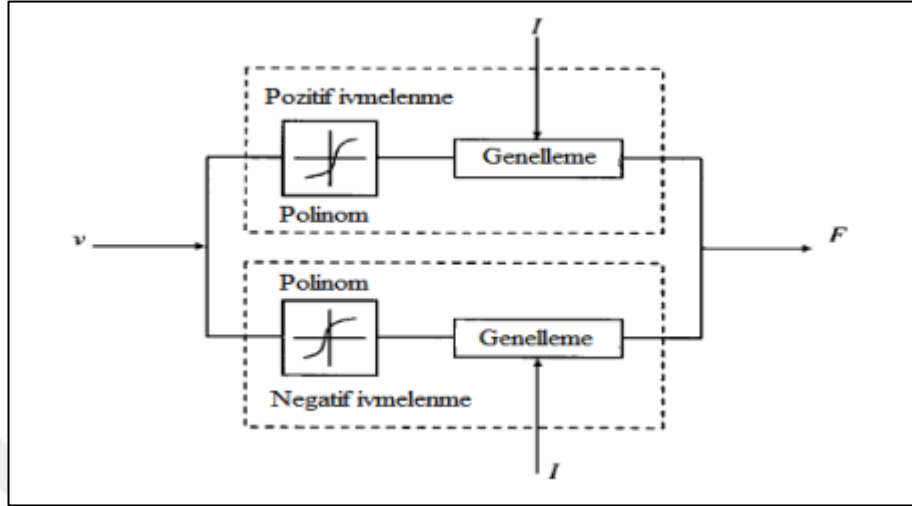
Şekil 2.8. Bingham modeli şematik gösterimi

2.3.5.2. Parametrik olmayan modeller

Parametrik olmayan modellerde deneysel yöntemlerle elde edilen MR sönümleyicinin karakteri, yüksek dereceden polinomlar ile bulunmaya çalışılır. Model için seçilen polinom katsayılarıyla keskin bir şekilde değişmektedir. Bu nedenle katsayı seçimi çok hassastır.

Bu konuda en sık kullanılan model polinomial modeldir. Bu model kullanılarak sönümleyicinin histeresis özellikli kuvvet-hız eğrisi, yüksek dereceden polinomlar ile elde edilebilir [26].

Aşağıdaki şematik gösterimde (Şekil 2.9) kuvvet-hız eğrisi pozitif ivmelenme ve negatif ivmelenme olarak iki şekilde incelenir ve her iki ivmelenme için ayrı katsayılar tanımlanır.



Şekil 2.9. MR Sönümleyici polinomial model şematik gösterimi

2.4. Taşıtların Matematik Modellenme Yöntemleri

Taşıtların titreşimlerinin analizlerinde, süspansiyon simülasyonlarında sistemin matematik modelini yapabilmek için taşıtların fiziksel basit bir modeli oluşturulur, buradan da matematiksel modeller üretilir. Modelleme yöntemi olarak en genel ve karmaşık halden en küçük ve basit hale doğru olmak üzere üç değişik model mevcuttur. Bunlar;

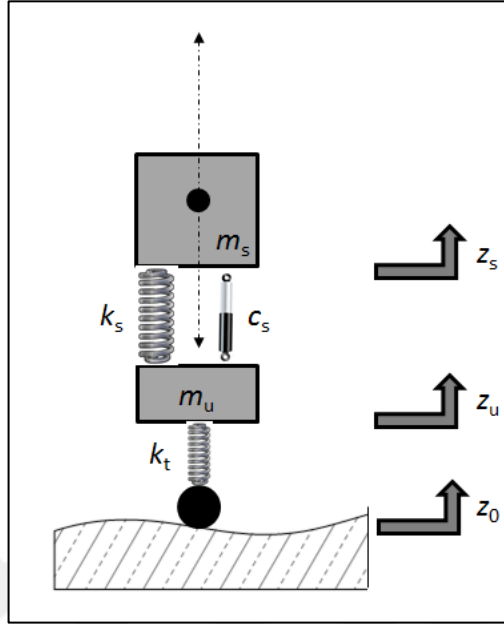
- Çeyrek Taşıtlar Modeli
- Yarı Taşıtlar Modeli
- Tam Taşıtlar Modeli.

Tüm bu modellerde taşıta ait alt sistemler kütle, yay, sönümleyici gibi basit alt bileşenlerle tariflenir.

2.4.1. Çeyrek taşıtlar modeli

Araç gövdesinin $\frac{1}{4}$ 'ünü baz alarak yapılan modelledir. Şekil 2.10' da görüldüğü gibi sistem en basit haliyle tariflenmiştir. Çeyrek taşıtlar modeli parametrelerin az oluşu ve kolay modellenebilmesi sayesinde simülasyonların çoğunda kullanılmaktadır.

Çeyrek taşıt modelinde kullanılan bileşenlerin tanımları aşağıdaki Tablo 2.3'de belirtilmiştir [27].



Şekil 2.10. Çeyrek taşıt modeli

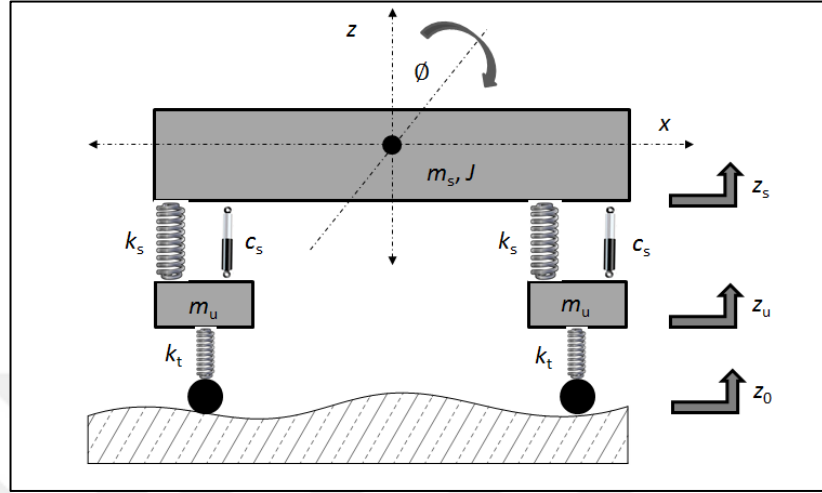
Tablo 2.3. Çeyrek taşıt modeli semboller

Sembol	Anlamı
m_s	Taşıt gövde kütlesi(yaylanan kütle)
m_u	Aks kütlesi(yaylanmayan kütle)
k_s	Süspansiyon yay sabiti
k_t	Teker yaylanma sabiti
z_s	Gövde yerdeğiştirme
z_u	Aks yerdeğiştirme
z_0	Teker yerdeğiştirme
c_s	Süspansiyon sönüm sabiti

2.4.2. Yarım taşıt modeli

Bu modelde araç boylam ekseninde 2 eşit parçaya bölünerek tüm sistemler 2 boyuta indirgenirler (Şekil 2.11). Bu modelde çeyrek taşıt modeline ek olarak yunuslama (başvurma) gibi dinamik hareketler gözlemlenebilmektedir. Çeyrek taşıt modelinde kullanılan bileşenlerin tanımları aşağıdaki Tablo 2.4'de belirtilmiştir.

Bu modelde taşıt gövdesi, ağırlık merkezinde toplanmış toplam kütle $1/2'$ si kadar bir m_s kütlede ve kütle merkezine göre eylemsizlik momenti J olan katı bir cisim olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle de yarı taşıt modeli olarak anılmaktadır.



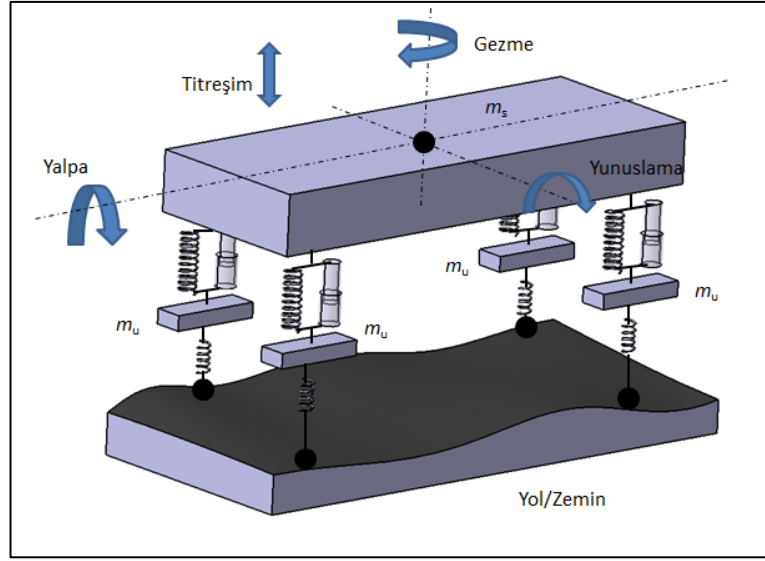
Şekil 2.11. Yarı taşıt modeli

Tablo 2.4. Yarı taşıt modeli semboller

Sembol	Anlamı
m_s	Taşıt gövde kütlesi(yaylanan kütle)
m_u	Aks kütlesi(yaylanmayan kütle)
k_s	Süspansiyon yay sabiti
c_s	Süspansiyon sönüm sabiti
J	Yaylanmayan kütlelerin eylemsizlik momenti
θ	Yunuslama açısı
k_t	Teker yaylanma sabiti
z_s	Gövde yerdeğiştirme
z_u	Aks yerdeğiştirme
z_0	Teker yerdeğiştirme

2.4.3. Tam taşıt modeli

Her bir süspansiyon grubunu ve bağlı alt sistemleri ayrı ayrı modelleyerek yapılan modellemedir. Gerçek şartlara en yakın modellemedir (Şekil 2.12). Bu modellemede yalpa, gezme, yunuslama gibi tüm dinamik etkiler gerçeğe en yakın şekilde gözlenebilmektedir. Ancak gerçek dünyada araç içindeki diğer alt sistemler (aktarma organları, motor vs.) ve diğer çevre şartlarının etkisiyle taşıt titreşimleri daha kompleks bir fonksiyonun sonucudur ve bu sebeplerin de etkisiyle, tam taşıt modeli tam anlamıyla sistemi modelleyememektedir [28].



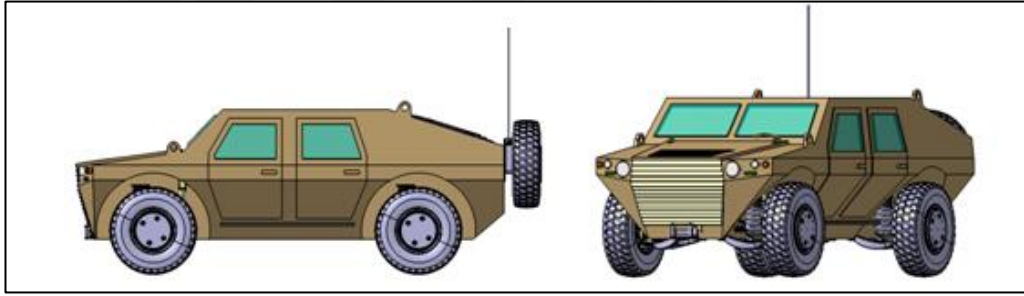
Şekil 2.12. Tam taşıt modeli

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda simülasyon ve testlerde kullanacağımız model, parametre ve yöntemleri inceleyeceğiz. Dökümanın başında bahsedilen ZPT platformunun parametrelerini incelenecek ve bunlar taşıt modeline uyarlanacaktır. Diğer taraftan ise ilgili platform için hedeflenen kontrol algoritmaları oluşturulacaktır.

3.1. Araç Matematik Modeli

Hedeflenen kara platformu genel amaçlı bir Zırhlı Personel Taşıyıcıdır (ZPT). ZPT ler (Şekil 3.1) genel maksatlı kullanılabilen bir platformdur. İlgili platformun görev sahası ve çalışma şartları çok geniş kapsamlıdır.



Şekil 3.1. ZPT 3D modeli

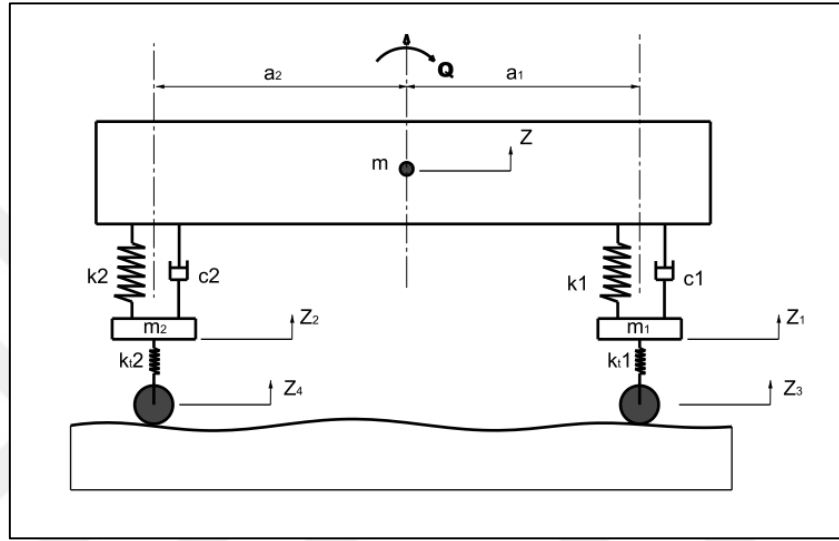
Aracın genel parametreleri aşağıdaki Tablo 3.1’de verilmiştir. Günümüz şartlarında bu tür araçlarda standart pasif süspansiyon sistemi kullanılmaktadır. Aracın matematik modeli oluşturulurken pasif sistemli yarım taşıt modeli (Şekil 3.2), yarı aktif sistemli yarım taşıt modeli (Şekil 3.3) ve yarı aktif sistemli çeyrek taşıt modeli (Şekil 3.4) olmak üzere 3 adet taşıt modeli oluşturulmuştur.

Tablo 3.1. ZPT parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Taşıt ağırlığı	M	6000	kg
Ön aks yükü	M_1	2800	kg
Arka aks yükü	M_2	3200	kg
Aks mesafesi	l	3300	mm
Ön aks ağırlık merkezine mesafesi	a_1	1800	mm

Tablo 3.1. (Devam) ZPT parametreleri

Yaylamayan kütle ağırlığı	M_s	130	kg
Ön Lastik yay sabiti	kt_1	463800	N/m
Arka Lastik yay sabiti	kt_2	463800	N/m
Ön aks yay sabiti	k_1	163000	N/m
Arka aks yay sabiti	k_2	450000	N/m
Pasif sönümleyicili sönüm sabiti	C_1, C_2	9053	Ns/m
Araç gövdesinin ataleti	I_y	4350	kgm ²



Şekil 3.2. ZPT pasif yarım taşıt modeli

İlk iki yarım taşıt modelin de kullanılan enerji denklemleri ise Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)'de gösterilmiştir.

a. Kinetik enerji;

$$K = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{z}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} I_y \dot{\theta}^2 \quad (3.1)$$

b. Potansiyel enerji;

$$P = \frac{1}{2} k_{t1} (z_1 - z_3)^2 + \frac{1}{2} k_{t2} (z_2 - z_4)^2 + \frac{1}{2} k_1 (z - z_1 - a_1 \theta)^2 + \frac{1}{2} k_2 (z - z_2 - a_2 \theta)^2 \quad (3.2)$$

c. Sönümleme Enerjisi;

$$D = \frac{1}{2} c_1 (\dot{z} - \dot{z}_1 - a_1 \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{z} - \dot{z}_2 + a_2 \dot{\theta})^2 \quad (3.3)$$

Yukarıdaki tariflenen enerji denklemleri matematik modellerimizin başlangıç noktasını teşkil etmektedir.

Yarım Taşıt modelinin serbestlik derecesi 4 tür, bu parametreler ; z, θ, z_1, z_2 dir (Denklemlerimizde yunuslama hareketlerinin küçük açılar yaptığı kabul edilmiştir). Her bir değişken için ilgili denklemler Denklem (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.7) türetilirse;

z :

$$m\ddot{z}+c_1(\dot{z}-\dot{z}_1-a_1\dot{\theta})+c_2(\dot{z}-\dot{z}_2+a_2\dot{\theta})+k_1(z-z_1-a_1\theta)+k_2(z-z_2+a_2\theta)=0 \quad (3.4)$$

θ :

$$I_y\ddot{\theta}-a_1c_1(\dot{z}-\dot{z}_1-a_1\dot{\theta})+a_2c_2(\dot{z}-\dot{z}_2+a_2\dot{\theta})-a_1k_1(z-z_1-a_1\theta)+a_2k_2(z-z_2+a_2\theta)=0 \quad (3.5)$$

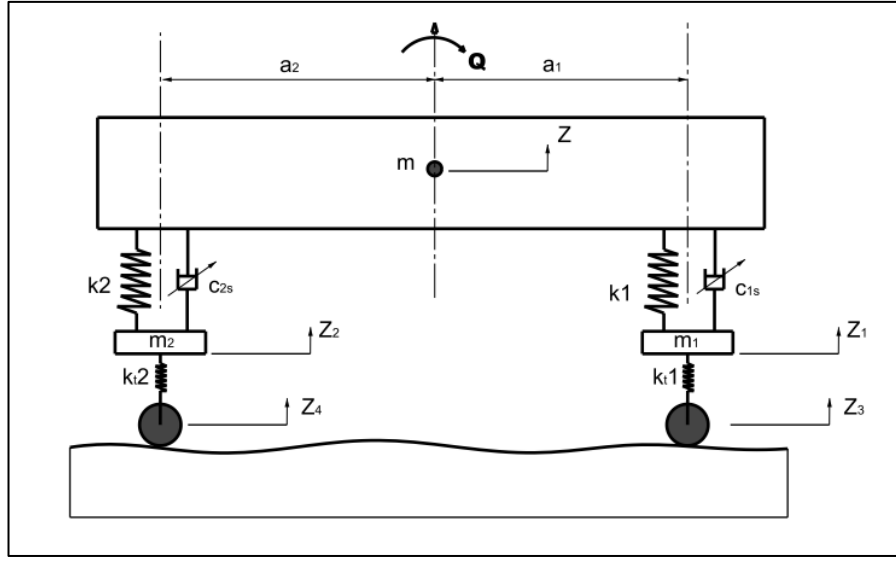
z_1 :

$$m_1\ddot{z}_1-c_1(\dot{z}-\dot{z}_1-a_1\dot{\theta})+k_{t1}(z_1-z_3)-k_1(z-z_1-a_1\theta)=0 \quad (3.6)$$

z_2 :

$$m_2\ddot{z}_2-c_2(\dot{z}-\dot{z}_2-a_2\dot{\theta})+k_{t2}(z_2-z_4)-k_2(z-z_2-a_2\theta)=0 \quad (3.7)$$

Bu denklemler pasif sistemler için geçerli olmakla beraber diğer sistemler (yarı aktif) için temel teşkil etmektedir.



Şekil 3.3. ZPT yarı aktif yarım taşıt modeli

Yarı aktif yarım taşıt modelinde ek olarak sönüm kuvveti f denkleme eklenir. Bu kuvvet hareket denklemlerine eklendiğinde ilgili eşitlikler Denklem (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) aşağıdaki şekli alırlar;

z :

$$m\ddot{z} + c_1(\dot{z} - \dot{z}_1 - a_1\dot{\theta}) + c_2(\dot{z} - \dot{z}_2 + a_2\dot{\theta}) + k_1(z - z_1 - a_1\theta) + k_2(z - z_2 + a_2\theta) - f = 0 \quad (3.8)$$

θ :

$$I_y\ddot{\theta} - a_1c_1(\dot{z} - \dot{z}_1 - a_1\dot{\theta}) + a_2c_2(\dot{z} - \dot{z}_2 + a_2\dot{\theta}) - a_1k_1(z - z_1 - a_1\theta) + a_2k_2(z - z_2 + a_2\theta) - f = 0 \quad (3.9)$$

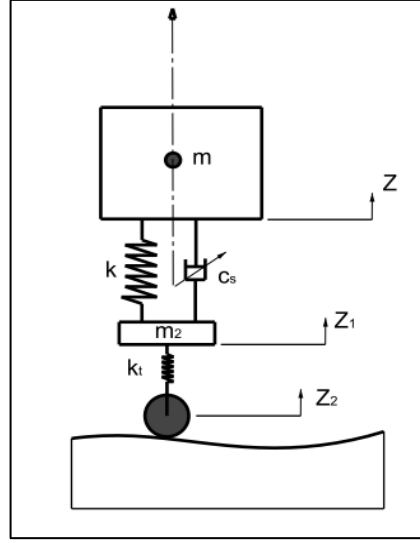
z_1 :

$$m_1\ddot{z}_1 - c_1(\dot{z} - \dot{z}_1 - a_1\dot{\theta}) + k_{t1}(z_1 - z_3) - k_1(z - z_1 - a_1\theta) + f = 0 \quad (3.10)$$

z_2 :

$$m_2\ddot{z}_2 - c_2(\dot{z} - \dot{z}_2 - a_2\dot{\theta}) + k_{t2}(z_2 - z_4) - k_2(z - z_2 - a_2\theta) + f = 0 \quad (3.11)$$

Yarı aktif çeyrek taşıt modeli daha basit bir sistemdir. Çeyrek taşıt modeli iki serbestlik dereceli bir modeldir. Bu modelde kullanılan parametreler, z ve z_1 dir. Her bir değişken için ilgili denklemler Denklem (3.12) ve Denklem (3.13) türetilirse;



Şekil 3.4. ZPT yarı-aktif çeyrek taşıt modeli

z:

$$m_1 \ddot{z} - c(\dot{z} - \dot{z}_1) - k(z - z_1) + k_t(z_1 - z_2) - f = 0 \quad (3.12)$$

z₁:

$$m_1 \ddot{z}_1 + c(\dot{z} - \dot{z}_1) + k(z_1 - z_2) + f = 0 \quad (3.13)$$

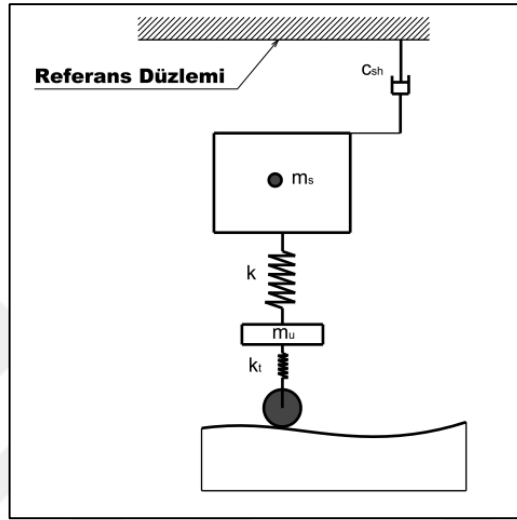
3.2. MR Sönümleyicilerin Kontrol Yöntemleri

Yarı aktif süspansiyon sistemlerinde kullanılmak üzere konfor ve yol tutuş kombinasyonunu en optimum şekilde elde edecek çeşitli kontrol yaklaşımları tasarlanmıştır. Bu yöntemler başta MR sönümleyicinin doğru sönümlenme kuvvetini üretmesi ve sistemi hedeflenen şekilde denetleyecek şekilde tasarlanmıştır.

İdeal sönümlenme kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan başlıca kontrol yaklaşımları olarak Hibrit (skyhook-groundhook) kontrol, LQG kontrol, H_∞ ve kırpmalı (anahtarlamalı) kontrol metodları gösterilebilir. Bölüm içeriğinde bu kontrol yaklaşımları ile ilgili temel bilgiler ve çeyrek taşıt modeline uygulanışı yer alacaktır.

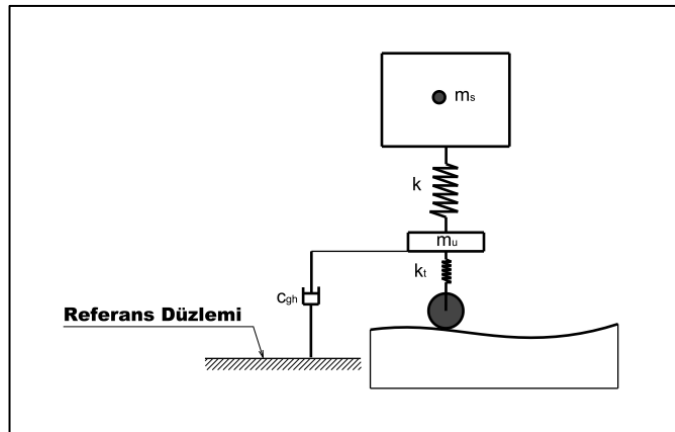
3.2.1. Hibrit (skyhook–groundhook) kontrol

Skyhook kontrol yaklaşımında (Şekil 3.5), taşıt gövdesine bağlı bir sönümleyicinin hayali bir referans noktasıyla gökyüzüne bağlanması kabulüne dayanır. Sönümleyicinin ürettiği kuvvet yaylanan kütlelerin hızı ve sönüm katsayısı ile belirlenir. Yaylanan kütlelerin performansına odaklanmış ideal bir kontrol yaklaşımıdır.



Şekil 3.5. Skyhook gösterimi

Groundhook kontrol metotunda (Şekil 3.6) ise benzer yaklaşım yaylanmayan (aks) kütlelerinin hayali bir referansla yeryüzüne bağlanması kabulüne dayalıdır. Bu yaklaşım yol tutuş performansı üzerine yoğunlaşmıştır.



Şekil 3.6. Groundhook gösterimi

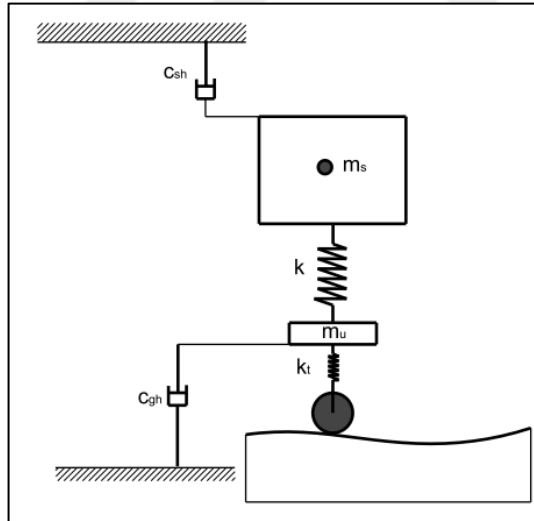
Bu iki kontrol yönteminin birleştirildiği yöntem ise hibrit kontrolcüdür. Aşağıdaki matematiksel denklemler Denklem (3.14), (3.15) ve (3.16)'da belirtildiği şekilde skyhook ve groundhook durumlarında üretilecek kuvvet değeri ve hibrit kontrolcünün gerekli kuvvet değerine karar verme şartları verilmiştir. Burada her iki durum için c_{sky} ve c_{gnd} sönüm katsayıları seçilmektedir [29];

$$F_{hibrit} = \alpha_h F_{sky} + (1 + \alpha_h) F_{gnd} \quad (3.14)$$

$$F_{sky} = \begin{cases} c_{sky} \dot{x}_2, & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_2 > 0 \\ 0, & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_2 \leq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$F_{gnd} = \begin{cases} -c_{gnd} \dot{x}_1, & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_1 < 0 \\ 0, & (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \dot{x}_1 \geq 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Denklemlerde kullanılan α_h katsayısı hibrit kontrollör geçiş katsayısıdır, bu katsayı sistemin optimizasyonuna bağlı olarak seçilir ve sistemin karakterine bağlı olarak 0-1 arasında bir değer seçilir.



Şekil 3.7. Hibrit kontrol gösterimi

3.2.2. LQG kontrol

LQG (linear quadratic gaussian) kontrol yöntemi (Şekil 3.8) rastgale titreşimli sistemlerde önerilen bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol mantığında algoritma girdisi olarak yaylanan kütle ivmesi ve lastik deplasmanı kullanılır. LQG kontrol

mantığında algoritma iki aşamalı çalışır, ilk adımda optimum kuvvet algoritma doğrultusunda hesaplanır ve ardından sistem MR sönümleyiciyi besler. Algoritmanın çalışma mantığı aşağıdaki şekilde tariflenebilir [30].

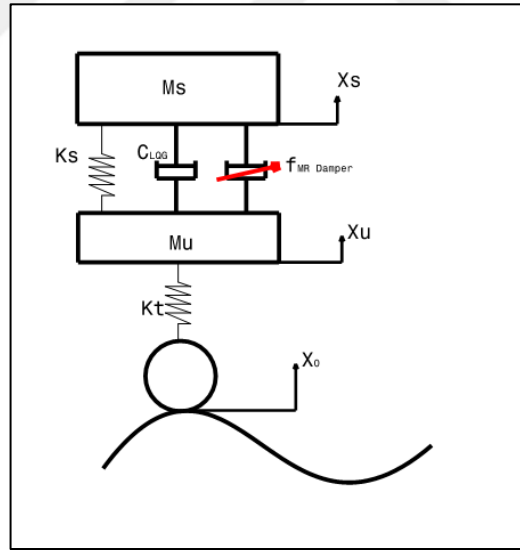
J, MR süspansiyon sisteminin performans indeksi olacak şekilde Denklem (3.17) de verilmiştir;

$$J = \int_0^{\infty} [\dot{x}_s^2 + \rho_1 x_s^2 + \rho_2 x_0^2 + \rho_3 u^2] dt \quad (3.17)$$

Burada ki semboller Tablo 3.2 tanımlanmıştır.

Tablo 3.2. J indeks bileşenleri

Sembol	Tanım
$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$	Ağırlık faktörleri
\dot{x}_s	Yaylanan kütle hız
x_s	Yaylanan kütle yerdeğiştirme
x_0	Teker yerdeğiştirme
U	Denge girdisi



Şekil 3.8. LQG kontrolcu çeyrek taşıt modeli

Aynı denklem aşağıdaki Denklem (3.18) gibi yazıldığında;

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q_x + 2x^T S^T u + u^T R_u] dt \quad (3.18)$$

Olmaktadır. Buradan alt bileşenleri çektığımızda Denklem (3.19), (3.20) ve (3.21) çıkmaktadır;

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{k_s^2}{m_s^2} & \frac{k_s c_s}{m_s^2} & 0 & -\frac{k_s c_s}{m_s^2} \\ \frac{k_s c_s}{m_s^2} & \frac{c_s^2}{m_s^2} + \rho_1 & 0 & -\frac{c_s^2}{m_s^2} \\ 0 & 0 & \rho_2 & 0 \\ -\frac{k_s c_s}{m_s^2} & -\frac{c_s^2}{m_s^2} & 0 & \frac{c_s^2}{m_s^2} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$S = - \begin{pmatrix} -\frac{k_s}{m_s^2} \\ -\frac{c_s}{m_s^2} \\ 0 \\ \frac{k_s}{m_s^2} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

$$R = \left(\frac{1}{m_s} + \rho_3 \right) \quad (3.21)$$

Bu bileşenlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda sönüm kuvveti Denklem (3.22)'de gösterildiği gibidir;

$$F'_{opt} = -R^{-1} (B^T P + S) x \quad (3.22)$$

Burada P, Denklem (3.23)'de gösterilmektedir ;

$$\dot{P} = -PA - A^T P + PRP - Q \quad (3.23)$$

Bu doğrultuda hesaplanan optimum sönüm kuvveti aşağıdaki Denklem (3.24) gibi yazılabilir;

$$F'_{opt} = \begin{cases} F'_{opt} & F'_{opt}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) < 0 \\ 0 & F'_{opt}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \geq 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

3.2.3. Kırpmalı (anahtarlamalı) kontrol

Kırpmalı (anahtarlamalı) kontrol yaklaşımında doğrusal optimum kontrolcü Kc(s) tasarlanmıştır, bu kontrolcü hedeflenen en uygun kontrol kuvveti

$f_c=[f_{c1},f_{c2},f_{c3}\dots f_{cn}]^T$ hesaplar. Hesaplamalarında girdi olarak yapısal cevap y ve ölçülen kontrol kuvvetini f kullanır ;

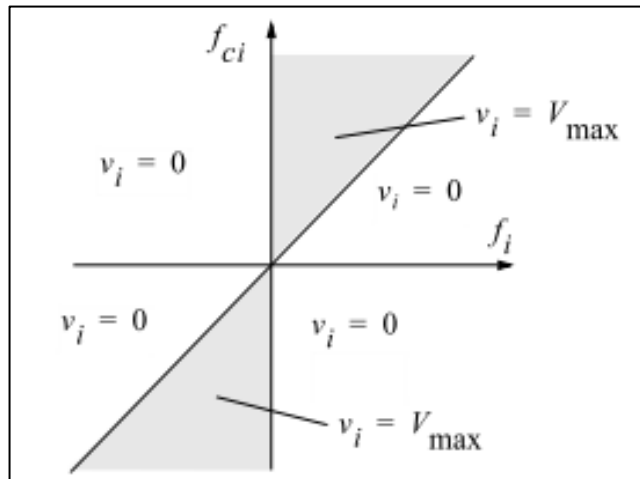
$$f_c=L^{-1}[-K_c(s)L\left\{\begin{matrix} y \\ f \end{matrix}\right\}] \quad (3.25)$$

Buradaki L , laplace çevrimidir.

MR sönümleyici tarafından üretilen kuvvetler yapısal cevapların sonucudur, bu sebepten istenilen optimum sönüm kuvveti f_{ci} her zaman MR sönümleyici tarafından üretilemez. Sistemin ürettiği kuvveti arttırmak yada azaltmak için sadece kontrol voltajı v_i doğrudan kontrol edilerek sağlanabilir. Böylelikle hedeflenen optimum kontrol kuvveti f_{ci} üretmek için kuvvet geri besleme döngüsü oluşturulur.

Temel olarak, eğer sönümleyicinin ürettiği kuvvet hedeflenen kuvvetten küçük ve aynı yönde ise sistem hedeflenen kuvvete ulaşmak için sürücü gerilimini artırarak hedeflenen kuvveti yakalamaya çalışır. Diğer durumlarda kontrol gerilimi 0-V olarak kalır. Algoritma doğrultusunda seçilen kontrol sinyalinin grafiksel gösterimi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Matematiksel olarak gösterimi ise Denklem (3.26)'da gösterilmektedir [31] ;

$$V_i=V_{\max}H(\{f_{ci}-f_i\}f_i) \quad (3.26)$$



Şekil 3.9. Kırpmalı kontrol voltaj kuvvet grafiği

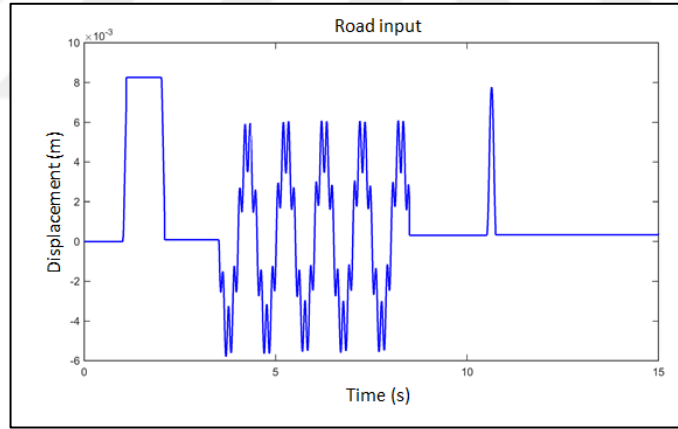
3.3. Simülasyon Çalışmaları

Bu kısımda hedef aracımızın (ZPT) maruz kaldığı yol şartları öngörülerek, tasarlanan yol profilinde koşturulmuştur. Simülasyon çalışmaları kapsamında kırpmalı ve hibrit kontrolcüler simülasyonda koşturulmuştur. Simülasyon çalışmaları doğrultusunda aracımızın parametreleri kullanılarak simulink ortamında yarım taşıt modelleri oluşturulmuştur, bunlar;

- Pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt simülasyonu.
- Yarı aktif süspansiyon sistemli (kırpmalı kontrol) yarım taşıt simülasyonu.
- Yarı aktif süspansiyon sistemli (hibrit kontrol) yarım taşıt simülasyonu.

3.3.1. Yol girdisi

Yol profili, simülasyon çalışmamızın ana parçalarından biridir. Bu amaçla özel bir yol kompozisyonu oluşturulmuştur (Şekil 3.10). Bu kompozisyonun üç ana bileşeni bulunmaktadır, bunlar ;



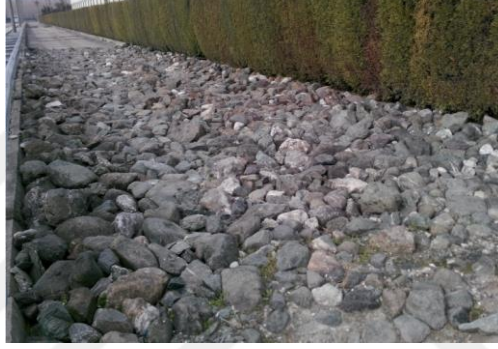
Şekil 3.10. Yol profil sinyali

- Perryman IV tipi engel: Askeri test parkurlarında standart olarak kullanılan engel tipidir (Şekil 3.11). Bu parkur genellikle silah stabilizasyon testlerinde kullanılır.



Şekil 3.11. Perryman IV tipi engel

b) Rastgale : Bu profil şekli kayalık zeminleri temsil için oluşturulmuştur (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kayalık zemin

c) Dik engel: Bu profil dik engel şartlarına karşılık seçilmiştir (Şekil 3.13).



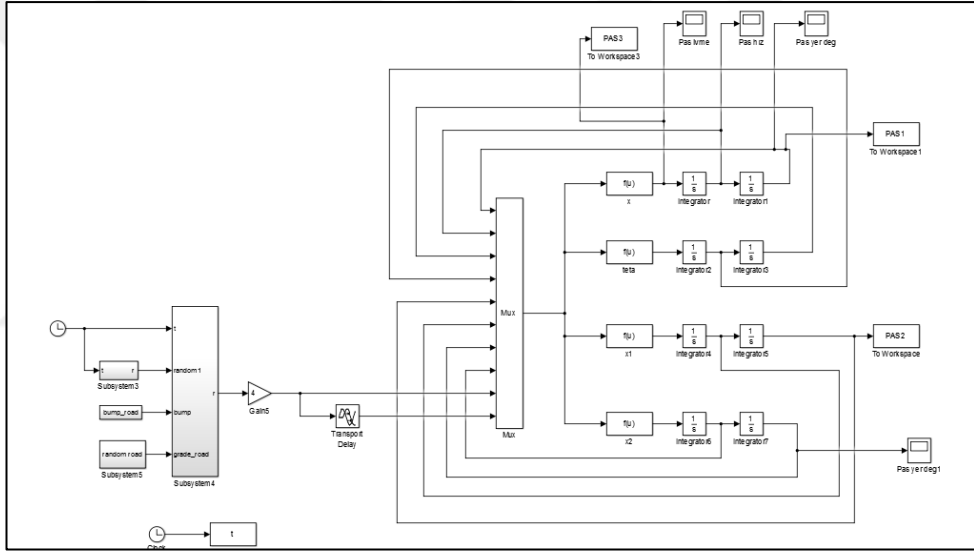
Şekil 3.13. Dik engel

3.3.2. Yarım taşıt simülasyonları

Yarım taşıt simülasyonu oluşturulurken parametleri (Tablo 3.1) verilen ZPT nin yarım taşıt modeli oluşturulmuştur. Aşağıda sırasıyla pasif kontrollü, kırpmalı kontrollü ve hibrit kontrollü simulink modelleri gösterilmektedir. Simülasyon esnasında araç hızı 20 km/s alınmıştır.

a) Pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt simülasyonu;

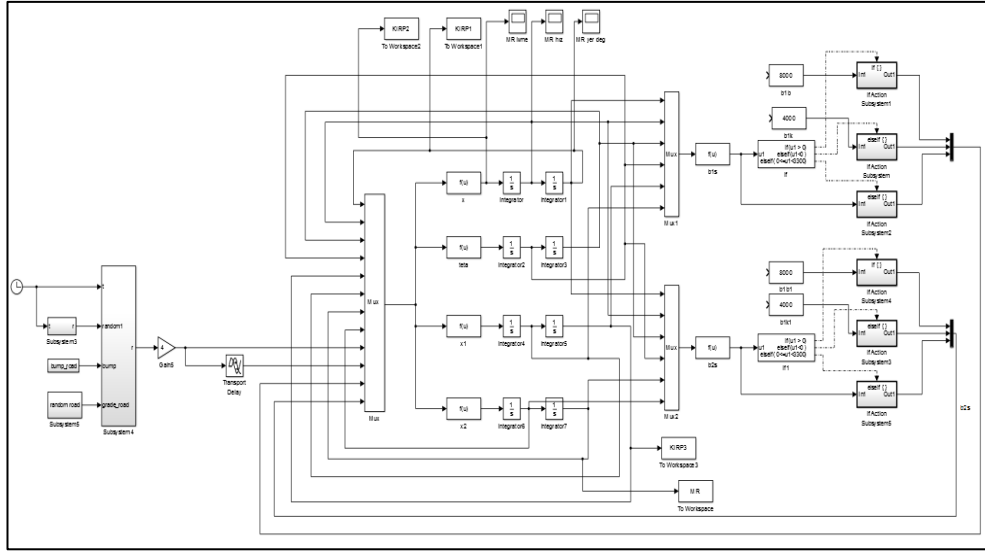
Bu model oluşturulurken Şekil 3.2’de gösterilen yarım taşıt modeli ve Tablo 3.1’deki parametreler baz alınmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.14’de pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt modelinin simulink modeli görülmektedir. Modelin tam sayfa şekli Ek-B’de bulunmaktadır.



Şekil 3.14. Pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt simulink modeli

b) Yarı aktif süspansiyon sistemli (Kırpmalı kontrol) yarım taşıt simülasyonu;

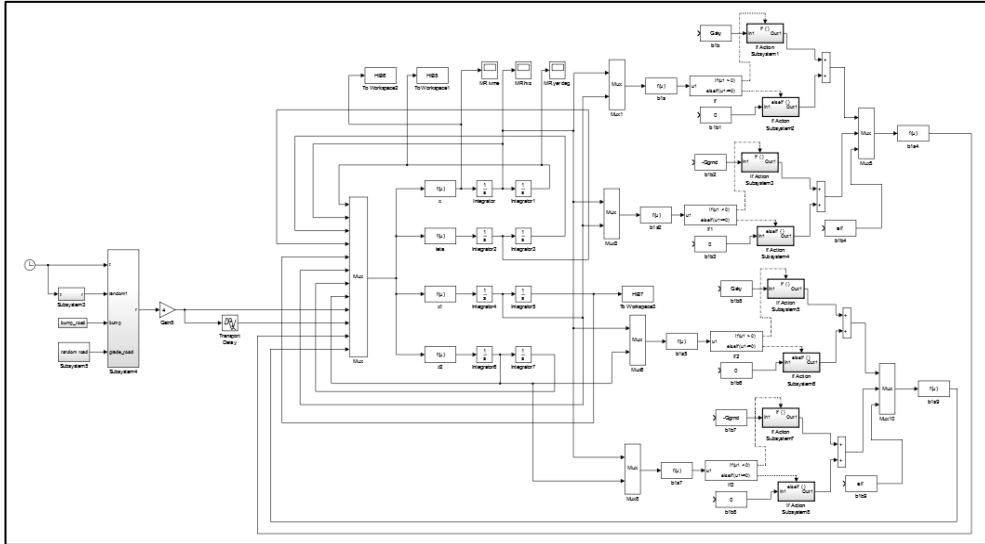
Bu model oluşturulurken Şekil 3.3’de gösterilen yarım taşıt modeli ve Tablo 3.1’deki parametreler kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.15’de kırpmalı kontrol algoritmasıyla kontrol edilen yarı aktif süspansiyon sistemli yarım taşıt simulink modeli görülmektedir. Modelin tam sayfa şekli Ek-B’de bulunmaktadır



Şekil 3.15. Yarı aktif süspansiyon sistemli (kırpmalı kontrol) yarım taşıt simulink modeli

c) Yarı aktif süspansiyon sistemli (hibrit kontrol) yarım taşıt simülasyonu;

Bu model oluşturulurken Şekil 3.3’de gösterilen yarım taşıt modeli ve Tablo 3.1’deki parametreler kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.16’da tam anahtarlamalı kontrol algoritmasıyla kontrol edilen yarı aktif süspansiyon sistemli yarım taşıt simulink modeli görülmektedir. Modelin tam sayfa şekli Ek-B’de bulunmaktadır.



Şekil 3.16. Yarı aktif süspansiyon sistemli (hibrit kontrol) yarım taşıt simulink modeli

4. TEST VE DOĞRULAMA

Bu bölümde, simülasyon çalışmalarının yanısıra seçilen kontrol yöntemlerinin deneysel olarak uygulaması ve karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Yol girişi olarak simülasyonlarda kullanılan profil kullanılmıştır. Test düzeneği olarak çeyrek taşıt modeli kullanılmıştır. Deney de ilgili çeyrek taşıt modeli aynı yol profiline pasif ve yarı aktif olarak koşturulmuş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Sistemin pasif halinde MR sönümleyicinin gerilim uygulanmamış hali kullanılmıştır.

4.1. Deney Düzeneği

Deney düzeneği olarak seçilen çeyrek taşıt modeli Gebze Teknik Üniversitesi, Sistem Dinamiği ve Kontrol laboratuvarında bulunan iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt deney düzeneği kullanılmıştır. Yol profillerini modellemek üzere panasonic MSME 750W AC servo motor kullanılmış, ilgili motora 1/5 oranında redüktör dahil edilmiştir.

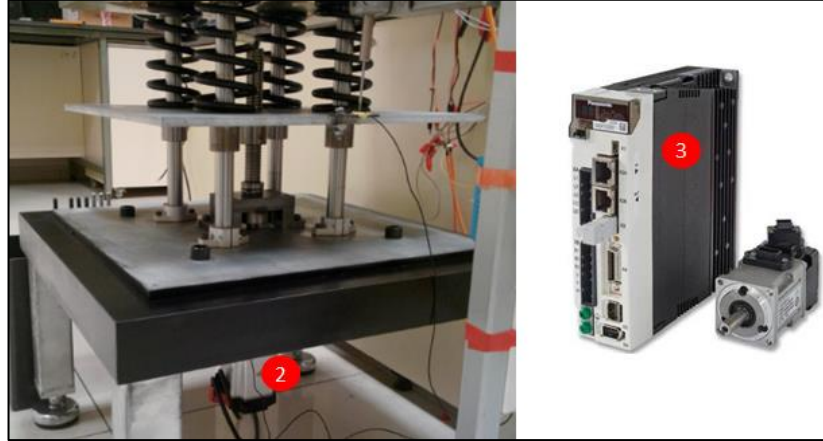
Yol, teker ve taşıt gövdesinin yerdeğiştirme değerlerinin kontrolü için iki adet Waycon SM serisi ve bir adet solatron S serisi LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörleri kullanılmıştır. Yol girdisinin taşıt gövdesine etkilerini gözlemlemek için ise Brüel&Kjaer 4507-B-002 serisi ivme ölçer kullanılmıştır.

MR sönümleyici olarak Lord RD 1005-3 serisi MR sönümleyici kullanılmıştır. İlgili sönümleyiciye ait performans değerlerini Ek-A'da bulabilirsiniz.

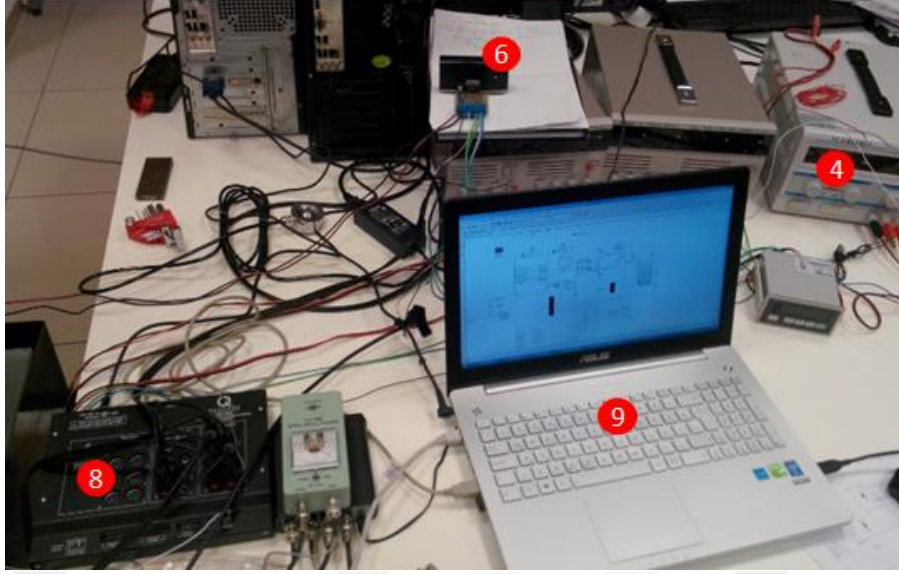
Simulink ortamında oluşturulan yol profilleri Quanse-Q8USB kontrolcü üzerinden gönderilmiştir. Çeyrek taşıt deney düzeneğine ait genel görünüş Şekil 4.1'de verilmiştir. Düzenek bileşenleri Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir ve Tablo 4.1'de bileşenlerin görevleri açıklanmıştır.



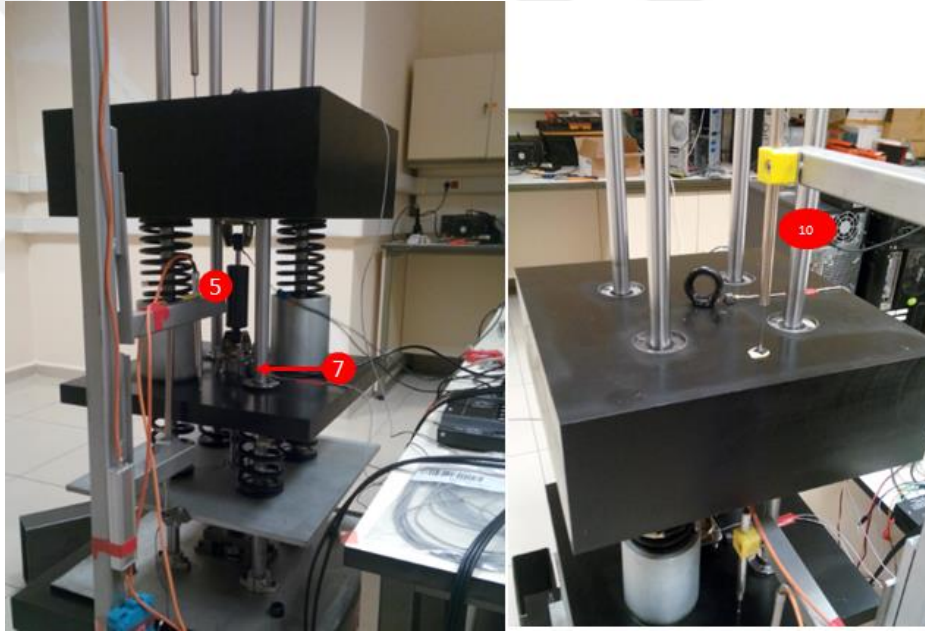
Şekil 4.1. Çeyrek taşıt deney düzeneği



Şekil 4.2. Servo motor ve sürücüsü



Şekil 4.3. Deney düzeneği kontrol gurubu



Şekil 4.4. MR sönümleyici ve seviye sensörleri

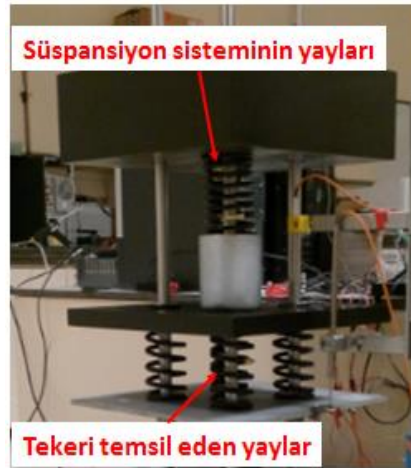
Tablo 4.1. Deney düzeneği bileşenleri ve görevleri

Ekipman	No	Görev
Çeyrek Taşıt Düzeneği	1	Aracın ¼ modeli
Servo motor	2	Yol profilini üretmek
Servo sürücü	3	Servo motor kontrolü
Güç kaynağı	4	Güç temini
MR sönümleyici	5	Kontrollü Sönüm kuvvetini oluşturmak
MR sürücü	6	MR sönümleyici sürmek
Yük hücresi	7	Sönüm kuvvetini okumak
DAQ(Data Acquisition Device)	8	Sistemi sürmek ve verileri okumak
Bilgisayar	9	Kontrol algoritmasını sürmek ve kayıt almak
LDTV	10	Yerdeđişimlerini okumak

4.2. Deney Parametreleri

Bu bölümde çeyrek taşıt test düzeneğinin parametrelerinin (taşıt kütleleri, yay sabitleri, sönüm değerleri.) seçilmesi ve simülasyona dahil edilmesi anlatılacaktır.

Çeyrek taşıt modelinde daha önce belirtildiği üzere 2 adet yay (Şekil 4.5) bulunmaktadır, bunlardan birincisi süspansiyon sisteminde bulunan yay diğeri ise tekeri temsilen bulunmaktadır. Yay katsayılarının doğru olarak belirlenmesi test düzeneği ve yapılacak deneyler için önem teşkil etmektedir. Yay katsayılarının elde edilmesi sistem karakteristiğini ifade etmekte önemlidir.



Şekil 4.5. Test düzeneği-yaylar

İlgili yayların katsayıları aşağıdaki Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Baskı kuvvetinin ölçülmesi için basma test düzeneği (Şekil 4.6) kullanılmıştır. Buradan elde edilen verilerle her bir yay için kuvvet-deplasman grafiği elde edilmiştir.

Yay katsayı ifadesinde d tel çapını, G tel malzemesinin kayma modülü, N aktif sarım sayısı D ise sarım çapını temsil etmektedir;

$$k = \frac{d^4 G}{8ND^3} \quad (4.1)$$

Burada;

Tablo 4.2. Yay katsayı denklem parametreleri

Sembol	Tanım
k	Yay sabiti
d	Tel çapı
N	Aktif sarım sayısı
G	Kayma modülü
D	Sarım çapı



Şekil 4.6. Basma test düzeneği

Çıkan sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.3' de listelenmiştir.

Tablo 4.3. Çeyrek taşıt deney düzeneği yay sabitleri

Sembol	Deneysel Değer	Birim
k_1 (Teker yay sabiti)	203860	N/m
k_2 (Süspansiyon yay sabiti)	18144	N/m

Diğer önemli parametrelerden ağırlıklar ise 1300 kg lık bir aracın değerleri baz alınarak hazırlanmıştır. Bir diğer parametre olan sönüm kuvveti MR sönümleyicinin gerilim uygulanmamış pasif değeri kullanılmıştır. Tüm parametrelerin listelendiği Tablo 4.4'de, aşağıda verilmiştir.

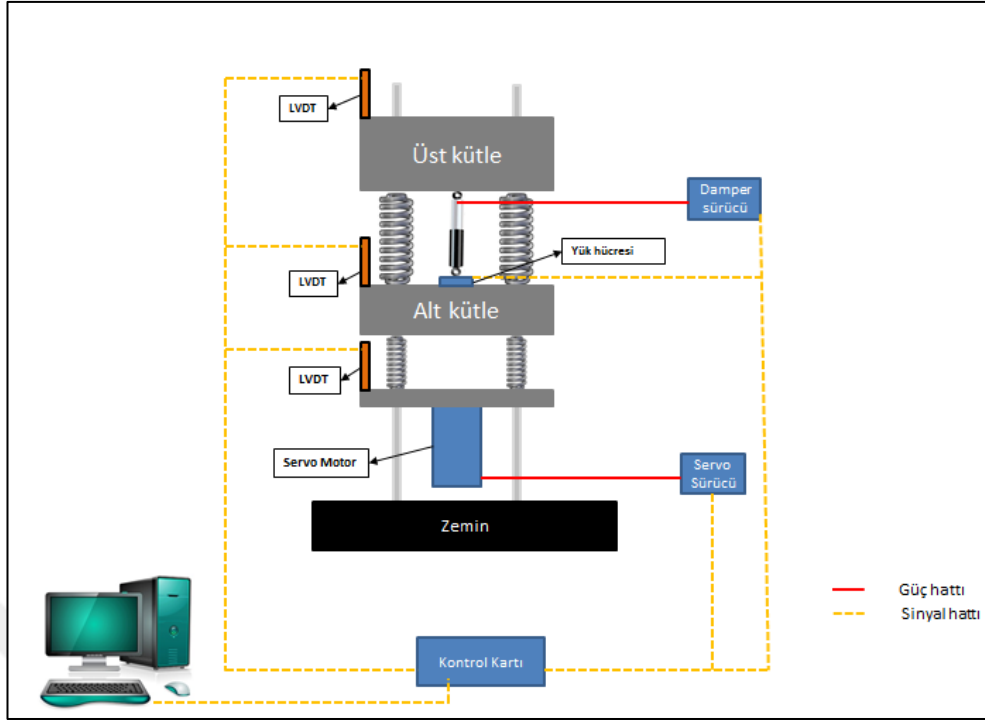
Tablo 4.4. Çeyrek taşıt deney düzeneği parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Araç gövde ağırlığı (yaylanan kütle)	Ms	248	kg
Aks ağırlığı (yaylanmayan kütle)	Mu	70	kg
Lastik yay sabiti	kt	200000	N/m
Süspansiyon yay sabiti	ks	19200	N/m
Sönüm katsayısı (pasif)	cs	110	Ns/m

4.3. Deney Düzeneği Algoritması

Deney düzeneğinin genel algoritması tam zamanlı çalışan bir döngü şeklinde tasarlanmıştır. Döngü de sistem sensörler yardımıyla gerçek zamanlı ölçümler alarak kontrol algoritması doğrultusunda, MR sönümleyiciyi sürerek en uygun sönüm kuvvetini üreterek sistemi denge konumuna getirmeye çalışmaktadır.

Deney düzeneğinin veri akışını gösteren blok diagramı aşağıdaki Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

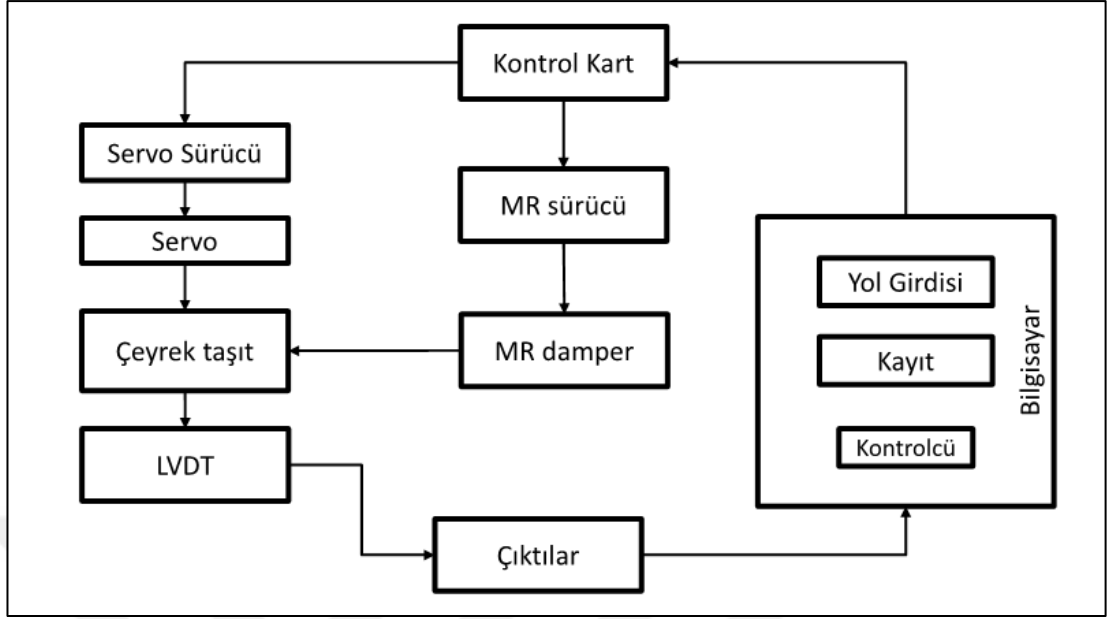


Şekil 4.7. Deney düzeneği blok diagramı

Düzenekte görüldüğü gibi kontrol kartı (Quanse-Q8USB) üstünde toplanan yer değiştirme ve yük hücresi verileri bilgisayarda çalışan kontrol algoritmasında işlendikten sonra hedeflenen sönüm kuvveti doğrultusunda MR sönümleyici sürülerek sistem kontrol edilir.

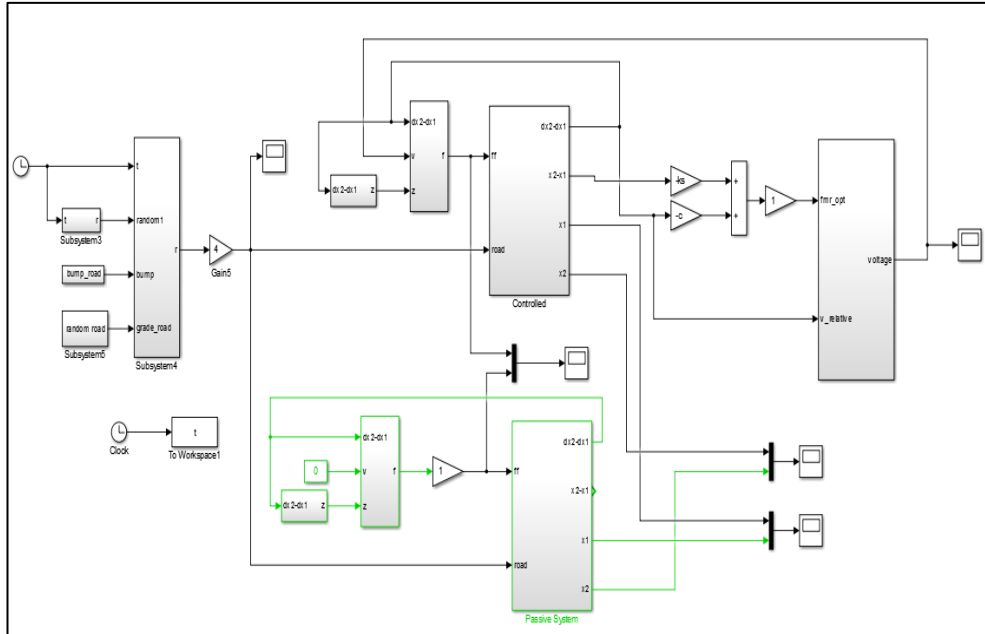
Sistemin mantık döngüsü ise Şekil 4.8’de gösterilen blok diagramdaki döngüyü takip etmektedir. Döngünün bir tur da izlediği işlem sırası aşağıdaki gibidir;

- Hedeflenen yol girdisi kontrol kartı üstünden servo sürücüyeye sinyal yollar.
- Servo sürücü sinyalleri işleyerek gerekli voltaj çıkıtısına dönüştürür.
- Sürülen servo motoru hedeflenen yol profili oluşturarak zemin plakasını tetikler.
- Yol profiline bağlı olarak sistem kütlelerin de oluşan yerdeğıştirmeler LVDT sensorleri tarafından okunurlar.
- İlgili cevaplar kontrol algoritmasına girdi olarak iletilir.
- Kontrol algoritması tarafından alınan girdiler işlenerek MR sürücü için gerekli çıkıtları oluşturur.
- MR sürücü, iletilen sinyal doğrultusunda gerekli voltaj çıkıtlarını oluşturarak MR sönümleyici sürer.
- Bu döngü her yol girdisin de eş zamanlı olarak tekrarlar ve kayıt altına alınırlar.

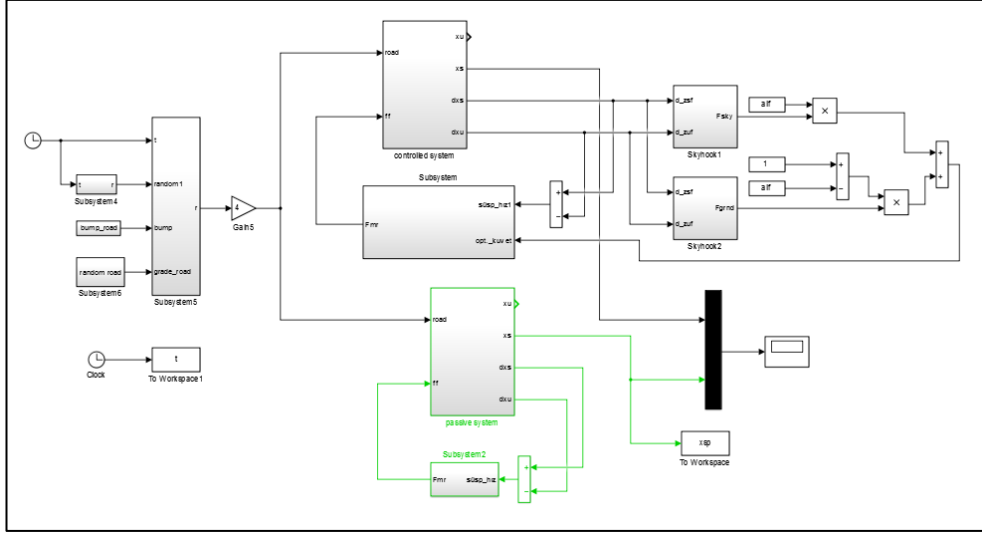


Şekil 4.8. Deney düzeneği mantık döngüsü

Karşılaştırma olarak kullandığımız kontrol algoritmalarının simulink modelleri de aşağıdaki Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Modellerin tam sayfa şekilleri Ek-B'de bulunmaktadır.



Şekil 4.9. Kırpmalı kontrol simulink modeli



Şekil 4.10. Hibrit kontrol simulink modeli

Kontrol algoritmalarının karşılaştırılması amacıyla yapılan deneylerin ilk aşamasında iki aşamalı kontrol deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler kapsamında sistemin pasif ve sabit gerilim altındaki davranışlarının simülasyon ve gerçek şartlarda ki çıktıları karşılaştırılarak deney düzeneği çıktılarının doğruluğu gözlemlenmiştir. İkinci aşamadaysa deney düzeneği tasarlanan yol girdisi kontrol algoritması altında koşturularak çıktılar karşılaştırılmıştır. İlgili çıktılar bir sonraki bölümde irdelenmiştir.

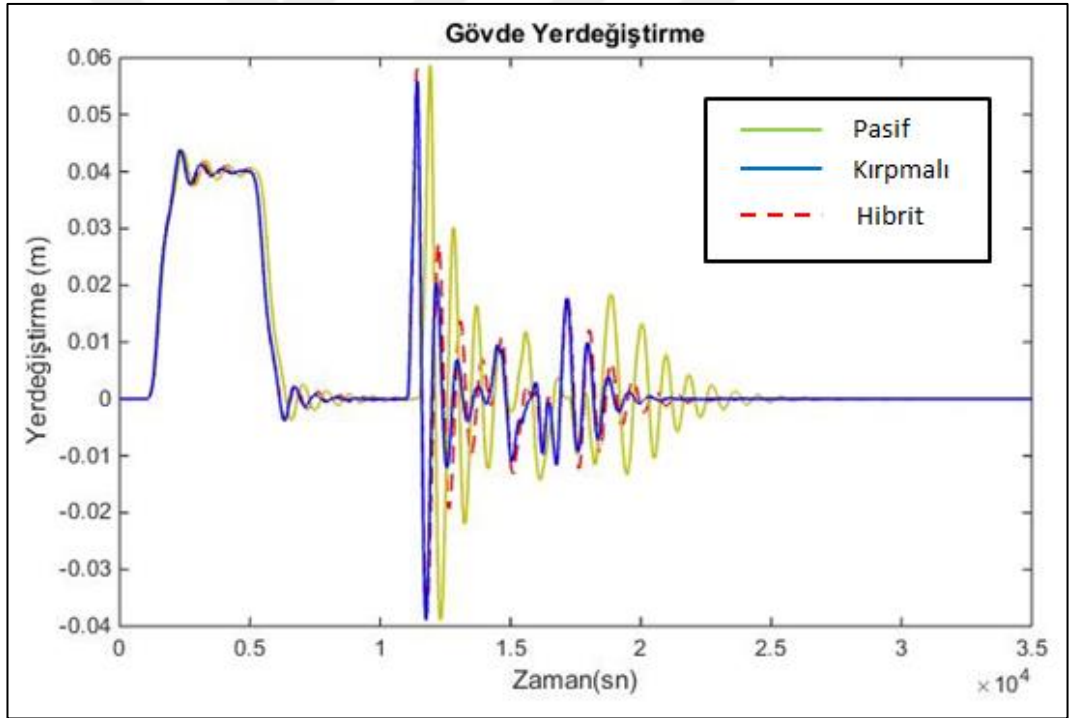
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dökümanımızın bu kısmında yapılan simülasyon ve test çalışmalarının sonuçları yorumlanılmıştır.

5.1. Simülasyon Çıktıları

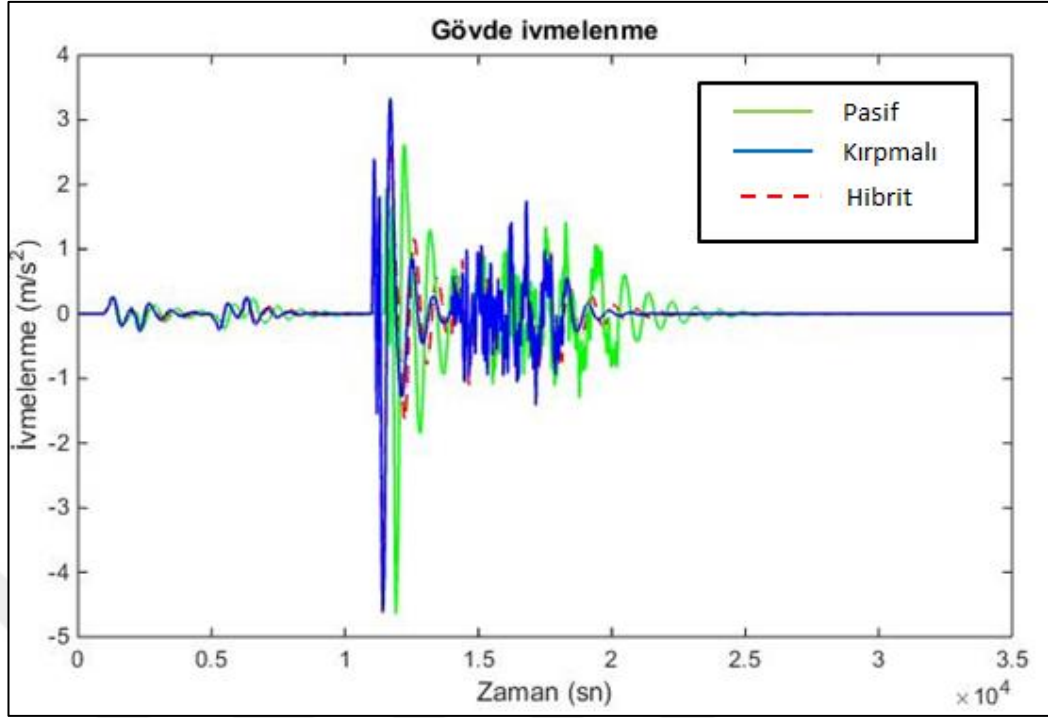
Simülasyon çıktıları 3 başlık altında incelenmiştir, bunlar;

- Gövde yerdeğiştirme
- Gövde ivmelenme
- Ön aks yerdeğiştirme



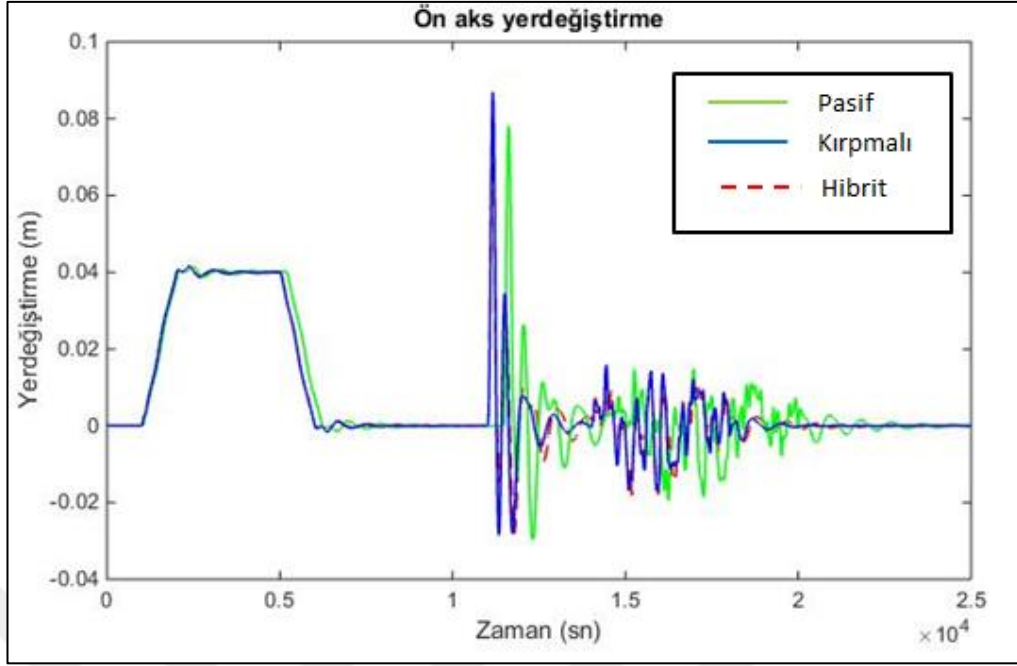
Şekil 5.1. Gövde yerdeğiştirme karşılaştırmalı simülasyon çıktısı

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere tepki süresi ve sistem dengesi olarak en kararlı durumu kırpmalı kontrolde gözlemlemekteyiz.



Şekil 5.2. Gö vde ivmelenmesi karşılaştırmalı simülasyon çıktısı

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere gö vde ivmelenmesinde kırpmalı ve hibrit kontrolcüler benzer tepkiler göstermiştir.



Şekil 5.3. Ön aks yerdeğiştirme karşılaştırmalı simülasyon çıktısı

Şekil 5.3’de görüldüğü üzere ön aks yerdeğiştirme, sinyal başlangıçta kırpmalı ve hibrit kontrolcüler benzer tepkiler göstermişse de kırpmalı kontrolcü daha hızlı dengeye gelmiştir.

5.2. Deney Bulguları

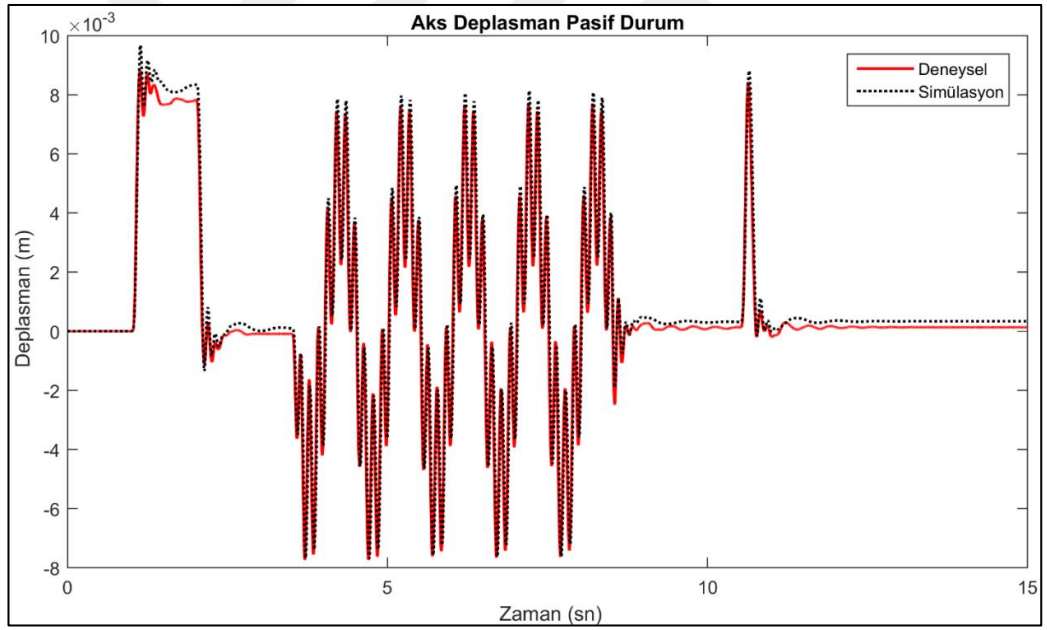
5.2.1. Doğrulama deneyleri

Bu deneysel çalışma da simülasyon ile gerçek şartların doğruluğunun karşılaştırması yapılmıştır, ilk deney 0 volt şartında yapılmıştır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). İkinci şartlandırma ise MR sönümleyici sabit 2 volt ile sürülmüştür (Şekil 5.6 ve Şekil 5.7). Doğrulama deneyleri sonucunda simülasyon ile gerçek durumun benzeştiği ancak ani yerdeğişikliği durumlarında cevapların farklılaştığı görülmektedir. Bu durum non-linear karakterli damperden kaynaklanmaktadır. Ancak cevaplar yapılacak olan karşılaştırma için yeterince benzeşmektedir.

- 0 volt durumu;

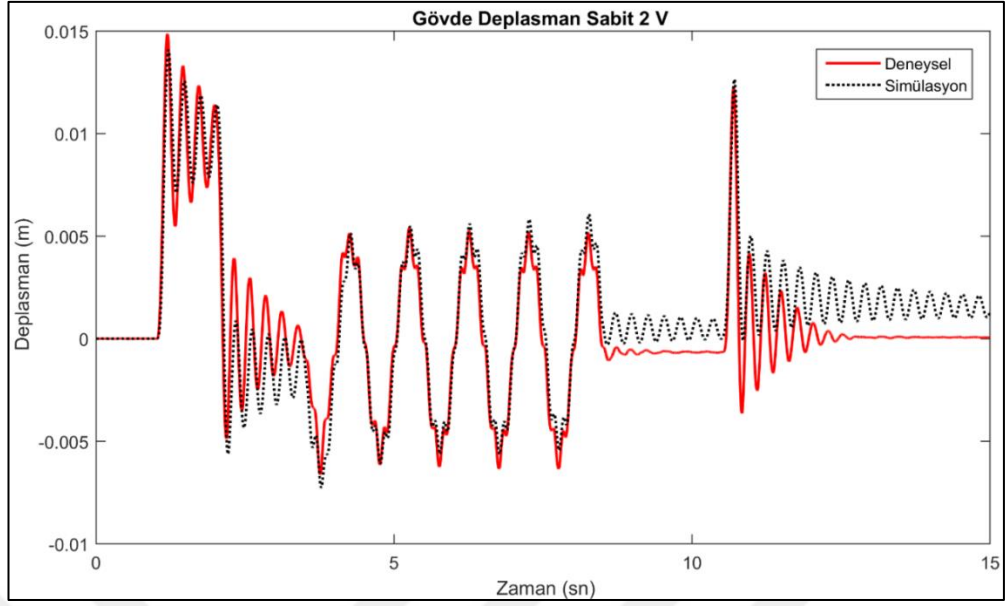


Şekil 5.4. 0 volt durumu gövde deplasman grafiği

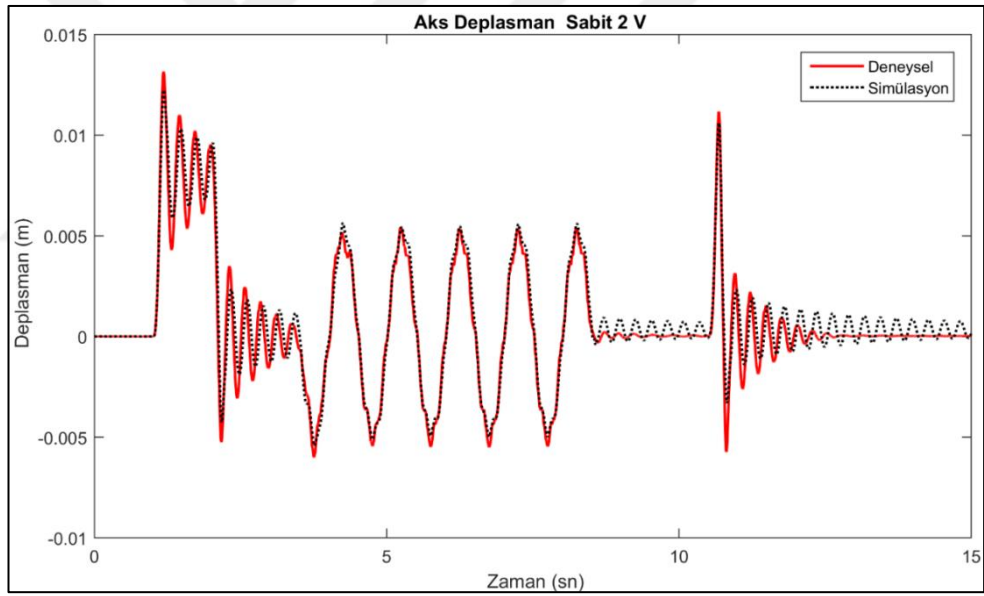


Şekil 5.5. 0 volt durumu aks deplasman grafiği

- Sabit 2 volt durumu;



Şekil 5.6. 2 volt durumu gövde deplasman grafiği



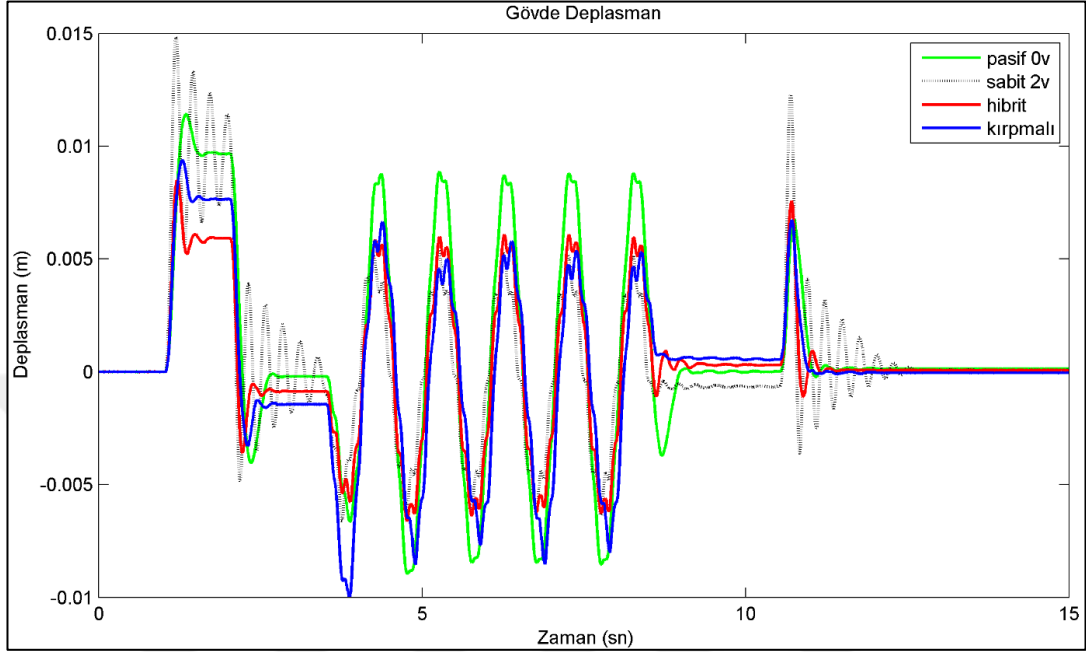
Şekil 5.7. 2 volt durumu aks deplasman grafiği

5.2.2. Karşılaştırma deneyleri

Deneysel çalışmanın bu kısmında kontrol parametrelerinin karşılaştırılması kapsamında, tasarlanan hedef yol profilinde çeyrek taşıt deney düzeneği kontrol algoritmaları eşliğinde koşturulmuştur. Çıktılar kayıt altına alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma deneyleri dört koşullu gerçekleştirilmiştir. Bunlar pasif (0V durumu), sert sönümlü (2V), hibrit kontrol, kırpmalı kontrol. Aşağıdaki

tablolarda kontrol algoritmalarının yol giridisine verdiği cevapları ve etkileri grafiklerle gösterilmiştir.

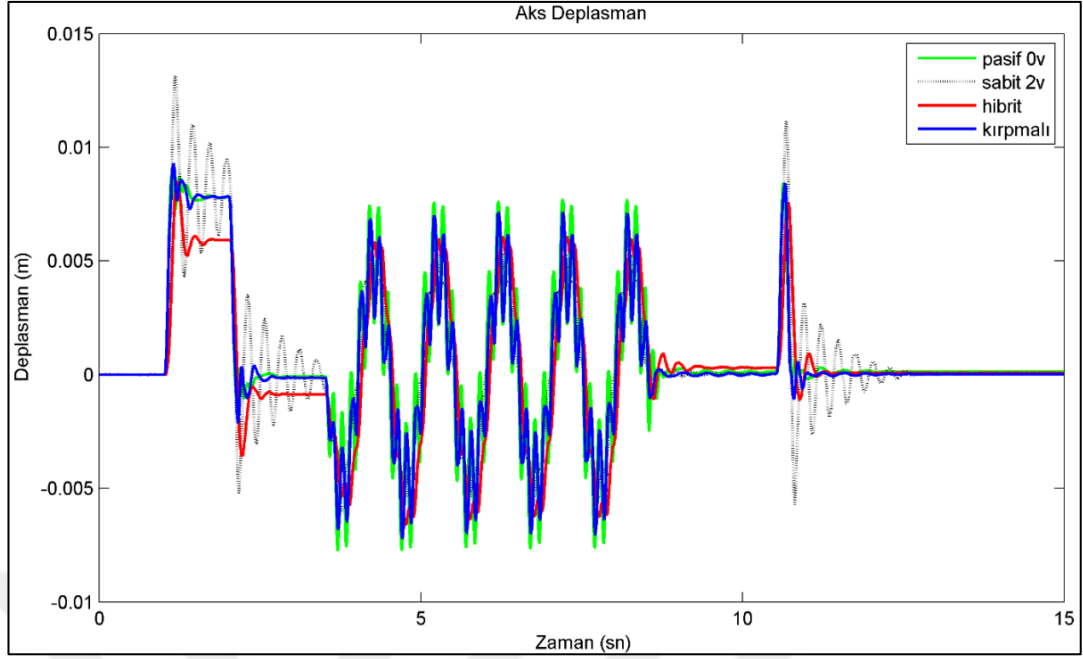
- Gövde yerdeğiştirme;



Şekil 5.8. Deney düzeneği gövde yerdeğiştirme

Yukarıdaki Şekil 5.8'de görüldüğü gibi araç gövdesi kırpmalı kontrol de daha dengeli bir profil izlemiştir. Ancak negatif yerdeğiştirme durumlarında özellikler karışık (kayalık) yol profilinde hibrit sistem daha olumlu bir profil sergilemiştir, bunun sebebi olarak kırpmalı kontrolün gövde üstüne minimum ivme etkisi oluşturmak istemesi sebebiyle olduğu söylenebilir.

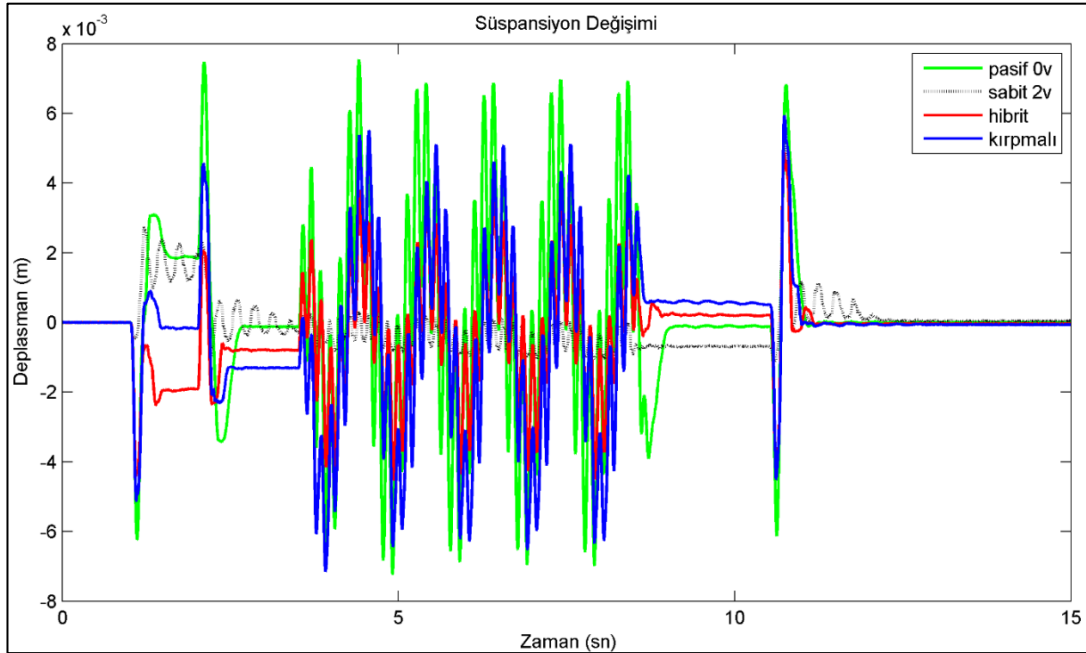
- Aks yerdeğiştirme;



Şekil 5.9. Deney düzeneği aks yerdeğiştirme

Yukarıdaki Şekil 5.9'da görüldüğü gibi aks gövdesi de araç gövdesine benzer bir profil izlemiştir.

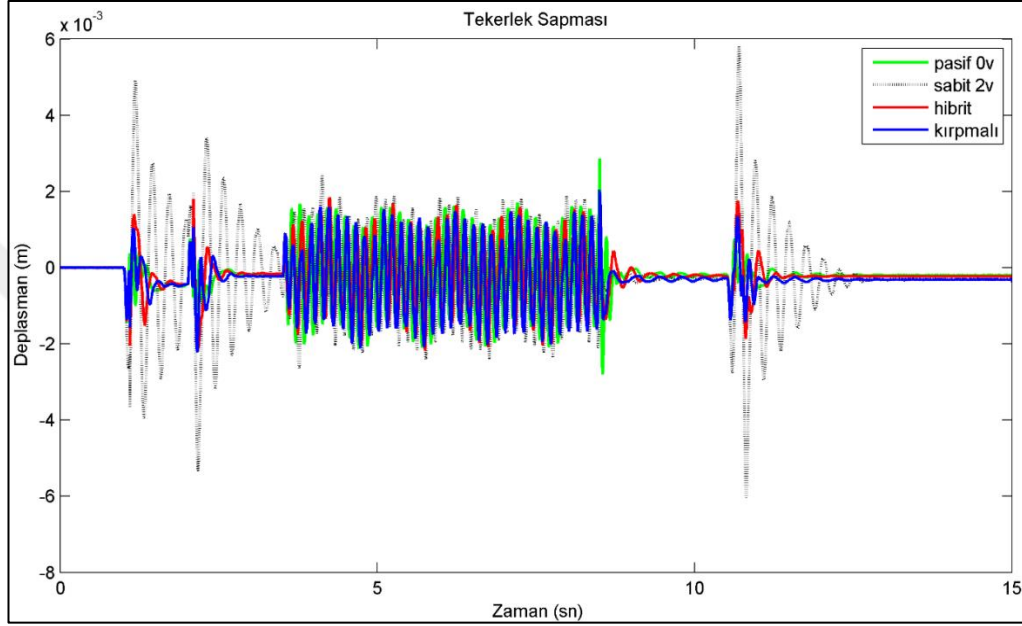
- Süspansiyon değişimi;



Şekil 5.10. Deney düzeneği süspansiyon yerdeğiştirme

Yukarıdaki Şekil 5.10’da görüldüğü üzere hibrit kontrolde süspansiyon değişimi daha düşük olmuştur bu etki hibrit kontrolün, denge durumuna ulaşmak için gerekli sönüm kuvvetini tam güç vererek elde etmektedir. Bunun sonucunda süspansiyon yerdeğiştirmesi daha kısa olmaktadır.

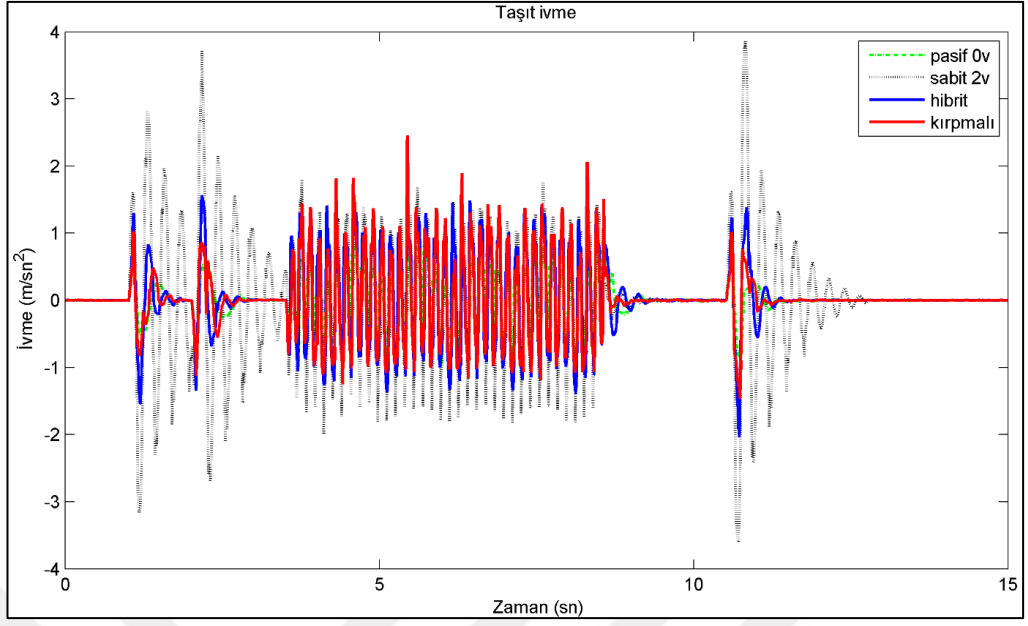
- Teker sapması;



Şekil 5.11. Deney düzeneği teker sapması

Yukarıdaki Şekil 5.11’de görüldüğü üzere her iki kontrol algoritmasında da benzer sapmalar gözlenmiştir.

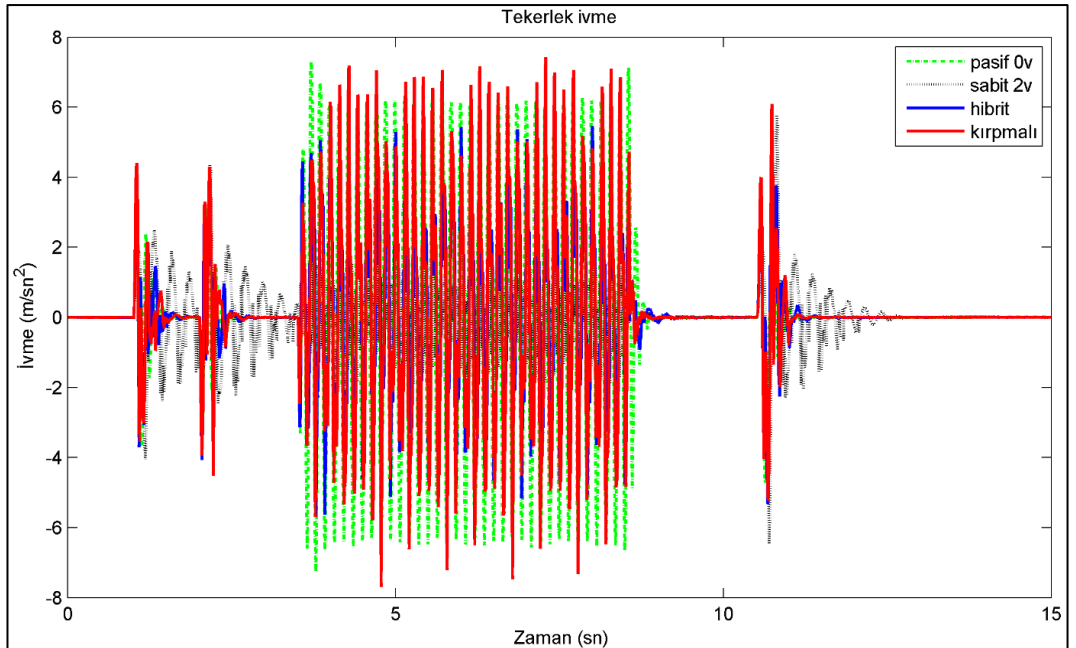
- Taşıt ivmesi;



Şekil 5.12. Deney düzeneği taşıt gövdesi ivmelenme

Yukarıdaki Şekil 5.12'de görüldüğü üzere kırpmalı kontrolün çalışma mantığında olduğu gibi algoritma gövde üstünde minimum ivme oluşacak şekilde denge durumuna gelmeye çalışmaktadır. Bu etki doğrudan araç personelinin konforunu olumlu yönde etkilemektedir .

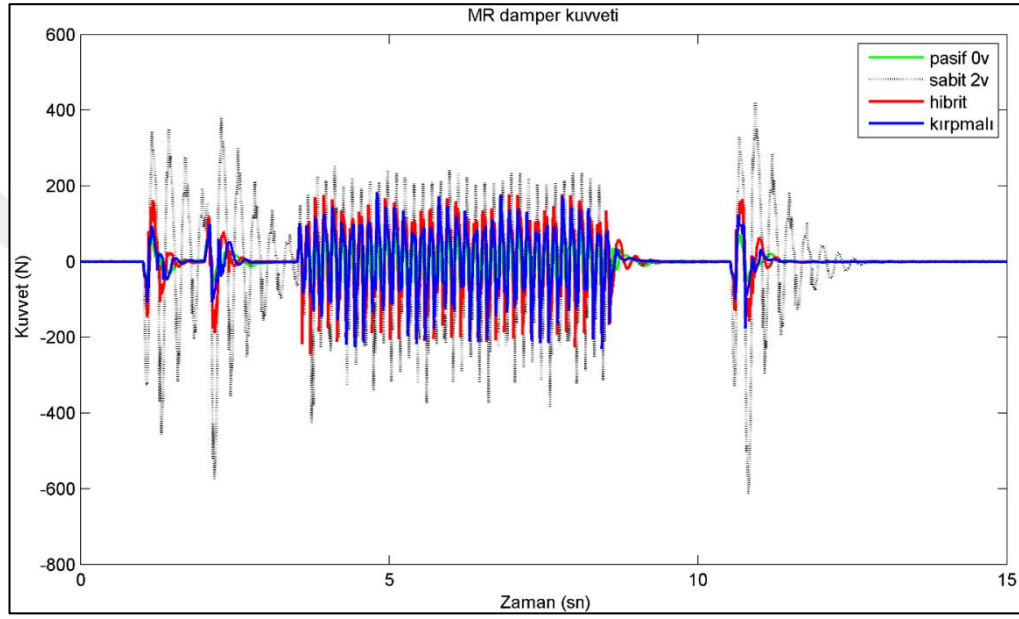
- Tekerlek ivmesi;



Şekil 5.13. Deney düzeneği tekerlek ivmelenme

Yukarıdaki Şekil 5.13’de görüldüğü üzere araç gövdesinin aksine tekerlek ivmesi kırpmalı kontrol de daha yüksek çıkmıştır bu etkinin kaynağı olarak, algoritma araç gövdesinde minimum ivme oluşması sönüm kuvvetini orantılı şekilde yükseltmesi sebebiyle aks kütlelerinin hareketlerinde daha serbest davranmasına sebep olmaktadır buda aks grubunda yüksek ivme olarak gözlemlenmektedir.

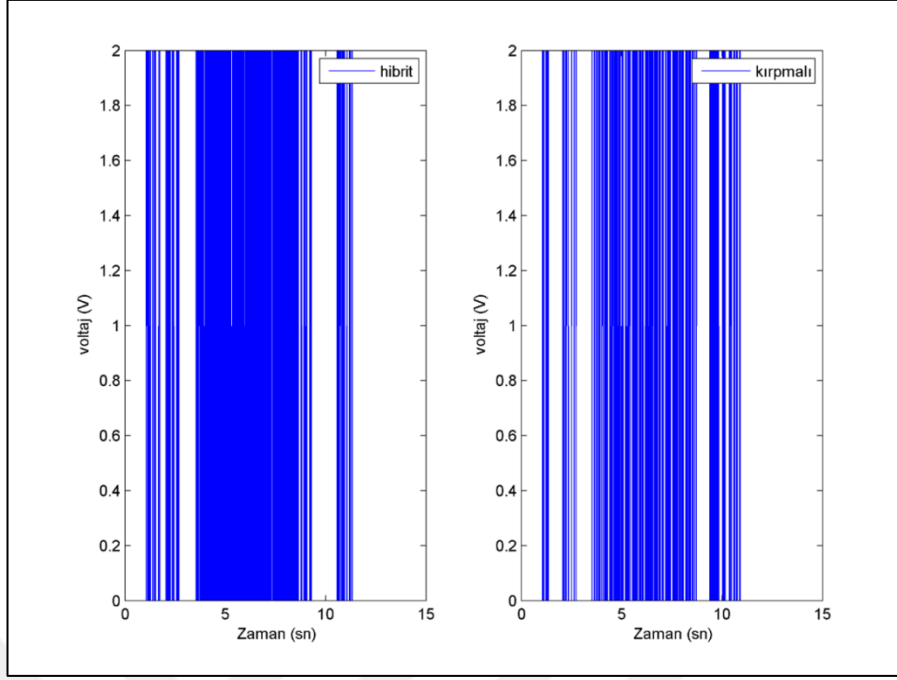
- MR kuvveti;



Şekil 5.14. Deney düzeneği MR sönümleyici kuvveti

Yukarıdaki Şekil 5.14’de görüldüğü üzere kırpmalı kontrol daha küçük sönüm kuvvetleri kullanarak sistemi denge durumuna getirmiştir .

- MR voltaj değeri;



Şekil 5.15. Deney düzeneği MR voltaj değerleri

Yukarıdaki Şekil 5.15’de görüldüğü üzere sönüm kuvvetine paralel olarak kırpmalı kontrol daha az enerji harcamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, MR sönümlü yarı aktif süspansiyon sistemlerini kontrol etmekte kullanılan tam zamanlı kontrol algoritmaları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada hedef araç olan ZPT sınıfı araçların görev yaptığı yol profili kullanılmıştır. Kontrolör performansını değerlendirmede, hem simülasyon hem de deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Deney düzeneğinde, sıkça kullanılan çeyrek taşıt süspansiyon modeli kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında kurulan çeyrek taşıt modelinde hedef yol giridisi kullanılarak tam zamanlı kontrolcü performansları kendi aralarında ve pasif duruma göre test edilerek karşılaştırılmıştır.

Performans değerlendirmesi, taşıt gövdesini temsil eden üst kütle için yer değişimi, ivme cevabı ve süspansiyon çalışma aralığı göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. Yol tutuş karakteristiği ise aks kütlelerini temsil eden alt kütle için yol yüzeyini ne kadar yakından takip ettiği bakımından incelenmiştir.

Simülasyon ve test sonuçları baz alındığında, kırpmalı (anahtarlamalı) kontrolörün daha etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Hibrit kontrolcünün algoritma mantığı olarak, tekerlek yol temasının sürekliliğini korumak üzere kurulduğunu daha önce belirtmiştik. Sürüş kontrolü kapsamında hibrit kontrolcü daha verimli görünmektedir ancak genel anlamda aracın denge konumuna ulaşması ve yolcu konforu anlamında kırpmalı kontrolcü daha verimlidir.

Kontrolcü performansının etkinliğini belirleyen faktörlerden biride algortima da kullanılan bileşenlerin bağımsızlığıdır. Hibrit kontrolcüde, yaylanan ve yaylanmayan kütlelerin değerleri ana girdilerden biridir ve bu kontrolcü için büyük bir dezavantajdır. ZPT sınıfı araçların değişken görev şartlarına bağlı olarak aracın muharebe ağırlığıda, değişkenlik gösterecektir ve bu kontrolcüde kararsızlığa sebep olacaktır. Kırpmalı kontrolcüldeyse yükten bağımsız olarak yaylanan kütle için ivmelenmesi ana girdi olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple kırpmalı kontrol her görev şartında kararlı bir şekilde çalışabilmektedir.

ZPT sınıfı araçlarda personel konforu ve sürüş kontrolü yanında önemli isterlerden biride araç dengesidir. Silah kulesi ve görüş sistemlerinde denge önem teşkil etmektedir, genelde bu alt sistemlerin kendi içinde stabilizyon sistemleri mevcuttur ancak bağlı oldukları platform ne kadar dengeli olursa gösterecekleri performans da orantılı olarak yükselecektir. Kırpmalı kontrolcü gövde dengesi konusunda daha verimli bir profil çizmektedir.

Atış sistemlerinde denge durumunun yanında, atış esnasında platformun sabit kalması istenir. Silah sisteminin kalibresine bağlı olarak seri atış esnasında, platform gövdesinde yalpalamalar başlar. Bu durumu en aza indirmek adına MR sönümleyici silah sistemine entegre edilebilir. Silah sisteminden alacak ilave bir sinyal ile sönümleyici maksimum voltajla beslenerek sönümleyicinin kitlenmesi sağlanabilir. Böylece sistemin yalpa yapması engellenerek atışların hassasiyeti sağlanmış olacaktır.

Bir sonraki aşamada MR sönümleyici kontrol modülü, araç bilgisayarına entegre edilebilir. Bu entegrasyon sayesinde, hızlanma, viraj alma, çevre sıcaklığı, rampa tırmanma ... vb. bilgiler kullanılarak MR sönümleyiciyi farklı durumlara bağlı olarak şartlandırarak platform performansı yükseltilebilir. Bu konu hakkında gerçek sistemler üstünde denemeler yapılarak kontrol algoritması oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim K. S., Geometric Optimal Design of MR Damper Considering Damping Force, Control Energy and Time Constant, *11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Dresden, Germany, 25-29 August 2009.
- [2] Şahin İ. , Öz H. R., Engin T., İlhan A., Akpolat A., Manyetik Sıvılı Damperlerin Yapısal Analizi, *Mühendis ve Makina*, 2005, **46**(551), 41-50.
- [3] Facey W. B., Rosenfeld N. C., Choi Y. T., Wereley N. M., Design And Testing of A Compact MR Damper For High Impulse Loads, *International Journal of Modern Physics B.*, 2005, **19**, 1549-1556.
- [4] Kim J. H., Oh J. H., Development of an Above Knee Prosthesis Using MR Damper and Leg Simulator, *IEEE International Conference on Robotics & Automation* , Singapore, 21-26 May 2001.
- [5] Hung K. C., *Conceptual Design of Magnetic Damper For Automotive Suspension System*, 1st ed., University Tecnicl Meleka, Malaysia, 2007.
- [6] Engin T., Öz H. R., Morgül K., Soydan Y., Şahin İ., Fırat M., Yazıcı İ., Yeni Nesil Yarı-Aktif Bir Süspansiyon Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve Optimizasyonu, *Tübitak MAG Proje*, Proje No: 104M157 ,1-139, 2008.
- [7] Savaresi S. M., Silani E., Bittanti S., Porciani N., On Performance Evaluation Methods and Control Strategies for Semi-Active Suspension Systems, *42nd IEEE Conference on Decision and Contro*, Maui, Hawaii USA, 9-12 December 2003.
- [8] Ghasemalizadeh O., Taheri S., Singh A., Goryca J., Semi-Active Suspension Control Using Modern Methodology: A Comprehensive Comparison Study, *Ground Vehicle System Engineering and Technology Symposium*, Novi, Michigan, USA, 12-14 August 2014.
- [9] Seong M. S., Choi S. B., Sung K. G., *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*, Chapter 5, Intech, Croatia , 2011.
- [10] Hong K. S, Sohn H. C., Hedrick J. K., Modified Skyhook Control of Semi-Active Suspensions: A New Model, Gain Scheduling, and Hardware-in-the-Loop Tuning , *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control ASME*, 2000, **124**(1), 158-167.
- [11] Yao G. Z., Yap F. F., Chen G, Li W., Yeo S. H., MR Damper And Its Application For Semi-Active Control Of Vehicle Suspension System, *Mechatronics*, 2002, **12** (7), 963-973.

- [12] Nabagło T., Jurkiewicz A., Kowal J., Semi-active Suspension System for 2S1 Tracked Platform in Application of Improvement of the Vehicle Body Stability, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **759**, 77-90.
- [13] Megiveron M. G., Singh A., Real-Time Driving Simulation of Magneto-Rheological Active Damper Stryker Suspension, *SAE Technical Paper*, 2012-01-0303, 2012.
- [14] Gordanlnejad F., Fuchs A., Dogrou U., Kanakas S., Liu Y., Hu B., Evrensel C., A New Generation of Magneto-Rheological Fluid Dampers, *University of Nevada Mechanical Engineering Laboratory*, DAAD19-01-1-0614, 2004.
- [15] Lu X. P, Li H. L., A Design Procedure for the Optimization of Vehicle Suspension, *Int. J. Of vehicle Design*, 1984, **5**(1/2), 129-142.
- [16] Şengirgin M., Yüksel İ., Erzan E., Şefkat G., Şiren M. N., Pasif ve yarı aktif süspansiyon sistemlerinin titreşim yalıtım performansının incelenmesi, *9. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, Türkiye, 13 - 15 Eylül 2000.
- [17] Çağatay Ç., Pasif ve Yarı-Aktif Kamyon Kabini Süspansiyon Sistemleri Tasarımı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 222822.
- [18] Giua A., Seatzu C., Usai G., A Mixed Suspension System for a Half-Car Vehicle Model, *Dynamics and Control*, 2000, **10**(4), 375-397.
- [19] Bilgiç B., Taşıt Süspansiyon Sistemlerinin MR Sönümleyici Kullanarak Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 216879.
- [20] Alghamdi A. A., Olabi A. G., Novel Design Concept Of Magneto Rheological Damper In Squeeze Mode, *15th International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, Portugal, 22-27 July 2012.
- [21] Wray A. C., Jimenez A. R., Anderfaas E., Hopkins B., LeNoach P., MR Fluid Semiactive Suspension System Performance Testing on a Stryker Vehicle, *SAE Technical Paper*, 2006-01-1379, 2006.
- [22] Terasawa T., Sakai C., Ohmori H., Sano A., Adaptive Identification of MR Damper for Vibration Control, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 14-17 December 2004.
- [23] Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K., Carlson J. D., Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, **123**(3), 230-238.

- [24] Kwok N. M., Ha Q. P., Nguyen M. T., Li J., Samali B., Bouc-Wen Model Parameter Identification for a MR Fluid Damper Using Computationally Efficient GA, *ISA Transactions*, 2007, **46**(2), 167-179.
- [25] Nia. Y. Q., Ying. Z. G., Wang. J. Y., KO. J. M., Spencer. B. F., Stochastic optimal control of wind-excited tall buildings using semi-active MR-TLCDs., *Probabilistic Engineering Mechanics.*, 2004, **19**(3), 279–285.
- [26] Yıldız A. S., Çeyrek Taşıt Sisteminin MR Sönümleyici ile Uyarlamalı Yarı Aktif Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013. 341425.
- [27] Sun, T., Zhang, Y., Barak P., Quarter Vehicle Ride Model, *SAE Automotive Dynamics and Stability Conference*, Michigan, USA, 7-9 May 2002.
- [28] Savaresi S. M., Poussot-Vassal C., Spelta C., Sename O., Dugard L., *Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles*, 1st ed., Butterworth-Heinemann Press, Oxford, 121-138, 2010.
- [29] Goncalves F. D., Ahmadian, M., A hybrid control policy for semi-active vehicle suspensions, *Shock and Vibration*, 2003, **10**(1), 59-70.
- [30] Dong X. M., Yu M., Liao C., Chen W., Comparative Research on Semi-Active Control Strategies for MR Suspension, *Nonlinear Dynamics*, 2009, **59**(3), 433-453.
- [31] Dyke S. J., Spencer. B. F., A Comparison of Semi-Active Control Strategies for the MR Damper, *IASTED Conference on Intelligent Info. Systems*, Bahamas, USA, 8-10 December 1997.



EKLER

EK-A

Lord RD 1005-3 Serisi MR Sönümleyici Özellikleri:

Tablo A.1. Bouc-Wen model parametreleri

Sembol	x_o	c_o	k_o	n	α	β	γ	δ
Birim	cm	N.s/cm	N/cm	-	N/cm	N/cm ²	1/cm ²	-
Değer	66,0	4,4	4,3	3,9	2480	115	110	1,0

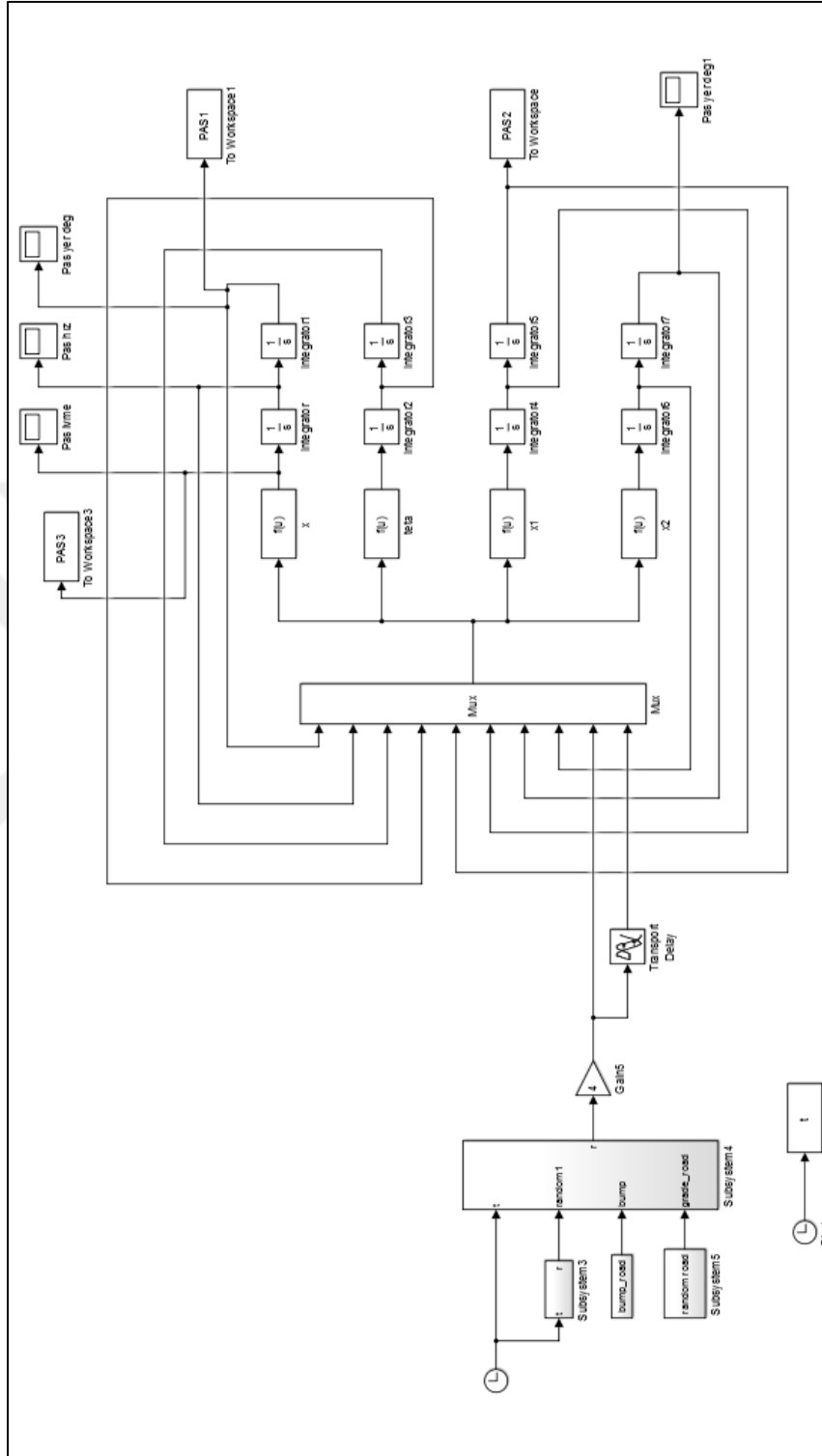
Tablo A.2. Histerisis özellikli model parametreleri

Sembol	c	f_o	k
Değer	1929I+ 1232	-18I+257	-1700I+5100
Sembol	α	β	δ
Değer	- 244I ² +918	100	0,3I+0.58

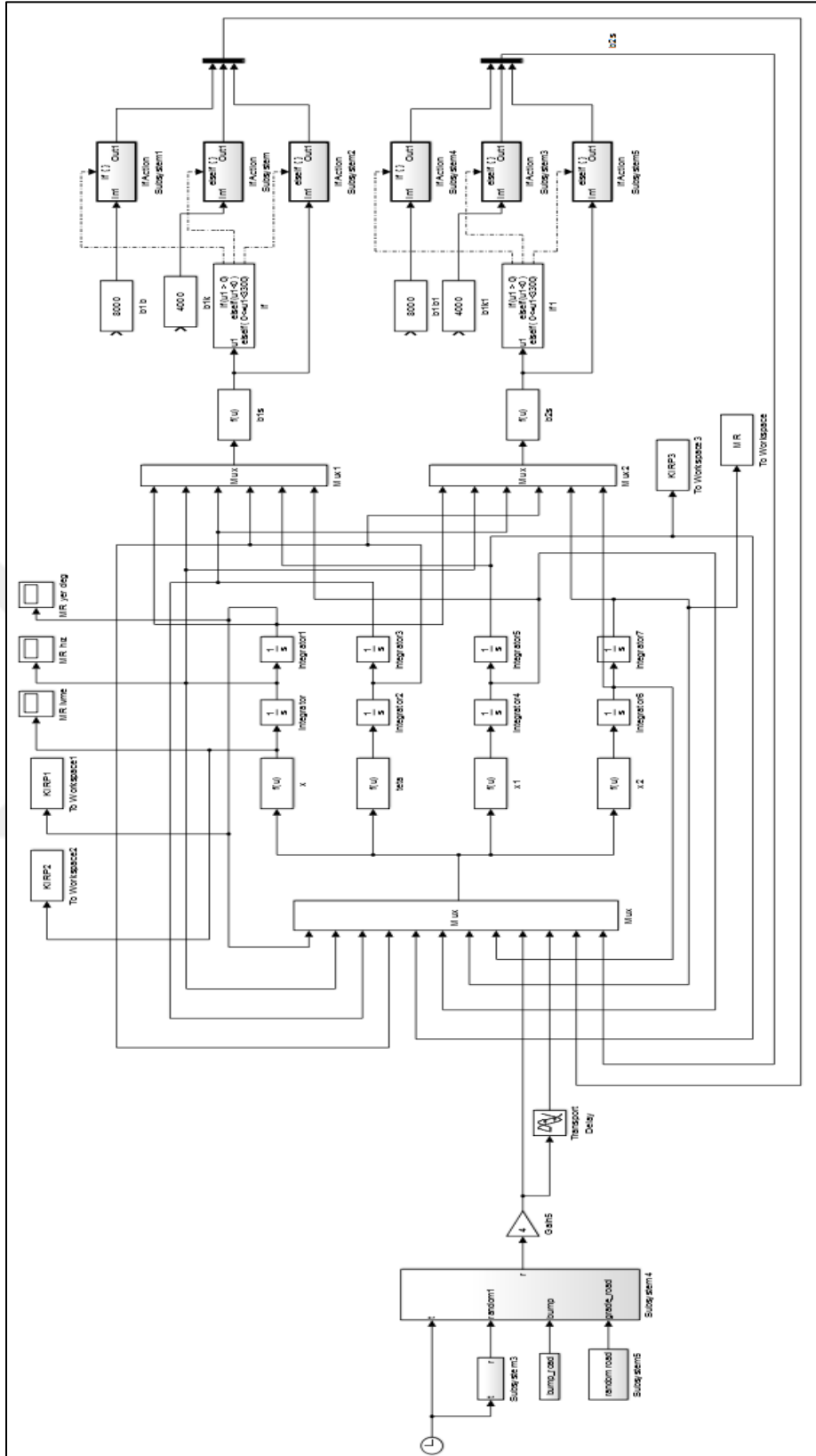
Tablo A.3. LuGre model parametreleri

Sembol	Anlamı	Değeri	Birimi
$z(t)$	İç dinamik değişken	-	m
$\dot{x}(t)$	MR sönümleyici hızı	-	m/s
V	Sönümleyiciye uygulanan gerilim	-	V
σ_0	Gerilim ile değişen z 'nin rijitliği	320000	N/(m.V)
σ_1	İç değişkenin sönüm katsayısı	3.2	N.s/m
σ_2	Viskoz sönüm katsayısı	1153.3	N.s/m
σ_a	İç değişken z'nin rijitliğini	76000	N/m
σ_b	Voltaja bağlı viskoz sönüm katsayısı	315	N.s/(m.V)
a_0	Sabit katsayı	1400	l/m

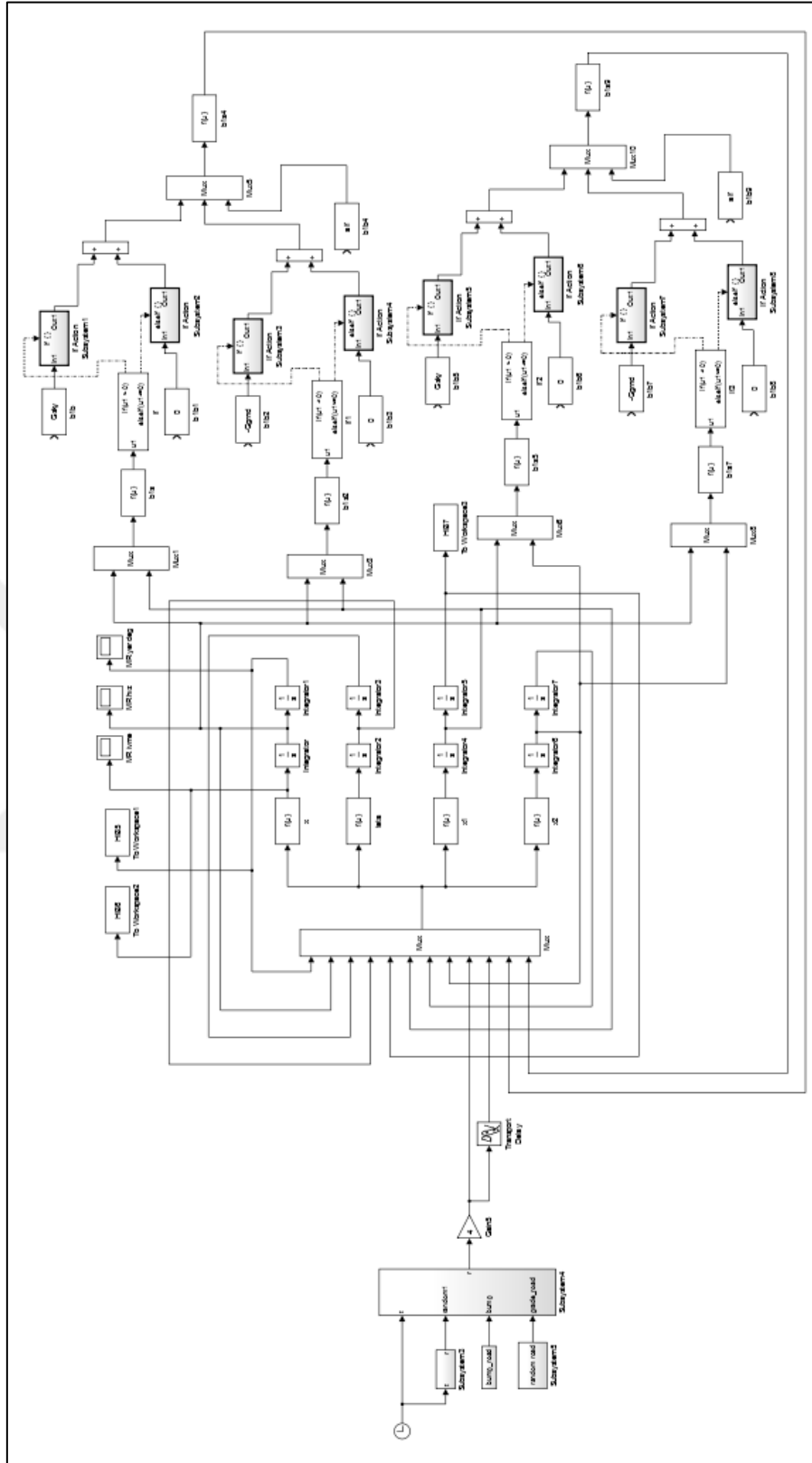
EK-B



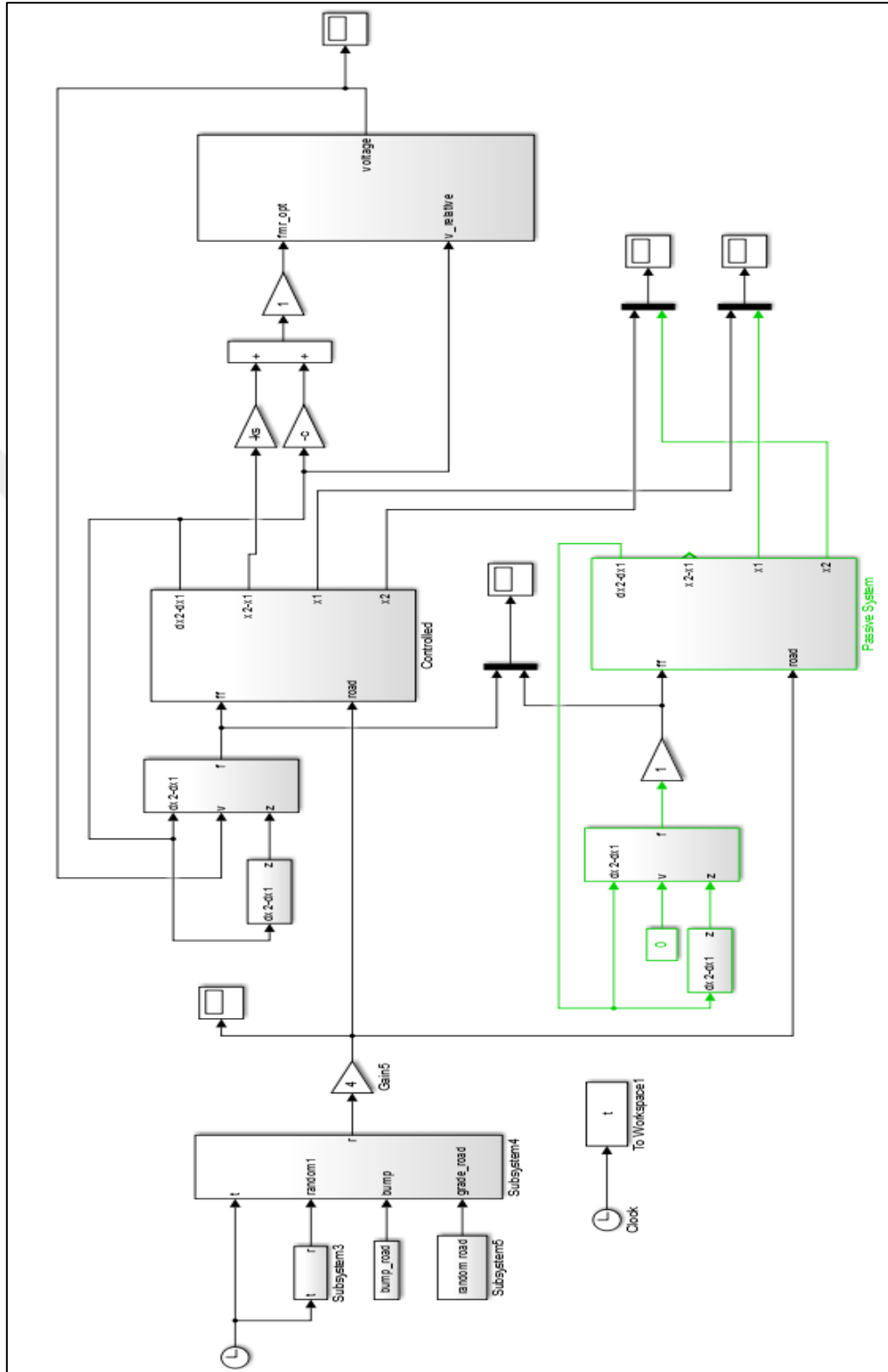
Şekil B.1. Pasif süspansiyon sistemli yarım taşıt simulink modeli



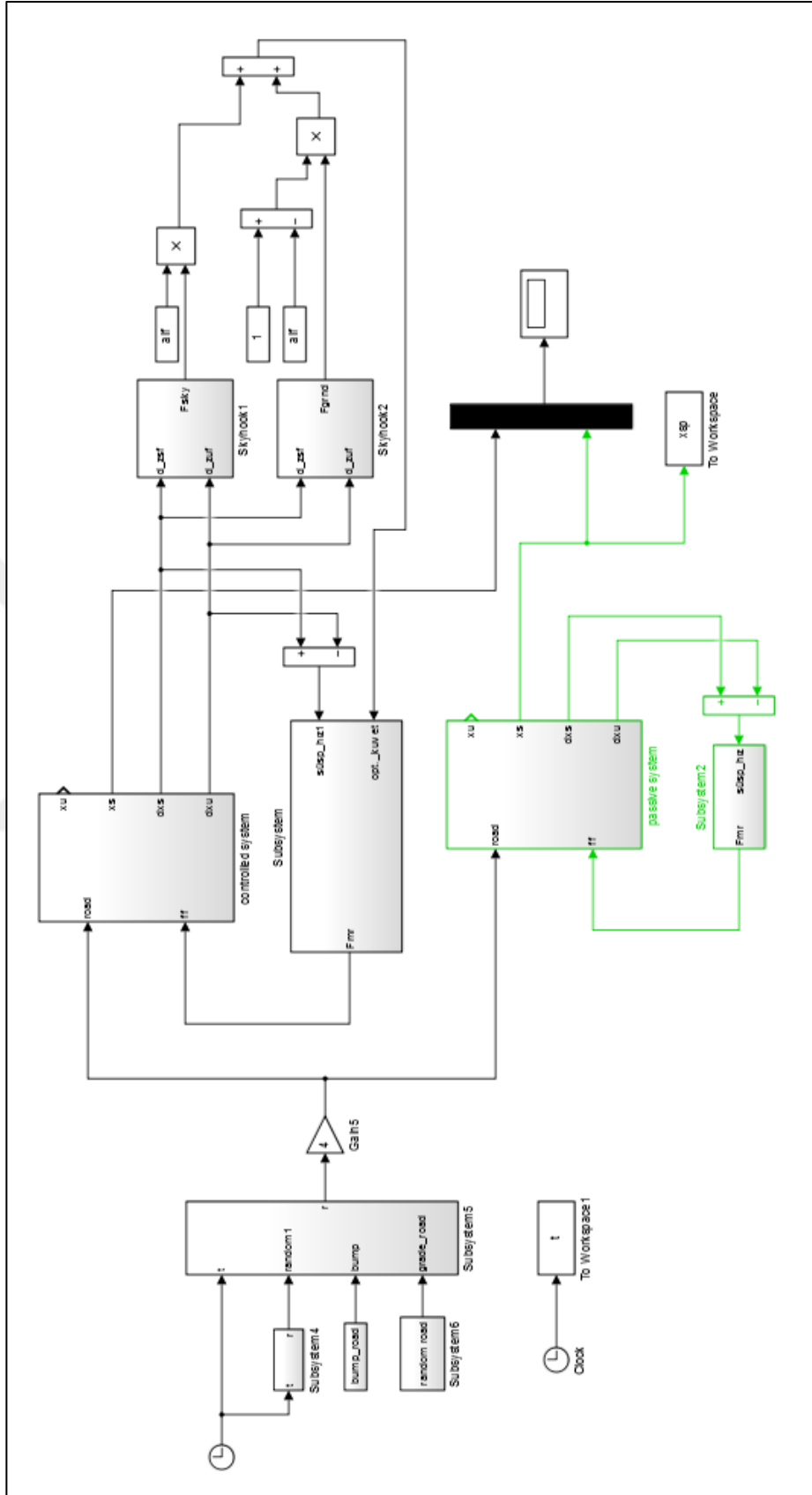
Şekil B.2. Yarı aktif süspansiyon sistemli (kırpmalı kontrol) yarım taşıt simulink modeli



Şekil B.3.Yarı aktif süspansiyon sistemli (hibrit kontrol)yarım taşıt simulink modeli



Şekil B.4. Test düzeneği kırpmalı kontrol simulink modeli



Şekil B.5. Test düzeneği hibrit kontrol simulink modeli

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Saltık S.**, 4x4 Zpt Platformlarında Mr Damperli Yarı Aktif Süspansiyon Sistemlerinin Modellenmesi Ve Tasarım Girdilerinin Oluşturulması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 11-13 Eylül 2014.
- [2] **Saltık S.**, Dülger Z., Experimental Comparison of Control Methods for Armoured Personnel Carriers with Semi-Active Magneto-Rheological Suspension, *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, Accepted for Publication.



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Mersin’de doğdu. Mersin Salim Yılmaz Lisesinden 1998 yılında mezun olmuştur. Gaziantep Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun olmuştur. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Halen özel bir firmada süreç yöneticisi olarak çalışmaktadır.

