

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOPLU TAŞIMA ARACI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ VE
YARI-AKTİF KONTROLÜ**

ABDULLAH TUNÇER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ MUZAFFER METİN**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOPLU TAŞIMA ARACI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ VE
YARI-AKTİF KONTROLÜ**

Abdullah TUNÇER tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer METİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer METİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Semih SEZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emre KOYUNCU
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın belirlenmesinde, araştırılmasında ve yürütülmesinde desteğini ve değerli zamanını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer Metin'e, tez çalışması sürecinde kaynak ve bilgi birikimini benimle paylaşan Arş. Gör. Sayın Mahmut Paksoy'a, tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme ve sevgili eşime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Temmuz, 2019

Abdullah TUNÇER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	8
BÖLÜM 2	
MODELLEME	
2.1 MR Sıvılar	9
2.2 MR Sönümleyiciler	10
2.3 MR Sönümleyiciler İçin Fiziksel ve Matematiksel Modeller	11
2.4 Toplu Taşıma Aracı İçin Fiziksel ve Matematiksel Modeller	13
2.5 Kontrol Sistemleri	15
2.5.1 PID Kontrol.....	16
2.5.2 Bulanık Mantık Kontrol.....	17
BÖLÜM 3	
SİMÜLASYON	
3.1 Basamak Yol Girişi İçin Simülasyonlar	22
3.1.1 Aracın Yüksüz Durumu İçin Simülasyon Sonuçları.....	22
3.1.2 Aracın Tam Yüklü Durumu İçin Simülasyon Sonuçları	25

3.2	ISO 8608 Yol Girişİ İçin Simölasyonlar	27
3.2.1	Aracın Yöksöz Durumu İçin Simölasyon Sonuçları.....	27
3.2.2	Aracın Tam Yöklö Durumu İçin Simölasyon Sonuçları	30

BÖLÖM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER	33
KAYNAKLAR.....	35

EK-A

PARAMETRELER

A-1 Taşıt Parametreleri (Aracın Yöksöz Durumu İçin)	37
A-2 Taşıt Parametreleri (Aracın Tam Yöklö Durumu İçin).....	38
A-3 MR Sönümleyici Parametreleri.....	38
A-4 Bulanık Mantıklı Kontrolcü Parametreleri.....	39
ÖZGEÇMİŞ	41

SİMGE LİSTESİ

a	Ön aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe
b	Arka aks ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe
c	Sağ tekerler ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe
c_0	Yüksek hızlarda gözlenen viskoz sönüm katsayısı
c_1	Düşük hızlardaki azalma etkisini (roll-off) gösteren sönüm katsayısı
c_{s1}	Ön sağ süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{s2}	Ön sol süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{s3}	Arka sağ süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{s4}	Arka sol süspansiyonun sönüm katsayısı
d	Sol tekerler ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe
e	Hata
F	MR sönümleyici sönüm kuvveti
F_{MR1}	Ön sağ MR sönümleyicinin kuvveti
F_{MR2}	Ön sol MR sönümleyicinin kuvveti
F_{MR3}	Arka sağ MR sönümleyicinin kuvveti
F_{MR4}	Arka sol MR sönümleyicinin kuvveti
I_y	Kütlisel atalet momenti (kafa vurma hareketi)
I_x	Kütlisel atalet momenti (yalpa hareketi)
k_0	Yüksek hızlardaki yay katsayısı
k_1	Akümülator yay katsayısı
k_{s1}	Ön sağ süspansiyonun yay katsayısı
k_{s2}	Ön sol süspansiyonun yay katsayısı
k_{s3}	Arka sağ süspansiyonun yay katsayısı
k_{s4}	Arka sol süspansiyonun yay katsayısı
k_{t1}	Ön sağ tekerleğin yay katsayısı
k_{t2}	Ön sol tekerleğin yay katsayısı
k_{t3}	Arka sağ tekerleğin yay katsayısı
k_{t4}	Arka sol tekerleğin yay katsayısı
M	Taşıt gövdesinin kütlesi
m_1	Ön sağ aks ve tekerleğin kütlesi
m_2	Ön sol aks ve tekerleğin kütlesi
m_3	Arka sağ aks ve tekerleğin kütlesi
m_4	Arka sol aks ve tekerleğin kütlesi
u	Aracın hızı
v	MR sönümleyiciye uygulanan gerilim

z	Bouc-Wen değışkeni
x_0	Bouc-Wen modelinde başlangıç yer değıştirmesi

KISALTMA LİSTESİ

BMK	Bulanık Mantık Kontrol
ER	Electro-rheological
LQR	Linear Quadratic Regulator
MR	Magneto-rheological
PSD	Power Spectral Density
RMS	Root Mean Square

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	MR sıvısındaki partiküllerin manyetik alan altında sıralanması..... 10
Şekil 2. 2	MR sönümleyicinin genel yapısı..... 10
Şekil 2. 3	Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli 11
Şekil 2. 4	Çalışmada kullanılan araç için genel temsili görsel..... 13
Şekil 2. 5	Yarı-aktif süspansiyon sistemi bulunan tam taşıt modeli 14
Şekil 2. 6	Açık çevrim kontrol 15
Şekil 2. 7	Kapalı çevrim kontrol 16
Şekil 2. 8	PID Kontrol'ün genel yapısı 16
Şekil 2. 9	BMK'nın genel yapısı 17
Şekil 2. 10	Yarı-aktif süspansiyonlu taşıt modeli için BMK yapısı 19
Şekil 3. 1	Basamak yol girişi 21
Şekil 3. 2	ISO 8608 yol girişi 22
Şekil 3. 3	Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları 23
Şekil 3. 4	Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 23
Şekil 3. 5	Gövdenin yalpalama hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 24
Şekil 3. 6	MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri 24
Şekil 3. 7	Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları 25
Şekil 3. 8	Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 26
Şekil 3. 9	Gövdenin yalpalama hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 26
Şekil 3. 10	MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri 27
Şekil 3. 11	Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları 28
Şekil 3. 12	Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 28
Şekil 3. 13	Gövdenin yalpalama hareketindeki açısai yer değiştirmesinin ve açısai ivmesinin zaman ve frekans cevapları 29
Şekil 3. 14	MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri 29
Şekil 3. 15	Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları 30

Şekil 3. 16	Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısal yer değıştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları	31
Şekil 3. 17	Gövdenin yalpalama hareketindeki açısal yer değıştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları	31
Şekil 3. 18	MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değeri	32
Şekil A. 1	BMK'nın girişleri ve çıkışı için üyelik fonksiyonları	39

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge A. 1	Minibüse ait taşıt parametreleri (aracın yüksüz durumu için)..... 37
Çizelge A. 2	Minibüse ait taşıt parametreleri (aracın tam yüklü durumu için)..... 38
Çizelge A. 3	MR sönümleyici parametreleri..... 38
Çizelge A. 4	BMK için kural tablosu..... 39

TOPLU TAŞIMA ARACI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ VE YARI-AKTİF KONTROLÜ

Abdullah TUNÇER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer METİN

Bu tez çalışmasında; şehir içi toplu ulaşımda kullanılan bir minibüs aracına etki eden titreşimlerin analizi ve yarı-aktif kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle sistemin fiziksel ve matematiksel modelleri çıkartılmıştır. Daha sonra, bilgisayar ortamında Matlab-Simulink programı kullanılarak boş ve dolu araç için iki farklı yol girişi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyonlarda dört farklı süspansiyon durumu incelenmiştir: 1) Geleneksel sönümleyicili ve kontrolcüsüz sistem, 2) MR sönümleyicili ve sönümleyici geriliminin sabit 0 V olduğu sistem, 3) MR sönümleyicili ve sönümleyici geriliminin PID kontrolcü ile kontrol edildiği sistem ve 4) MR sönümleyicili ve sönümleyici geriliminin Bulanık Mantıklı kontrolcü ile kontrol edildiği sistem. Her durumdaki simülasyon sonuçları için yer değiştirme ve ivme grafikleri hem zaman hem de frekans alanında elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece, MR sönümleyicili yarı-aktif kontrolün farklı kontrol algoritmaları ile taşıt titreşimlerini bastırmadaki performansı gözlemlenmiştir. Boş ve dolu araç senaryoları ile de, kullanılan kontrol algoritmalarının araç kütle parametresinin değişimine karşı duyarlılığı ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Taşıt titreşimleri, toplu taşıma aracı, yarı-aktif kontrol, MR sönümleyici, bulanık mantık kontrol

**ANALYSIS AND SEMI-ACTIVE CONTROL OF VIBRATIONS OF PUBLIC
TRANSPORTATION VEHICLE**

Abdullah TUNÇER

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Muzaffer METİN

In this thesis study; analysis and semi-active control of vibrations which affecting a minibus vehicle used in urban public transportation were investigated. Firstly, physical and mathematical models of the system have been extracted. After that, simulation studies were performed in computer environment by using Matlab-Simulink program, for unladen (driver only) and laden conditions of vehicle for two different road input. In simulations, four different cases were examined; 1) system with traditional damper and non-controller system, 2) system with MR damper and damper voltage as constant 0V, 3) system with MR damper and damper voltage controlled by PID controller and 4) system with MR damper and damper voltage controlled by Fuzzy Logic controller. In each case, the displacement and acceleration graphs for the simulation results were obtained in both time domain and frequency domain and compared with each other. In this way, different control algorithms for semi-active control with MR damper and their performance in damping the vehicle vibrations were observed. By the help of unladen and laden vehicle scenarios, it was presented that the designed control algorithms are sensitive to vehicle mass change.

Keywords: Vehicle vibrations, public transportation vehicle, semi-active control, MR damper, fuzzy logic control

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

1.1 Literatür Özeti

Süspansiyon sistemleri, yoldan iletilen titreşimleri sönümleyerek araçlardaki sürüşü daha konforlu hale getirmek ve araçların yol tutuşunu arttırarak daha güvenli bir sürüş sağlamak gibi görevleri nedeniyle otomotiv sektöründe büyük öneme sahiptirler. Bu nedenle, araçlardaki titreşim analizleri ve süspansiyon sistemleri üzerine çalışmalar önem arz etmektedir. Süspansiyon sistemi ile ilgili yapılan araştırmalara bağlı olarak farklı tiplerde süspansiyon modelleri ve kontrol stratejileri ortaya koyulmuştur. Bu çalışmada, yarı-aktif süspansiyon sistemi üzerinde durulmuştur.

Yarı-aktif süspansiyon sistemi, pasif süspansiyon sistemi ve aktif süspansiyon sistemi ile karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Pasif süspansiyon sistemlerine göre avantajı, titreşimlerin yarı aktif süspansiyonlarla daha etkili şekilde bastırılması ve konforun artırılması olurken, aktif süspansiyon sistemlerine karşı en büyük avantajı ise, titreşim kontrolü için çok daha az enerji gereksinimine ihtiyaç duyması ve donanım maliyetinin de daha ucuz olmasıdır. Her ne kadar, aktif süspansiyonların göstermiş olduğu titreşim bastırma performansı yarı aktif sistemlere göre çok daha üstün olsa da, yarı aktif sistemler aktif süspansiyonlara göre hem işletme hem de kurulum açısından çok daha ucuzdur. Nispeten ucuz bir sistemle taşıt titreşimlerinin bastırılarak yolcu konforunun artırılabilmesi, yarı-aktif süspansiyon sistemleri üzerine araştırmalar yapılmasına ve performansının artırılmasına dair problemlerin çözülmesi için çeşitli çalışmalar yapılmasına neden olmaktadır. Bu araştırmalar neticesinde, bu sistemin kullanım alanları ve sıklığı gün geçtikçe artmaktadır.

Yarı-aktif süspansiyon sisteminde, pasif süspansiyon sisteminde kullanılan geleneksel sönüm elemanları yerine içlerinde akıllı sıvı yer alan sönümleyiciler kullanılır. Akıllı sıvı olarak adlandırılan bu sıvıların temel özelliği; fiziksel özellikleri ve dolayısıyla sönüm katsayıları değişebilir ve kontrol edilebilir olmasıdır. Bu sıvılara örnek olan ER (elektro reolojik) sıvıların sönüm katsayıları elektrik alan altında, MR (manyeto reolojik) sıvıların sönüm katsayıları manyetik alan altında değiştirilebilmektedir.

Kontrol edilebilir, akıllı sıvılar üzerine çalışmaların 1940'lı yıllarda başladığı görülmektedir. Willis Winslow, ER sıvılar ile bu alanda çalışmalar yapmıştır [1]. MR sıvılar ile çalışmaların Jacob Rabinow'un yaptığı çalışmalar ile başladığı söylenebilir. Rabinow MR sıvıların kullanıldığı sönümleme elemanı tasarımı hakkında yaptığı çalışmalar neticesinde 1951 ve 1954 yıllarında patentler almıştır [2], [3]. 1970'li yıllardan sonra bu alandaki araştırmalar artmaya başlamıştır. 1974 yılında Karnopp D.C. yaptığı çalışmalar ile Shyhook kontrolünü ortaya koymuştur. Yarı-aktif süspansiyon sisteminin araçlarda kullanılması fikri değerlendirilmeye başlanmıştır [4].

Spencer vd. [5], kontrol edilebilir sıvılı sönümleyiciler için birkaç idealleştirilmiş mekanik modeli gözden geçirdikten sonra, tipik bir MR sönümleyici davranışını etkin bir şekilde yansıtabilen yeni bir model önermişlerdir. Bir prototip sönümleyici için deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırma, modelin çok çeşitli çalışma koşullarında doğru olduğunu, kontrol tasarımı ve analiz için yeterli olduğunu ortaya koymuştur.

Ahmadian ve Pare [6], çalışmalarında MR sönümleyicilerle taşıt modelini deneysel olarak kurmuşlardır. Bu model üzerinde, yarı-aktif kontrol için kullanılan Shyhook, Groundhook ve bu iki yöntemin birleşik bir etkisinin sağlanması amaçlanan hibrit kontrol yöntemlerini incelemişler ve deney sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; hibrit kontrolün, daha iyi bir araç dengesi ve sürüş konforu için sürüş koşullarına ve araç dinamiğine yavaşça uyum sağlayabilen bir yarı-aktif kontrol yöntemi olduğunu ve diğer iki yöntemle göre daha etkili olduğunu göstermiştir.

Yao vd. [7], araç süspansiyon sisteminin yarı-aktif kontrolü için akış modunda çalışan bir MR sönümleyici tasarlamış ve bu sönümleyicinin performansını gözlemlemek için test düzeneği kurmuşlardır. MR sönümleyicinin performansını nitelemek için Bouc-Wen matematiksel modelini kullanmışlardır. Model için katsayıları, Matlab'deki

optimizasyon yöntemi ve MR sönümleyicinin deneysel sonuçları ile belirlemişlerdir. MR sönümleyici modelini içeren, ölçekli bir çeyrek taşıt modeli oluşturmuşlardır. Süspansiyon sisteminin titreşimini kontrol etmek için yarı-aktif kontrol uygulamışlardır. Yapılan deneylerde; MR sönümleyicinin sönümleme katsayısının elektrik akımının artmasıyla beraber arttığını, uyarım genliğinin artmasıyla ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Simülasyon sonuçları ile birlikte yarı-aktif kontrol yönteminin etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Lai ve Liao [8], bir serbestlik dereceli ve MR sönümleyicili bir süspansiyon sistemi üzerine çalışma yapmışlardır. Model için uygun parametrelerin bulunması için prototip bir sönümleyicinin deneysel sonuçlarından yararlanmışlardır. Sistemin kontrolü için kayan kipli kontrolcü tasarlamışlardır. İki farklı uyarı sinyali kullanarak, çalışılan süspansiyon sisteminin performansını incelemişlerdir. Titreşim cevaplarını zaman ve frekans alanlarında değerlendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kontrol edilen MR sönümleyicili sistemin, titreşimlerin önemli ölçüde azaltılmasını sağladığını göstermişlerdir.

Blanchard [9], yüksek lisans tez çalışmasında önce pasif ve yarı-aktif sönümleyiciler kullanarak iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli, sonra da yedi serbestlik dereceli tam taşıt modeli oluşturmuştur. Modelde kontrol için skyhook, groundhook ve hibrit kontrol yöntemlerini kullanmış ve buradaki sonuçları pasif sönümleyicili model sonuçlarıyla kıyaslamıştır. Performans ölçütleri olarak, konfor göstergesi olarak kabul edilebilecek olan titreşim sönümlemeyi, süspansiyon hareketi gereksinimlerini ve yol tutuş kalitesini göz önünde bulundurmuştur. Yaptığı simülasyon çalışmaları ile; hibrit kontrol sisteminin pasif sisteme göre, daha iyi bir konfor sağlarken aracın yol tutuşunda bozulmaya yol açmadığını; ve ayrıca hibrit kontrolün skyhook ve groundhook kontrollere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtmiştir.

Yu vd. [10], bir taşıtın ön aksındaki pasif sönümleyicilerin yerine iki adet MR sönümleyici yerleştirmişler ve bu sönümleyicileri kontrol etmek için bulanık mantık kontrol yöntemini kullanmışlardır. MR sönümleyicili süspansiyon sisteminin performansını yol testleri yaparak değerlendirmişlerdir. Yapılan testler ile MR

sönümleyicilerin taşıt gövdesi ve tekerleklerdeki titreşimi önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuşlardır.

Yağız vd. [11], beş serbestlik dereceli taşıt modeli üzerinde bulanık mantık kontrol yöntemini uygulamışlardır. Çalışmada, üç farklı durumu ele almışlardır; ilki, aracın pasif süspansiyon sistemli ve yolcu koltuğunun aktif kontrollü olduğu durum; ikincisi, aktif kontrollü süspansiyon sistemini ve pasif sistemli yolcu koltuğu olduğu durum; üçüncüsü de hem süspansiyon sistemi hem de yolcu koltuğunun aktif kontrollü olduğu durumdur. Yolcu koltuğunun bu üç durumdaki titreşimlerini analiz etmek için simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda; sürüş konforundaki en başarılı sonuçların, hem araç süspansiyon sisteminin hem de koltuğun aktif kontrol edildiği yöntemde elde edildiğini göstermişlerdir.

Göksel [12], yarı-aktif süspansiyon sisteminin performansını değerlendirmek için bulanık mantık ve optimal lineer regülatör olmak üzere iki farklı kontrol yöntemi uygulamıştır. Bu karşılaştırma için MR sönümleyicili çeyrek taşıt modelini kullanarak, simülasyon çalışmaları yapmıştır. Bu iki kontrol yöntemi için elde edilen sonuçları sürüş konforu ve araç güvenliği açısından birbirleriyle ve pasif süspansiyon sistemi ile kıyaslamıştır.

Rashid vd. [13], MR sönümleyicili, iki serbestlik dereceli bir çeyrek taşıt modelinde farklı yol profilleri altındaki taşıt titreşimlerinin bulanık mantık yöntemi ile yarı-aktif kontrolünü çalışmışlardır. Bulanık mantık yöntemi ile kalsik PID kontrol yöntemini karşılaştırmışlar, ve bulanık mantık yönteminin titreşimleri sönümlemede daha iyi sonuç verdiğini değerlendirmişlerdir.

Yaz [13], yüksek lisans tez çalışmasında, tam taşıt modelinde değişken sönümlü yarı-aktif süspansiyon sisteminin optimizasyonunu ele almıştır. Sönüm katsayılarının en uygun değerlerinin elde edilebildiği kapalı çevrim kontrol için Pontryagin esasını uygulamıştır. Matlab programı ile yaptığı simülasyon çalışmaları neticesinde, araç ve tekerleklerdeki titreşim hareketlerinin yarı-aktif kontrol ile büyük ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

Bilgiç [14], yüksek lisans tez çalışmasında, çeyrek taşıt modeli vasıtasıyla ideal bir yarı-aktif sistemin başarısını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Önce PID kontrolcü, bulanık

mantıklı kontrolcü ve kayan kipli kontrolcü kullanarak MR sönümleyici modeli olmadan; daha sonra MR sönümleyici modelinin de eklenmesiyle kontrol yöntemlerinin etkisini incelemiştir. MR sönümleyici modelinin eklenmesiyle gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmiştir. MR sönümleyici için en uygun olan kontrol yöntemini belirleyebilmek için birçok simülasyon gerçekleştirip, bulunan değerleri karşılaştırarak en iyi yöntemi belirlemeye çalışmıştır.

Metin [15], yüksek lisans tez çalışmasında, taşıt titreşim analizi için İstanbul şehir içi ulaşımında kullanılan bir raylı sistem aracını ele almıştır. Araca ait gerçek parametreleri kullanarak, Matlab’de modelleme ve simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Simülasyonlarda zamana ve frekansa bağlı olarak elde edilen yer değişimleri ve ivmelerin en aza indirilmesi için bulanık mantıklı kontrolcü tasarımı yaparak aktif kontrol uygulamıştır. Kontrolcüsüz ve kontrolcülü sonuçların karşılaştırmalarını vererek, bulanık mantıklı kontrolcülü sistemin titreşimleri sönümlemesindeki başarısını vurgulamıştır.

Emekli [16], yüksek lisans tez çalışmasında, hafif ticari bir araç için yarı-aktif süspansiyon sistemi tasarımı yapmıştır. Öncelikle bu araca ait gerçek parametreler ile oluşturduğu model için bilgisayar ortamında simülasyon çalışmaları yapmış, sonrasında prototip bir araçta gerekli ekipmanların takılmasıyla yol testleri yapmıştır. Sistemin kontrol çalışmaları için, Skyhook, groundhook ve hibrit gibi farklı kontrol yöntemlerini uygulamıştır. Bu kontrol yöntemlerinin sonuçlarını birbiriyle ve pasif sisteme göre kıyaslamıştır. Ayrıca simülasyon sonuçları ile yol testleri sonuçlarını karşılaştırdığında sonuçların birbirine yakın olduğunu gözlemlemiştir. Elde ettiği sonuçlara istinaden; Skyhook kontrol yönteminin konfor açısından, hibrit kontrol yönteminin yol tutuş açısından en iyi sonuçları verdiğini belirtmiştir.

Yabansu [17], yüksek lisans tez çalışmasında, sürüş konforu ve yol tutuşunu mümkün olabildiğince aynı anda arttırmak için MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyonlar üzerinde kontrol uygulamaları yapmıştır. İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli üzerinde, anahtar kontrolü, Skyhook kontrolü, durum geri beslemeli kontrol ve LQR kontrolü uygulayarak simülasyonlar yapmıştır. Uygulanan kontrol yöntemlerinin yoldan

gelen iki farklı bozucu sinyal çeşidine göre verdiği cevapları pasif sistemin verdiği cevaplar ile karşılaştırmıştır.

Erdoğan [18], yüksek lisans tez çalışmasında, yarı-aktif süspansiyon sistemleri için kullanılan kontrol yöntemlerini, araçların sürüş konforunu geliştirmek için tasarlamıştır. Araç modelinde süspansiyonların uygulaması gereken sönümleme kuvvetlerinin belirlenebilmesi için yarı-aktif kontrol yöntemi geliştirmiştir. İlk önce lineer karesel durum regülatörünü (LKR) kullanmıştır. Buna ek olarak skyhook kontrolcüsünü incelenmiş ve LKR kontrolcüsüyle performans açısından karşılaştırmıştır. Yedi serbestlik dereceli araç modeli üzerindeki simülasyon çalışmaları ile, düşey hareket, kafa vurma hareketi ve yalpalama hareketlerini zaman ve frekans alanlarında analiz ederek, LKR denetleyicisinin yeterliliği göstermiştir.

Paksoy [19], yüksek lisans tez çalışmasında, yedi serbestlik dereceli tam taşıt modeli ve yarı-aktif kontrolü için de MR sönümleyici kullanmıştır. MR sönümleyiciyi modellemek için Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli kullanmıştır. Sistemi önce pasif olarak modellemiş sonrasında pasif sönümleyiciler yerine MR sönümleyiciler kullanarak modellemiştir. MR sönümleyicinin kontrolsüz hali ile pasif sistemi karşılaştırmış ve emniyet açısından uygun olduğunu göstermiştir. Daha sonra MR sönümleyici ile modellenen sistemin kontrolü için, bulanık mantıklı kontrolcüye öz uyarlamalı bulanık mantıklı kontrolcü uygulamaları yapmıştır. Modelleme ve simülasyon çalışmalarını, Matlab-Simulink programı yardımı ile gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmaları ile yarı-aktif kontrolün taşıt titreşimlerinin azaltılmasındaki performansını ortaya koymuştur. Ayrıca, kontrol yöntemleri arasında bir karşılaştırma ve değerlendirme de yapmıştır.

Güneşer [20], yüksek lisans tez çalışmasında, MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyon sistemini kamyon kabinlerindeki titreşimleri azaltmak için uygulamıştır. Kontrolcünün performansını analiz etmek için; pasif sistem, MR sönümleyicinin kontrol edilmediği sistem, MR sönümleyicinin tasarlanan kontrolcü ile kontrol edildiği sistem durumlarını simülasyon çalışmaları ile irdlemiştir. Koltuk ve kabin için yer değiştirmeyi ve ivmeyi zamana bağlı grafikler ile belirtilen farklı durumlar için karşılaştırmıştır. Elde edilen titreşim değerleri ve bunların RMS değerleri ile de tasarlanan kontrolcülerin etkinliğini göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

Emniyet ve sürüş konforu, taşıtlarda değerlendirme ölçütleri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Yollardaki düzgünsüzlükler, taşıtlarda titreşim oluşturmak suretiyle sürüş konforunu olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle konforu arttırmak için bu titreşimlerin azaltılması gerekmektedir. Taşıtlarda titreşimleri ve olumsuz etkilerini azaltmak için süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Süspansiyon sistemleri; titreşimlerin azaltılması ile yol düzgünsüzlüklerinin en az düzeyde hissedilmesini sağlamak ile birlikte, tekerleklerin yolla arasındaki bağlantının sürekliliğini sağlayarak taşıtın yol tutuşunu arttırmaktadır. Bu da süspansiyon sistemlerinin emniyet açısından önemini göstermektedir. Süspansiyon sistemleri kontrol yöntemleri açısından; pasif, yarı-aktif ve aktif süspansiyon sistemleri olarak üç gruba ayrılmaktadır. Geleneksel süspansiyon sistemleri olan pasif süspansiyon sisteminde bir kontrol olmaksızın, yay ve sönüm elemanı yardımı ile titreşim sönümlenmesi yapılır. Otomotiv alanındaki gelişmeler ile birlikte, süspansiyon sistemlerinin iyileştirilmesi için de çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar aktif ve yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Aktif süspansiyon sistemlerinde; sahip oldukları kuvvet eyleyici ile titreşimlerin kontrolü ve daha iyi azaltılması sağlanırken, harcadığı enerjinin yüksek olması ve fazla maliyetli olması gibi dezavantajlar mevcuttur. Yarı-aktif süspansiyon sistemleri ise; aktif sistemler ile kıyaslandıklarında titreşim sönümlenme performansı daha düşük kalsa da kabul edilebilir iyi sonuçlar vermeleri, daha az enerji harcamaları ve daha düşük maliyetli olmaları, ilaveten güvenlik açısından pasif sistemlere benzer olmaları gibi avantajları içermektedir. Yarı-aktif sistemlerin temel özelliği, kullanılan sönüm elemanın sönüm katsayısının değiştirilebilir ve kontrol edilebilir olmasıdır.

Bu tez çalışmasının amacı, MR sönümleyicili yarı-aktif bir süspansiyon sistemi ve bu sistemin bulanık mantık kontrolü (BMK) ile taşıt titreşimlerinin azaltılmasıdır. Çalışmada, şehir içi ulaşımda kullanılan bir toplu taşıma aracına ait gerçek değerler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen kontrolün başarısını değerlendirmek amacıyla, BMK ile kontrol edilen MR sönümleyicili yarı-aktif sistem; pasif sistem, MR sönümleyicinin kontrol edilmediği, MR sönümleyicinin PID kontrolcü ile kontrol edildiği sistemler ile kıyaslanmıştır. Taşıtın modellenmesi ve simülasyon çalışmaları Matlab-Simulink programı ile yapılmıştır. Kontrolcülerin parametre değişimine karşı duyarlılığını

incelemek için ise, taşıtın hem boş hem de dolu ağırlıkları kullanılarak yapılan simülasyonlar iki farklı bozucu yol girişi altında gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Yarı-aktif süspansiyon sistemleri sahip oldukları; titreşim sönümleme performanslarının iyi olması ile birlikte az enerji harcama, düşük maliyetli ve emniyetli gibi avantajlar ile yakın zamanda otomotiv alanındaki kullanımlarını artıracaktır. Kullanımlarının yaygınlaşması sayesinde binek araçların yanısıra ticari ve toplu taşıma araçlarında da tercih edileceklerdir.

MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyon sistemlerinin daha verimli çalışması için uygun bir kontrolcü tasarımı önemlidir. BMK ile kontrol edilen MR sönümleyicinin taşıt titreşimlerini önemli ölçüde bastırması beklenmektedir.

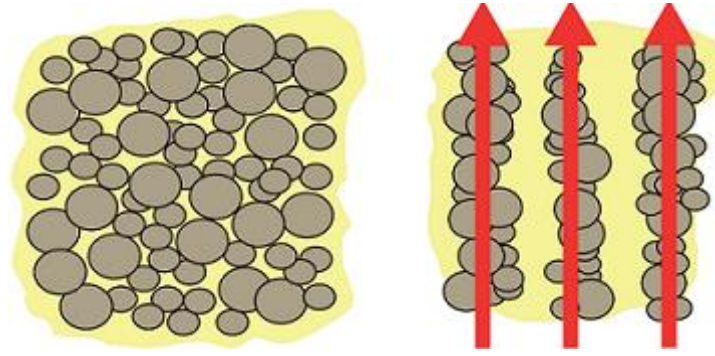
BÖLÜM 2

MODELLEME

Bu bölümde ilk olarak; yarı-aktif süspansiyon sisteminde sönüm elemanı olarak kullanılan MR sönümleyicinin yapısı, fiziksel ve matematiksel modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Sonrasında; yarı-aktif süspansiyon sistemi bulunan minibüs için fiziksel model belirtilerek, bu modele ait matematiksel ifadeler çıkartılmıştır.

2.1 MR Sıvılar

MR sönümleyicileri ve nasıl çalıştıklarını daha iyi kavrayabilmek için öncelikle bu sönümleyicilerde kullanılan MR sıvılara göz atmak faydalı olacaktır. MR sıvılar, Jacob Rainbow tarafından 1940'lı yılların sonlarında keşfedilmiştir [2], [3]. MR sıvıların fiziksel özellikleri, manyetik alan etkisine bağlı olarak değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. MR sıvılar; içerisinde mikron boyutunda manyetik parçacıklar bulunan taşıyıcı bir sıvıdan oluşan yapılardır. Bu taşıyıcı sıvı için; su, madeni yağ, glikol, vs. kullanılabilir. Manyetik alan etkisi mevcut olduğunda, MR sıvılar içerisindeki mikron boyutundaki parçacıklar manyetik alan doğrultusunda birbirine zincir şeklinde tutunur ve milisaniye mertebesinde olacak kadar kısa bir süre içerisinde sıvı durumdan yarı katı duruma dönüşebilirler. Manyetik alan etkisi sonlandığında ise tekrar aynı şekilde çok hızlı olarak eski hallerine, serbes akış durumlarına geri dönerler [24]. Manyetik alan etkisindeki manyetik parçacıkların kenetlenmesi ve oluşturduğu yapı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Manyetik alanın şiddetine bağlı olarak MR sıvısının viskozitesi değişir, bu da sıvının kontrol edilebilmesini sağlamaktadır. Kontrol edilebilir veya akıllı sıvı olarak belirtilmelerindeki sebep de budur.

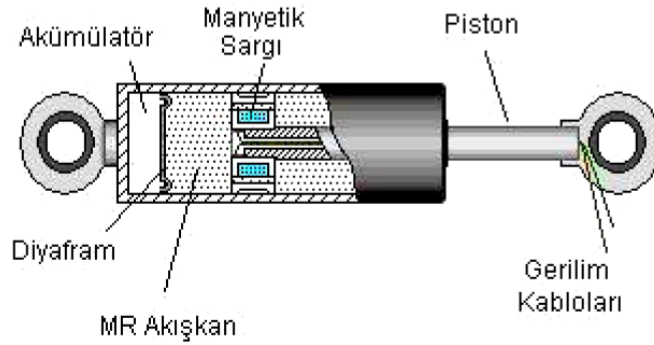


Şekil 2. 1 MR sıvısındaki partiküllerin manyetik alan altında sıralanması [24]

MR sıvıların avantajları arasında; hızlı cevap süresi, geniş çalışma sıcaklığı aralığı (-40°C / $+150^{\circ}\text{C}$), çalışması içindüşük güç gereksinimi, yüksek dinamik akma gerilmesi, kirden çok etkilenmemesi gibi özellikler gösterilebilir [25].

2.2 MR Sönümleyiciler

Yarı-aktif süspansiyon sistemlerinde kullanılan sönüm elemanı çeşitlerinden biri MR sönümleyicidir. MR sönümleyiciler, içlerindeki MR sıvıların özelliği gereği manyetik alan etkisinde sönümleme kuvveti değişen sönümleyicilerdir. MR sönümleyiciler genel itibarıyla MR sıvısı, akümülatör, piston, gerilim kabloları ve manyetik sargıdan meydana gelmektedir. MR sönümleyicinin genel yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 MR sönümleyicinin genel yapısı [25]

Piston içerisindeki gerilim kabloları vasıtasıyla uygulanan gerilim manyetik sargılara iletilir ve bu sayede manyetik alan oluşturulur. Oluşan manyetik alan ile MR sıvısı içerisindeki manyetik parçacıkların dizilimi değiştirilerek sıralı bir hale geçirilmiş olur. Bu dizilim ile sıvının viskozitesi artırılır. Bu şekilde sönüm katsayısı artırılmış olur. Bu özellik sayesinde, gerilim değeri değiştirilerek MR sönümleyicinin sönüm katsayısı ve

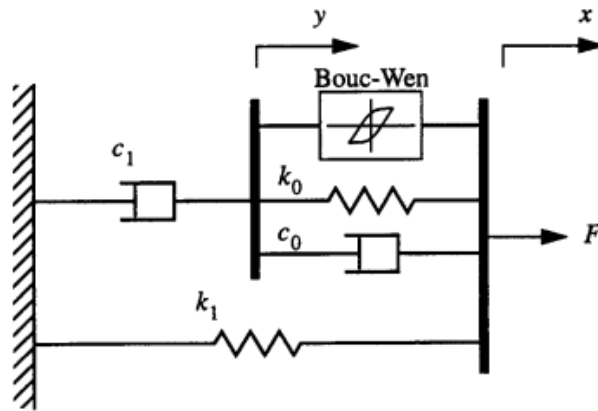
sönümleme karakteristiği değiştirilebilmektedir. Herhangi sebeple bir gerilim girişi olmazsa, MR sönümleyici pasif sönümleyici gibi davranır. Bu da MR sönümleyiciler için emniyet açısından olumlu bir özellik teşkil eder.

2.3 MR Sönümleyicilerin Matematiksel Modeli

MR sönümleyiciler, pasif sönümleyicilerden farklı olarak doğrusal olmayan karaktere sahiptir. MR sönümleyiciyi modelleyerek, sahip olduğu bu doğrusal olmayan karakteri etkili ve gerçeğe yakın olarak ifade edebilmek amaçlanmaktadır. MR sönümleyici için en iyi modeli elde edebilmek için literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalardaki modeller genel olarak parametrik ve parametrik olmayan modeller olarak iki gruba ayrılmaktadır. Parametrik olmayan modeller deneysel çalışmaların sonucunda bulunan verilerden oluşurken; parametrik modeller yay, sönüm elemanı gibi mekanik elemanların kullanılmasıyla oluşmaktadır. Parametrik model olarak; Lugre modeli, Bingham modeli, Bouc-Wen modeli, Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli gibi birçok model geliştirilmiştir.

Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli

Bingham ve Bouc-Wen modelleri ile karşılaştırıldığında Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli'nin, MR sönümleyicinin hareketini daha yüksek başarı ile modellediği yapılan çalışmalar ile ifade edilmiştir [5]. Bu nedenle, bu çalışmada MR sönümleyicinin hareketini yansıtmak için Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli tercih edilmiştir. Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli [5]

Modele ait matematiksel ifadelere aşağıda yer verilmiştir.

Denklemler çıkartılırken, modeldeki üst taraf ve alt taraf ayrı ayrı düşünülmektedir. Buna göre önce üst taraf incelendiğinde;

$$c_1 \dot{y} = \alpha_h z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) \quad (1.1)$$

hesap edilebilir değişken olan z şu şekilde ifade edilir;

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} z - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A (\dot{x} - \dot{y}) \quad (1.2)$$

Denklem 2.1’de $\dot{y}$ ifadesi çekilirse;

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha_h z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0)] \quad (1.3)$$

Sistemdeki toplam kuvvet, F bulunurken, Şekil 2.3’deki modelin üst ve alt tarafları birlikte ele alındığında aşağıdaki gibi bulunur;

$$F = \alpha_h z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \quad (1.4)$$

Modelde; k_1 akümülator yay katsayısını, c_0 yüksek hızlardaki viskoz sönümü, c_1 düşük hızlardaki deneysel değerin azaltılması için kullanılan sönümü, k_0 yüksek hızlardaki yay sabitini, x_0 akümülator yayının başlangıç yer değiştirmesini ifade etmektedir.

MR sönümleyicinin hareketini, değişken bir manyetik alan altında olduğu durumda ifade edebilmek için Denklem 2.3 ve 2.4’teki parametrelerin uygulanan voltaja bağlı olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu şekilde genelleştirilmiş denklemler elde edilmektedir. Bu denklemler aşağıda Denklem 2.5 – 2.8’de gösterilmektedir.

$$\alpha_h = \alpha_{ha} + \alpha_{hb} V \quad (1.5)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} V \quad (1.6)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} V \quad (1.7)$$

burada V aşağıdaki şekilde bulunur;

$$\dot{V} = -\mu (V - v) \quad (1.8)$$

v ifadesi MR sönümleyiciye uygulanan gerilimdir.

2.4 Toplu Taşıma Aracı İçin Fiziksel ve Matematiksel Modeller

Bir sistemde yapılacak olan titreşim analizi için öncelikle sistemin fiziksel modeli, sonrasında matematik modeli oluşturulmalıdır. Fiziksel model ile sistemin serbestlik derecesi belirlenirken, matematiksel model ile sistemin hareket denklemleri elde edilir.

Bu çalışmada, toplu taşıma aracı olarak Şekil 2.4'te temsili olarak görülen bir minibüs kullanılmıştır. Minibüs, tam taşıt modeli olarak modellenmiştir. Bu model Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Tam taşıt modeli; gövdenin düşey hareketi, kafa vurma hareketi, yalpalama hareketi ve her bir aksın düşey hareketi olmak üzere toplam yedi serbestlik derecelidir.



Şekil 2. 4 Çalışmada kullanılan araç için genel temsili görsel

Hareket denklemlerinin elde edilmesi için bu çalışmada Lagrange yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde; genelleştirilmiş koordinatlarda sistemlerin enerjileri ifade edilerek doğrudan hareket denklemleri elde edilir. Genelleştirilmiş koordinatlar sistemin konumunu tamamıyla ve bütün sınırlamalardan bağımsız olan bağımsız parametrelerin oluşturduğu bir settir [15]. Karmaşık fiziksel sistemlerin modellenmesinde Lagrange metodu kolaylık sağlamaktadır. Lagrange yöntemi için çok çeşitli kaynaklarda bilgi bulmak mümkündür. (Pasin, 1984) Lagrange yönteminin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_j} + \frac{\partial E_p}{\partial q_j} + \frac{\partial E_s}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (1.9)$$

E_k Toplam kinetik enerji

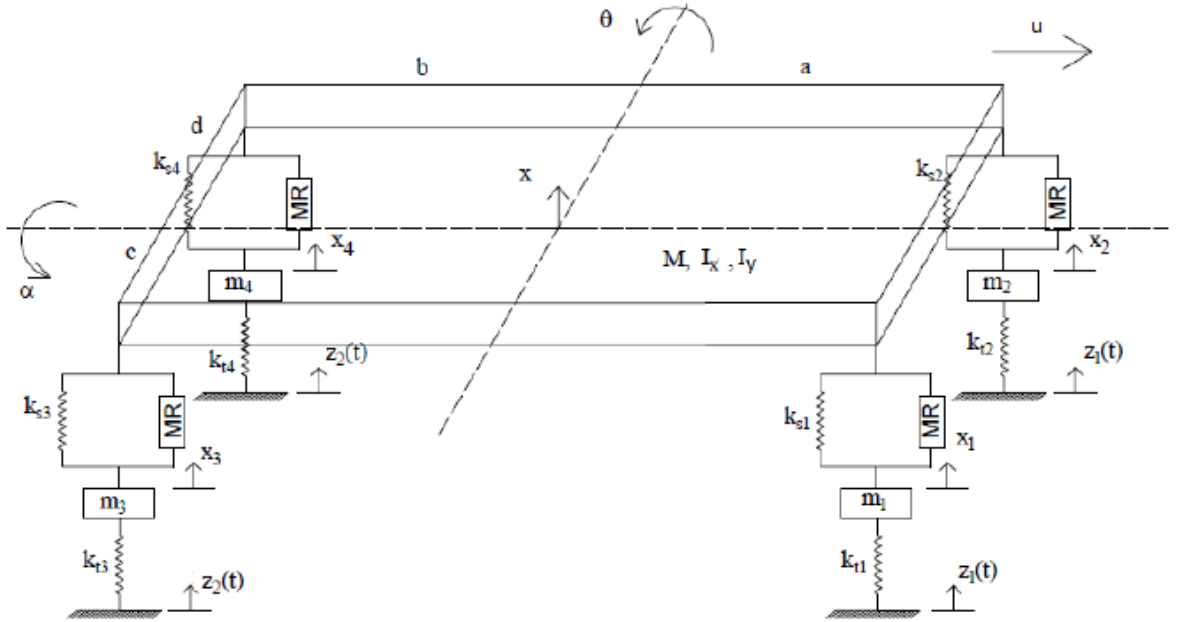
E_p Toplam potansiyel enerji

E_s Toplam sönüm enerjisi

- Q_j Genelleştirilmiş kuvvetler
 q_j Genelleştirilmiş koordinatlar

Yarı-Aktif Süspansiyon Sistemi Bulunan Taşıt Modeli

Minibüs, öncelikle geleneksel pasif sönümleyiciler ile modellenmiştir. Pasif sönümleyicili modeller hakkında literatürde çalışmalar yer almaktadır [11], [16], [19]. Detay için mevcut çalışmalar incelenebilir. Daha sonra ilk kısımda kullanılan geleneksel sönümleyiciler çıkartılarak yerine MR sönümleyiciler yerleştirilerek modelleme yapılmıştır. Sistem yedi serbestlik dereceli olduğu için yedi adet hareket denklemi olacaktır.



Şekil 2. 5 Yarı-aktif süspansiyon sistemi bulunan tam taşıt modeli [19]

Hareket denklemleri elde edilirken Langrange yöntemi kullanılmıştır. Pasif sönümleyicili modelden farklı olarak; hareket denklemlerinde pasif sönümleyici için kullanılan c sönüm katsayısı kullanılmamış, denklemlere MR sönümleyici kuvvetleri eklenmiştir. Bu durumda elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
& M\ddot{x} + (k_{s1} + k_{s2} + k_{s3} + k_{s4})x + (k_{s1}a + k_{s2}a - k_{s3}b - k_{s4}b)\theta \\
& + (-k_{s1}c + k_{s2}d - k_{s3}c + k_{s4}d)\alpha - k_{s1}x_1 + k_{s2}x_2 + k_{s3}x_3 - k_{s4}x_4 \\
& = -F_{MR1} - F_{MR2} - F_{MR3} - F_{MR4}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

$$\begin{aligned}
& I_y\ddot{\theta} + (k_{s1}a + k_{s2}a - k_{s3}b - k_{s4}b)x + (k_{s1}a^2 + k_{s2}a^2 + k_{s3}b^2 + k_{s4}b^2)\theta \\
& + (-k_{s1}ac + k_{s2}ad + k_{s3}bc - k_{s4}bd)\alpha - k_{s1}ax_1 - k_{s2}ax_2 + k_{s3}bx_3 + k_{s4}bx_4 \\
& = -F_{MR1}a - F_{MR2}a + F_{MR3}b + F_{MR4}b
\end{aligned} \tag{1.11}$$

$$\begin{aligned}
& I_x\ddot{\alpha} + (-k_{s1}c + k_{s2}d - k_{s3}c + k_{s4}d)x + (-k_{s1}ca + k_{s2}da + k_{s3}cb - k_{s4}db)\theta \\
& + (k_{s1}c^2 + k_{s2}d^2 + k_{s3}c^2 + k_{s4}d^2)\alpha + k_{s1}cx_1 - k_{s2}dx_2 + k_{s3}cx_3 - k_{s4}dx_4 \\
& = F_{MR1}c - F_{MR2}d + F_{MR3}c - F_{MR4}d
\end{aligned} \tag{1.12}$$

$$m_1\ddot{x}_1 - k_{s1}x - k_{s1}a\theta + k_{s1}c\alpha + (k_{s1} + k_{t1})x_1 - k_{t1}z_1 = F_{MR1} \tag{1.13}$$

$$m_2\ddot{x}_2 - k_{s2}x - k_{s2}a\theta - k_{s2}d\alpha + (k_{s2} + k_{t2})x_2 - k_{t2}z_2 = F_{MR2} \tag{1.14}$$

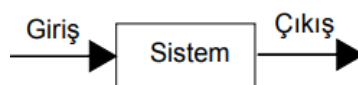
$$m_3\ddot{x}_3 - k_{s3}x + k_{s3}b\theta + k_{s3}c\alpha + (k_{s3} + k_{t3})x_3 - k_{t3}z_3 = F_{MR3} \tag{1.15}$$

$$m_4\ddot{x}_4 - k_{s4}x + k_{s4}b\theta - k_{s4}d\alpha + (k_{s4} + k_{t4})x_4 - k_{t4}z_4 = F_{MR4} \tag{1.16}$$

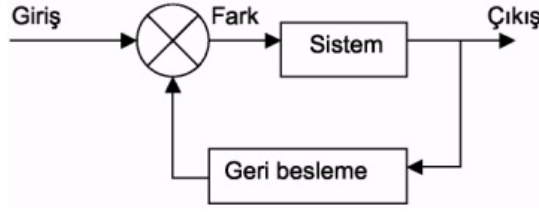
2.5 Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri, herhangi bir sistemde yapılan işin denetlenmesi amacıyla geliştirilen yapılardır. Kontrol sistemlerinin yardımıyla yapılan işin doğru biçimde ilerlemesi ve sonuçlanması, bu sistemlerin hem güvenlik hem de verimlilik açısından önemini göstermektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve yaşam standartlarının yükselmesine bağlı olarak hem günlük hayatta hem de çok çeşitli alanlarda kontrol sistemlerinin kullanımları gittikçe yaygınlaşmaktadır.

Kontrol sistemleri genel itibarıyla açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Açık çevrim kontrol sistemlerinde; sistem girişi bağımsız bir değişken olup, çıkıştan etkilenmemektedir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise; sistem girişi, çıkıştan alınan bir geri besleme ile sürekli olarak kontrol edilmektedir. Açık Çevrim Kontrol ve Kapalı Çevrim Kontrol'ün yapıları Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 6 Açık çevrim kontrol

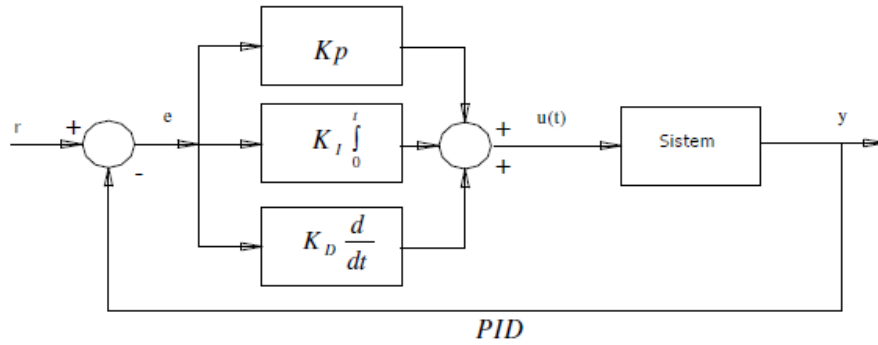


Şekil 2. 7 Kapalı çevrim kontrol

Teknolojik gelişmeler ve yapılan çalışmalar neticesinde kontrol yöntemleri hızla gelişmektedir. Günümüzde birçok başarılı kontrol yöntemleri yer almaktadır. Bu çalışmada PID kontrol ve BMK yöntemleri kullanılmıştır.

2.5.1 PID Kontrol

PID kontrol sistemi; orantı kontrol (P), integral kontrol (I) ve türev kontrol (D) kontrol sistemlerinin birleşiminden meydana gelmiştir. Bu sayede bu üç temel kontrol sisteminin üstünlüklerini beraber içermektedir. Orantı kontrol ile sistemin cevap hızı artırılır, integral kontrol ile sistemde ortaya çıkabilecek durum hatası sıfırlanır, türev kontrol ile sistemin kararlılığı artırılır. Dolayısıyla PID kontrolde, sistemde durum hatasını sıfır olan, kararlı ve hızlı cevap veren bir kontrol sağlar. PID kontrol, kapalı çevrim bir kontrol olup genel yapısı Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 8 PID Kontrol’ün genel yapısı [26]

PID kontrol sisteminin kontrol yasası şu şekildedir;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.17)$$

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1.18)$$

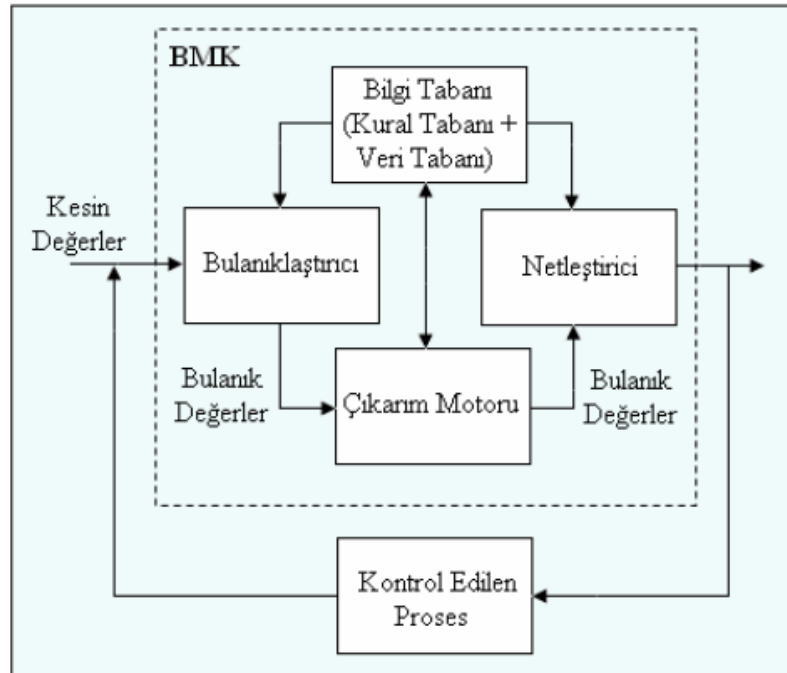
burada $e(t)$ hatayı, kontrol parametresi olan K_p , K_i ve K_d sırasıyla sırasıyla orantı, integral ve türev kazançlarını, $C(s)$ Laplace formundaki transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

2.5.2 Bulanık Mantık Kontrol (BMK)

Zadeh'in 1965 yılındaki Bulanık Kümeler isimli makalesi ile literatürde ilk defa Bulanık Mantık ifadesi ortaya çıkmıştır [21]. Yine Zadeh'in 1973 yılındaki diğer bir makalesinde bulanık kümeler kavramının sistemlerde kullanılmasını işlemiştir [22]. Bu makale sonrasında Mamadani ve arkadaşları tarafından yapılan sistemlerde BMK üzerine çalışmalar günümüze kadar devam ederek gelmiştir.

BMK sisteminin yapısı, insanın düşünme ve karar verme yapısına benzerdir. Hayattaki olaylar çoğunlukla kesin olmaktan ziyade yaklaşık olmakla ifade edilirler. Bu durumdan yola çıkarak BMK'da kesin yargı bildirmek yerine, yaklaşık ifadeler kullanılarak daha esnek bir kontrol sağlanmaktadır.

Günümüzde birçok farklı alanda kullanılan BMK'nın uygulamaları için; çimento ve çelik sanayileri, çamaşır ve bulaşık makineleri, elektrik süpürgeleri, video kameralar, televizyonlar, el bilgisayarları, klimalar, asansör denetimleri, tren frenleme sistemleri, ABS fren sistemi, insansız uçakların kontrolü gibi örnekler verilebilir [23].



Şekil 2. 9 BMK'nın genel yapısı [15]

BMK'nın yapısına bakıldığında sistem; bulanıklaştırıcı, kural tabanı, çıkarım motoru ve durulaştırıcı olarak dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

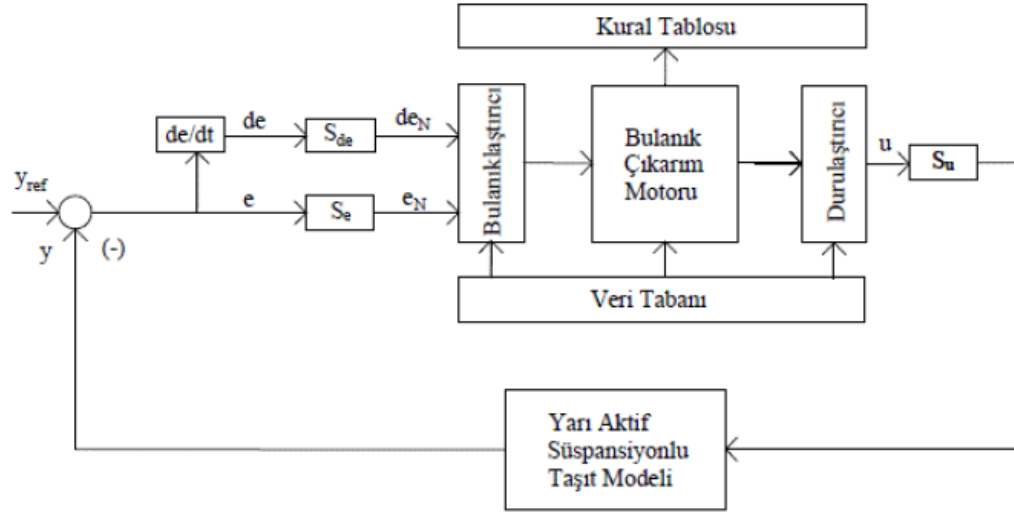
Bulanıklaştırıcı kısmında, sisteme girilen kesin değerler 0 ile 1 arasında bulanık değerler atanarak bulanıklaştırılır. Kural tabanı, bilgiye ve tecrübeye dayanarak oluşturulan değerlerdir. Çıkarım motoru kısmında, gelen bulanık değerler kural tabanına göre yorumlanarak yine bulanık değerler olarak sonuçlar elde edilir. Durulaştırıcı kısmında, sonuç olarak gelen bulanık değerler kesin değerlere dönüştürülür.

BMK'nın genel olarak avantajlarına ve dezavantajlarına göz atıldığında; karmaşık sistemlerin kontrolü için basit çözümler sunması, maliyet ve işlem yükünü azaltması gibi avantajlar; performansın deneyime çok bağlı olması sistemin performansının önceden kestirilememesi ve sonuçların ancak simülasyon çalışmaları ile değerlendirilebilmesi gibi dezavantajlar gösterilebilmektedir [23].

BMK yönteminde, kontrolcünün performansı çıkarılan matematiksel modelin hassasiyetinden bağımsızdır. Ayrıca bulanık mantıklı kontrolcüler sistemdeki lineer olmayan davranışlarla da başa çıkabilmektedirler [19]. Bu sebeple bu çalışmada MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyon sistemi bulunan toplu taşıma aracı titreşimlerinin kontrolünde, BMK yöntemi kullanılmıştır.

Taşıt Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü

İki giriş ve bir çıkıştan oluşan Bulanık Mantıklı kontrolün yarı-aktif süspansiyonlu taşıt modeline uygulandığı sistemin yapısı Şekil 2. 10'da gösterilmiştir. Bu model için yapılan tasarımda kontrolcü giriş sinyalleri hata ve hatanın türevidir. Hata "e" ve hatanın türevi de "de" olarak ifade edilmiştir. Kontrolcünün çıkış sinyali olarak gerilim elde edilmektedir. Bu gerilim ifadesi "v" olarak gösterilmiştir. Kontrolcünün üyelik fonksiyonları ve kullanılan kural tablosu EK-A-3'te verilmiştir. Giriş değerleri [-1, 1] aralığında, çıkış değeri ise gerilim negatif olmayacağı için [0, 1] aralığında ölçeklendirilmiştir. Bu tezde, bulanıklaştırma işlemi için tüm kurallar, Mamdani Yöntemi kullanılarak yazılmıştır. Netleştirme için ise Merkez (Centroid) yöntemi kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonları Trapmf tipi olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. 10 Yarı-aktif süspansiyonlu taşıt modeli için BMK yapısı [19]

SİMÜLASYON

Bu bölümde, 7 serbestlik dereceli tam taşıt modeli kullanılarak modellenen minibüs için yapılan simülasyon çalışmaları anlatılmıştır. Çalışmada araç hızı 50 km/sa olarak belirlenmiştir. Araç 3 boyutlu olarak Adams programında modellenerek aracın yüksüz (yalnızca sürücü bulunan, yolcu bulunmayan) durumu ve tam yüklü (sürücü ve 22 adet yolcu bulunan) durumu için ağırlıkları, x ve y eksenleri etrafındaki ataletleri ve ağırlık merkezleri elde edilmiştir. Araca ait bu değerler ve diğer parametreler EK-A'da yer almaktadır. Simülasyonlar; Matlab-Simulink programında, aracın yüksüz ve yüklü durumları için aşağıda belirtilen dört farklı model ve bir sonraki başlıkta belirtilen yol girişleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Her durum için aracın düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivme değerleri zaman ve frekans alanlarında incelenmiştir. Bulunan sonuçlar karşılaştırmalı olarak birer şekilde toplanmıştır. Grafiklerde gösterimler; Pasif sönümleyicili model (Pasif) için kesikli siyah renkli çizgi, kontrol edilmeyen MR sönümleyicili model (MR + 0 V) için kesikli yeşil renkli çizgi, PID kontrollü MR sönümleyicili model (MR + PID) için kesikli mavi renkli çizgi, BMK'lı MR sönümleyicili model (MR + Fuzzy) için düz kırmızı çizgi ile yapılmıştır.

Pasif Sönümleyicili Araç Modeli

Bu modelde geleneksel süspansiyon sisteminde kullanılan sabit katsayılı yay ve sönüm elamanları kullanılmış olup, herhangi bir kontrol sistemi kullanılmamıştır.

MR Sönümleyicili, Gerilim Değeri 0 (Sıfır) Alınan Araç Modeli

Bu modelde MR sönümleyici için gerilim girişi, 0 volt olarak alınmıştır. Yani MR sönümleyici için bir kontrol uygulanmamış, sabit olarak 0 V gerilim uygulanmıştır.

MR Sönümleyicili, Gerilim Değeri PID Kontrolcü'den Alınan Araç Modeli

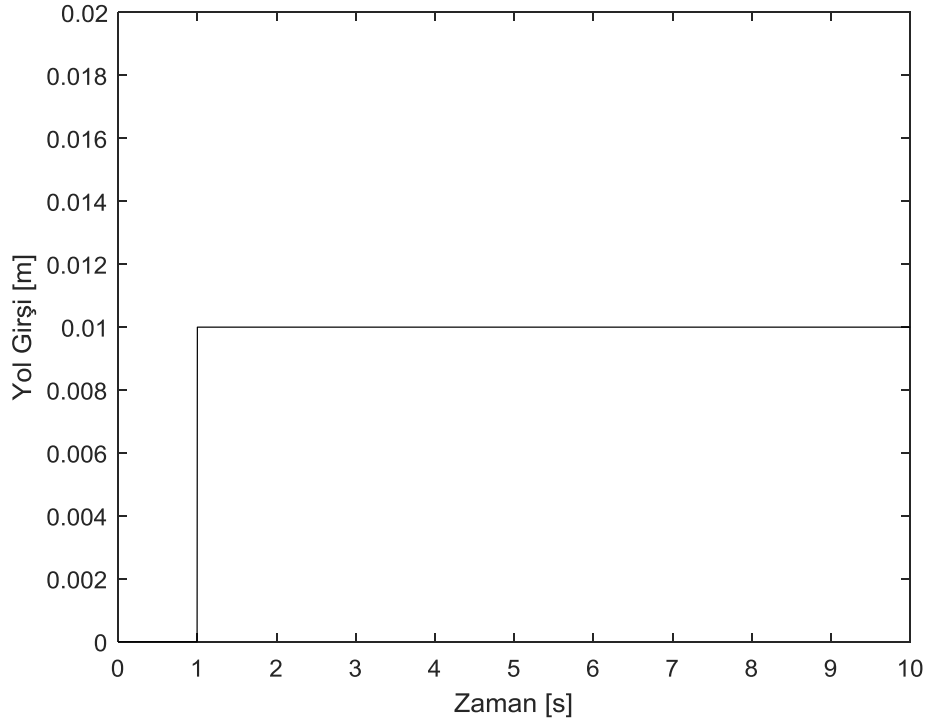
Bu modelde MR sönümleyici için gerilim girişi, PID Kontrolcü'nün çıkışından alınmıştır.

MR Sönümleyicili, Gerilim Değeri Bulanık Mantıklı Kontrolcü'den Alınan Araç Modeli

Bu modelde MR sönümleyici için gerilim girişi, BMK'nın çıkışından alınmıştır.

Yol Girişi

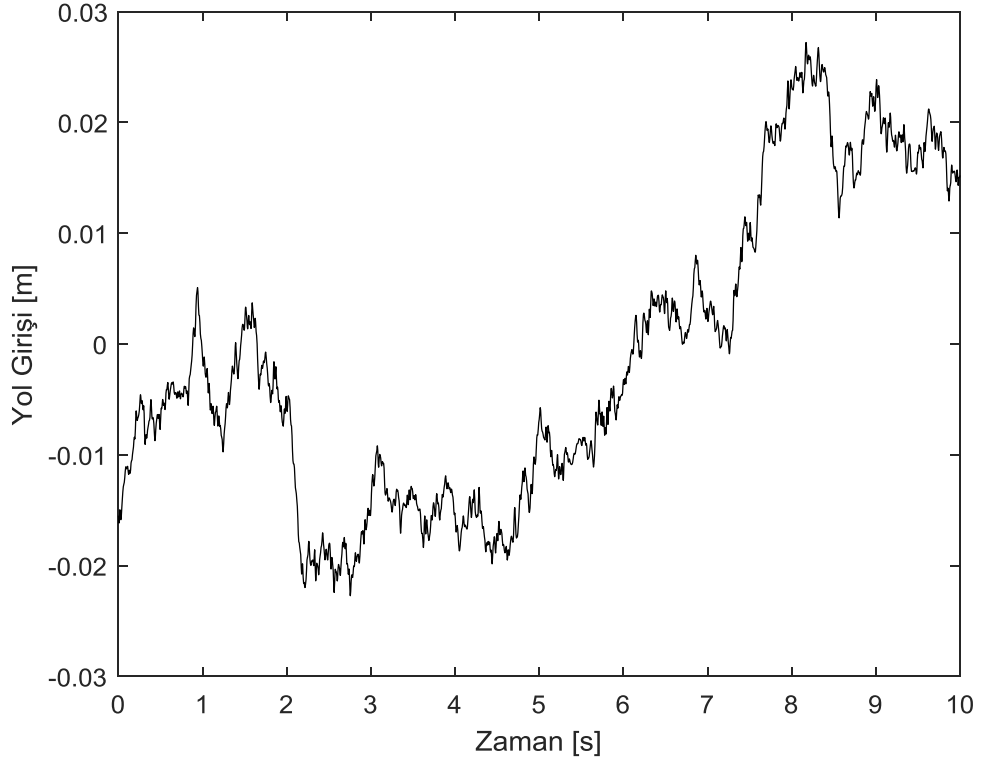
Bu çalışmada, yoldan kaynaklanan bozucu giriş için iki farklı yöntem ele alınmıştır. İlk olarak Şekil 3.1'de gösterilen 0.01m'lik basamak yol girişi; sonrasında Şekil 3.2'de gösterilen ISO 8608'e göre oluşturulan yol profili kullanılmıştır.



Şekil 3. 11 Basamak yol girişi

ISO 8608'e göre rastgele bir yol profili oluşturmak için Denklem 3.1'deki ifade kullanılmaktadır. Denklemden yer alan k_r yolun pürüzlülüğü, n_0 referans uzamsal frekans ($n_0 = 0.1$), n data sayısı, Δn zaman aralığı ve ϕ_i ise $0-2\pi$ arasında rasgele belirlenen faz aralığı kümesidir.

$$d(t) = 10^{-3} 2^{k_r} \Delta n^{-1/2} n_0 \sum_{i=1}^n \cos(2\pi i \Delta n t + \phi_i) \frac{1}{i} \quad (3.1)$$



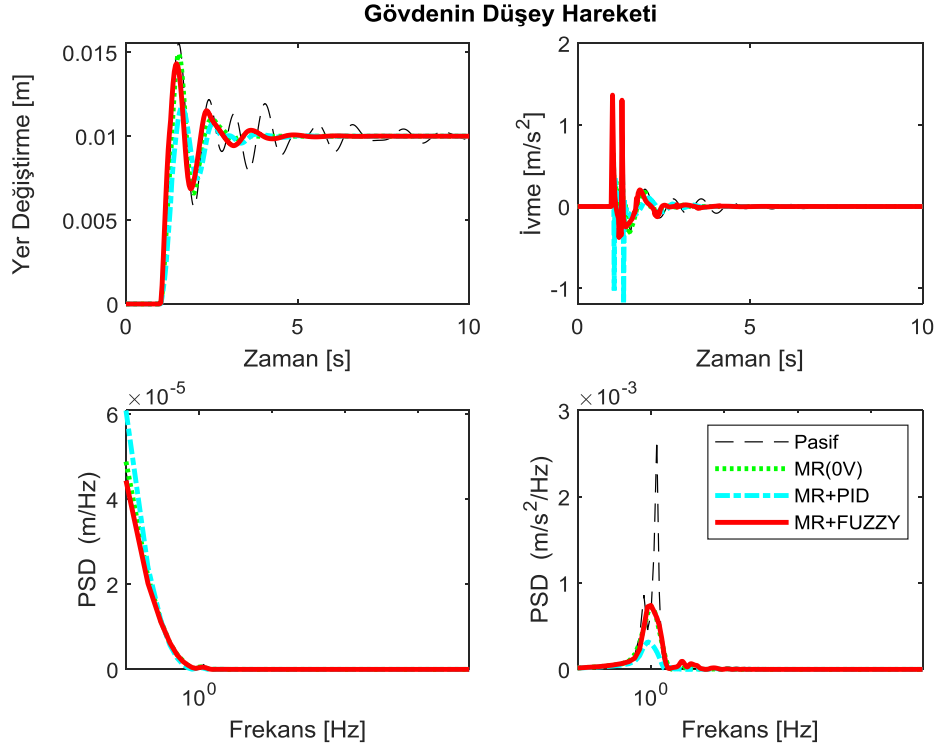
Şekil 3. 12 ISO 8608 yol girişi

3.1 Basamak Yol Girişi İçin Simülasyonlar

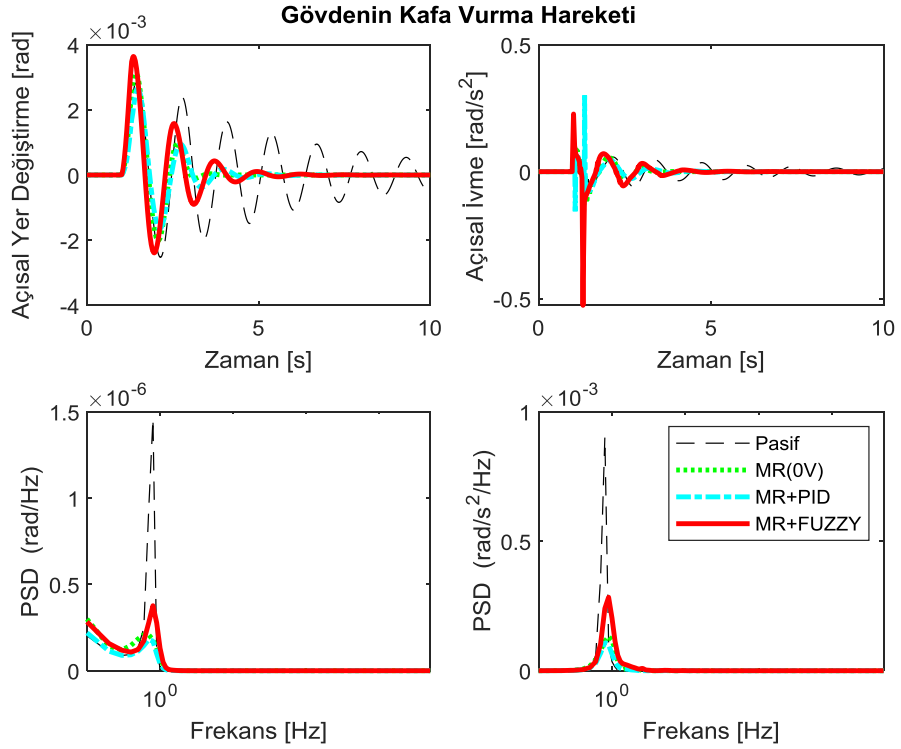
3.1.1 Aracın Yüksüz Durumu İçin Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.3 - 3.5'te, yüksüz durum (boş araç) ve basamak yol girişi için araç gövdesinin sırasıyla düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları görülmektedir.

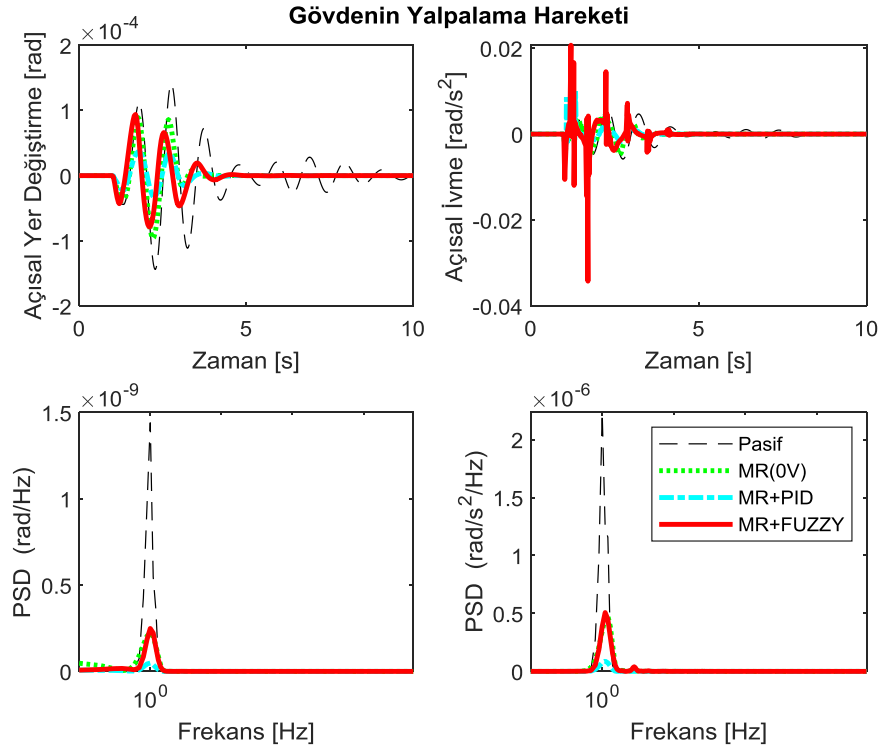
Şekil 3.6'da, PID kontrol ve BMK yöntemlerinin kullanılması durumunda MR sönümleyicilere gelen gerilim değerleri gösterilmektedir.



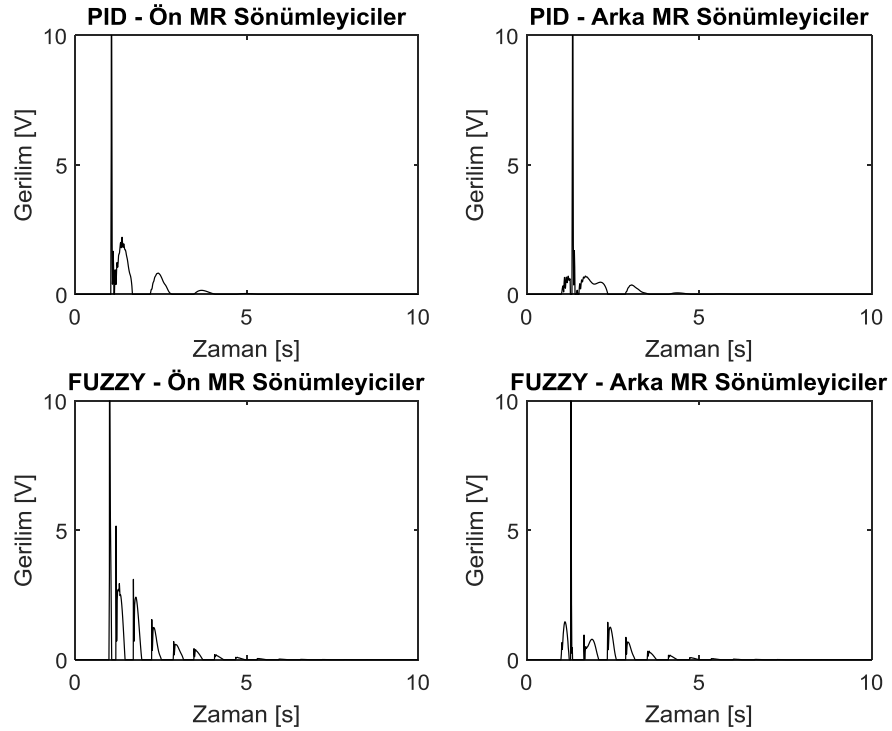
Şekil 3. 13 Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 14 Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısal yer değiştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 15 Gövdenin yalpalama hareketindeki açısal yer değıştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları

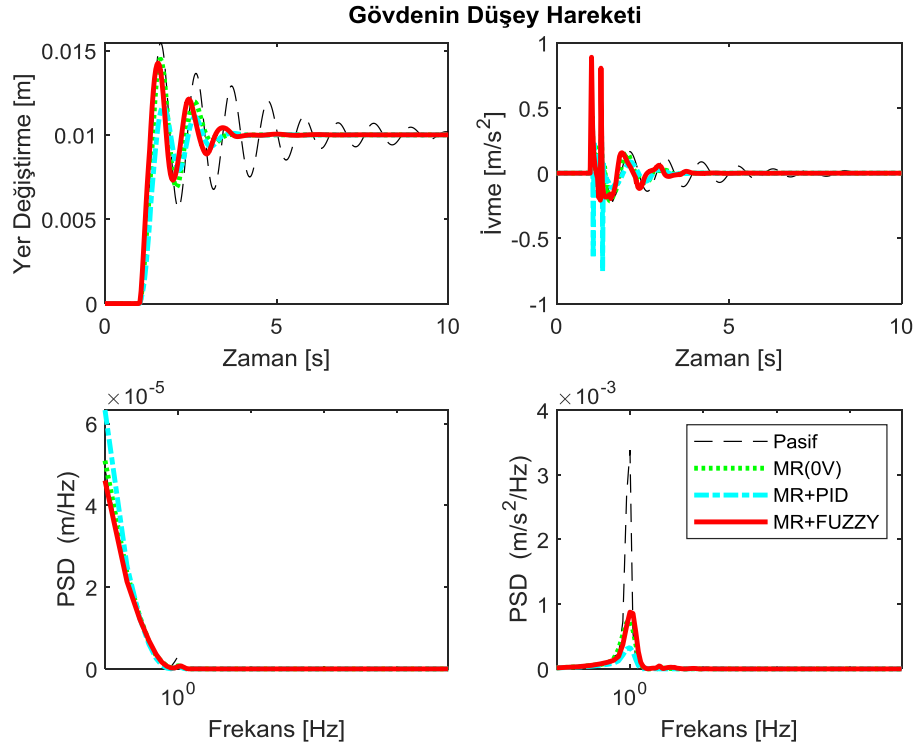


Şekil 3. 16 MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değeri

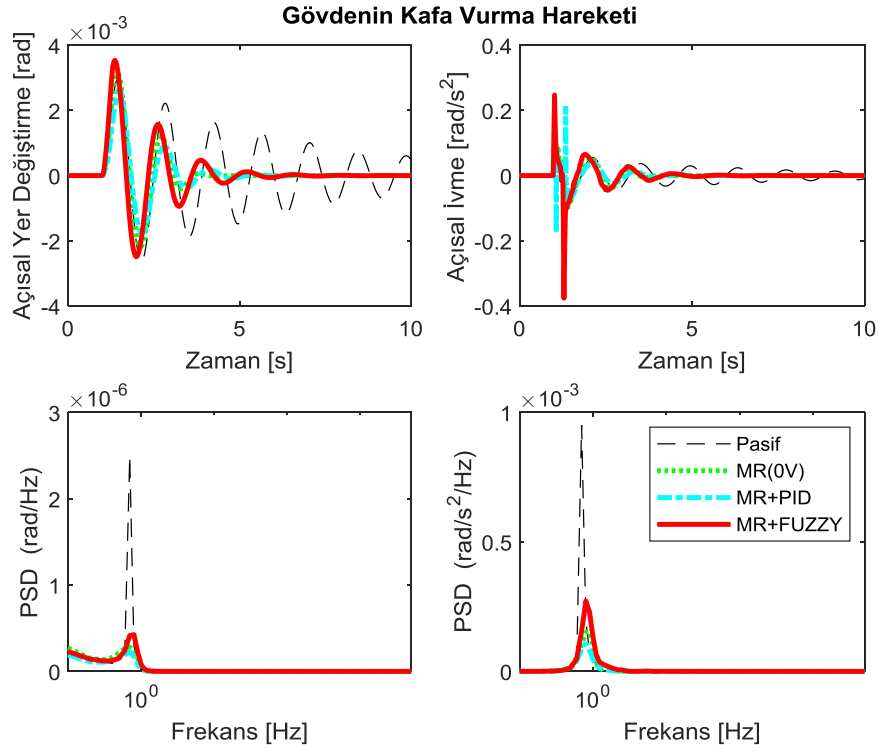
3.1.2 Aracın Tam Yüklü Durumu İçin Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.7 - 3.9'da, tam yüklü durum (dolu araç) ve basamak yol girişi için araç gövdesinin sırasıyla düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları görülmektedir.

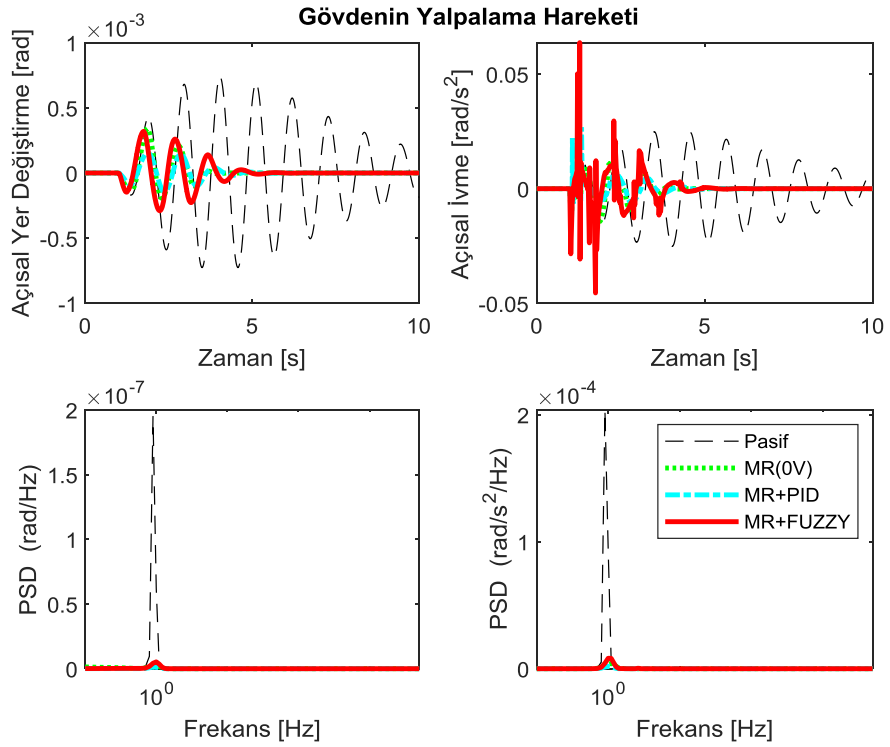
Şekil 3.10'da, PID kontrol ve BMK yöntemlerinin kullanılması durumunda MR sönümleyicilere gelen gerilim değerleri gösterilmektedir.



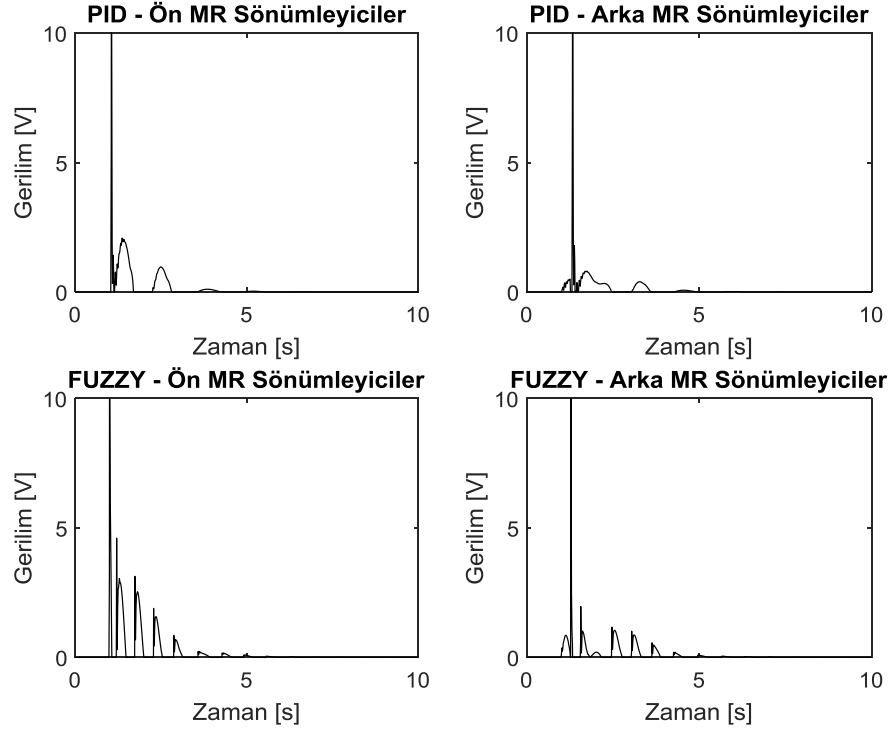
Şekil 3. 17 Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 18 Gövdenin kafa vurma hareketindeki açisal yer değıştirmesinin ve açisal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 19 Gövdenin yalpalama hareketindeki açisal yer değıştirmesinin ve açisal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



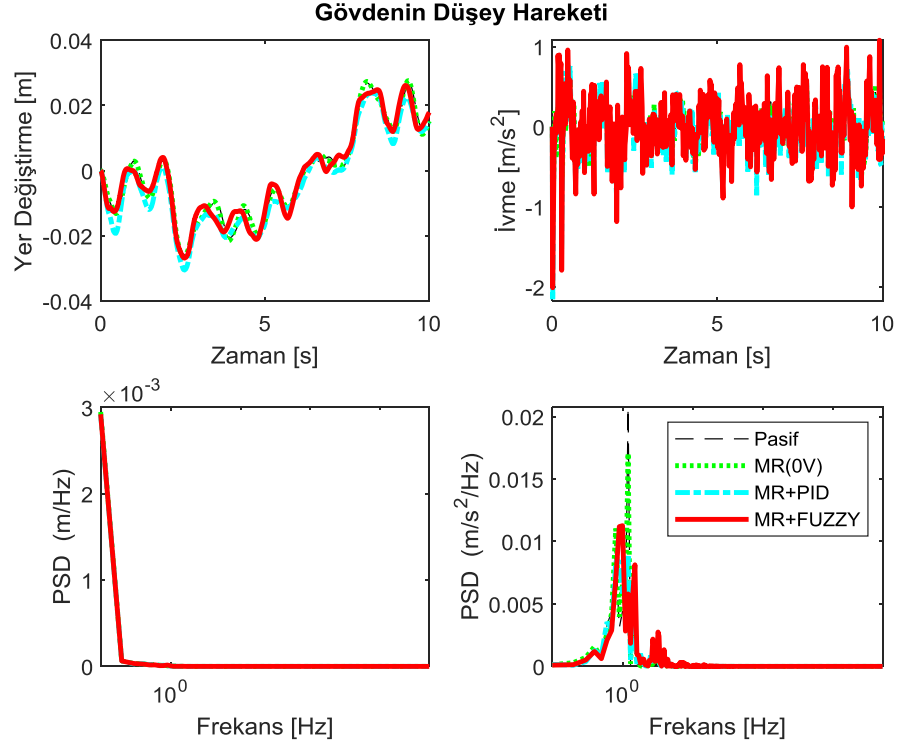
Şekil 3. 20 MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri

3.2 ISO 8608 Yol Girişi İçin Simülasyonlar

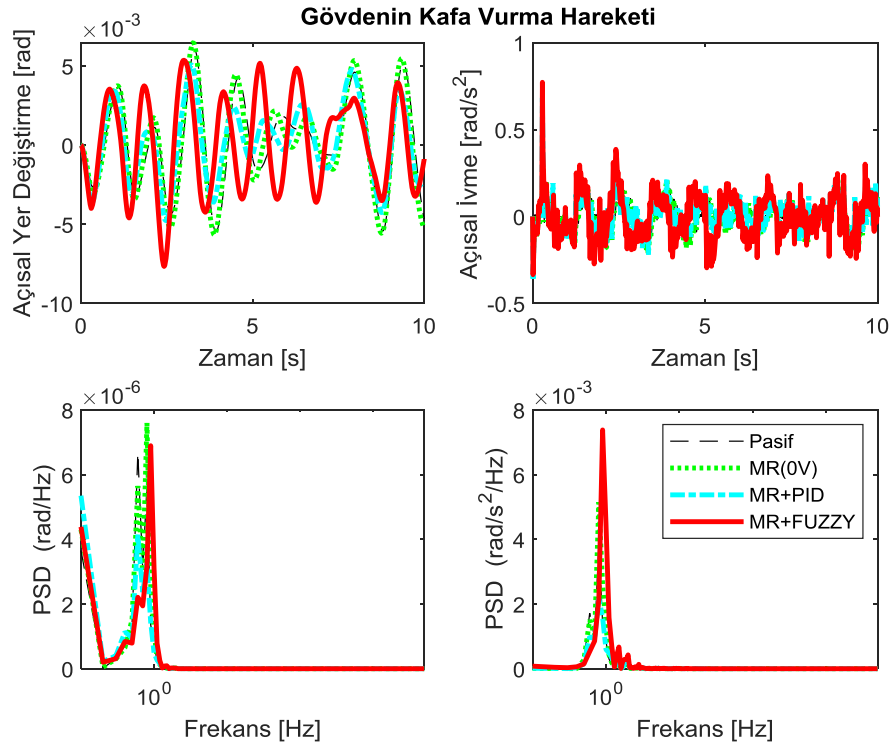
3.2.1 Aracın Yüksüz Durumu İçin Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.11 - 3.13'te, yüksüz durum (boş araç) ve ISO 8608 yol girişi için araç gövdesinin sırasıyla düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları görülmektedir.

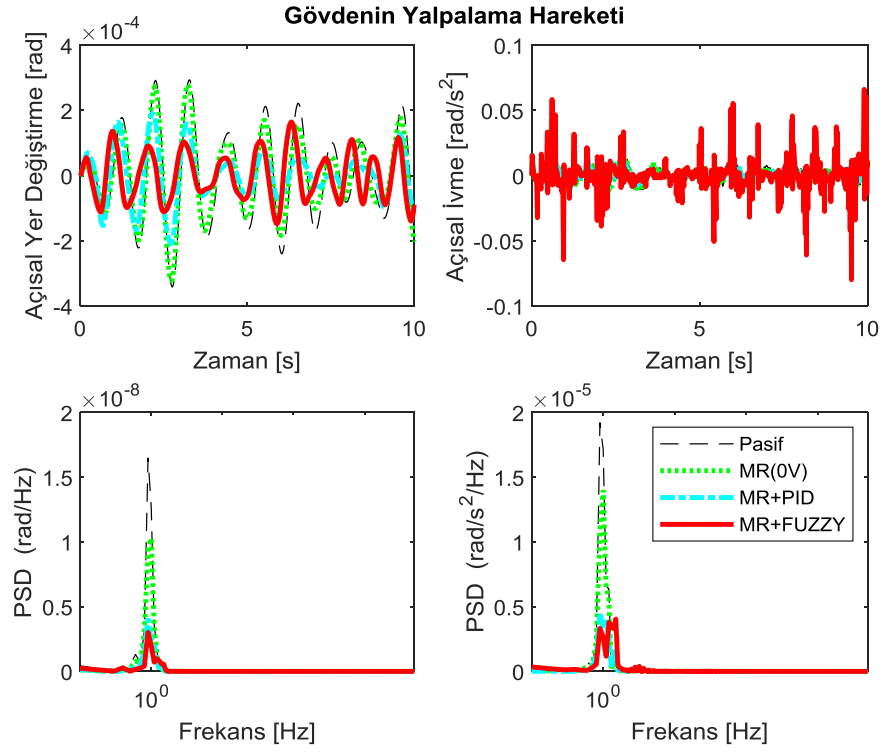
Şekil 3.14'te, PID kontrol ve BMK yöntemlerinin kullanılması durumunda MR sönümleyicilere gelen gerilim değerleri gösterilmektedir.



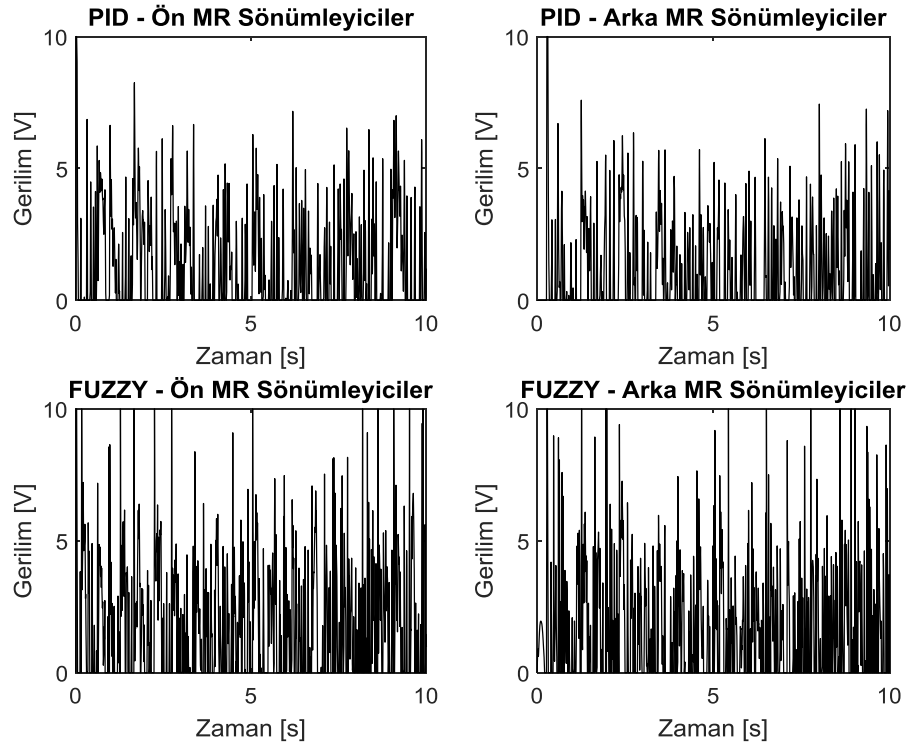
Şekil 3. 21 Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 22 Gövdenin kafa vurma hareketindeki açısal yer değiştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 23 Gövdenin yalpalama hareketindeki açısal yer değiştirmesinin ve açısal ivmesinin zaman ve frekans cevapları

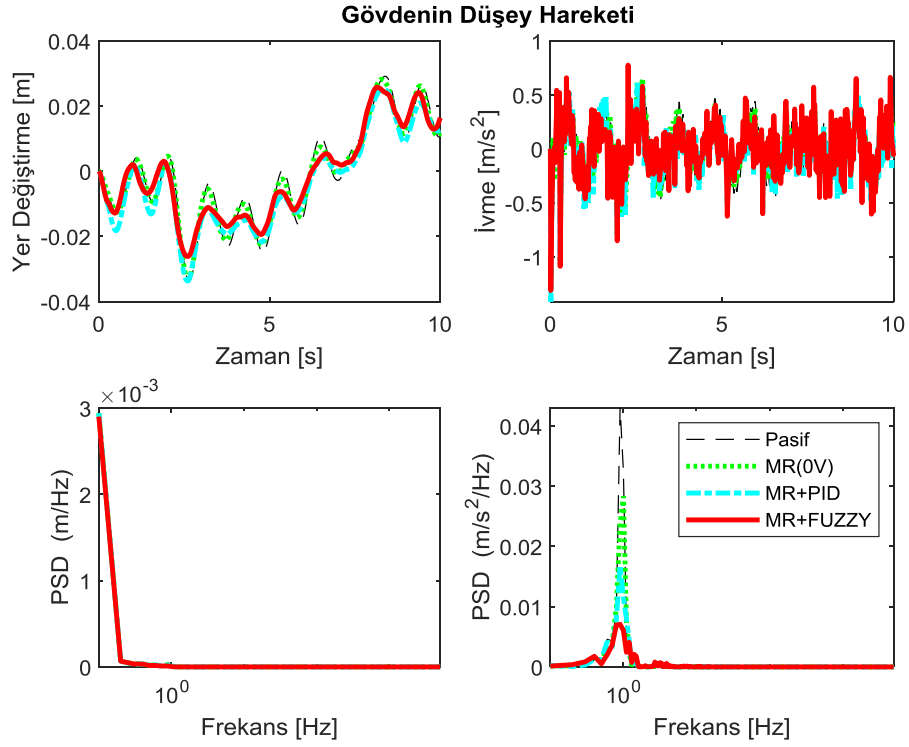


Şekil 3. 24 MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri

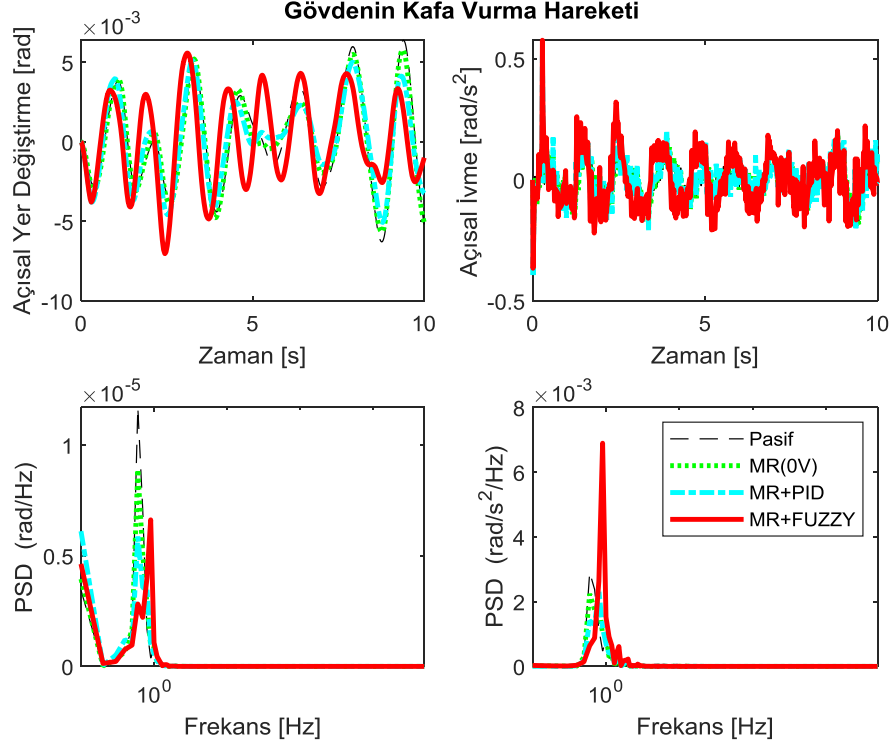
3.2.2 Aracın Tam Yüklü Durumu İçin Simülasyon Sonuçları

Şekil 3.15 - 3.17’de, tam yüklü durum (dolu araç) ve ISO 8608 yol girişi için araç gövdesinin sırasıyla düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivmelerin zaman ve frekans alanındaki cevapları görülmektedir.

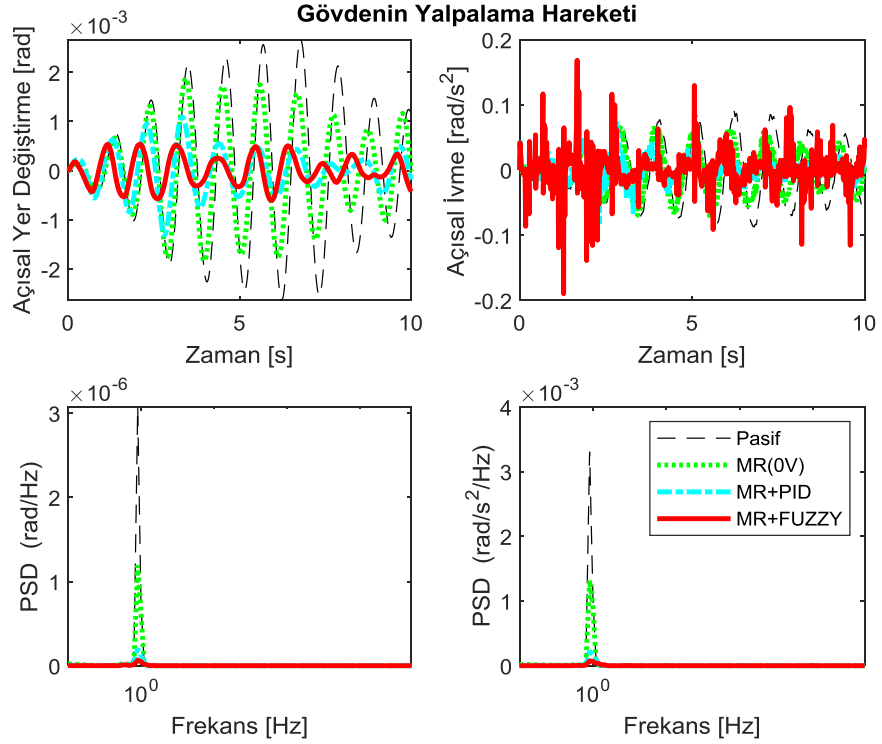
Şekil 3.18’de, PID kontrol ve BMK yöntemlerinin kullanılması durumunda MR sönümleyicilere gelen gerilim değerleri gösterilmektedir.



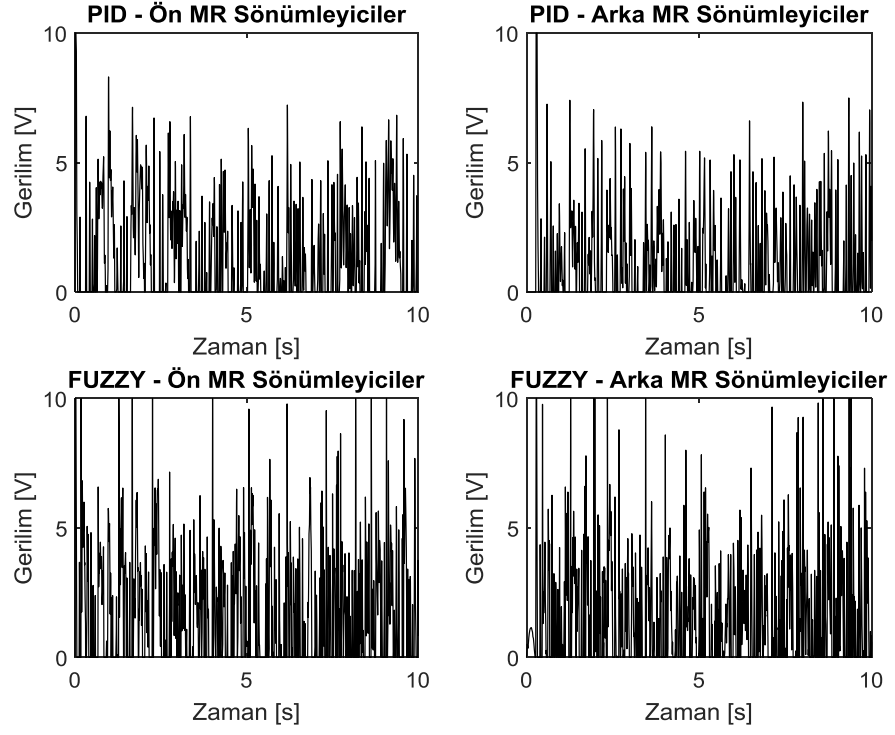
Şekil 3. 25 Gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirmesinin ve ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 26 Gövdenin kafa vurma hareketindeki açisal yer değiştirmesinin ve açisal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 27 Gövdenin yalpalama hareketindeki açisal yer değiştirmesinin ve açisal ivmesinin zaman ve frekans cevapları



Şekil 3. 28 MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, günümüzde yaygın olarak kullanılan toplu taşıma araçlarından biri olan minibüs aracında yol yüzeyinin düzgünsüzlüğü sebebiyle oluşan titreşimler incelenmiş ve bu titreşimler yarı-aktif süspansiyon sistemi ile azaltılmaya çalışılmıştır.

Minibüs, yedi serbestlik dereceli tam taşıt olarak ve gerçek araç parametreleri kullanılarak Matlab-Simulink programında modellenmiştir. Aracın yüksüz (yalnız sürücülü) ve tam yüklü (sürücü ve 22 adet yolculu) durumlarındaki ağırlık değerleri, atalet değerleri ve ağırlık merkezi noktalarının belirlenmesi için araç aynı zamanda Adams programında da modellenerek ilgili değerler bulunmuştur. Sistem yedi serbestlik dereceli olduğu için sisteme ait yedi adet doğal frekans değeri mevcuttur. Aracın yüksüz durumundaki doğal frekans değerleri; 0.7660, 0.9542, 1.2041, 10.7560, 10.7625, 11.4696, 11.4753 Hz.; aracın tam yüklü durumundaki doğal frekans değerleri 0.7136, 0.8949, 0.9632, 10.7555, 10.7586, 11.4689, 11.4727 Hz. olarak hesaplanmıştır.

Yarı-aktif süspansiyon sisteminde, MR sönümleyiciler kullanılmıştır. MR sönümleyicilerin modellenmesi Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli ile yapılmıştır. Sistemin hareket denklemleri Langrange yöntemi ile çıkartılmıştır. Sistem öncelikle pasif olarak geleneksel süspansiyon sistemi ile ve sonrasında MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyon sistemi ile kurulmuştur. Yarı-aktif süspansiyon sistemi için sırasıyla; MR sönümleyicinin kontrol edilmediği, sönümleyiciye herhangi voltaj girişi yapılmadığı durum (sabit 0 V), MR sönümleyicinin kontrolü için tasarlanan PID kontrolcülü durum ve son olarak yine MR sönümleyicinin kontrolü için tasarlanan BMK'lı durum senaryoları oluşturulmuştur. Aracın hızı 50km/sa olarak belirlenmiştir. Titreşim kaynağı olarak önce test amaçlı 0.01m'lik basamak yol girişi kullanılmış; daha sonra gerçekçi bir

yol profili elde edebilmek için ISO 8608'e göre bir yol girişi tanımlanmıştır. Bu yol girişleri için yukarıda bahsedilen dört farklı sistem için Matlab-Simulink programında simülasyonlar yapılmıştır. Oluşan titreşim hareketleri yer değiştirme ve ivme olarak her senaryoda araç gövdesinin düşey, kafa vurma ve yalpalama hareketlerinde incelenmiştir. Ayrıca, MR sönümleyicilerin kontrol edildiği PID ve BMK'lı modellerde ön ve arka akslardaki MR sönümleyicilere uygulanan gerilim değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirme ve ivme cevapları hem zaman hem de frekans alanları için elde edilerek, dört farklı senaryodaki sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Her senaryodaki simülasyon sonuçları, MR sönümleyicili yarı-aktif süspansiyon sisteminin beklenildiği üzere pasif süspansiyon sistemine göre titreşimleri daha etkili olarak sönümleme başarısını ortaya koymuştur. Sonuçların yüksüz ve tam yüklü durumlarda benzer karakterde olması, tasarlanan süspansiyon ve kontrol sistemlerinin kararlı olduğunu göstermektedir.

Basamak yol girişi için yapılan simülasyonlar ele alındığında ve özellikle frekans cevapları incelendiğinde; gövdenin düşey hareketindeki yer değiştirme için BMK daha iyi sonuç verirken, gövdenin düşey hareketindeki ivmede ve gövdenin kafa vurma ile yalpalama hareketlerindeki yer değiştirme ve ivme değerlerinde PID kontrol ile daha iyi sonuçlar alınmıştır. ISO yol girişi için yapılan simülasyonlar ele alındığında ve yine frekans cevapları incelendiğinde; kafa vurma hareketindeki ivme değerleri dışında diğer yer değiştirme ve ivme değerlerinde BMK'nın en başarılı sonuçları verdiği gözlemlenmektedir.

Yarı-aktif sistemler, pasif ve aktif sistemler ile kıyaslandığında avantajlara sahiptir. Örneğin; titreşim sönümlemede pasif sistemlere göre daha başarılıdır, aktif sistemlere göre daha zayıftır ancak harcanan güç miktarı ve maliyet açısından aktif sistemlerden daha iyi durumdadır. Sahip olduğu bu avantajlar dolayısıyla, yarı-aktif sistemlerin diğer taşıtlarda olduğu gibi toplu ulaşım taşıtlarının süspansiyon sistemlerinde de kullanımlarının artacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Winslow, W.M., (1949). "Induced Fibration of Suspensions", Journal of Applied Physics, 20 (12):1137–1140.
- [2] Rabinow, J., (1951). "Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device", U.S. Patent Number: 2,575,360.
- [3] Rabinow J., (1954). "Magnetic Fluid shock absorber", U.S. Patent Number: 2,667,237.
- [4] Karnopp, D.C., Crosby, M.J and Harwood, R.A, (1974). "Vibration control using semi-active force generators." Journal of Engineering for Industry, 96:619-626.
- [5] Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. ve Carlson, J.D., (1997). "Phenomenological Model of a Magnetorheological Dampers", Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 123(3):230-238.
- [6] Ahmadian, M. ve Pare, C.A., (2000). "A Quarter-Car Experimental Analysis of Alternative Semiactive Control Methods", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 11:604-612.
- [7] Yao, G.Z., Yap F.F., Chen, G., Li, W.H. ve Yeo, S.H., (2002). "MR Damper and its Application for Semi-Active Control of Vehicle Suspension System", Mechatronics, 12(7):963-973.
- [8] Lai, C, Y., ve Liao, W, H., (2002). "Vibration Control of a Suspension System via a Magnetorheological Fluid Damper", Journal of Vibration and Control, Vol. 8-4, 2002.
- [9] Blanchard, E.D., (2003). On the Control Aspects of Semiactive Suspensions for Automobile Applications, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [10] Yu, M., Liao, C.R., Chen, W.M. ve Huang, S.L., (2006). "Study on MR Semi-Active Suspension System and its Road Testing", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 17:(8-9):801-806.
- [11] Yagiz, N., Sakman, L.E. ve Guclu, R., (2007), "Different Control Applications on a Vehicle Using Fuzzy Logic Control", SADHANA-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 33(1):15-25.

- [12] Göksel, M., (2007). "Control of Semiactive Suspension System for Quarter Car Model" Electronics Letters on Science&Engineering, (3):1-14.
- [13] Guclu, R., (2003). "Active Control of Seat Vibrations of a Vehicle Model Using Various Suspension Alternatives", Tr. Journal of Engineering&Environmental Sciences, 27(6):361-373.
- [14] Bilgiç, B., (2007). Taşıt Süspansiyon Sistemlerinin MR Sönümleyici Kullanarak Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Metin, M., (2007). Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Emekli, M.E., (2008). Hafif Ticari Bir Araç İçin Yarı Aktif Süspansiyon Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Yabansu, Y.C., (2008). Semi Active Suspension Control With Magnetorheological Dampers, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Erdoğan, Z., (2009). Development of a Control Strategy for Road Vehicles With Semi-Active Suspensions Using a Full Vehicle Ride Model, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [19] Paksoy, M., (2013). Taşıt Titreşimlerinin MR Sönümleyici İle Yarı Aktif Bulanık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Güneşer, B., (2016). Ağır Ticari Taşıtlarda Yarı Aktif Süspansiyon Sistemleri Yardımıyla Titreşim Kontrolü, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Zadeh, L.A., (1965). "Fuzzy Sets", Information and Control, 8:338-353.
- [22] Zadeh, L.A., (1973). "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, (1):28-44.
- [23] Yaralıoğlu, K. Bulanık Mantık Ders Notları, Soft Yöneylem Teknikleri, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [24] Lord Corporation, <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>, 15 Nisan 2019.
- [25] Çetin S., (2010), MR Sönümleyici ile Yapıların Titreşim Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Metin, M., 2 Serbestlik Dereceli Taşıt Modeli PID Kontrolü Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

PARAMETRELER

A-1 Taşıt Parametreleri (Aracın Yüksüz Durumu İçin)

Çizelge A. 1 Minibüse ait taşıt parametreleri (aracın yüksüz durumu için)

M	3100 [kg]	C_{s1}	1650 [Ns/m]
I_y	25442 [kgm ²]	C_{s2}	1650 [Ns/m]
I_x	3924 [kgm ²]	C_{s3}	950 [Ns/m]
m_1	55 [kg]	C_{s4}	950 [Ns/m]
m_2	55 [kg]	k_{t1}	222825 [N/m]
m_3	59 [kg]	k_{t2}	222825 [N/m]
m_4	59 [kg]	k_{t3}	222825 [N/m]
k_{s1}	62500 [N/m]	k_{t4}	222825 [N/m]
k_{s2}	62500 [N/m]	a	1.34 [m]
k_{s3}	46450 [N/m]	b	2.40 [m]
k_{s4}	46450 [N/m]	c	0.91 [m]
u	13.9 [m/s]	d	0.89 [m]

A-2 Taşıt Parametreleri (Aracın Tam Yüklü Durumu İçin)

Çizelge A. 2 Minibüse ait taşıt parametreleri (aracın tam yüklü durumu için)

M	4800 [kg]	c_{s1}	1650 [Ns/m]
I_y	29835 [kgm ²]	c_{s2}	1650 [Ns/m]
I_x	4430 [kgm ²]	c_{s3}	950 [Ns/m]
m_1	55 [kg]	c_{s4}	950 [Ns/m]
m_2	55 [kg]	k_{t1}	222825 [N/m]
m_3	59 [kg]	k_{t2}	222825 [N/m]
m_4	59 [kg]	k_{t3}	222825 [N/m]
k_{s1}	62500 [N/m]	k_{t4}	222825 [N/m]
k_{s2}	62500 [N/m]	a	1.72 [m]
k_{s3}	46450 [N/m]	b	2.02 [m]
k_{s4}	46450 [N/m]	c	0.93 [m]
u	13.9 [m/s]	d	0.87 [m]

A-3 MR Sönümleyici Parametreleri

Çizelge A. 3 MR sönümleyici parametreleri [8]

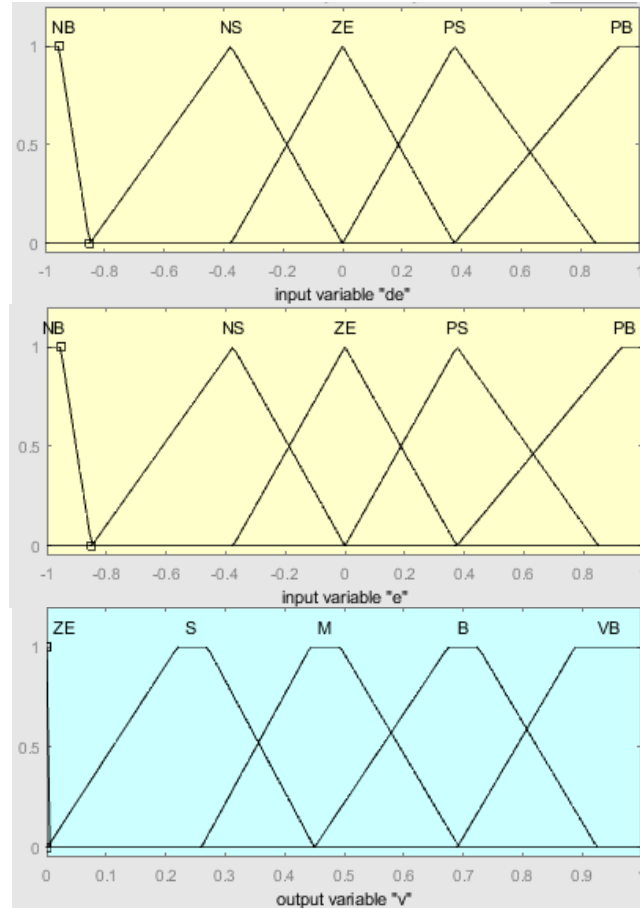
c_{0a}	784 Ns/m	k_0	3610 N/m
c_{0b}	1803 Ns/mV	k_1	840 N/m
c_{1a}	14649 Ns/m	A	58
c_{1b}	34622 Ns/mV	γ	136320 m ⁻¹
x_0	0	β	2059020 m ⁻²
α_a	12441 N/m	η	190 s ⁻¹
α_b	38430 N/mV	n	2

A-4 BMK Parametreleri

Girişler için kullanılan dilsel değerler: NB (Negatif Büyük), NK (Negatif Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PB (Pozitif Büyük) şeklindedir. Çıkış için kullanılan dilsel değerler ise: S (Sıfır), K (Küçük), O (Orta), B (Büyük), ÇB (Çok Büyük) şeklindedir.

Çizelge A. 4 BMK için kural tablosu

e / de	NB	NK	S	PK	PB
NB	ÇB	B	K	S	S
NK	B	O	S	S	S
S	O	S	S	S	K
PK	S	S	S	O	B
PB	S	S	O	B	ÇB



Şekil A. 29 BMK'nın girişleri ve çıkışı için üyelik fonksiyonları

Kural tablosuna göre oluşturulan kurallar aşağıdaki gibidir;

1. Eğer (e = NB) ve (de = NB) ise (v = ÇB)
2. Eğer (e = NB) ve (de = NK) ise (v = B)
3. Eğer (e = NB) ve (de = S) ise (v = K)
4. Eğer (e = NB) ve (de = PK) ise (v = S)
5. Eğer (e = NB) ve (de = PB) ise (v = S)
6. Eğer (e = NK) ve (de = NB) ise (v = B)
7. Eğer (e = NK) ve (de = NK) ise (v = O)
8. Eğer (e = NK) ve (de = S) ise (v = S)
9. Eğer (e = NK) ve (de = PK) ise (v = S)
10. Eğer (e = NK) ve (de = PB) ise (v = S)
11. Eğer (e = S) ve (de = NB) ise (v = O)
12. Eğer (e = S) ve (de = NK) ise (v = S)
13. Eğer (e = S) ve (de = S) ise (v = S)
14. Eğer (e = S) ve (de = PK) ise (v = S)
15. Eğer (e = S) ve (de = PB) ise (v = K)
16. Eğer (e = PK) ve (de = NB) ise (v = S)
17. Eğer (e = PK) ve (de = NK) ise (v = S)
18. Eğer (e = PK) ve (de = S) ise (v = S)
19. Eğer (e = PK) ve (de = PK) ise (v = O)
20. Eğer (e = PK) ve (de = PB) ise (v = B)
21. Eğer (e = PB) ve (de = NB) ise (v = S)
22. Eğer (e = PB) ve (de = NK) ise (v = S)
23. Eğer (e = PB) ve (de = S) ise (v = O)
24. Eğer (e = PB) ve (de = PK) ise (v = B)
25. Eğer (e = PB) ve (de = PB) ise (v = ÇB)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Abdullah TUNÇER
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.08.1990, İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tuncer.a@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2019 – Devam Ediyor	Ford Otosan	Ürün Geliştirme Mühendisi
2013 – 2019	Hexagon Studio	Tasarım Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Tuncer, A. and Metin, M., (2019). "Fuzzy Logic Control of Vehicle Vibrations by Using Semi-Active Suspension Systems", International Conference on Applied Analysis and Mathematical Modelling (ICAAMM2019), 10-13 March 2019, İstanbul
2. Tuncer, A., Paksoy, M. and Cetin, S., (2016). "Semi Active Control of a Half Vehicle Roll Motion", International Conference on Advances in Mechanical Engineering 2016 (ICAME2016), 11-13 May 2016, İstanbul