

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

**UÇAK İNİŞ TAKIMININ MR DAMPERLE YARI AKTİF BULANIK MANTIKLI
KONTROLÜ**

HÜSEYİN BALTA

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. RAHİMİ GÜÇLÜ**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UÇAK İNİŞ TAKIMININ MR DAMPERLE YARI AKTİF BULANIK MANTIKLI
KONTROLÜ**

Hüseyin BALTA tarafından hazırlanan tez çalışması 04.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Makine Teorisi ve Kontrol Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Şaban ÇETİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Yener TAŞKIN
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında hiçbir yardımını esirgemeyen, her türlü problemimi titizlikle ele alan, her türlü açıklama, izahat ve yorumu cömertçe anlatan değerli hocam Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'ye, tezi tamamlamamda önemli katkıları olan Yrd. Doç. Dr. Şaban ÇETİN ve Arş. Gör. Mahmut PAKSOY'a, tez çalışmaları boyunca her zaman her konuda bana değerli yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Oğuzhan AHAN ve Arş. Gör. Hüseyin AGGÜMÜŞ'e, yoğun çalışma dönemimde bana gösterdikleri sabır ve yardımları için çalıştığım kurum ve çalışma arkadaşlarıma, son olarak da tezimin hazırlanması sırasında beni cesaretlendiren, büyük emekleri geçen, beni yetiştirip bu konuma ulaşmamı sağlayan, öğrenim hayatım boyunca her türlü fedakarlığı gösteren ve hayatım boyunca her zaman benden yardımlarını esirgemeyen aileme, nişanlıma ve tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Nisan, 2016

Hüseyin BALTA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	10
BÖLÜM 2	
TAŞIT TİTREŞİMLERİ	11
2.1 Titreşimlerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri	11
2.1.1 ISO İnsan Titreşimleri Standartları Parametreleri ve Titreşim Seviyeleri.....	12
2.1.2 İnsan Vücudunun Frekans Cevabı	14
2.1.3 Frekans Ağırlıklandırması	15
2.1.4 Vücut-Frekans Ağırlık Eğrisi ve Referans Ekseni	16
2.2 Taşıt Modelleri	17
2.3 Uçak Dinamik Davranışlarının İncelenmesi.....	18
2.3.1 Pasif Süspansiyonlar	18
2.3.2 Yarı Aktif Süspansiyonlar	19
2.3.3 Tam Aktif Süspansiyonlar.....	19

BÖLÜM 3

MR SÖNÜMLEYİCİLER	21
3.1 MR Akışkanlar	21
3.2 MR Damper Modeli.....	24
3.3 MR Sıvı Amortisörünün Histerik Karakteristiklerinin Dinamik Modellemesi	27
3.3.1 MR Sıvısı Tabanlı Cihazların Çalışma Özellikleri	28
3.3.2 MR Amortisör Modellerinin Değerlendirilmesi	30
3.4 MR Sönümleyicilerin Matematiksel Modeli	32
3.4.1 Bingham Modeli	32
3.4.2 Bouc-Wen Modeli	34
3.4.3 Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli	36

BÖLÜM 4

UÇAK İNİŞ TAKIMI MODELİ VE SİMÜLASYONLARI	39
4.1 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli	39
4.2 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli İçin Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Parametreler	42
4.3 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modelinin Simülasyonları	43
4.3.1 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli (Rasgele Yol Girişli)	43
4.3.2 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli (Sinüsoidal Yol Girişli)	48

BÖLÜM 5

UÇAK İNİŞ TAKIMI MODELİNİN KONTROLÜ	54
5.1 Kontrol Sistemleri	54
5.2 Bulanık Mantık Teorisi	55
5.2.1 Bulanık Mantığın Avantajları.....	57
5.2.1.1 Bulanık Mantığın Sakıncaları	58
5.2.2 Bulanık Mantığın Uygulama Alanları	59
5.2.3 Bulanık Sistemler	60
5.2.3.1 Bulanıklaştırma İşlemi	61
5.2.3.2 Kural İşleme Birimi	62
5.2.3.3 Durulaştırma İşlemi	64
5.3 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü	65
5.3.1 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü (Rasgele Yol Girişli).....	67
5.3.2 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü (Sinüsoidal Yol Girişli).....	72
5.4 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolünün Simülasyonlarının Karşılaştırılması.....	77
5.4.1 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolü (Rasgele Yol Girişli)	77
5.4.2 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolü (Sinüsoidal Yol Girişli)	82

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 88

KAYNAKLAR..... 90

EK-A

KONTROL KURALLARI..... 93

A-1 Bulanık Mantıklı Kontrol Kuralları 93

ÖZGEÇMİŞ..... 94

SİMGE LİSTESİ

a_{eq}	Eşdeğer ivme değeri
L_{eq}	Eşdeğer ivme seviyesi
a_i	İvme
L_d	Desibel olarak titreşim seviyesi
a_{ref}	Referans seviyesi
de	Hatanın türevi
e	Hata
F	MR sönümleyici sönüm kuvveti
f_c	Sürtünme kuvveti
f_0	Akümülatör kuvveti
c_0	Bouc wen modeli için yüksek hızlardaki sönüm katsayısı
c_1	Bouc wen modeli için düşük hızlardaki sönüm katsayısı
X	MR sönümleyici modellerinde yer değiştirme miktarı
x_0	Bouc wen modelinde başlangıç yer değiştirmesi
$\dot{x}$	Hız
k_1	Akümülatör yay katsayısı
Z	Bouc wen değişkeni
γ, η	Histeresiz sabitleri
β, n	Histeresiz sabitleri
a_h, A	Manyetik alana bağlı değişkenler
v	Uçak hızı
V	Gerilim
M	Tam taşıt modeli için uçak gövdesinin kütlesi
m_1	Tam uçak iniş takımı modeli için ön iniş takımı ve tekerleğin kütlesi
m_2	Tam uçak iniş takımı modeli için sol iniş takımı ve tekerleğin kütlesi
m_3	Tam uçak iniş takımı modeli için sağ iniş takımı ve tekerleğin kütlesi
Q	Kafa vurma açısal yer değişimi

β	Yalpa açısal yer değişimi
u	Uçak düşey yer değiştirme hareketi
q	Uçak kafa vurma hareketi
p	Uçak yalpalama hareketi
a	Ön iniş takımının ağırlık merkezine mesafesi
b	Arka iniş takımlarının ağırlık merkezinden mesafesi
d	Sol iniş takımının ağırlık merkezine mesafesi
e	Sağ iniş takımının ağırlık merkezine mesafesi
θ_1	Ön iniş takımı MR sönümleyicinin kuvveti
θ_2	Sol iniş takımı MR sönümleyicinin kuvveti
θ_3	Sağ iniş takımı MR sönümleyicinin kuvveti
u_{g1}	Ön iniş takımı için yol girişi
u_{g2}	Arka sol iniş takımı için yol girişi
u_{g3}	Arka sağ iniş takımı için yol girişi
u_1	Düşey yer değiştirmeler
u_2	Düşey yer değiştirmeler
u_3	Düşey yer değiştirmeler
k_0	Bouc wen modeli için yüksek hızlardaki yay katsayısı
k_{s1}	Ön iniş takımı süspansiyon yay katsayısı
k_{s2}	Arka sol iniş takımı süspansiyon yay katsayısı
k_{s3}	Arka sağ iniş takımı süspansiyon yay katsayısı
c_0	Bouc-Wen modeli için sönüm katsayısı
c_{s1}	Ön iniş takımı süspansiyon sönüm katsayısı
c_{s2}	Arka sol iniş takımı süspansiyon sönüm katsayısı
c_{s3}	Arka sağ iniş takımı süspansiyon sönüm katsayısı
k_{t1}	Ön tekerlek yay katsayısı
k_{t2}	Arka sol tekerlek yay katsayısı
k_{t3}	Arka sağ tekerlek yay katsayısı
c_{t1}	Ön tekerlek sönüm katsayısı
c_{t2}	Arka sol tekerlek sönüm katsayısı
c_{t3}	Arka sağ tekerlek yay katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

BMK	Bulanık Mantık Kontrol
ER	Elektroreolojik
ISO	International Standards Organisation
KOD	İvmenin Karesel Ortalama Değeri
LQR	Linear Quadratic Regulator
MR	Manyetoreolojik
UNBB	Negatif Çok Büyük
UNB	Negatif Büyük
UNM	Negatif Orta
UNS	Negatif Küçük
UPBB	Pozitif Çok Büyük
UPB	Pozitif Büyük
UPM	Pozitif Orta
UPS	Pozitif Küçük
UZ	Sıfır
VB	Pozitif
VN	Negatif
VZ	Sıfır
XNB	Negatif Büyük
XNS	Negatif Küçük
XPB	Pozitif Büyük
XPS	Pozitif Küçük
Z	Sıfır

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Sinüzoidal bir titreşim için konum değişimi, hız ve ivme arasındaki ilişki [22].	12
Şekil 2. 2 Farklı titreşim büyüklükleri [22]	13
Şekil 2. 3 İnsan vücudunun fiziksel modeli [22]	14
Şekil 2. 4 İnsan vücudu için ağırlıklandırılmış frekans eğrileri [22]	15
Şekil 2. 5 İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşime göre rahatsızlık sınır eğrisi [22]	16
Şekil 2. 6 İnsan vücudu için frekans eğrisi ve referans koordinat takımı [22]	16
Şekil 2. 7 Pasif süspansiyon sistem modeli [23]	19
Şekil 2. 8 Yarı aktif süspansiyon sistem modeli [23]	19
Şekil 2. 9 Aktif süspansiyon sistem modeli [23]	20
Şekil 3. 1 MR sıvısının manyetik alana tepkisi [1]	23
Şekil 3. 2 MR sıvısının elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı (Sol-manyetik alan yokken demir parçacıklarının durumu, sağ-manyetik alan varken demir parçacıklarının durumu [2])	23
Şekil 3. 3 MR damperin fiziksel modeli [1]	24
Şekil 3. 4 Pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [2]	25
Şekil 3. 5 MR sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [2]	26
Şekil 3. 6 MR sönümleyici sıvı geçişi tiplerine göre tasarım şekilleri , (a) Çift milli, (b) Tek milli ve akümülatörlü, (c) Yan geçişli, (1- Manyetik alanın olduğu kısım 2- Akümülatör, 3- Yan geçiş kanalı) [21]	27
Şekil 3. 7 Verim-sonrası bölgede MR sıvısının davranışı [1]	28
Şekil 3. 8 Ön-verim ve verim-sonrası bölgelerinde MR sıvısının davranışı [1]	28
Şekil 3. 9 MR sıvısının çalışma modları (a) Kesme modu (b) Akış modu (c) Sıkıştırma Modu [21]	29
Şekil 3. 10 Bingham modeli [24]	33
Şekil 3. 11 Bingham modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]	33
Şekil 3. 12 Bingham modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]	34
Şekil 3. 13 Bouc-Wen modeli [24]	34
Şekil 3. 14 Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]	35
Şekil 3. 15 Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]	35

Şekil 3. 16	Geliştirilmiş bouc-wen modeli [24]	36
Şekil 3. 17	Geliştirilmiş bouc-wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]	37
Şekil 3. 18	Geliştirilmiş bouc-wen modeli ve deneysel sonuçların karşılaştırılması..... kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]	37
Şekil 4. 1	Tam uçak iniş takımı modeli [9]	39
Şekil 4. 2	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi	43
Şekil 4. 3	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	44
Şekil 4. 4	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi	44
Şekil 4. 5	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	44
Şekil 4. 6	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi	45
Şekil 4. 7	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	45
Şekil 4. 8	Uçak gövdesinin düşey ivmesi	45
Şekil 4. 9	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi	46
Şekil 4. 10	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	46
Şekil 4. 11	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	46
Şekil 4. 12	Uçak sol iniş takımı ivmesi.	47
Şekil 4. 13	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	47
Şekil 4. 14	Uçak pist yol profili.....	48
Şekil 4. 15	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi	49
Şekil 4. 16	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	49
Şekil 4. 17	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi	49
Şekil 4. 18	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	50
Şekil 4. 19	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi.....	50
Şekil 4. 20	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	50
Şekil 4. 21	Uçak gövdesinin düşey ivmesi.....	51
Şekil 4. 22	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi.....	51
Şekil 4. 23	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	51
Şekil 4. 24	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	52
Şekil 4. 25	Uçak sol iniş takımı ivmesi.	52
Şekil 4. 26	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	52
Şekil 5. 1	Açık çevrim kontrolör [2]	55
Şekil 5. 2	Kapalı çevrim kontrolör [2]	55
Şekil 5. 3	(a) Kesin küme (b) Bulanık küme [2]	56
Şekil 5. 4	Bulanık sistem yapısının genel gösterimi [28]	60
Şekil 5. 5	Bulanıklaştırma süreci üyelik fonksiyonları: a) Monotonik, b) Sigmoid, c) Üçgen, d) Yamuk, e) Çan eğrisi [27]	62
Şekil 5. 6	Kesme ve ölçekleme metodu ile kuralın uygulanması gösterimi [28].....	64
Şekil 5. 7	Yükseklik metodunun gösterimi [28]	65
Şekil 5. 8	Ağırlık merkezi yönteminin gösterimi [28]	65
Şekil 5. 9	Bulanık mantıklı kontrolörün genel yapısı	66
Şekil 5. 10	Girişler ve çıkış için kullanılan üyelik fonksiyonları [19].....	67
Şekil 5. 11	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi.....	68
Şekil 5. 12	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	68
Şekil 5. 13	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi	68
Şekil 5. 14	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	69
Şekil 5. 15	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi.....	69

Şekil 5. 16	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	69
Şekil 5. 17	Uçak gövdesinin düşey ivmesi.....	70
Şekil 5. 18	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi	70
Şekil 5. 19	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	70
Şekil 5. 20	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	71
Şekil 5. 21	Uçak sol iniş takımı ivmesi.....	71
Şekil 5. 22	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	71
Şekil 5. 23	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi.....	73
Şekil 5. 24	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	73
Şekil 5. 25	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi	73
Şekil 5. 26	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	74
Şekil 5. 27	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi.....	74
Şekil 5. 28	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	74
Şekil 5. 29	Uçak gövdesinin düşey ivmesi	75
Şekil 5. 30	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi	75
Şekil 5. 31	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	75
Şekil 5. 32	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	76
Şekil 5. 33	Uçak sol iniş takımı ivmesi.	76
Şekil 5. 34	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	76
Şekil 5. 35	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi.....	78
Şekil 5. 36	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	78
Şekil 5. 37	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi.....	78
Şekil 5. 38	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	79
Şekil 5. 39	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi.....	79
Şekil 5. 40	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	79
Şekil 5. 41	Uçak gövdesinin düşey ivmesi.....	80
Şekil 5. 42	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi	80
Şekil 5. 43	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	80
Şekil 5. 44	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	81
Şekil 5. 45	Uçak sol iniş takımı ivmesi.....	81
Şekil 5. 46	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	81
Şekil 5. 47	Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi.....	83
Şekil 5. 48	Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi	83
Şekil 5. 49	Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi.....	83
Şekil 5. 50	Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi	84
Şekil 5. 51	Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi.....	84
Şekil 5. 52	Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi	84
Şekil 5. 53	Uçak gövdesinin düşey ivmesi.....	85
Şekil 5. 54	Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi.....	85
Şekil 5. 55	Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi	85
Şekil 5. 56	Uçak ön iniş takımı ivmesi.....	86
Şekil 5. 57	Uçak sol iniş takımı ivmesi.....	86
Şekil 5. 58	Uçak sağ iniş takımı ivmesi.....	86

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	MR sıvısı ve ER sıvısının karşılaştırılması [23]..... 24
Çizelge 4. 1	MR damper modelinin parametreleri [25]..... 42
Çizelge 4. 2	Uçak iniş takımı modelinin parametreleri [9] 42
Çizelge 5. 1	Bulanık kontrolün gelişmesinde pay sahibi olan önemli çalışmalar [27].56
Çizelge 5. 2	Bulanık mantıklı kontrolör için kural tablosu [19]..... 66

UÇAK İNİŞ TAKIMININ MR DAMPERLE YARI AKTİF BULANIK MANTIKLI KONTROLÜ

Hüseyin BALTA

Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Uçaklarda pistten kaynaklanan yol pürüzlülükleri ve hava şartları (rüzgar, fırtına vs.) titreşimlere sebep olmaktadır. Bu da konforu ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak amacıyla, uçaklarda süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insanlarda konfor beklentileri de artmıştır. Bu yüzden süspansiyon sistemlerini geliştirmek, konforu artırmak için yapılan çalışmalar da hızla devam etmektedir.

Titreşimleri azaltmak için pasif, aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerden titreşim sönümleme açısından en etkili olanı aktif süspansiyondur. Fakat yarı aktif süspansiyon, aktif süspansiyona yakın performans sergilemesi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir.

Bu çalışmada uçak iniş takımı, altı serbestlik dereceli olarak modellenmiş ve yarı aktif kontrol için MR (Manyetoreolojik) sönümleyici modeli kullanılmıştır. MR sönümleyiciyi modellemek için geliştirilmiş bouc-wen modeli kullanılmıştır. Pasif sistemdeki sönümleyicilere MR sönümleyiciler eklenerek sistem modellenmiştir. Modele yol profili olarak rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanmıştır. MR sönümleyici kontrolsüz hali ile farklı voltajlar verilerek oluşturulmuş durumları karşılaştırılmış ve voltajın artırılmasıyla beraber sönümleme sisteminin emniyet açısından daha uygun olduğu gösterilmiştir. Daha sonra MR sönümleyici ile modellenen sistemin kontrolü bulanık mantıklı kontrolör tarafından gerçekleştirilmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları, MATLAB-Simulink programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları ile

elde edilen sonuçlar, yarı aktif bulanık mantıklı kontrolün uçak iniş takımı titreşimlerinin azaltılmasındaki performansını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçak iniş takımı titreşimleri, MR sönümleyici, pasif kontrol, yarı aktif kontrol, bulanık mantık kontrol

**SEMI ACTIVE FUZZY LOGICAL CONTROL OF AIRCRAFT LANDING GEAR
WITH MR DAMPER**

Hüseyin BALTA

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Roughness caused on the road resulting from the runway and weather conditions (wind, storm etc.) in the aircraft leads to vibrations. This situation affects the comfort and human health negatively. In order to eliminate these negative effects, suspension systems are used in aircrafts. Comfort expectations has increased in human life with the development in technology. So improvement in suspension system and comfort are underway quickly.

To reduce vibrations; passive, active and semi-active suspension systems are used. In these systems, the most effective one is active suspension in terms of vibration damping but the semi-active suspension is preferred due to its advantages such as immediate display performance near to active suspension and low power consumption.

In this study, aircraft landing gear modeled as free six degree and MR (Magnetorheological) damper model was used for semi active control. Developed bouc-wen model was used to model MR damper. The model has been modeled with MR dampers in addition to passive damping system. A random and a sinusoidal entry road was applied to the model as an input profile. Differrent voltages has been given to compare the situation of uncontrolled state of MR damper and wtih the increase of the voltage damping system, it has been shown more suitable results in terms of

safety. Then the control of MR damping system with the modeled one was carried out by fuzzy logic controller. Modeling and simulation studies were carried out with the help of MATLAB-Simulink. Results that are obtained from simulation studies demonstrated the performance in reducing vibrations of semi-active control of the aircraft landing gear. Furthermore, a comparison and evaluation is made between the control methods.

Keywords: Aircraft landing gear vibration, MR damper, passive control, semi-active control, fuzzy logic control

1.1 Literatür Özeti

Uçak yapısı farklı bileşenlerin ve alt montajlarının bir dizi karmaşık birleşiminden oluşmaktadır. Uçak çalışma süresi boyunca iniş, havalanma, seyrüsefer(uçuş) ve taksi yapma gibi değişik işlevsel aşamalara tabi tutulur. Uçağın iniş safhası bunların içinde yolcu güvenliği ve uçuş güvenliği açısından en kritik işlevdir. Uçak kazası soruşturma raporlarına göre, uçağın kazayla karşılaşma ihtimali iniş aşamasında diğer aşamalara göre daha yüksektir. Boeing tarafından yapılan istatistiksel analize göre, 1959'dan 2001'e kadar olan uçak kazalarının %45'nin iniş aşamasında meydana geldiği belirtilmiştir. Bu oran diğer işlevsel aşamalar olan havalanma, uçuş ve taksi yapma aşamasına göre açıkça üstünlük göstermektedir. Rapor edilmiş birçok ölümcül insan kaybının olduğu iniş kazaları bulunmaktadır. İran Hava Yolları tarafından kontrol edilen Boeing 727, kaza alanındaki yaralanmalarda organ ezilmesi nedeniyle ölen yolcu oranının %50 'den fazla olduğunu ortaya çıkarmıştır. Başarısız iniş yapmaktan kaynaklanan başka bir kaza da 2009'da Amsterdam da rapor edilmiş olup kurtulanların oranı ortalama %25,7'dir [1].

Yukarıdaki istatistiksel veri, iniş safhasının kritikliğinin ve buna bağlı tehlikeler olduğunun açık bir göstergesidir. Bir uçağın ana amacının elde edilebilecek en iyi verimlilik ile uçmak olduğu bilinen bir gerçektir. Ancak uçak iniş, havalanma ve zeminde taksi yapma aşamasında önemli bir zaman harcamaktadır. Havayolları bir uçak tarafından zemin üzerinde harcanan zamanı, iniş ve havalanma sayısına göre değerlendirir. Uçak ömrü boyunca yaklaşık olarak, 90000'e kadar iniş ve havalanma

gerçekleştirmesi gerekmektedir. Uçak kazalarının neredeyse %50'si iniş ve kalkış aşamasında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, iniş aşamasında güvenlik faktörlerine önem vermek zorunluluk haline gelmektedir. Uçak kazalarının sebebi, doğrudan iniş takımlarının tasarımı ile ilgilidir. Her ne kadar teknik olmayan profesyoneller iniş takımlarının bir grup tekerlek olduğunu düşünseler de, uçak tasarımcıları için en kritik ve paha biçilemez montaj ekipmanı olduğu bilinmektedir. Çünkü doğrudan yolcu güvenliğinin çeşitli işlevsel aşamaları ile ilgilidir. İniş takımlarının görevi sadece güvenli iniş için uçağın işini kolaylaştırmak değil, aynı zamanda içeri çekme ve uzatma sırasında aerodinamik kuvvetlere destek olmaktır. Farklı aşamalardaki bu çelişkili durumlar genellikle tasarımcılar için zahmetli bir işlem haline gelmektedir.

İniş takımları uçak gövdesi ve pist arasında bir ara eleman durumunda hareket ederek önemli bir rol oynar. Uçağın yere inişi sırasında sert iniş koşulları nedeniyle oluşan büyük boyutlu titreşimler, iniş takımları aracılığıyla uçak gövdesine iletilir. İniş darbesinin uçak yapısına etkisi yaklaşma hızı, alçalma hızı ve çevre koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Uçuşa elverişlilik, belirlenen standartlara göre, sivil uçaklarda 3.05 m/ s'lik alçalma hızı ile iniş için tasarlanmıştır. Halbuki savaş uçakları, eğitimciler ve güverte iniş uçakları için standart alçalma hızı ise sırasıyla 3.66 m/s, 4.0 m/s ve 6.0 m/s üzerinde olmaktadır. İniş sırasındaki standart alçalma oranlarının aşılması durumunda uçak genellikle sert iniş koşullarına maruz kalacaktır. Sert iniş şartlarının sorumlusu büyük boyutlu titreşim iletimidir ki, bu durum yolcuların rahatsız olmasındaki birincil etkindir ve bazen de ciddi iniş kazalarına yol açmaktadır. Bu nedenle, iniş etkisini hafifletmek amacıyla dikey kinetik enerjinin absorbe edilmesi ve kısa sürede mümkün olabilecek en etkili bir biçimde dağıtılması, iniş sırasında uçağın yapısında oluşan ivmeyi azaltacaktır. Böylece yapısal hasar önlenmiş olur. Bu önemli görev iniş takımlarının en önemli bileşeni olarak kabul edilen amortisör ile gerçekleştirilmektedir.

Geçmişte etkin amortisör tasarımı girişimleri uçağın ağırlığında herhangi bir değişiklik yapmadan tutarlı biçimde yapılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana, birçok yenilikçi amortisör tasarımları savaş uçaklarının yanı sıra ticari uçaklar içinde yapıldı. İyi bir amortisör, uçağın iniş ve taksit yapma aşamasında darbe sonucu oluşan kinetik enerjisinin çoğunu emmesi gerekir. Oleo-pnömatik amortisörler uçak iniş takımlarında, yüksek verimlilikleri ve darbeleri absorbe (emme) yetenekleri nedeniyle en sık

kullanılan amortisörlerdir. Tutarsız sönümleme gereksinimleri nedeniyle taksi yapma ve iniş aşamaları sırasında, pasif oleo amortisörler ile uçağın performans verimliliği genellikle sınırlı hale gelmektedir. Mevcut amortisörler her bir işlevsel aşamalardaki gereksinimlere bağlı olarak değişken sönümleme yeteneğine sahip değildir. İniş performansını iyileştirme amacıyla iniş takımlarının sıkıştırılması sırasında yumuşak bir süspansiyona ihtiyaç duyulmaktadır. Hâlbuki daha sert bir elastikiyet iniş takımınlarının açılması sırasında gerekli olacaktır. Bu değişken sönümleme ve sertlik gereksinimleri mevcut pasif amortisörler ile elde edilememektedir.

Tutarsız sönümleme gereksinimleri pasif amortisör performans verimliliğine sınırlamalar getirmektedir. Değişken sönümleme ihtiyacını karşılamak amacıyla akıllı sıvılar ile ilgili çalışmalar ortaya çıkmıştır [1]. Akıllı sıvıların sönümleyicilerde kullanılması ile ilgili çalışmalar son 25 yılda yoğunlaşsa da aslında akıllı sıvıların keşfi 1940'lara kadar dayanmaktadır. Akıllı sıvıların keşfi konusunda Amerikan araştırmacı Willis Winslow elektriksel etkiyi kuvvete dönüştüren bir sıvının patentini almıştır ve bu konuda bir makale yayınlamıştır. MR (Manyetoreolojik) akışkanlar üzerine yapılan çalışmalar ile temel atılmış olup, 1940'larda J. Rabinow da akıllı sıvı olan MR üzerine çalışmalar yapmıştır. MR akışkanlı kuvvet ve moment ileten bir aletin tasarımını yapmış ve patentini 1951 yılında almıştır. Günümüzde MR kullanımının çok değişik alanları bulunmaktadır. Bunlar; inşaat sektöründe binaların depremden korunmasında, demir yollarında, köprülerde, medikal alanda, askeri alanda, çelik yelek üretiminde ve en önemlisi de otomotiv sektöründe olup araçların değişik komponentlerinde MR akışkanlar aktif, güvenilir ve hızlı gelişir şekilde kullanılmaktadır.

MR akışkanın lineer olmayan karaktere sahip olması ve modellemedeki zorluklarından dolayı akıllı akışkanların sisteme uygulanmasında dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu konudaki ilk çalışmalar, ER (Elektroreolojik) sıvılar ve sönümleyiciler üzerine yoğunlaşmış olsa da, bunların yavaş cevap süresi, düşük dinamik akma gerilmesi, yüksek plastik viskozite, dar sıcaklık bandında çalışabilme, kolay çökme, düşük alan gereksinimi ve yüksek enerji tüketiminden dolayı bu konudaki çalışmalar ER sıvılarda bulunan olumsuz durumların bulunmadığı, MR sıvılar üzerine yoğunlaşmıştır [2].

Aktif ve yarı aktif süspansiyon sistem tasarım kavramının akıllı sınırlar ile yapılmış uçak uygulamaları oldukça sınırlıdır. Bu durum karayolu taşıtları için akıllı süspansiyonlar geliştirmede bir ölçüde kullanılmaktadır. Günümüzdeki uçakların hiçbirinde aktif ya da yarı aktif iniş takımları yerleştirilmiş değildir. Ancak, son dört yıldan bu yana kontrol edilebilir iniş takımları fikrini teşvik etmek amacıyla yoğun bir araştırma, uçak yolculuğunu daha güvenli ve yolcular için daha rahat hale getirmek için devam etmektedir. Aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemleri pasif sistemlere göre konfor noktasında üstünlük göstermektedir. Ancak, bu sistemlerin hayata geçirilmesi yüksek maliyet, ağırlık ve tasarım karmaşıklığı nedeniyle zor bir iştir.

Bu zamana kadar yapılan çalışmalar olarak, Sforza, P., M. [3], yaptığı çalışmada, iniş takımlarının statik ve dinamik yükler altındaki performansını incelemiş, buna bağlı olarak iniş takımının tasarımı ve uçak gövdesi üzerindeki yerleşimi hakkında çalışmada bulunmuştur. Astori, P. [4], yaptığı çalışmada, iniş takımının içerdiği elemanları, fonksiyonlarını, kararlılık üzerindeki etkisini incelemiş ve iniş takımını iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli olarak ele almıştır. Zapaterio, M., vd. [5], çalışmalarında, çeyrek taşıt modelinin ele alındığı, doğrusal olmayan yay ve sönüm elemanlarını içeren, bozucu bastırıcı gürbüz kontrolcü tasarlamışlardır.

Mikulowski ve Holnicki-Szulc [6] yaptığı çalışmada, uçak iniş takımının darbe sönümleme kapasitesini artırmak ve iniş koşullarındaki farklılıklarla başa çıkmak için adaptif uçak amortisör kavramını tasarlamışlardır. Kruger üç farklı kontrol yaklaşımlarını (pasif, aktif ve yarı-aktif sistemler) kullanarak nakliye uçakların çok gövdeli uçak modelinin simüle performanslarını karşılaştırarak yarı-aktif iniş takımı tasarlamıştır. Bu sistemlerin karşılaştırılmasındaki kriter iniş sırasında gövdeye iletilen düşey ivme olmuştur [7]. Ghiringhelli, G., L. [8], yaptığı çalışmada iniş takımı performansını deneysel olarak incelemiştir.

Günümüzde hava, kara ve deniz taşıtlarında, bozucular etkisiyle oluşan titreşimlerin analiz edilmesinde konfor önemli bir kriterdir. Sivakumar, S., ve Haran, A., P. [9], çalışmalarında, taksi yapan iki serbestlik dereceli yarı aktif iniş takımına sahip bir uçakta, bozucu yol etkilerinden kaynaklı titreşimleri bastırmaya çalışan PID kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Corsetti ve Dilow [10] yaptıkları çalışmada, uçağa taksi sırasında

yerden gelen bozucu etkileri, aktif kontrol yapısı kullanarak bastırmaya çalışmışlardır. Jahromi vd. [11], yaptıkları çalışmada, üç serbestlik dereceli uçak süspansiyon sistemine, yarı-aktif kontrolcü uygulamasıyla, H^∞ ve LQR kontrolcülerini kullanarak benzetim çalışmaları yapmışlardır. Lin ve arkadaşları [12], iniş sırasında gövdeye iletilen ivmeleri azaltmak için, iniş takımı sisteminin kontrolü için bulanık PID kontrolcü önermiştir. PID ve bulanık kontrolün avantajlarını birleştiren hibrit kontrol algoritması geliştirilmiş ve simülasyon yaklaşımıyla doğrulanmıştır. PID kontrolcü kullanan aktif ve yarı-aktif iniş takımları kavramı sırasıyla Wang, [13] Sivakumar ve Haran [14] tarafından iniş ve diğer aşamalar sırasında uçak gövdesinin dikey hareketini azaltmak için kullanılmıştır. Doğrulama kriteri olarak yolcu konforu ve uçak yorulma ömrü göz önüne alındığında, aktif iniş takımı kavramının uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Zapeteiro ve arkadaşları [15] uçak çalışmasının değişik aşamalarında sönümleme performansını iyileştirmek amacıyla robust ve H^∞ kontrol yaklaşımını kullanarak iniş takımı için uyarlanabilen geri basamaklı kontrol kavramını geliştirmişlerdir. Khani, M. [16], yaptığı çalışmada PID kontrol yöntemini kullanarak kontrolünü gerçekleştirdiği, iki serbestlik dereceli yarı aktif MR süspansiyon sistemi ile modellenmiş uçak iniş takımı sistemi üzerine çalışma yapmıştır. Gharapurkar, A. A. [1], yaptığı çalışmada LQR ve H^∞ kontrol yöntemini kullanarak kontrolünü gerçekleştirdiği, üç serbestlik dereceli yarı aktif MR süspansiyon sistemi ile modellenmiş uçak iniş takımı sistemi üzerine çalışma yapmıştır.

Guclu [17], yaptığı çalışmada, dört serbestlik dereceli bir araç modelinin bulanık mantıklı kontrol (BMK) yöntemini kullanarak taşıt süspansiyon kontrolünü gerçekleştirmiştir. Kuvvet eyleyicileri süspansiyonlara paralel olarak yerleştirilmiştir. Bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılmasının nedeni, süspansiyon-boşluk hatası probleminin üstesinden gelebilme becerisidir. Çalışmada sürüş konforundaki gelişme, araç gövdesinin hareketlerinin genliklerinin azaltılmasıyla elde edilmiştir. Aracın gövde sıçraması ve hatve hareketleri zaman tanım kümesinde, frekans tanım kümesinde, basamak yol profilinin üzerinde yolculuk etme durumunda her iki tanım kümesinde simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları pasif süspansiyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, kontrol biriminin performansı, önerilen yaklaşımın avantajı ve sistem performansındaki ilerleme sürüş konforu açısından tartışılmıştır.

Guclu [18], 2003 yılında yaptığı çalışmada, aktif süspansiyon ve PID kontrolörlü yolcu koltuğuna sahip, lineer olmayan 8 serbestlik dereceli bir araç modelinin dinamik davranışını incelemiştir. Lineer olmama durumu sönümleyicilerdeki kuru sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Üç farklı kontrol stratejisi durumunu göz önüne alınmıştır. İlk durumda yalnızca yolcu koltuğu kontrol edilmektedir. İkinci durumda sadece araç gövdesi kontrol edilmektedir. Üçüncü durumda ise, araç gövdesi ile yolcu koltuğu aynı anda kontrol edilmektedir. Her bir kontrol stratejisi için, lineer olmayan araç modellerinin yol rahatsızlıklarından dolayı oluşan zaman cevapları ve harmonik olarak lineerize edilen, lineer olmayan araç modellerinin frekans cevaplarını elde etmiştir. Yapılan bu çalışmanın neticesinde PID kontrol yönteminin başarısı simülasyon çalışmalarıyla ortaya konulmuştur.

Güçlü [19], 2004 yılında yaptığı çalışmada, aktif süspansiyonlara ve bulanık mantık kontrollü (BMK) yolcu koltuğuna sahip lineer olmayan 8 serbestlik dereceli bir araç modelinin dinamik davranışını test etmiştir. Lineer olmama durumu sönümleyicilerdeki kuru sürtünmeden dolayı meydana gelmektedir. Üç farklı kontrol stratejisini kullanılmıştır. Birinci durumda sadece yolcu koltuğu kontrol edilmektedir. İkinci durumda sadece araç gövdesi kontrol edilmektedir. Üçüncü durumda ise, araç gövdesi ile yolcu koltuğu aynı anda kontrol edilmektedir. Çalışmada her bir kontrol stratejisi için lineer olmayan araç modellerinin yol rahatsızlıklarından dolayı oluşan zaman cevapları ve frekans cevapları elde edilmiştir. Kontrol yönteminin başarısı yapılan simülasyon çalışmalarıyla ortaya konmuştur.

Güçlü ve Yağız [20], 2004 yılında yaptıkları çalışmada, yolcu koltuklu yarım taşıt modeli için kayan kipli kontrol yöntemini kullanarak titreşim kontrolü gerçekleştirmişlerdir. Önce aktif süspansiyonlu yolcu koltuğuna sahip modeli daha sonra aktif süspansiyon gövde kombinasyonlarını incelemişlerdir. Son durumda ise, hem yolcu koltuğunu hem de gövde süspansiyonlarını aktif olarak kontrol etmişlerdir. Üç durumda da yol girişi olarak, bazı ülkelerde araçları kavşaklarda yavaşlatmak için yaygın olarak kullanılan tümsekleri kullanmışlardır. Simülasyon çalışmaları yapmışlar ve sonuçları, en iyi sürüş konforunu veren kombinasyonu seçmek için karşılaştırmışlardır.

Paksoy ve Güçlü [2], 2013 yılında yaptıkları çalışmada, yedi serbestlik dereceli aracı tam taşıt olarak modellenmiş ve yarı aktif kontrol için MR (Manyetoreolojik) sönümleyici kullanılmıştır. MR sönümleyiciyi modellemek için geliştirilmiş bouc wen modeli kullanılmıştır. Sistem önce pasif olarak modellenmiş daha sonra pasif sönümleyiciler yerine MR sönümleyiciler kullanılarak sistem modellenmiştir. MR sönümleyici kontrolsüz hali ile pasif sistem karşılaştırılmış ve emniyet açısından uygun olduğu gösterilmiştir. Daha sonra MR sönümleyici ile modellenen sistemin kontrolü, önce bulanık mantıklı kontrolör daha sonra ise öz uyarlamalı bulanık mantıklı kontrolör tarafından gerçekleştirilmiştir. Modelleme simülasyon çalışmaları, MATLAB-Simulink programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları ile elde edilen sonuçlar, yarı aktif kontrolün taşıt titreşimlerinin azaltılmasındaki performansını ortaya koymuştur. Ayrıca, kontrol yöntemleri arasında bir karşılaştırma ve değerlendirme de yapılmıştır.

Engin, T. ve arkadaşları [21], 2008 yılında yaptıkları çalışmada, yeni nesil yarı-aktif bir süspansiyon sisteminin tasarımı, imalatı ve optimizasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Bu projede, traktör koltuğu ile kullanılmak üzere bir MR damperin tasarımı, imalatı ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Damperin davranışını tahmin etmek üzere, sanki-statik yaklaşımla, dolayısıyla akışkan ivmesi ihmal edilerek damper içerisindeki akışın analizi yapılmıştır. Daha sonra teorik sonuçlar deneysel verilerle doğrulanarak aralarında çok iyi bir uyumun olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak MR damper içerisindeki akış hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca damper geometrisini optimize etmek amacıyla bir optimizasyon aracı olarak Taguchi yöntemi incelenmiştir. MR damperi PC-tabanlı gerçek-zamanlı kontrolüne yönelik testleri yapmak için bir koltuk simülatörü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu amaçla özel bir kontrol devresi tasarlanmış ve havaya-asma, yere-bağlama ve melez olmak üzere üç ayrı kontrol algoritması karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar; yerdeğiştirme, hız ve ivme gibi titreşim göstergelerinin önerilen MR damper ve kontrol stratejisi ile etkin bir şekilde bastırılabilirliğini ve titreşimin büyük oranda düşürülebileceğini göstermiştir.

Breese ve Gordaninejad [2], yaptıkları çalışmada bir dağ bisikletinin ön ve arka süspansiyonlarında MR sönümleyici kullanmışlar ve MR sönümleyicinin kontrol

altındaki ve pasif durumunu karşılaştırmışlardır. MR sönümleyicinin kontrol altında titreşim sönümleme ve konfor açısından başarısını ve güvenilir olduğunu simülasyon çalışmalarıyla ortaya koymuşlardır. Lau ve Liao [2], yaptıkları çalışmada, MR sönümleyiciyi raylı taşıt modeline uygulamışlardır. Titreşim sönümlemedeki başarısını göstermek için simülasyon çalışmaları yapmışlar, pasif ve yarı aktif kontrolcü ile sistemlerin titreşim sönümlemedeki başarısını araştırmışlar ve sonuçları değerlendirmişlerdir.

Spencer vd., MR sönümleyiciyi Bingham Modeli, Bouc-Wen Modeli ve geliştirilmiş Bouc-Wen modelini kullanarak 1996 yılında modellemiştir. Bu modellerde Spencer, MR sönümleyicinin davranışını ne kadar yansıttığını göstermek amacıyla elde ettikleri sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve hata oranlarını belirlemişlerdir.

Kyoung vd. [2], nonlinear karaktere sahip MR sönümleyici için (bouc-wen, bingham, li vb. gibi) daha önce yapılan modellemelerden farklı olarak, MR sönümleyiciyi modellemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları modelde Bulanık Mantıklı Kontrol algoritmasını kullanmışlar ve diğer modellere göre hesap yükünü oldukça azaltan ve MR sönümleyicinin hareketini tatmin edici oranda yansıtan bir model geliştirmişlerdir. Sonuçları simülasyon çalışmalarıyla ortaya koymuşlardır.

Liao ve Lai [2], yaptıkları çalışmada tek serbestlik dereceli bir sistem kullanmışlar ve MR sönümleyicinin titreşim sönümleme ve konfor üzerine etkilerini incelemek amacıyla kayan kipli kontrol yöntemini kullanmışlardır. MR sönümleyiciyi geliştirilmiş bouc wen modelini kullanarak modellemiştir. Değişik yol girişleri için MR sönümleyicinin titreşim sönümleme ve konfor açısından başarısını simülasyon çalışmaları yardımıyla göstermişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Uçak, ömrü boyunca, hava da olduğu gibi zemin üzerinde değişken çalışma koşullarına tabi tutulur. İniş tüm çalışma aşamaları arasında en kritik aşama olduğundan en verimli iniş takımları tasarlama ihtiyacı vardır. İniş aşamasında devasa darbe enerjisi absorbe eden amortisör, iniş takımı grubunun kalbi olarak kabul edilir ve bu nedenle, performans verimini ve ömrünü artırmak gereklilik haline gelir. Mevcut amortisörler

bugüne dek en verimli olmalarına rağmen, onlar değişken çalışma şartları ile başa çıkmaları ve değişken sönümlleme gereksinimleri karşılamaları mümkün değildir. Bu sebeplerden dolayı teknolojinin ilerlemesi ile birlikte insanların taşıtlardan beklentileri de her açıdan artmaktadır. Emniyet ve konfor şüphesiz bunların başında gelmektedir. Uçak iniş takımlarında meydana gelen titreşimlerinin temel kaynağı kötü hava koşulları, pilot yanlışlıkları ve pist pürüzlülüğü gibi problemler uçağın çalıştığı sırada ortaya çıkabilir bu da bazen kazalara sebep olabilir. Bu yüzden kazalara sebebiyet verebilecek titreşimleri minimuma indirerek, maksimum konfor şartını sağlamak için yapılan çalışmalar tüm hızıyla devam etmektedir.

Uçak iniş takımlarında titreşimi bastırmak için süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Bu süspansiyon sistemleri pasif, yarı aktif ve aktif olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır. Pasif süspansiyon sistemleri bunlar arasında en basit olan yöntem olup, yay ve sönüm elemanından meydana gelen yapılardır. Bu sistemdeki yay ve sönüm elemanının karakteristikleri değişken olmadığı için diğerlerine göre titreşimlerin azaltılması yönünden daha zayıftırlar. Aktif süspansiyon sistemlerinde ise, yay ve sönümlleme elemanından başka birde eyleyici bulunur. Bu sayede sisteme kuvvet girişi ile daha iyi bir kontrol amaçlanır. Ancak bu tip sistemlerinde harcadığı enerji ve maliyeti daha fazladır. Yarı aktif süspansiyon sistemlerinin özelliği ise sahip olduğu elemanlarının özelliklerinin değişebilir yapıda olmasıdır. Bu sistemler aktif sistemlere göre daha az enerji tüketmesi, daha güvenli olması, aktif kadar olmasa da iyi bir performansa sahip olması vb. gibi özellikleri dolayısıyla tercih edilirler. Yarı aktif kontrol için değişik sönümleyiciler bulunmakta olup en sık tercih edilen sönümleyiciler, ER sönümleyiciler (Elektroreolojik akışkan) ve MR sönümleyiciler (Manyetoreolojik akışkan)'dir. Aktif süspansiyon sistemlerinde ise, yay ve sönümlleme elemanından başka birde eyleyici bulunur. Bu sayede sisteme kuvvet girişi ile daha iyi bir kontrol amaçlanır. Ancak bu tip sistemlerinde maliyeti ve enerji tüketimi fazla olması kullanım alanını daraltmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada daha az enerji tüketmesi, daha güvenli olması, aktif kadar olmasa da iyi bir performansa sahip olması ve yarı aktif değerlerine göre daha fazla tercih edilen MR sönümleyiciler tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı aşağıda belirtildiği gibidir :

- MR sönümleyici kullanarak uçak iniş takımı titreşimlerinin azaltılmasını ve konforun artırılması,
- MR damperin kontrolü için bulanık mantıklı kontrol (BMK) yönteminin kullanılması,
- Sonuçların MATLAB-Simulink programı yardımıyla yapılan simülasyon çalışmaları ile değerlendirilmesidir.

1.3 Hipotez

Uçakların pistte seyri sırasında yoldaki pürüzlülükler titreşime sebep olur. Bu titreşimler ise insan sağlığı ve konforunu olumsuz etkilemektedir. Bu titreşimlerin sönümlenmesi ve en az seviyeye indirilmesi insan sağlığı ve konforu açısından önemlidir. Uçaklarda titreşimi azaltmak amacıyla, süspansiyon sistemleri kullanılır. Süspansiyon sistemlerinin üç tipi bulunmaktadır. Bunlar; pasif süspansiyon sistemleri, aktif süspansiyon sistemleri ve yarı aktif süspansiyon sistemleridir. Bunlardan en basit yapıya sahip olanı ve en çok kullanılanı ise pasif süspansiyon sistemleridir. Fakat pasif süspansiyon sistemleri titreşim sönümleme açısından değerlendirildiğinde, diğer süspansiyon sistemlerine göre daha başarısız kalmaktadırlar. En başarılı sistem ise aktif süspansiyon sistemleridir. Bu sistemler de çok enerji tüketirler ve taşıtta ek yüklerle sebep olurlar.

Yarı aktif süspansiyon sistemleri ise, uçak iniş takımı titreşimlerinin sönümlenmesinde, aktif sistemler kadar başarılı olmasalar da, iyi bir kontrol yöntemi kullanılarak bu sistemlere yakın bir performans sergileyebilirler. Aynı zamanda, enerji tüketimleri düşüktür ve emniyetli sistemlerdir. Bu özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Yarı aktif süspansiyon sistemlerinde yay katsayısını anlık olarak değiştirmek, sönüm katsayısını anlık olarak değiştirmekten daha zor olduğundan değişken sönümlü sistemler daha çok tercih edilirler. Sönüm kuvveti hıza bağlı olarak değiştiğinden sistem kontrol edilirken sönümleyicinin hızının kullanılması ile titreşimlerin sönümlenmesi açısından iyi sonuçlar elde edilebilir. Bunun yanında sönümleyicinin yer değiştirmesinin ve hızının aynı anda kullanıldığı bir kontrol yöntemiyle de başarı oranı arttırılabilir.

TAŞIT TİTREŞİMLERİ

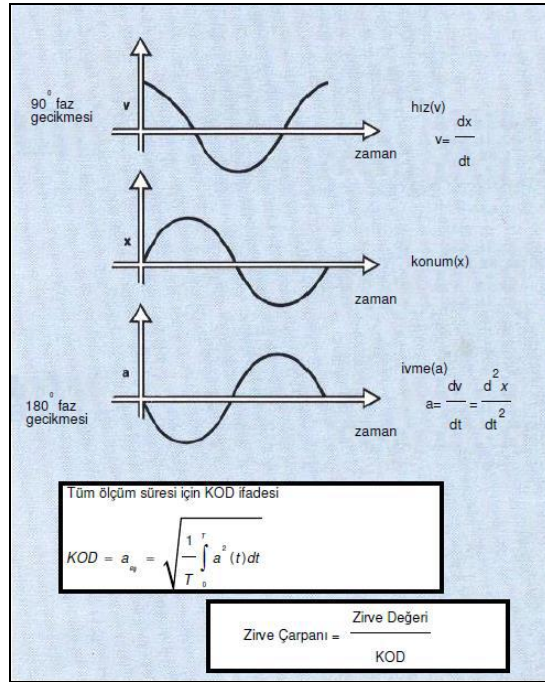
2.1 Titreşimlerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Titreşim, makineleşme başladığından beri insanların çok yakın olduğu bir konudur. Kimi aletler için gerekli olan titreşim (zımpara, hilti vs.), insan konforu ve güvenliği düşünüldüğünde minimuma indirilmesi gereken bir sorundur. Bu konuda yıllardır yapılan titreşimin pasif ve aktif kontrollü çalışmaları, birçok değişik alanda literatürde mevcuttur. Uçak iniş takımından gelen titreşim hareketi insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler bırakabilmektedir. Bu konuda değişik çalışmalar yapılmıştır. Fakat konfor algısı insandan insana farklılık gösterdiğinden, bu çalışmalarda titreşim sınırları farklılık gösterebilmektedir [2].

İnsan vücudu günlük hayatta makinalar, el aletleri, otobüs, minibüs, tren gibi taşıma araçlarını kullanırken vb. uzun ya da kısa süreli mekanik titreşimlere maruz kalır. Bu mekanik titreşimler insan yapısı için sanki ses titreşimleri dinlemekten zevk duyduğumuz müzik veya rahatsız edici gürültü olabileceği gibi, rahatlatıcı veya rahatsız edici olabilir. Devamlı surette kuvvetli ve uzun süreli mekanik titreşimler insan vücuduna kalıcı zararlar dahi verebilir. Bu sebeplerden dolayı insan vücudunun mekanik titreşimlere verdiği cevapların bilimsel olarak araştırılma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç neticesinde yapılan araştırmalar sonucunda ISO insan titreşimleri standartları geliştirilmiş ve uygulanmaya başlamıştır [22].

2.1.1 ISO İnsan Titreşimleri Standartları Parametreleri ve Titreşim Seviyeleri

İnsan vücudu titreşim üreten bir mekanik aletle temas ettiğinde sabit bir referansa göre titreşimin etkisiyle konumu değişir. Bu konum değişikliği titreşimin şiddetinin bir ölçüsü olarak kullanılabilir. Titreşimler ayrıca hız ve ivme parametreleriyle de tanımlanabilirler. Konum değişimi, hız ve ivme arasındaki ilişki sinüzoidal bir titreşim için Şekil 2.1’de verilmiştir [22].



Şekil 2. 1 Sinüzoidal bir titreşim için konum değişimi, hız ve ivme arasındaki ilişki [22]

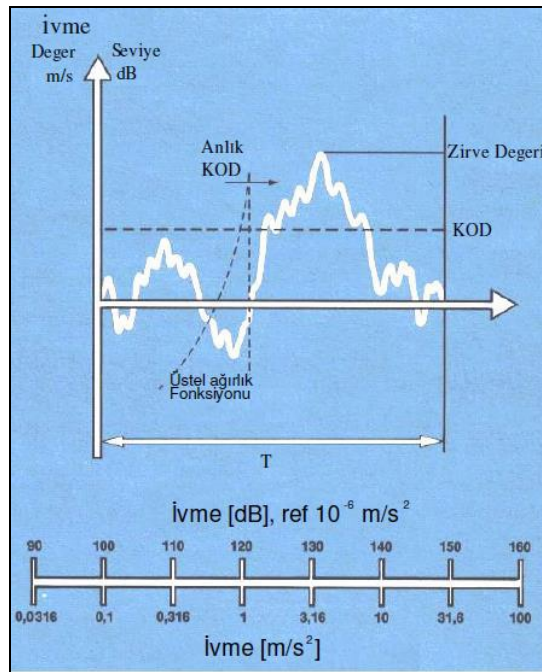
ISO standartlarının uygulanması için ivme değerleri titreşim mertebelerini belirleyici faktör olarak ölçülür. T ölçüm zamanı olmak üzere birkaç farklı büyüklük titreşimi tanımlamak için kullanılabilir.

Zirve Değeri: İvmenin ölçüm zamanı T içindeki anlık maksimum değeridir. Özellikle ani şokların şiddetlerinin tanımlanmasında iyi bir ayrıdır.

İvmenin Karesel Ortalama Değeri (KOD): Anlık ivme değerlerinin karelerinin ortalama değerinin kareköküne eşittir. KOD nispeten uzun bir zaman aralığında hesaplanır ve titreşimin enerji içeriği ile ilintili bir ivme değeri verir. Bu yüzden çoğu zaman eşdeğer ivme değeri a_{eq} (m/s^2) veya eşdeğer ivme seviyesi L_{eq} (desibel) olarak adlandırılmış olup Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Anlık Karesel Ortalama: Eğer KOD ölçüm süresine göre düşük bir zaman aralığında hesaplanırsa buna anlık karesel ortalama denir. Bu değer hesaplanırken ivmeler üstel olarak ağırlıklandırılır. Bunun anlamı son ölçülen değerlere öncekilere göre daha fazla ağırlık verilmesidir.

Zirve Çarpanı: Zirve değeri ile tüm ölçüm süresi içerisinde hesaplanan KOD arasındaki orandır. Bir titreşim ne kadar ani (impulsive) ise zirve çarpanı değeri o kadar yüksektir. Anlık titreşimler, anlık olmayan titreşimlere nazaran daha tehlikeli kabul edilirler ve zirve çarpanı değeri bu zararlı titreşim içeriklerinin belirlenmesinde iyi bir ayraçtır [22].



Şekil 2. 2 Farklı titreşim büyüklükleri [22]

İvme değeri (m/s^2) ki bu durumda a_i ile gösterelim veya ivme seviyesi (L_d ile gösterelim), desibel (dB) olarak ölçülebilir. Bu ikisi arasında $10^{-6} (m/s^2) = 0$ dB gibi bir referans düzeyi tanımlandığı takdirde bir a_i ivmesi aşağıdaki gibi bir L_d seviyesi olarak gösterilebilir:

$$L_d \text{ (dB)} = 20 \log_{10} [a_i / a_{ref}] \quad (2.1)$$

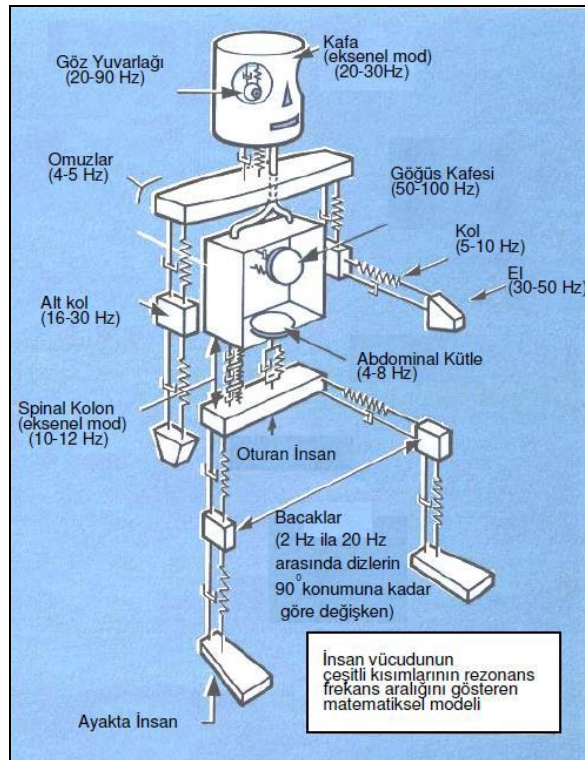
Burada, L_d = Desibel olarak titreşim seviyesi

$a_i = m/s^2$ cinsinden ölçülen ivme, a_{ref} = referans seviyesi = $10^{-6} m/s^2$ 'dir.

2.1.2 İnsan Vücudunun Frekans Cevabı

Bir makinanın mekanik titreşimi, makinanın çalışan parçalarından kaynaklanır. Makinanın her parçasının hareketiyle ilişkili belli bir frekansı vardır ve insan vücuduna iletilen genel titreşim bunların bileşimidir. İnsan vücudu ise her frekanstaki titreşimlere eşit şekilde duyarlılık göstermediği için bu husus büyük önem arz etmektedir.

İnsan vücudunu mekanik bir sistem gibi düşünerek niçin ve neden bazı frekanslara daha duyarlı olduğunu anlayabiliriz. İnsan vücudu, bir makine gibi vücudunun her bir parçasında farklı frekans hassasiyetine sahiptir. Buna ek olarak insan vücudunun tümüyle simetrik olmaması işleri daha da zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı çıkarılabilecek en tabi sonuç aynı titreşime tamamen aynı tepkiyi gösteren iki insan yoktur. Buna rağmen insan vücudunun titreşim cevabını simule edebilen yeterli bio-mekanik modeller geliştirilmiştir. Şekil 2.3’de büyük ölçüde basitleştirilmiş, her bölümün ayrı ayrı kütle ve yay-damper ikilileri ile temsil edildiği ve tüm vücut hatlarına ayrı frekans cevaplarının verildiği bir model görülmektedir [22].

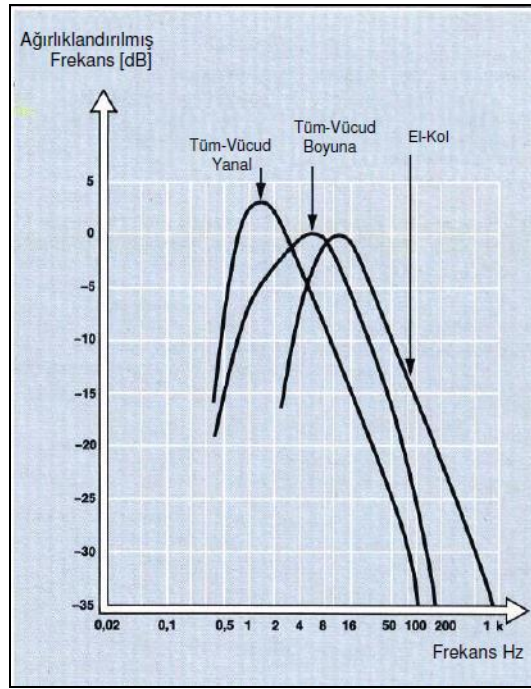


Şekil 2. 3 İnsan vücudunun fiziksel modeli [22]

2.1.3 Frekans Ağırlıklandırması

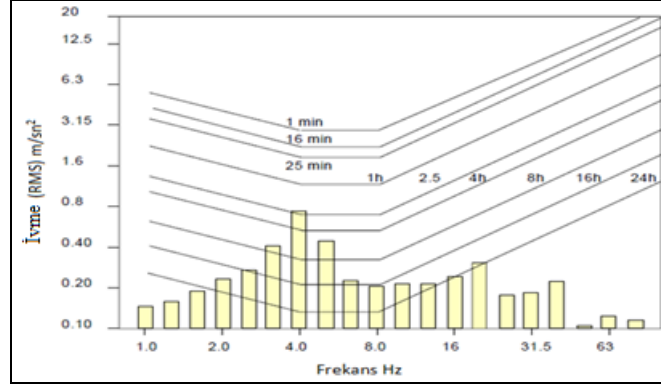
İnsan vücudunun fiziksel modeli farklı frekans ve yönlerden gelen titreşimlere farklı hassasiyet gösterir. Bu konuyu dikkate alarak yaptığı çalışma sonucu ISO (International Standards Organisation) Şekil 2.4’de görülen üç eğriyi önermiştir.

İnsan kafasından ayağına doğru olan doğrultuda insan vücudu 4-8 Hz frekans aralığındaki titreşime duyarlıdır. Ön veya arkasına doğru olan eksen veya omuzları doğrultusunda ise 1-2 Hz frekans aralığındaki titreşime duyarlıdır. 0.1-0.63 Hz frekans aralığı ise mide bulantısı deniz veya araba tutmasının nedeni olarak kabul edilir. Bu konu birazda insanın yaşı, korkuları vb. gibi psikolojik faktörlere de bağlı olması bu konudaki çalışmaları zorlaştırmaktadır [22].



Şekil 2. 4 İnsan vücudu için ağırlıklandırılmış frekans eğrileri [22]

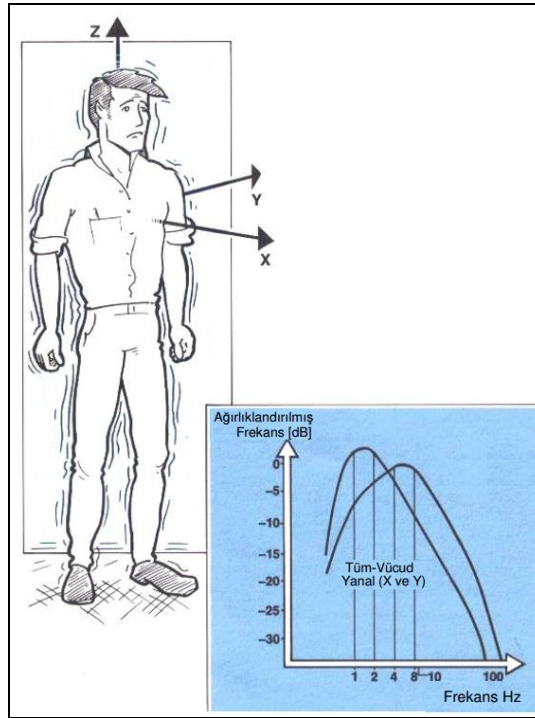
ISO (International Standards Organisation) 2631 kriterleri, konfor konusunun her ne kadar insandan insana göre göreceli bir durum olduğunu bilse de bazı önerilerde bulunmaktadır. İnsan bedeninin tümünün titreşime maruz kalması durumunda titreşimin büyüklüğüne bağlı olarak maruz kalabileceği süreyi sınırlamış olup Şekil 2.5’de gösterilmektedir [22].



Şekil 2. 5 İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşime göre rahatsızlık sınır eğrisi [22]

2.1.4 Vücut-Frekans Ağırlık Eğrisi Ve Referans Eksen

İnsanın maruz kaldığı vücut titreşimleri, merkezi insan kalbinde olan dik bir eksen takımının tüm doğrultuları boyunca ölçülmelidir. Düşey yön Z ile belirtilen doğrultudur. İnsan bu doğrultuda en çok 4-8 Hz frekans aralığındaki titreşimlere duyarlıdır. İnsanın X ve Y doğrultularındaki titreşimlere olan duyarlılığı birbirlerinden pek farklı olmayıp, bu doğrultularda en çok 1-2 Hz arasındaki titreşimlere karşı hassastır. İnsan vücudunun maruz kaldığı titreşimden kaynaklı oluşan frekans eğrisi ve referans koordinat sistemi Şekil 2. 6'da gösterilmektedir.



Şekil 2. 6 İnsan vücudu için frekans eğrisi ve referans koordinat takımı [22]

0.1 Hz-0.63 Hz frekans aralığı genelde mide bulantısı, deniz veya araba tutması duygusunun nedeni olarak kabul edilir. Ancak, bu frekans aralığındaki titreşimlere maruz kalan insanların verdikleri cevap yalnızca titreşimin kendisine bağlı değil, aynı zamanda görüş, kokular, yaş gibi faktörlere de bağlıdır ve bu durum insan üzerindeki titreşim çalışmalarını zorlaştırmaktadır [22].

2.2 Taşıt Modelleri

Sistemleri modellemenin en önemli aşaması kullanılacak modelin fiziksel yapısının ortaya çıkarılmasıdır. Fiziksel sistemleri belirli yaklaşımlarla modellemenin amacı, sistem dinamiğini etkileyen faktörleri belirlemek ve en uygun tasarım için çözümler bulmaktır. İlgilenilen sistemler genellikle dinamik sistemler olduğundan elde edilen denklemler de diferansiyel denklemler olacaktır. Sistemlerin önceden belirli yaklaşımlarla modellenmesi tasarım açısından oldukça büyük avantajlar sağlar. Fiziksel sistemler, matematiksel olarak modellenirken sistem ile ilgili fiziksel yasalardan faydalanılır. Sistemler modellenirken sistemin karakteristiğinin belirlenmesi için sistemle ilgili olan fiziksel olayların idealleştirilmesi gerekir. Çok karmaşık yapıya sahip fiziksel bir sistem bile uygun kabullerle basit bir şekilde modellenebilir.

Sistemlerin fiziksel olarak modellenmesindeki amaç, sistemlerin verecekleri cevapların önceden belirlenmesidir. Fiziksel olarak modellenen sistem için bir sonraki aşama matematiksel modelleme olacaktır. Mekanik sistemler, sistemin matematiksel modelinden elde edilen diferansiyel denklemlerin lineer olmasına veya olamamasına göre lineer sistem veya lineer olmayan sistem diye adlandırılrsa da gerçekte tamamen lineer olarak ifade edilebilen sistem yoktur. Yani bütün mekanik sistemler gerçekte lineer olmayan sistemlerdir. Sistemi lineerleştirmek bazı kabuller yapmamıza sebep olur. Buda çözüm hassasiyetini düşüren bir faktördür. Sistemlerin lineerleştirilmesinin nedeni lineer diferansiyel denklemlerin hemen hemen hepsinin çözümü gerçekleştirilebilirken lineer olmayan denklemler için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Bu yüzden sistemlerin çözümünün kolaylaştırılması amacıyla lineerleştirme yoluna gidilir [2].

2.3 Uçakların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi

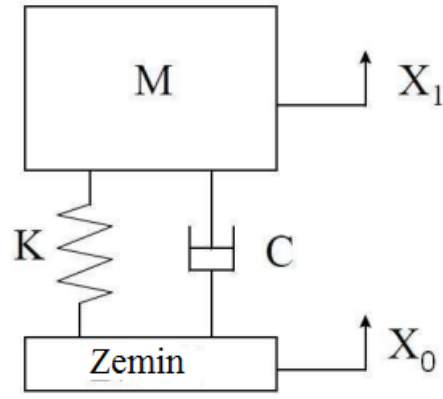
Uçağın gövdesinin hareketinin ortaya çıkardığı sonuçların incelenmesi için ilk olarak uçakların fiziksel modeli oluşturulmalıdır. Bir uçak altı serbestlik derecesine sahiptir.

Uçağın dinamik bir sistem olarak en iyi şekilde incelenebilmesi için, süspansiyonları üzerinde yaptığı hareketlerin özelliklerine bakmak gerekir. Uçağın dinamik davranışlarını genelde süspansiyonlar belirler. Uçakların seyri esnasında, seyir konforuna etki eden en önemli elemanlar süspansiyonlardır. Uçak gövdesinin devrilmesine engel olmak, tekerleklerin yolla temasını sağlamak, uçak gövdesinin yol bozukluklarından etkilenmesini engellemek, aksın yolu takip edebilmesi için düşey uyumluluk göstermek, tekerleklerin aks üzerinde dengeli olarak durmasını sağlamak amortisörlerin temel işlevleri arasında yer alır. Süspansiyonlar kendi arasında üç sınıfta incelenebilir.

- Pasif süspansiyonlar
- Yarı aktif süspansiyonlar
- Tam aktif süspansiyonlar

2.3.1 Pasif Süspansiyonlar

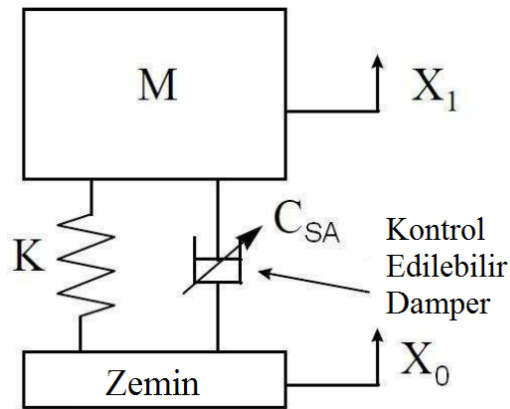
Pasif süspansiyonlar, zamana bağlı olmayan yay ve sönümleme özelliklerine sahip elemanlar içerir. Bu tip süspansiyonlar sıkışmış yayın enerjisini biriktirir ya da amortisör vasıtasıyla enerjiyi dağıtır. Amortisörlere dışardan herhangi bir enerji verilmez. Kendinden seviye ayarlamalı süspansiyonlar, havalı süspansiyon olarak da bilinen ve havalı bir yay vasıtasıyla yükteki değişimlere uyabilen diğer pasif süspansiyon çeşididir. Ağır kamyonlarda, otobüslerde ve az miktarda yolcu taşıyan küçük yolcu taşıtlarında kullanılır. Bir seviye kontrol valfi, süspansiyon yer değiştirmeyi istenen seviyeye getirmek için ayarlanır.



Şekil 2. 7 Pasif süspansiyon sistem modeli [23]

2.3.2 Yarı Aktif Süspansiyonlar

Bu tip süspansiyonlarda, süspansiyona dışarıdan uygulanacak bir kuvvet veya gönderilecek bir sinyal sayesinde sistemin yay ve sönümleme katsayıları ayarlanır. Yarı aktif süspansiyon sistemleri; yavaş aktif, alçak bant ve yüksek bant şeklinde gruplara ayrılır. Yavaş aktif sistemlerde, süspansiyonun sönümleme ve yay katsayısı seyir esnasındaki değişimlere cevap verecek şekilde ayarlanabilir.



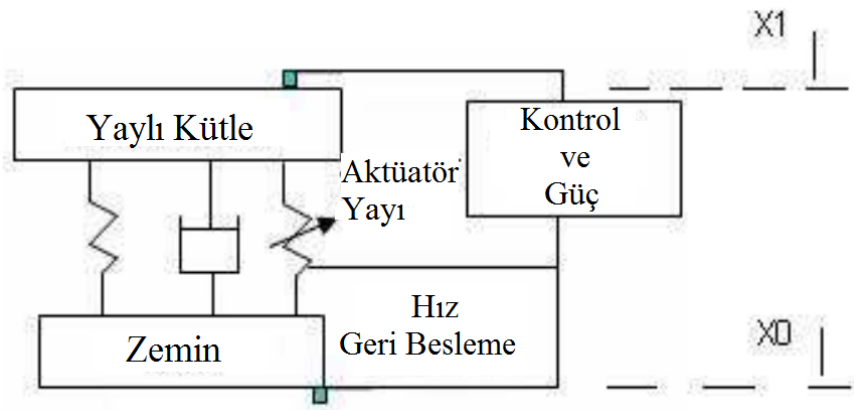
Şekil 2. 8 Yarı aktif süspansiyon sistem modeli [23]

2.3.3 Tam Aktif Süspansiyonlar

Bu tipteki süspansiyon sistemlerinde kuvvet üreteçleri denilen ve süspansiyon sistemi içinde gereken kuvveti üreten teleskopik geometriye sahip elektromagnetik cihazlar ya da hidrolik kontrollü silindirler bulunur. Dışardan gelecek bir kuvvet sistemi amortisörü harekete geçirir.

Süspansiyon sistemlerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar, taşıtın seyir performansını arttırırken, taşıtın yol tutuşunda da aynı performansın sağlanabilmesini amaçlamaktadır. Süspansiyon kontrol edilirken, kontrol kuvvetleri sadece ihtiyaç duyulan zamanda uygulanır ve böylece seyir performansının arttırılması için diğer özelliklerin değiştirilmesi gerekmez.

Aktif süspansiyon sistemlerinin tasarımı yapılırken çoğu zaman taşıtın gövde hareketi ve y eksenli boyunca yaptığı kafa vurma hareketi esas alınır. Yolculara gelen ivmenin en iyi biçimde sönümlenebilmesi için taşıtın bu yönlerde yaptığı titreşimler incelenmelidir. Araç gövdesine frenleme esnasında gelen kuvvet sonucunda taşıtın gövdesi ileri kafa vurma hareketi yapar. Kontrolcü, sönümleme kuvvetini arttırarak veya zıt kuvvetler uygulayarak bu hareketi engelleyebilir. Yoldaki bozukluklardan dolayı tekerlekler üzerinde oluşan dinamik yükler, aktif süspansiyonlar tarafından azaltılarak araç gövdesinin yol tutuş performansı da arttırılmış olur. Yol düzlemindeki taşıtlara etki eden titreşimlerin kaynağı, yolun geometrik profili ve taşıtın hızıdır. Taşıtların yol üzerindeki hareketi esnasında meydana gelen ivmeler taşıttaki bazı mekanik parçaların titreşmesine ve bağlantıların gevşemesine sebep olabilir. Bu titreşimler maksimum değerine rezonans bölgelerinde ulaşır. Yol bozukluğundan dolayı oluşan zorlayıcı kuvvetin frekansı, taşıtın çeşitli kısımlarının doğal frekansı ile çakışması durumunda taşıtta rezonans başlar. Bu oluşan rezonans titreşim, yolcuların seyir konforunu olumsuz yönde etkilediği gibi, taşıttaki birçok mekanik aksamında yıpranmasına, hatta kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. 9 Aktif süspansiyon sistem modeli [23]

MR SÖNÜMLEYİCİLER

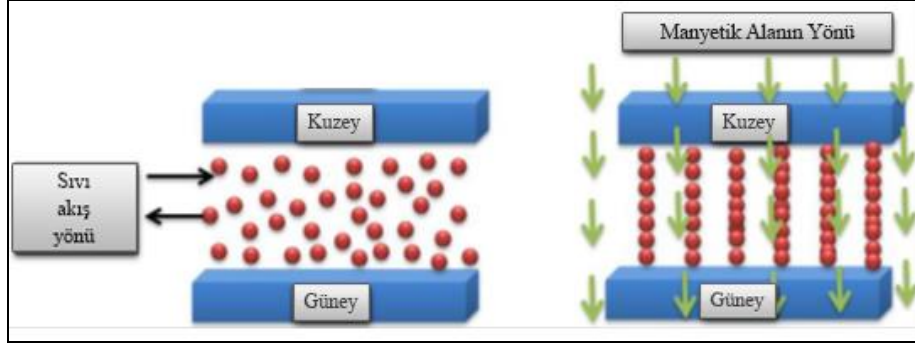
3.1 MR Akışkanlar

MR (Manyetoreolojik) akışkanların buluşu J. Robinow tarafından 1940'lı yılların sonlarında gerçekleştirilmiştir. MR akışkanın kontrol edilebilir içsel reolojik özelliklerinden dolayı akıllı akışkan olarak adlandırılmaktadır. Bu akışkanın en önemli özelliği uygulanan manyetik alana bağlı olarak viskozitesinde değişmesidir [2]. Diğer tip kontrol edilebilir akışkan ise Willis Winslow tarafından keşfedilmiş olan Elektoreolojik (ER) akışkanlardır. Bununla birlikte, MR sıvıları alanındaki araştırma programları ER akışkanları alanına kıyasla daha geniştir. MR akışkanların kontrol edilebilir reolojik özellikleri onların şok ve titreşim kontrol cihazlarına uygulanması için uygun hale getirir. Bu sıvıların reolojik özellikleri esnekliği, plastiklik ve akışa direnci ile ilgilidir. Bu sıvıların kontrollü manyetik alana uygulanması akışa dirençlerini artırır böylece şok Emilimi artar. Tersine, manyetik alan kaldırıldığında, normal hallerine geri dönerler. Bu temel özellik, yarı aktif titreşim kontrol yaklaşımlarında kullanılabilir.

Manyetoreolojik sıvı temelde, sıvı ortam içerisinde dağıtılmış manyetize parçacıklardan imal edilmiş bir birleşim olup, stabilizatör ile taşıyıcı yağ olarak adlandırılır. Sıvı ortam genellikle yalıtım özelliklerine sahip organik ya da sulu bir solüsyondur. MR sıvısı hazırlamak için sıvı ortam olarak genellikle, petrol esaslı yağlar, silikon yağı, kerozen, mineral yağları, sentetik hidrokarbon yağları, polyester, polieter ve su vb kullanılmıştır. Belirli bir uygulama için kullanılan sıvı ortam iyi bir ısı kararlılığına sahip olmalıdır. Taşıyıcı yağ içinde dağılmış parçacıklar 1-10 µm aralığında boyuta sahip demir bazlı

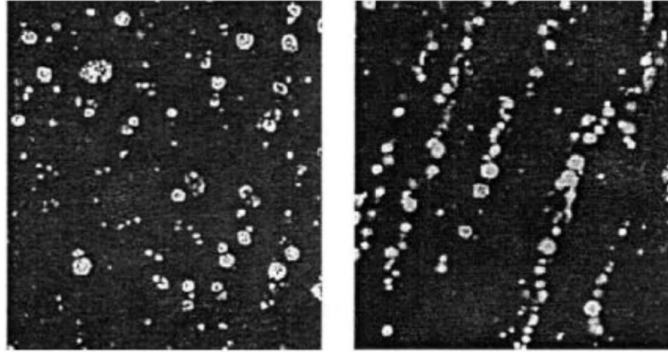
mikron boyutlu parçacıklardır. Bu parçacıklar manyetik olarak yumuşaktır bu da manyetik alan kaldırıldığında polarize durumdan normal duruma geçişlerine yardımcı olur. En yaygın olarak kullanılan manyetize parçacıklar karbonil demir tozu esaslıdır ki bu da demir pentakarbonil'in ayrışmasının ürünüdür. Bununla birlikte, demir tozlarının yüksek yoğunluğu (7.8 g/cm^3) taşıyıcı sıvı ile karşılaştırıldığında parçacıkların tabana oturduğu oranda akışkanın yeniden dağılmasına bazı kısıtlamalar teşkil etmektedir. Araştırma, taşıyıcı sıvının dağılmasını kolaylaştırmak amacıyla parçacıkların boyutunu azaltarak nano-ölçekli olmaları için devam etmektedir. MR sıvı bileşimini tamamlayan üçüncü unsur parçacıkların birbirine yapışmasını ve zamanla tabana yerleşmesini önleyen, yığinsal istikrarın yanı sıra tortul istikrarının korunması işlevini gören bir dengeleyicidir. Kalitesiz partiküllere daldırılmış bir sıvıda, silika jeli dengeleyici olarak kullanılır hâlbuki oleik asit gibi iyonik kayganlaştırıcılar iyice dağılmış partiküller için kullanılmaktadır [1].

Manyetoreolojik sıvılar eşsiz, manyetik alana maruz kaldıklarında serbest akışkan durumdan oldukça yapışkan bir yarı-katı duruma dönüşme özelliğine sahiptir. Tipik bir MR sönümleyici cihazında, akım sıvıya bitişik olarak yerleştirilmiş bobinden geçtiğinde, taşıyıcı yağ içinde rastgele dağılmış bir haldeki demir partikülleri, uygulanan manyetik alan ile dipol momenti kazanır. Bu işlem, sıvı akış yönüne dik olarak demir partiküllerinden bir zincir oluşturur dolayısıyla kısıtlanmış olur. Bu etki, manyetik alan muhafaza edildiği sürece devam eder. Manyetik alan kaldırıldıktan sonra, demir parçacık zincirler kırılır ve sıvı normal durumuna geri döner. Bu durum Şekil 3.1'den görülebilir. Bu dönüşüm milisaniyeler içinde olur ve geri çevrilebilir, bu da sıvıya manyetik alan kalktığında normal durumuna dönme olanağı sağlar. Bu özellik, MR sıvısı tabanlı cihazlarda değişken sönümleme sağlamak için, özellikle şok ve titreşim hafifletme uygulamalarında kullanılabilir [1].



Şekil 3. 1 MR sıvısının manyetik alana tepkisi [1]

Şekil 3.2’de ise MR sıvısının elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 3. 2 MR sıvısının elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı (Sol-manyetik alan yokken demir parçacıklarının durumu, sağ-manyetik alan varken demir parçacıklarının durumu) [2]

Manyetik alanın yokluğunda, MR sıvılar oda sıcaklığında 0.1 ile 1 Pa arasında viskoziteye sahip olan Newton sıvıları gibi davranırlar. 150-200 kA/m bir manyetik alan uygulaması ile 50-100 kPa dinamik akma gücü elde edilebilir. Bu durum da ani darbelerin hızla dağıtılması gerektiği uygulamalar için çok önemlidir. MR sıvısının tercih edilmesinde sahip olduğu bazı avantajlar etkili olmaktadır. MR sıvısı, hızlı cevap süresi, yüksek dinamik akma gerilmesi, düşük plastik viskozite, geniş sıcaklık bandında çalışabilme, zor çökelme, kolay ve homojen karışım oluşturma gibi özelliklere sahiptir [1]. Bu sıvıların geniş sıcaklık bandında çalışma aralığı akma dayanıklılığının minimal gücüne göre -40 °C ile 150 °C’e kadar uzayabilir. Genel olarak, bu akışkanlar imalat işlemi sırasında kirleticilerden etkilenmezler. Dağınık demir parçacıkları nedeniyle, bu sıvıların yoğunluğu 3-4 g/cm³ arasında değişir. MR etkisi üzerinde çalışabilen cihazlar genellikle 2-50 Watt güç kaynağı gerektirir. MR sıvılar, manyetik veya elektrik alana maruz kaldıklarında sıvı halden yarı katı hale birkaç milisaniyede geçebilir ve etkinin

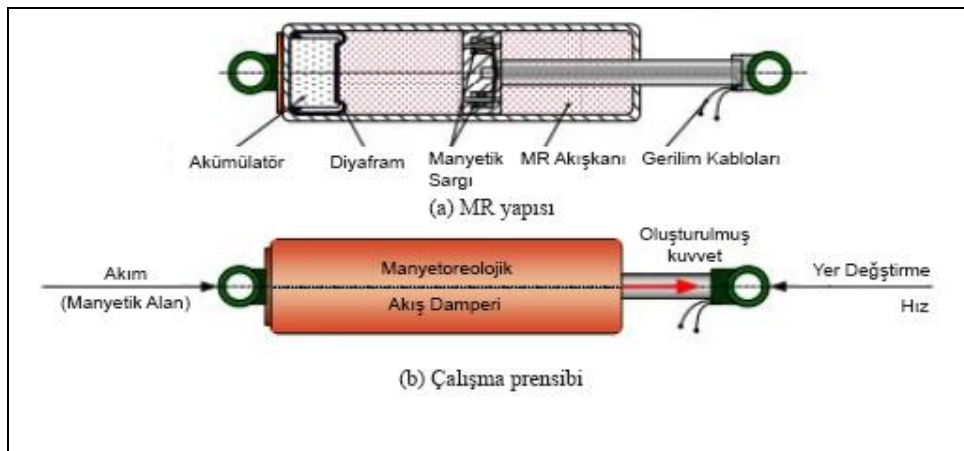
kalkmasıyla aynı hızda eski durumuna geri dönebilirler. Bunun yanında MR sıvılar zehirli olmayıp sıvı kararlılığını sağlamak üzere çeşitli katkı maddeleri güvenle kullanılabilir. Kontrol edilebilir akışkanların diğer türü olarak araştırılan ER sıvısının ise MR sıvısında olan avantajların bazılarının olmaması, düşük alan ve yüksek gerilime ihtiyaç duyması vb. gibi dezavantajlarının bulunmasından dolayı, ER sıvısı MR sıvısına göre arka planda kalmıştır. ER sıvısı ve MR sıvısının özellikleri karşılaştırmalı olarak ayrıntılı bir şekilde Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 MR sıvısı ve ER sıvısının karşılaştırılması [23]

ÖZELLİK	MR sıvısı	ER Sıvısı
Maksimum akma gerilmesi	50 - 100 Kpa	2-5 Kpa
Maksimum manyetik alan	250 kA/m	4 kV/mm
Plastik viskozite	0.1 - 10 Pa.s	0.1 - 1 Pa.s
Çalışma sıcaklık aralığı	-40 °C - +150 °C	+10 °C - +90 °C
Kararlılık	Kirlilikten etkilenmez	Kirlilikten etkilenir
Cevap süresi	Milisaniye	Milisaniye
Yoğunluk	3 – 4 g/cm ³	1 – 2 g/cm ³
Dinamik vizkozite/akma gerilmesi	5e-11 s/Pa	5e-8 s/Pa
Maksimum enerji yoğunluğu	0.1 J/cm ³	0.001 J/cm ³
Güç tüketimi	2 – 50 V, 1-2 A	2000 – 5000 V, 1-10 mA

3.2 MR Damper Modeli

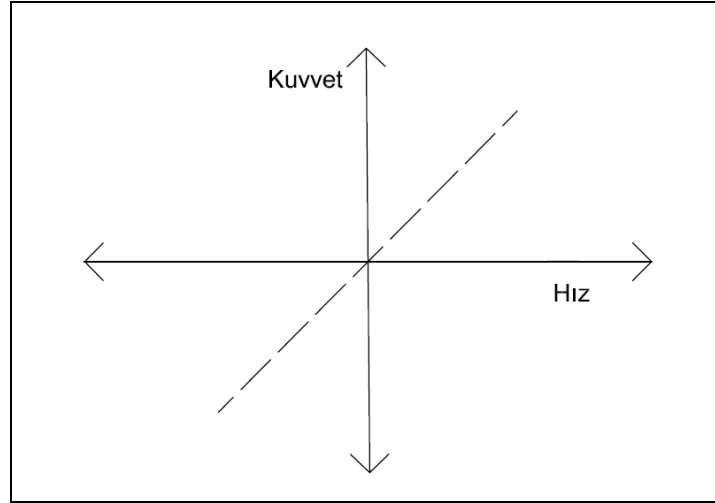
Yarı aktif sönümleyici olan MR damper, piston, MR sıvısı, akümülatör ve manyetik sargıdan oluşur. MR sönümleyicinin fiziksel modeli Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3. 3 MR damperin fiziksel modeli [1]

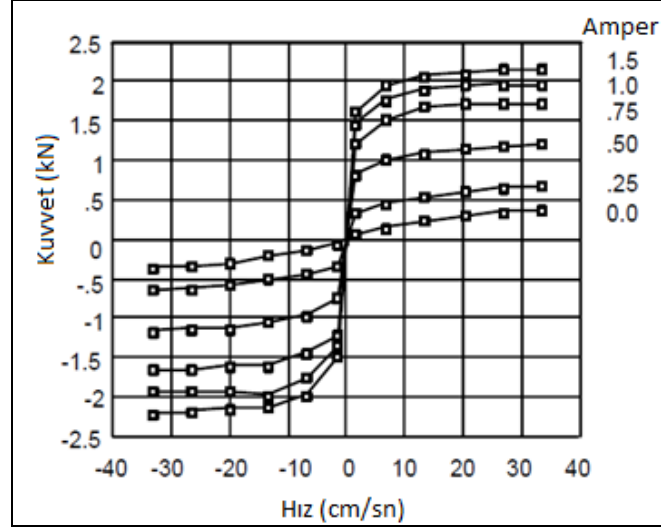
Taşıyıcı sıvı içerisine mikron seviyede manyetik parçacıklar eklenerek MR sönümleyici içinde bulunan MR sıvısı elde edilir. Taşıyıcı sıvı olarak genelde su, silikon bazlı yağ veya petrol bazlı yağ kullanılır. Manyetik parçacık olarak ise genellikle demir kullanılır. MR sönümleyici içinde bulunan MR sıvısı pistonun hareketiyle, pistonun ucunda bulunan boşluktan akmaya zorlanır. Pistonun ucundaki boşlukta aynı zamanda elektromıknatıslar bulunmaktadır. Bu elektromıknatıslar manyetik alan oluşturmazsa MR sıvısı normal akışkan özelliği gösterir. Fakat elektromıknatıslar manyetik alan oluşturursa, MR sıvısını boşluktan geçerken, içinde bulunan manyetik parçacıklar sıralı bir şekilde dizilerek sıvının viskozitesini değiştirir ve olduğundan daha viskoz bir sıvıymış gibi davranmasını sağlar. Bu da MR sönümleyicinin oluşturduğu sönüm kuvvetinin değişmesini sağlar. Bunun için gerekli güç miktarı oldukça düşük olup bir akü ile bile sağlanabilir. Ayrıca herhangi bir sebepten dolayı güç kesilirse MR sönümleyicinin pasif sönümleyici özelliği göstermesi, emniyet açısından önemli bir özelliğidir [2].

Lineer bir pasif sönümleyicinin sönüm kuvveti hızla orantılı olarak değişir. Yani verilen bir hıza karşı tek bir kuvvet oluşur. Lineer bir pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi önceden belirlenebilir ve bir tanedir (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4 Pasif sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [2]

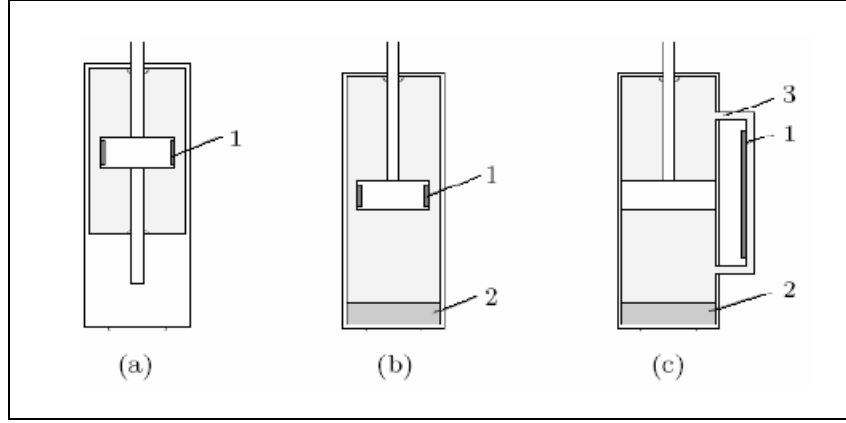
MR sönümleyici ise, oluşturulan manyetik alana bağlı olarak sürekli değişebilen bir sönüm kuvveti oluşturacaktır. Kuvvet-hız eğrisi ise manyetik alana bağlı olarak değişken olup Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 5 MR sönümleyicinin kuvvet-hız eğrisi [2]

MR damperlerin mevcut tasarımlarında, genel olarak bir silindir ve bu silindiri iki odacığa ayıran bir piston bulunmaktadır. Odacıklar arası sıvı geçişi, manyetik alanın uygulandığı bir kanaldan yapılırsa, manyetik alanın uygulanması ile MR sıvının görünür viskozitesi artacağından sıvı geçişi zorlaşacak, dolayısı ile akıma bağlı bir tepki kuvveti oluşturulmuş olacaktır.

MR sönümleyiciler iki odacık arasındaki sıvı geçişinin tipine göre farklı şekillerde üretilmektedirler (Şekil 3.6). (Şekil 3. 6(a))'daki modelde her iki odacık tarafında da mil bulunmakta ve dolayısı ile ısı genleşme ihmal edilirse basınç dengelemesi için akümülatöre ihtiyaç duyulmamaktadır. MR sönümleyicinin ikinci üretim şekli, çıkış mili tek tarafta olup, milin silindir içine girmesi ile odacıklar arasında oluşan basınç farkını dengelemek için bir akümülatör yerleştirilmiştir (Şekil 3.6(b)). Bu iki tip MR sönümleyicinin ortak özelliği, manyetik alanın piston üzerinde manyetik kutuplar oluşturulması ile elde edilmesidir. MR sönümleyicinin üçüncü ve son üretim şekli ise, diğerlerinden farklı olarak odacıklar arası MR sıvı akışı silindir içinde değil, bir yan geçiş (by-pass) kanalı yardımı ile sağlanır. Bu tip MR sönümleyicide kontrolün gerçekleşmesi, yan geçiş kanalı üzerinde uygun bir manyetik alan oluşturulması ile yapılabilmektedir (Şekil 3.6(c)) [21].



Şekil 3. 6 MR sönümleyici sıvı geçişi tiplerine göre tasarım şekilleri, (a) Çift milli, (b) Tek milli ve akümülatörlü, (c) Yan geçişli, (1- Manyetik alanın oluştuğu kısım, 2- Akümülatör, 3-Yan geçiş kanalı) [21]

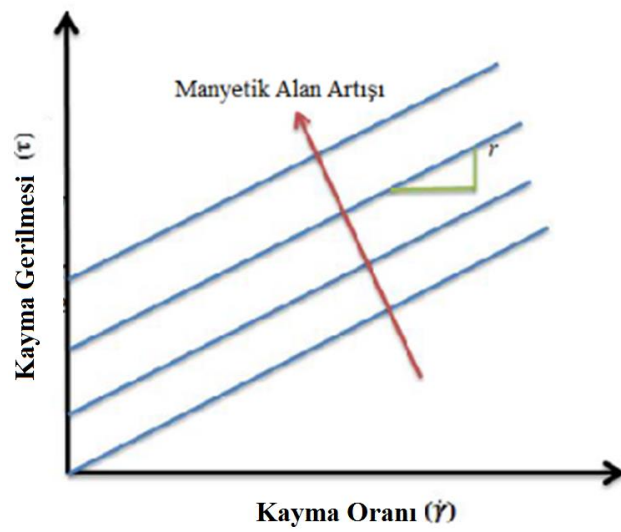
3.3 MR Sıvı Amortisörünün Histerik Karakteristiklerinin Dinamik Modellemesi

Manyetoreolojik amortisörler araç süspansiyonları, uçak iniş takımları, demiryolu süspansiyonları ve inşaat mühendisliğinin yanı sıra biyomekanik mühendisliği uygulamaları gibi çeşitli mühendislik uygulamaları için kullanılabilme potansiyelleri nedeniyle araştırmacıların ve mühendislerin odak noktasıdır. MR amortisör uygulamalarının çok çeşitli olmasının başlıca nedeni onların kontrol edilebilen akışkanlıklarıdır. Gerekli akışkanlığın elde edilmesi için akım seviyeleri çok düşüktür. Bu amortisörler mevcut değişimlere göre düşük akışkanlık durumundan yüksek akışkanlık durumuna hızlı geçiş sağlayan benzersiz özellikler gösterirler. Mekanik sistemler ile elektronik sistemler arasında hızlı ortak yüzey sağlayabilme yetenekleri yarı-aktif sistemler geliştirmek için kullanılabilir.

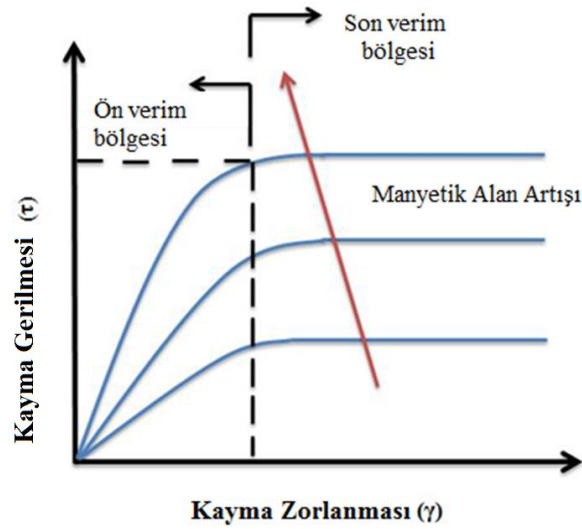
Verimli MR sıvısı tabanlı amortisörler dizayn etmek için, onların çalışma prensibini anlamak şarttır. Bu nedenle, kontrolcü tasarımı sorununu gidermek için bu amortisörlerin içsel histerik doğasını anlamak şarttır. Geçmişte çeşitli dinamik modeller kesin olarak MR amortisör davranışını tanımlamak için araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür. MR sıvı amortisörünün histerik karakteristiklerinin dinamik modellemesi; ilk olarak MR amortisörün temel prensibi, MR sıvısı tabanlı cihazların çalışma özellikleri ve MR amortisör modellerinin değerlendirilmesi ile açıklanarak yapılmıştır [1].

3.3.1 MR Sıvısı Tabanlı Cihazların Çalışma Özellikleri

Manyetoreolojik sıvı tabanlı cihazlar, manyetik alana bağlıdır ve manyetik alanın uygulanması üzerine, yüksek dinamik akış gerginliği üretebilmektedir. Literatürde bahsedildiği üzere, tipik MR sıvı cihazları için elde edilebilen esneme geriliminin 100 kPa civarında olması onları titreşim azaltma uygulamalarında kullanışlı hale getirir. Manyetik alanın etkisi altındaki MR sıvılarının davranışlarını anlamak için Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'deki gerilim gelişim eğrilerini analiz etmek gereklidir [1].



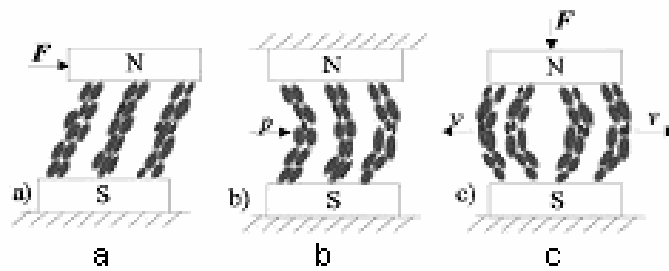
Şekil 3. 7 Verim-sonrası bölgede MR sıvısının davranışı [1]



Şekil 3. 8 Ön-verim ve verim-sonrası bölgelerinde MR sıvısının davranışı [1]

Yukarıdaki şekillerde, MR sıvısının kayma altındaki dinamik davranışının eğrisel tasviri şekilde gösterilmiştir. Sıvının iki ayrı bölge olan ön-verim ve verim-sonrası bölgedeki davranışını anlamak için kayma zorlanması; kayma gerilmesine ve kayma oranına karşı çizilir. MR sıvısı bu iki bölgede farklı mekanik özellikler sergiler. Kayma gerilmesi akma gerilmesinin altında olduğunda veya sınırını aştığında verim-sonrası bölgesinde olduğu belirtilmektedir. Oysa sıvının ön-verim bölgede olduğu belirgindir. Sıvı manyetik alan etkisi altında olduğunda, kayma gerilmesi değişiklik göstermektedir. Bunun iki bileşeni olup, biri viskoz kaynaklı bileşen, diğeri ise alan bağımlı gerilme bileşenidir. Alan bağımlı gerilme bileşeni, uygulanan alanla katlanarak değişir. MR sıvısı ön-verim bölgesinde doğrusal viskoelastik hareketi, verimli bölgede doğrusal olmayan viskoelastik hareketi ortaya çıkarır. Kayma gerilmesi akma gerilmesini aştığı zaman, sıvı verim-sonrası bölgesine girerek plastik davranış sergiler. MR sıvı tabanlı cihazlar oluşturmak için bu iki bölgede akışkanın reolojik özelliklerini anlamak önemlidir.

MR sıvılar üç farklı tipte çalıştırılabilir olup Şekil 3.9’da gösterilmektedir. MR sıvısının ilk çalışma modunda sıvıyı sınırlandıran plakalardan birine bir kuvvet uygulanır. MR etki, kayma gerilmesinden dolayı, sıvı plakanın hareketine karşı koyacak şekilde bir tepki kuvveti oluşturur ve bu “kesme modu” çalışma olarak adlandırılır (Şekil 3.9(a)). Bu tür çalışma genellikle MR fren ve kavramalarda görülür. MR sıvısının ikinci çalışma modu “akış tipi” çalışma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.9(b)). Bu çalışma modunda eğer sıvı üzerine bir basınç uygulanacak olursa, zincir yapı sıvı akışına engel olmaya çalışır ve bu durum genelde MR damperlerde görülmektedir. MR sıvısının son çalışma modu ise, “sıkıştırma tipi” çalışma olarak adlandırılır Şekil 3.9(c)). Bu çalışma modunda ise sınırlandırma plakalarına dik olarak bir kuvvet uygulanması durumunda, zincir yapıda küçük hareket kabiliyeti görülür.



Şekil 3. 9 MR sıvısının çalışma modları (a) Kesme modu (b) Akış modu (c) Sıkıştırma modu [21]

Amortisör, akış modu ve direkt kesme modunun birleşiminden oluşan karma bir modda çalışır. Silindir, bir piston ile ayrılmış üst bölme ve alt bölmeden oluşur. Silindirin iç duvarında ve pistonun dış duvarı arasında halka şeklinde bir boşluk vardır. Manyetik devre, piston ve silindirle birlikte kurulurken uygulanan akıma bağlı olarak belirli bir süre için manyetik alan da üretir. MR sıvısı aktivasyon bölgeleri boyunca aktığında, viskoz kuvveti elde etmek için manyetik alana maruz kalır. Bu şekilde, akım seviyesini belirli aralıklarla kontrol ederek, uygulamanın gerekliliklerine göre akışkanı sıkınatılamak ve yüksek dinamik verim gerilimleri elde edilebilir. Uçak uygulamalarında, bu cihazlar nominal akım seviyeleri için gerekli viskoz kuvvetleri üreterek, iniş sırasındaki aşırı titreşimleri azaltma potansiyellerini gösterebilirler.

3.3.2 MR Amortisör Modellerinin Değerlendirilmesi

MR amortisörün doğrusal olmayan histerik özellikleri kuvvet-hız ve kuvvet-yer değişim ilişkileriyle bağlantılıdır. MR amortisörler histerik davranışlar sergilerler ve onların değişken sönümleme uygulamalarında etkili biçimde tatbik edilebilmeleri için farklı modelleme teknikleri uygulanarak doğru tahminler yapılmalıdır. Kuvvet-hız karakteristiği, çeşitli sönümleme kuvveti ile piston hızı çizmektedir. Bu da verim-sonrası ve verim-öncesi olarak adlandırılan iki farklı bölgede tanımlanabilir. Gecikme döngüsünün şekli, uygulanan sinyallerin frekans, genlik ve akım gibi parametrelerin değişimlerine göre farklılık gösterir. Bugüne kadar birçok model etkili kontrol stratejileri geliştirilmesi adına MR amortisörlerin histerik davranışlarını doğru tahmin etmek için geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller uyarı koşulları için uygun olmalıdır. Sağlamlık, basitlik, doğruluk ve devredilebilme gibi ölçütleri karşılamalıdır. Özelliklerine göre MR amortisörler dinamik modeller ve yarı-statik modeller olarak iki ayrı grupta sınıflandırılabilir. Yarı-statik modeller MR amortisörlerin tasarımını sağlayabilmekte ama doğrusal olmayan histerik özelliklerini tahmin edememektedir. Yarı-statik modellerin olumsuz etkileri dinamik modeller tarafından engellenir. Bu sayede doğrusal olmayan gecikmeler belirlenilebilir ve tasarım süreci biraz daha kolaylaştırılmış olur. Dinamik modeller ayrıca parametrik dinamik model ve parametrik olmayan model olarak sınıflandırılabilir. Parametrik olmayan modelleme yöntemleri MR amortisörlerin davranışını belirlemede analitik yaklaşımı kullanır. Bu modeller

dayanıklıkları nedeniyle hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemler için kullanılabilir. Choi ve arkadaşları MR amortisörün geciken özelliklerini tahmin etmek için parametrik olmayan bir polinom model önerdiler. Bu modelde, MR amortisör kuvveti pistonun hızı açısından polinom fonksiyonu olarak belirtilir. Ancak polinomun sırası kuvvet-hız gecikmesini doğru yakalamak için deneme yanılma yöntemi ile tespit edilmiştir. Jin ve arkadaşları MR amortisörlerin yapısal kontrol problemleri ile başa çıkmak için black-box modelleme tekniğini önermişlerdir. Doğrusal olmayan black-box modelleme ve yarı-fiziksel modelleme arasındaki karşılaştırma rapor edilmiştir. Wang ve Liao tarafından önerilen yapay sinir ağı modeli, MR amortisörü modelleme ve davranışlarını kontrol etmede kullanılabilir; literatürde belirtildiği üzere besleme-ileri sinir ağları devam eden işlevler için çözüm bulabilir. Parametrik olmayan diğer modeller bulanık model, ridget model, dalgacık modeli ve çok fonksiyonlu modeli içerir.

Parametrik dinamik modeller, dinamik modellerin başka bir sınıfını temsil eder. Parametrik modeller yaylar ve amortisörler gibi öğeler topluğu olarak bir sistemi temsil eder ve MR amortisörün dinamik davranışını modelleme için parametre tanımlama prosedürü gerektirir. Modelin karmaşıklığı tespit edilen parametrelerin sayısına göre değerlendirilir. Parametrik dinamik modeller bouc-wen gecikmeli tabanlı modeller; biviscous modeller, sigmoid işlev tabanlı modeller, bingham model tabanlı dinamik modeller, viskoelastik plastik modeller, hiperbolik teğet işlevli modeller, eşdeğer modeller gibi çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Werely ve arkadaşları kuvvet-hız gecikmesi ve MR amortisörü enerji dağıtımını analizini tahmin etmek için dört farklı parametrik model uygulamaktadır. Bu modeller doğrusallaştırılmış eşdeğer viskoz sönüm model, doğrusal olmayan bingham plastik model, doğrusal olmayan biviscous model ve doğrusal olmayan biviscous histeretik modelleri içerir. Önerilen bingham plastik modeli amortisör kuvvet verim gücünü aştığında malzemenin ön-verim bölgesinin katı olduğu varsayılarak Newton sıvısı gibi akmaya başlar. Stanway önerdiği doğrusal olmayan biviscous modelinde, malzemenin ön-verim ve verim-sonrası bölgede plastik olduğunu ve ön-verim durumunda sönümlemenin verim-sonrası duruma göre önemli ölçüde yüksek olduğunu varsaymaktadır. Doğrusal olmayan biviscous modelin uzantısı olan doğrusal olmayan biviscous histerik model, ön-verim bölgesindeki gecikme olgusunu

tanımlayan dört parametrelili bir modeldir. Sigmoid fonksiyon tabanlı modeller kuvvet-hız ilişkisini betimlemek için simetrik ve asimetrik Sigmoid fonksiyonlarını kullanırlar. Bouc-Wen gecikme tabanlı dinamik modeller, yaygın olarak histerik özellikleri doğru şekilde tanımlamak için kullanılır. Spencer, MR amortisörlerin doğrusal olmayan davranışlarını doğru şekilde tahmin edebilecek bouc-wen gecikme modeline dayalı yeni bir model önerdi. Modelin kesinliği çalışma koşullarının durumuna göre doğrulanmıştır. Bouc-Wen, modelinde daha fazla değişikliklerin gerekliliğini belirtmiş, Dominguez ve arkadaşları tarafından dinamik hali artırmak için uygulanmıştır. Bu modeller, yapısal kontrol için yarı-aktif sistemler geliştirmede kullanılmıştır [1].

3.4 MR Sönümleyicilerin Matematiksel Modeli

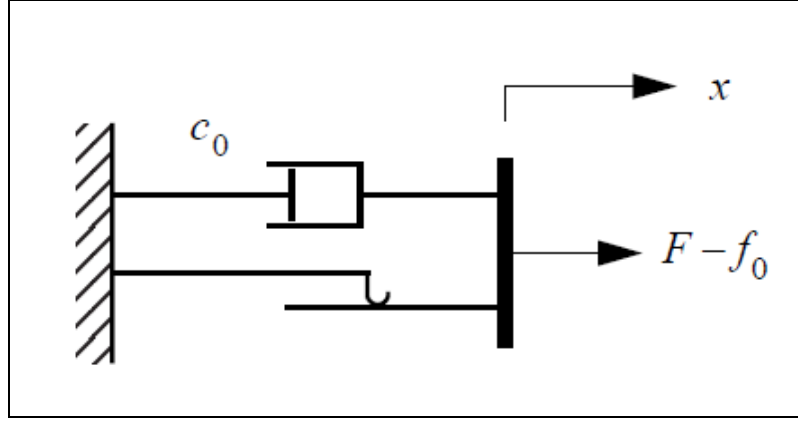
MR sönümleyici lineer olmayan histeresiz karaktere sahiptir. MR sönümleyiciyi modellemedeki amaç sahip olduğu bu lineer olmayan hareketi iyi bir şekilde yansıtan matematiksel modeli elde etmektir. MR sönümleyicinin hareketini iyi bir şekilde yansıtan birçok model geliştirilmeye çalışılmıştır. Genel olarak bu modeller parametrik ve parametrik olmayan modeller olarak iki kısımda ayrılırlar. Bunlardan parametrik olanlar, yay ve sönüm elemanı vb. gibi mekanik elemanlar kullanılarak oluşturulurlar. Parametrik olmayanlar ise, deney sonuçlarına göre elde edilirler. Parametrik modellere örnek olarak; gomota-filisko modeli, li modeli, bingham modeli, bouc-Wen modeli ve geliştirilmiş bouc wen modeli vb. verilebilir. Parametrik olmayanlara ise, yapay sinir ağları ve bulanık mantık kontrollü sinir ağları, adaptif bulanık mantık kontrollü sinir ağları vb. örnek verilebilir [2].

3.4.1 Bingham Modeli

Bingham plastik modeli basitliği sebebi ile yaygın olarak kullanılan ve non-lineer sınırları tanımlamada uzun yıllardır kabul görmüş modeldir. Bu model, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bir viskoz sönümleyici ve paralel bağlı bir Coulomb sürtünme elemanından oluşmaktadır [24]. Sistemin genel denklemi;

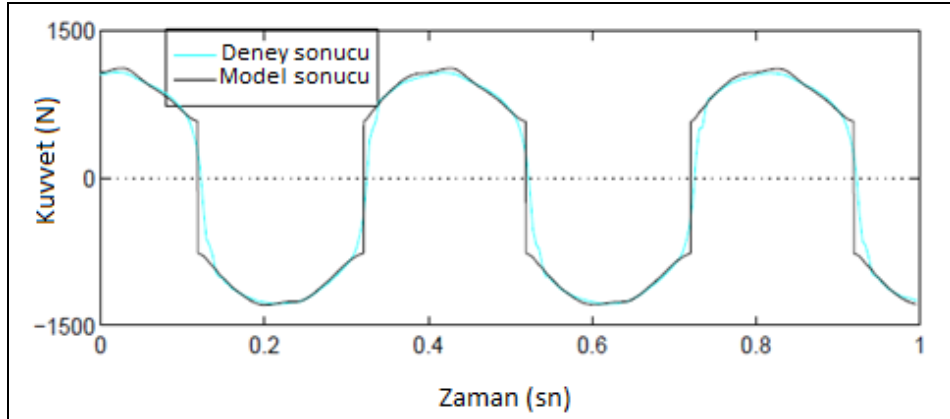
$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

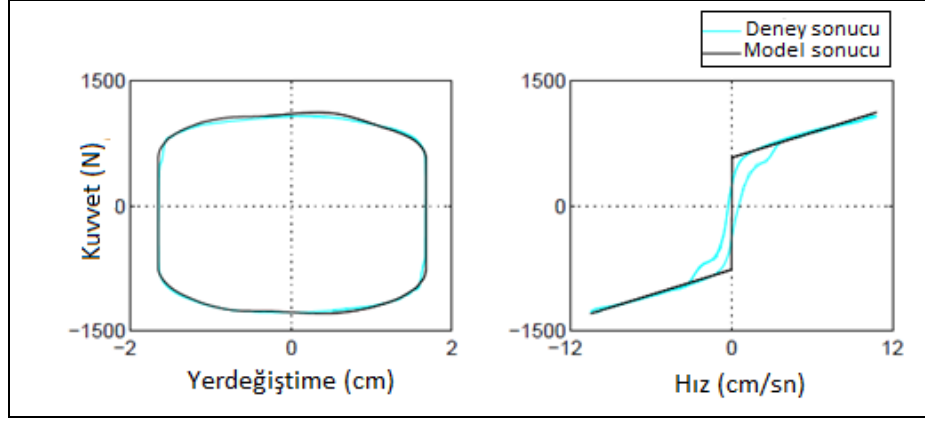


Şekil 3. 10 Bingham modeli [24]

Denklemdaki f_0 terimi sistemde bulunan akümülator dolayısıyla kuvvette yapılması gereken değişikliği, f_c kuvveti sürtünmeyi, c_0 ise sönümleme katsayısını ifade etmektedir [25]. Ancak bingham modeli MR sıvılarda görülen kayma incilmesi veya kayma kalınlaşması durumlarında MR sönümleyiciyi tam olarak modelleyememektedir. Bu olgu Herschel-Bulkley Modeli ile ifade edilmektedir. Spencer vd. 1996 yılında yaptıkları çalışmada deneysel sonuçları, bingham modelini kullanarak elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görüldüğü üzere, bingham modeli MR sönümleyicinin hareketini modellemekte yetersiz kalmaktadır [24].



Şekil 3. 11 Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]



Şekil 3. 12 Bingham modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]

3.4.2 Bouc-Wen Modeli

MR sönümleyicinin lineer olmayan hareketinin modellemede kullanılan diğer bir model bouc wen modelidir (Şekil 3.13).

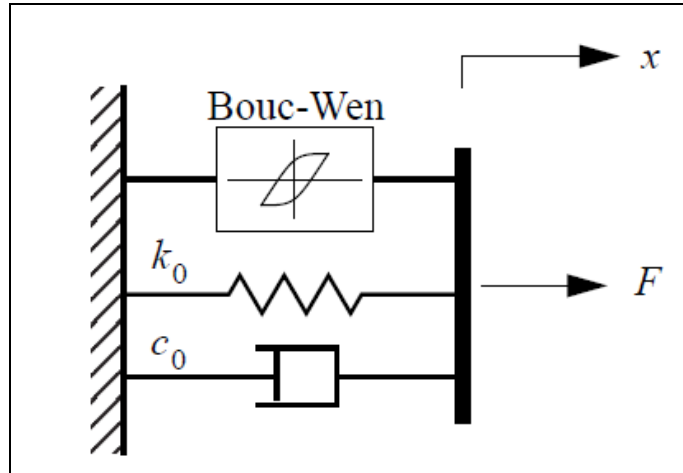
Burada F kuvveti;

$$F = (c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + a_h z \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Hesaplanabilir değişken z ise;

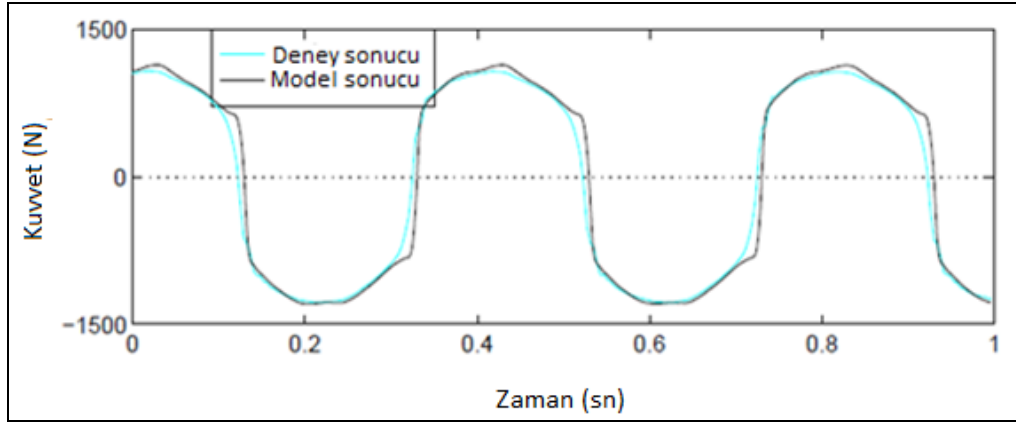
$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

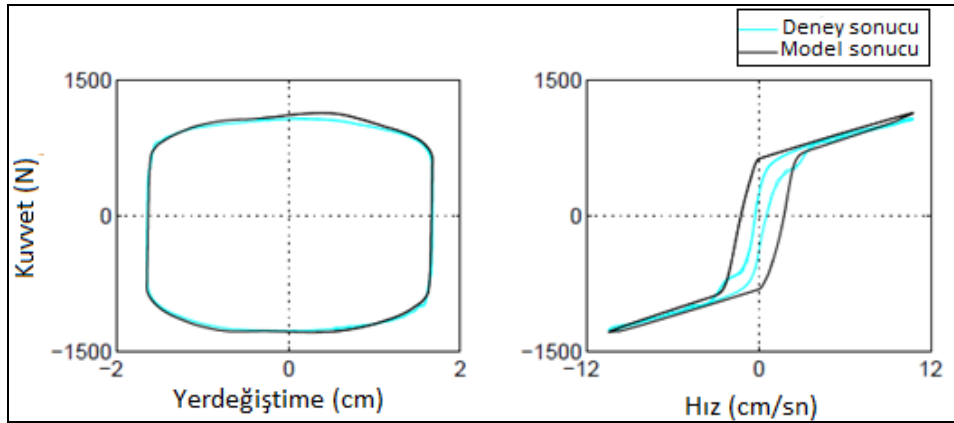


Şekil 3. 13 Bouc-Wen modeli [24]

Bu modelde; γ, A, β MR sönümleyicinin histeresiz karakterinin tanımlanmasında kullanılan ve deneysel verilerle elde edilen sabitlerdir. Bunlara ek olarak f_0 akümülatör basınç kuvveti, x yer değiştirme, $\dot{x}$ hız ve k_0 ise lineer yayın katsayısıdır.



Şekil 3. 14 Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]

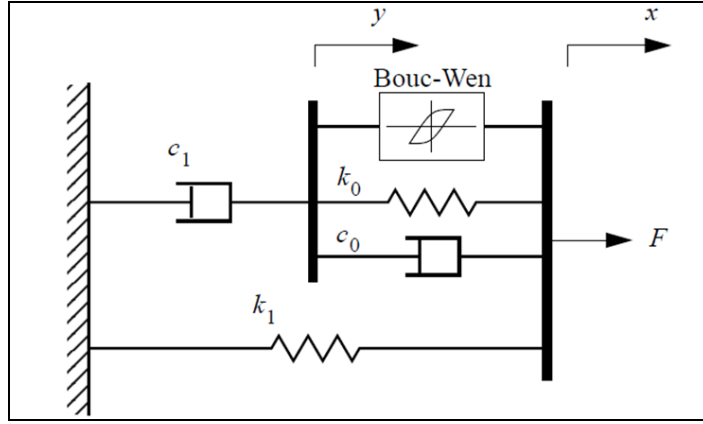


Şekil 3. 15 Bouc-Wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’den de görüldüğü üzere bouc wen modeli MR sönümleyicinin hareketini olumlu bir şekilde modellemektedir. Fakat bingham modeline göre iyi bir sonuç verse de yine de bingham modelinde olduğu gibi kuvvet-hız grafiğine bakıldığında hata oranı yüksek olduğu anlaşılmaktadır [24]. Bu yüzden iyileştirilmesi gerekmektedir. Bouc-Wen modelinin gerçeğe daha yakın sonuçlar alabilmesi için çalışmalar yapılmış ve geliştirilmiş bouc-wen modeli ortaya çıkmıştır.

3.4.3 Geliştirilmiş Bouc-Wen Modeli

Bu model aslında bouc-wen modeline yakındır fakat bouc-wen modelinin MR sönümleyicisinin daha gerçeğe yaklaşması için bazı düzeltmeler eklenerek sistemin davranışı modellenmiştir. Bouc-Wen modeline bir sönümlleme elemanı ve bir yay Şekil 3.16'daki gibi eklenerek yeni bir model oluşturulmuştur.



Şekil 3. 16 Geliştirilmiş bouc-wen modeli [24]

Sistemin genel denklemleri (3.4) ile (3.7) arasında gösterilmiştir.

$$F = az + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (3.4)$$

buradan $c_1\dot{y}$;

$$c_1\dot{y} = az + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) \quad (3.5)$$

şeklinde olacaktır. Burada z ve y;

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}||z|^{n-1}z - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (3.4) nolu denklem y için düzenlenirse

$$\dot{y} = \frac{1}{C_0 + C_1} \{az + c_0\dot{x} + k_0(x - y)\} \quad (3.7)$$

şeklinde dir. Burada k_1 akümülatör yay katsayısı, c_0 yüksek hızlarda gözlenen viskoz sönüm katsayısı, c_1 ile temsil edilen sönüm elemanı düşük hızlarda gözlenen azalma etkisi, k_0 ise yüksek hızlardaki kontrol yay katsayısını temsil etmektedir. x_0 , k_1 yayı ile ifade edilen akümülatörden kaynaklanan başlangıç yer değiştirmesini ifade etmektedir.

MR damperin sargılarına uygulanan gerilim sonucu oluşan magnetik alanın MR damper dinamiğine etkisi

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$$

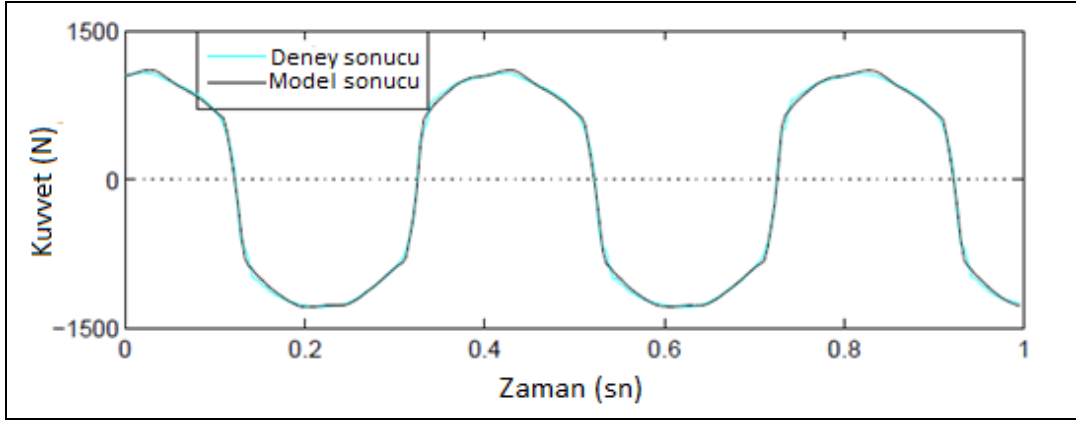
$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (3.8)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u$$

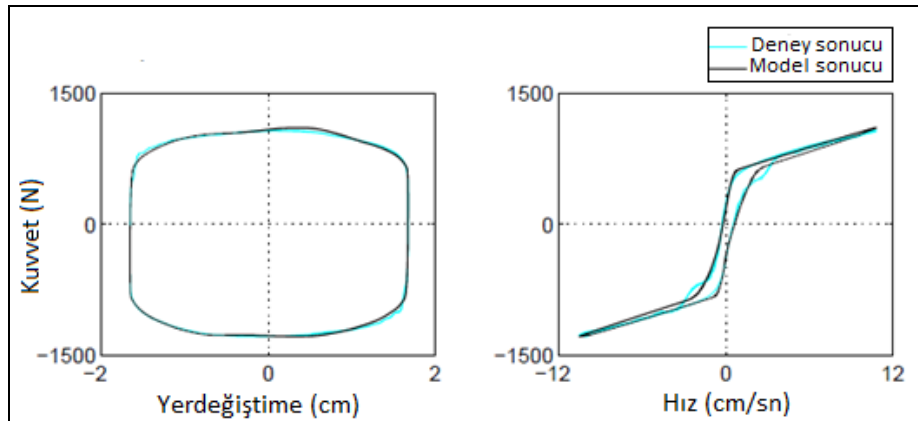
eşitlikleri ile verilebilir. Burada u ifadesi birinci dereceden bir filtre yardımıyla

$$\dot{u} = \eta(u - V) \quad (3.9)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada V ifadesi MR damperin sargılarına uygulanan gerilimi ifade etmektedir [24].



Şekil 3. 17 Geliştirilmiş bouc-wen modelinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması, kuvvet-zaman grafiği [24]

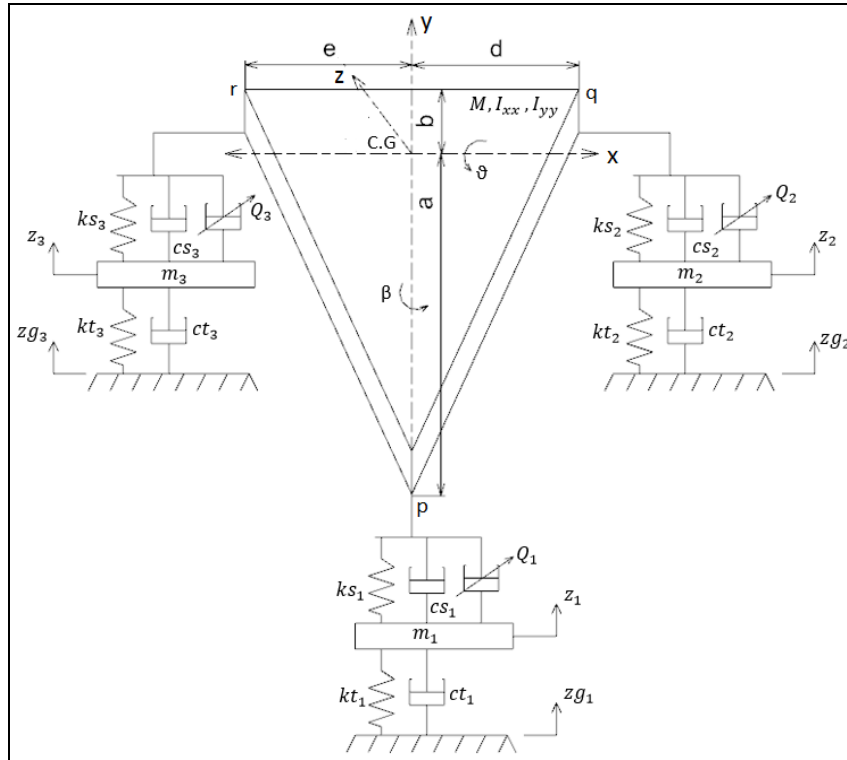


Şekil 3. 18 Geliştirilmiş bouc-wen modeli ve deneysel sonuçların karşılaştırılması kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri [24]

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de de görüldüğü gibi geliştirilmiş bouc-wen modeli MR sönümleyicinin hareketini bingham ve bouc-wen modeline göre daha başarılı bir şekilde madellemektedir. Diğer iki modelde de olan kuvvet-hız grafiğindeki hata oranı bu modelde diğerlerine göre daha azdır. Bu çalışmada da MR sönümleyiciyi modellemek için, deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren geliştirilmiş bouc wen modeli kullanılmıştır.

UÇAK İNİŞ TAKIMI MODELİ VE SİMÜLASYONLARI

4.1 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli



Şekil 4. 1 Tam uçak iniş takımı modeli [9]

Tam uçak modeli uçak gövdesi veya yay kütlesi, kafa vurma ve yalpalama hareketlerinden oluşmaktadır. Yay kütlesi ön, arka sol ve sağ iniş takımlarına bağlıdır. Bu yay kütleleri düşey yer değiştirme hareketinde serbest tutum göstermektedir. Tam uçak modeli üç serbestlik dereceli düşey yer değiştirme, kafa vurma ve yalpalama ile üç serbestlik dereceli ön, sol ve sağ iniş takımının kütesinden olmak üzere toplamda 6 serbestlik derecelidir.

Altı serbestlik dereceli uçak iniş takımı modeli, Şekil 4. 1’de gösterilmektedir. Burada z , θ ve β sırasıyla uçağın düşey yer değiştirme, kafa vurma ve yalpalama hareketlerini gösterirken; u_1 , u_2 ve u_3 ise burun, sol ve sağ iniş takımlarının yer değişimini ifade etmektedir. Modelde a ön iniş takımının ağırlık merkezine mesafesi, b arka iniş takımlarının ağırlık merkezinden mesafesi, d ve e ise sol ve sağ iniş takımlarının ağırlık merkezinden mesafesini ifade etmektedir [9].

Burada sistemde; pasif sönümleyicilere yarı aktif MR sönümleyiciler eklenmiştir (Şekil 4.1). Her bir MR sönümleyicinin değişken sönüm miktarı geliştirilmiş bouc-wen modeline göre sönüm kuvveti olarak elde edilmektedir. Ön iniş takımı MR sönümleyicinin kuvveti θ_1 , sol MR sönümleyicinin kuvveti θ_2 , sağ MR sönümleyicinin kuvveti θ_3 şeklinde ifade edilmektedir [9].

Newton’un ikinci kanunu kullanarak uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin bağlı sıkışma miktarı (p , q , r) aşağıda belirtilmiştir. Bu kabule göre sistemin hareketlerinin diferansiyel denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{aligned} p &= z - a\theta - h\beta - z_1 \\ q &= z + b\theta - d\beta - z_2 \\ r &= z + b\theta + e\beta - z_3 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Yaylı kütlenin düşey yer değiştirme hareketi için;

$$M\ddot{z} + k_{s1}p + k_{s2}q + k_{s3}r + c_{s1}\dot{p} + c_{s2}\dot{q} + c_{s3}\dot{r} + \theta_1 = 0 \quad (4.2)$$

$$M\ddot{z} + k_{s1}(z - a\theta - h\beta - z_1) + k_{s2}(z + b\theta - d\beta - z_2) + k_{s3}(z + b\theta + e\beta - z_3) + c_{s1}(\dot{z} - a\dot{\theta} - h\dot{\beta} - \dot{z}_1) + c_{s2}(\dot{z} + b\dot{\theta} - d\dot{\beta} - \dot{z}_2) + c_{s3}(\dot{z} - b\dot{\theta} + e\dot{\beta} - \dot{z}_3) + \theta_1 = 0$$

Yaylı kütlenin kafa vurma hareketi için;

$$I_{yy}\ddot{\theta} - k_{s1}pa + k_{s2}qb + k_{s3}rb - c_{s1}\dot{p}a + c_{s2}\dot{q}b + c_{s3}\dot{r}b + \theta_2 = 0 \quad (4.3)$$

$$I_{yy}\ddot{\theta} - k_{s1}(z - a\theta - h\beta - z_1)a + k_{s2}(z + b\theta - d\beta - z_2)b + k_{s3}(z + b\theta + e\beta - z_3)b - c_{s1}(\dot{z} - a\dot{\theta} - h\dot{\beta} - \dot{z}_1)a + c_{s2}(\dot{z} + b\dot{\theta} - d\dot{\beta} - \dot{z}_2)b + c_{s3}(\dot{z} + b\dot{\theta} + e\dot{\beta} - \dot{z}_3)b + \theta_2 = 0$$

Yaylı kütlelinin yalpalama hareketi için;

$$I_{xx}\ddot{\beta} - k_{s1}ph + k_{s2}qd + k_{s3}re - c_{s1}\dot{p}h + c_{s2}\dot{q}d + c_{s3}\dot{r}e + \theta_3 = 0 \quad (4.4)$$

$$I_{xx}\ddot{\beta} - k_{s1}(z - a\theta - h\beta - z_1)h + k_{s2}(z + b\theta - d\beta - z_2)d + k_{s3}(z + b\theta + e\beta - z_3)e - c_{s1}(\dot{z} - a\dot{\theta} - h\dot{\beta} - \dot{z}_1)h - c_{s2}(\dot{z} + b\dot{\theta} - d\dot{\beta} - \dot{z}_2)d + c_{s3}(\dot{z} + b\dot{\theta} + e\dot{\beta} - \dot{z}_3)e + \theta_3 = 0$$

Ön iniş takımının yaylanmaz kütlesi için;

$$m_1 \ddot{z}_1 - k_{s1}p - c_{s1}\dot{p} + k_{t1}(z_1 - z_{g1}) + c_{t1}(\dot{z} - \dot{z}_{g1}) - \theta_1 = 0 \quad (4.5)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 - k_{s1}(z - a\theta - h\beta - z_1) - c_{s1}(\dot{z} - a\dot{\theta} - h\dot{\beta} - \dot{z}_1) + k_{t1}(z_1 - z_{g1}) + c_{t1}(\dot{z} - \dot{z}_{g1}) - \theta_1 = 0$$

Sol ana iniş takımının yaylanmaz kütlesi için;

$$m_2 \ddot{z}_2 - k_{s2}q - c_{s2}\dot{q} + k_{t2}(z_2 - z_{g2}) + c_{t2}(\dot{z}_2 - \dot{z}_{g1}) - \theta_2 = 0 \quad (4.6)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 - k_{s2}(z + b\theta - d\beta - z_2) - c_{s2}(\dot{z} + b\dot{\theta} - d\dot{\beta} - \dot{z}_2) + k_{t2}(z_2 - z_{g2}) + c_{t2}(\dot{z}_2 - \dot{z}_{g1}) - \theta_2 = 0$$

Sağ ana iniş takımının yaylanmaz kütlesi için;

$$m_3 \ddot{z}_3 - k_{s3}r - c_{s3}\dot{r} + k_{t3}(z_3 - z_{g3}) + c_{t3}(\dot{z}_3 - \dot{z}_{g3}) - \theta_3 = 0 \quad (4.7)$$

$$m_3 \ddot{z}_3 - k_{s3}(z + b\theta + e\beta - z_3) - c_{s3}(\dot{z} + b\dot{\theta} + e\dot{\beta} - \dot{z}_3) + k_{t3}(z_3 - z_{g3}) + c_{t3}(\dot{z}_3 - \dot{z}_{g3}) - \theta_3 = 0$$

4.2 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli için Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Parametreler

Tasarlanan yarı aktif kontrol yöntemlerinin etkinliğini araştırmak için MATLAB-Simulink ortamında çalışmalar yapılmıştır. Matematiksel modeli verilen MR damper modeline ait parametreler, Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 MR damper modelinin parametreleri [25]

Parametre	Değer	Parametre	Değer
k_1	840 N/m	α_a	12441 N/m
k_0	3610 N/m	α_b	38430 N/m
c_{0a}	784 N.s/m	β	2059020 m^{-2}
c_{0b}	1803 N.s/m	γ	136320 m^{-2}
c_{1a}	14649 N.s/m	n_u	58
c_{1b}	34622 N.s/m	n	2
x_0	0.0908 m		

Yarı-aktif süspansiyon sistemine sahip uçak iniş takımı modelinin parametreleri [9] ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

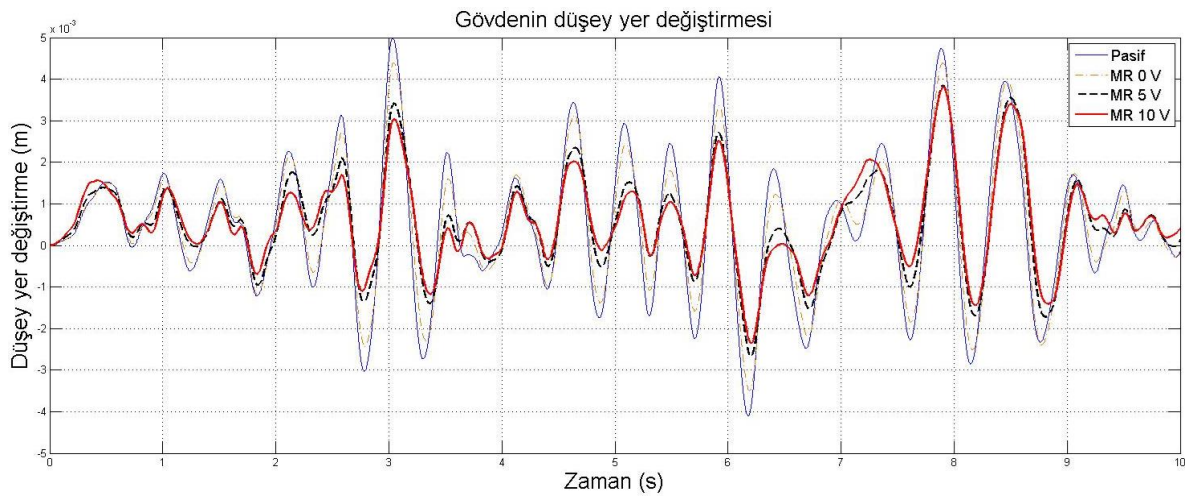
Çizelge 4. 2 Uçak iniş takımı modelinin parametreleri [9]

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
M	22000 kg	k_{s1}	673000 N/m	c_{t1}, c_{t2}, c_{t3}	4066 N.s/m
I_{xx}	65000 $kg.m^2$	k_{s2}, k_{s3}	408000 N/m	a	7.76 m
I_{yy}	100000 $kg.m^2$	k_{t1}, k_{t2}, k_{t3}	1590000 N/m	b	1.94 m
m_1	130 kg	c_{s1}	143000 N.s/m	d	3.8425 m
m_2, m_3	260 kg	c_{s2}, c_{s3}	625000 N.s/m	e	3.8425 m

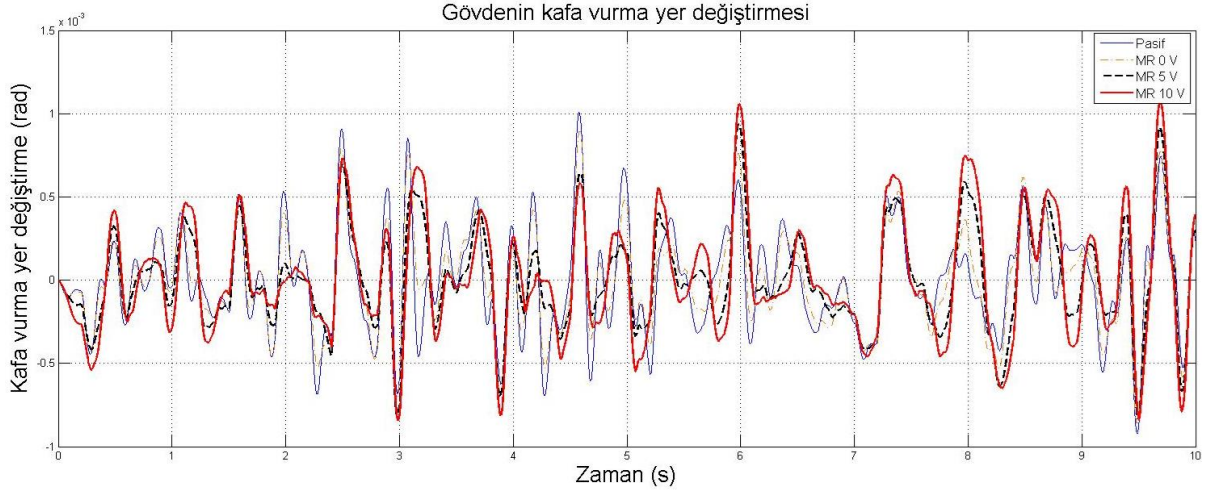
4.3 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modelinin Simülasyonları

4.3.1 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli (Rasgele Yol Girişli)

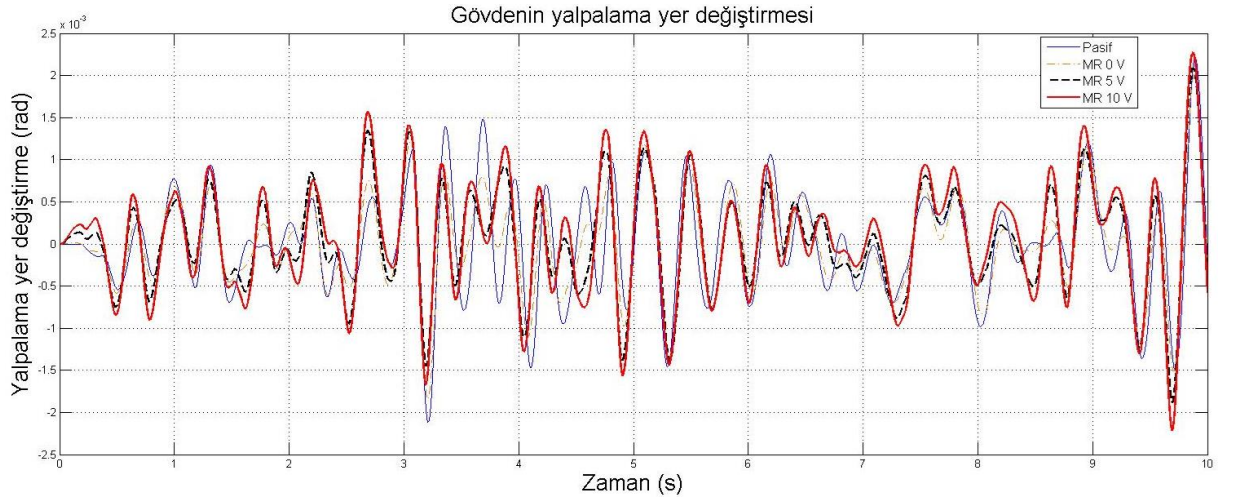
Yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modelinin taksi pozisyonunda hızı 55 km/h kabul edilmiştir. Modele yol profili olarak ISO 2631 standardına uygun C sınıfı rasgele yol girişi etki ettirilmiştir [26]. Uçak ön ve arka iniş takımları arasında dt zaman gecikmesi ($dt=a+b/V$), arka sol ve sağ iniş takımları arasında ise 0.5 s'lik zaman gecikmesi göz önünde bulundurularak sistemin hareketleri hem MR sönümleyicili kıyaslamalarda hem de Bölüm 5'deki bulanık mantıklı kontrol uygulamasında incelenmiştir. Bu çalışmada MR sönümleyiciyi modellemek için, deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren geliştirilmiş bouc-wen modeli kullanılmıştır. Bu kabullere göre, yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli pasif ve MR dampere uygulanan gerilimler olan MR 0, 5 ve 10 voltluk duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Pasif ve yarı aktif MR dampere uygulanan gerilimler arasındaki karşılaştırma uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve ön-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmıştır. Uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme simülasyonları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 4.2 ile Şekil 4.13 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince çizgi, MR 0 volt durumu ince kesikli kahverengi çizgi, MR 5 volt durumu kalın kesikli siyah çizgi ve MR damperin geriliminin 10 volt ile belirlendiği durum ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



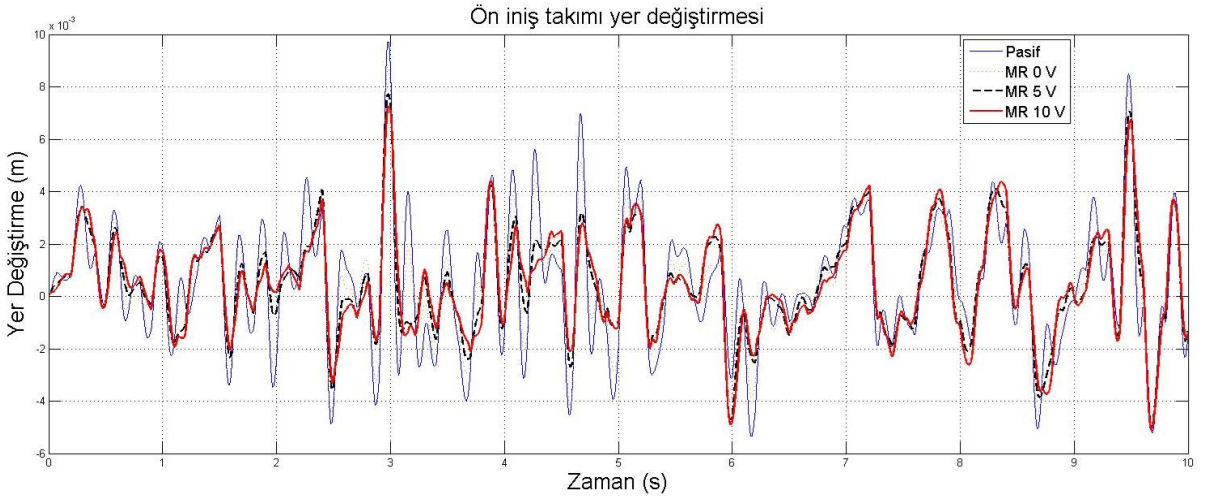
Şekil 4. 2 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi



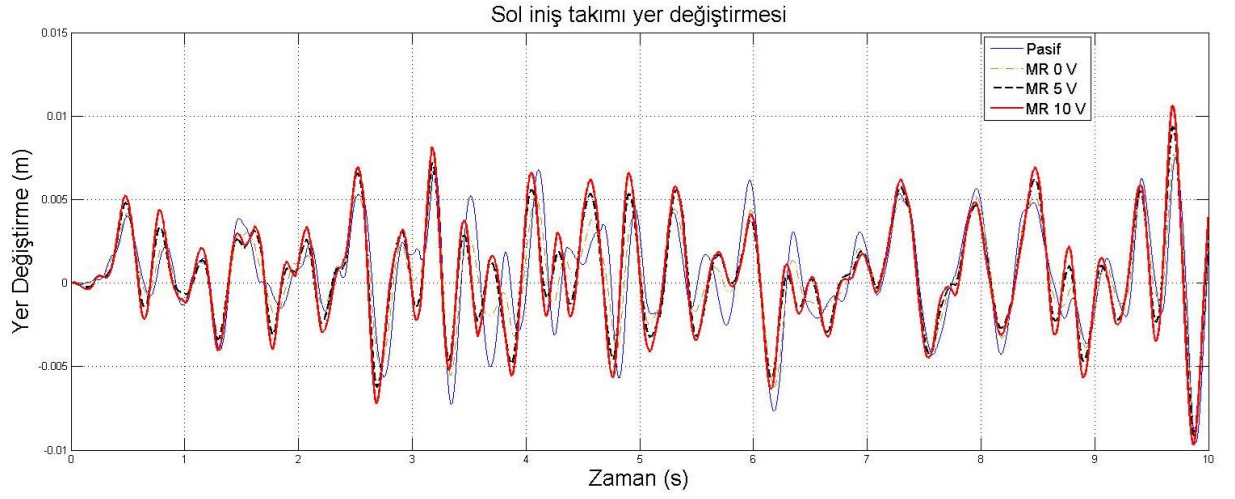
Şekil 4. 3 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değıştirmesi



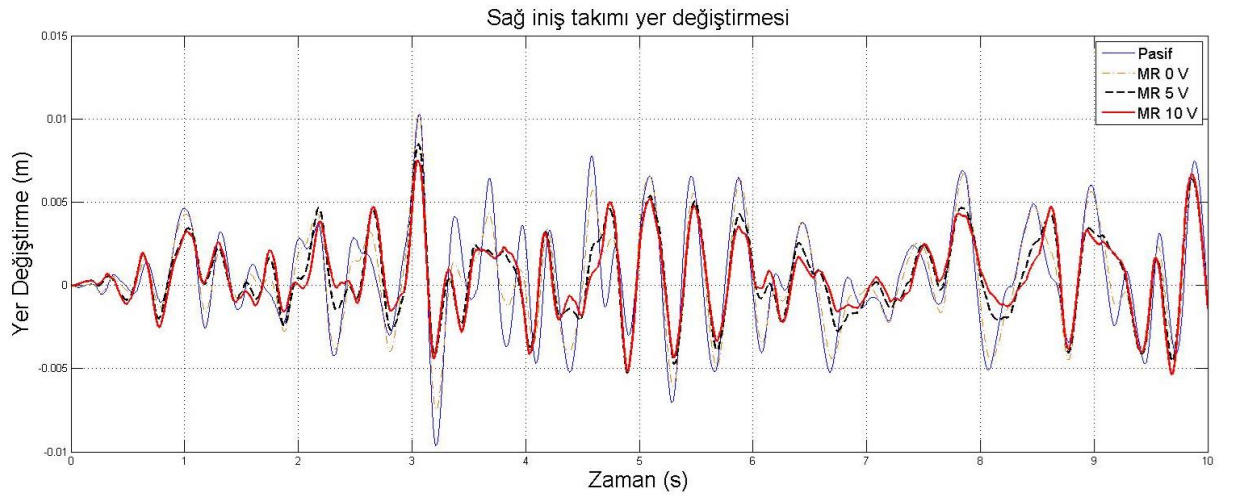
Şekil 4. 4 Uçak gövdesinin yalpalama yer değıştirmesi



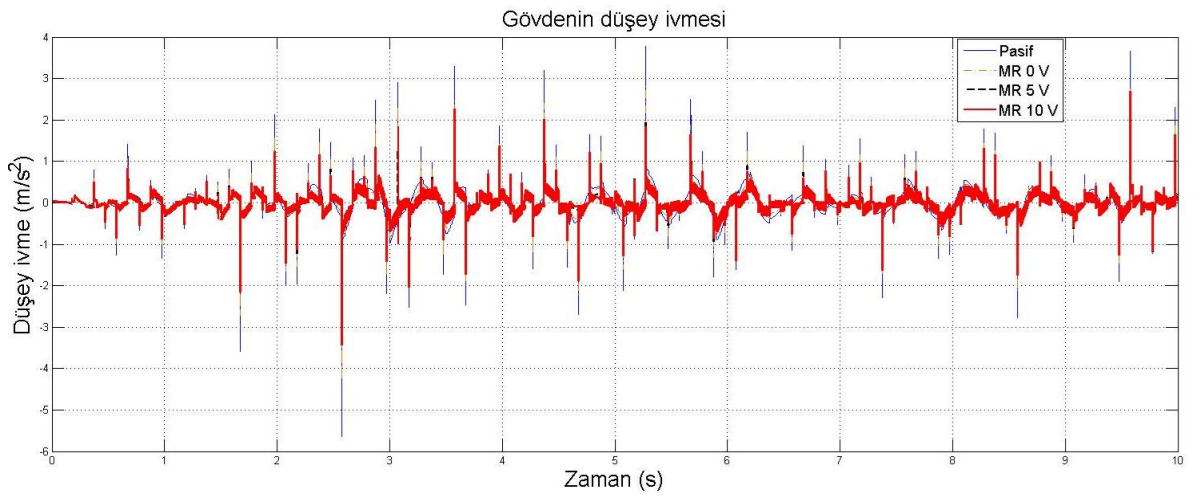
Şekil 4. 5 Uçak ön iniş takımı yer değıştirmesi



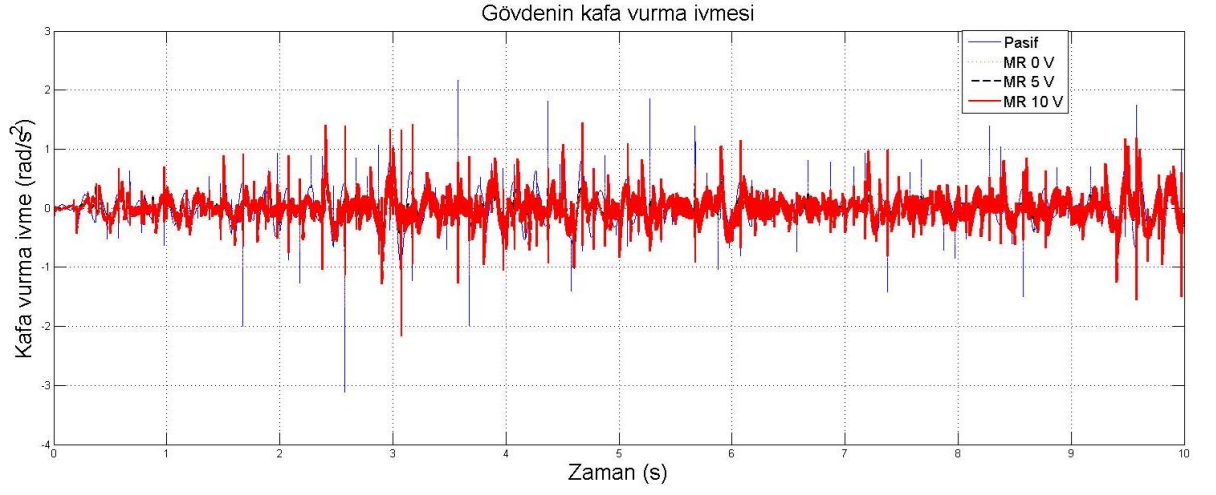
Şekil 4. 6 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



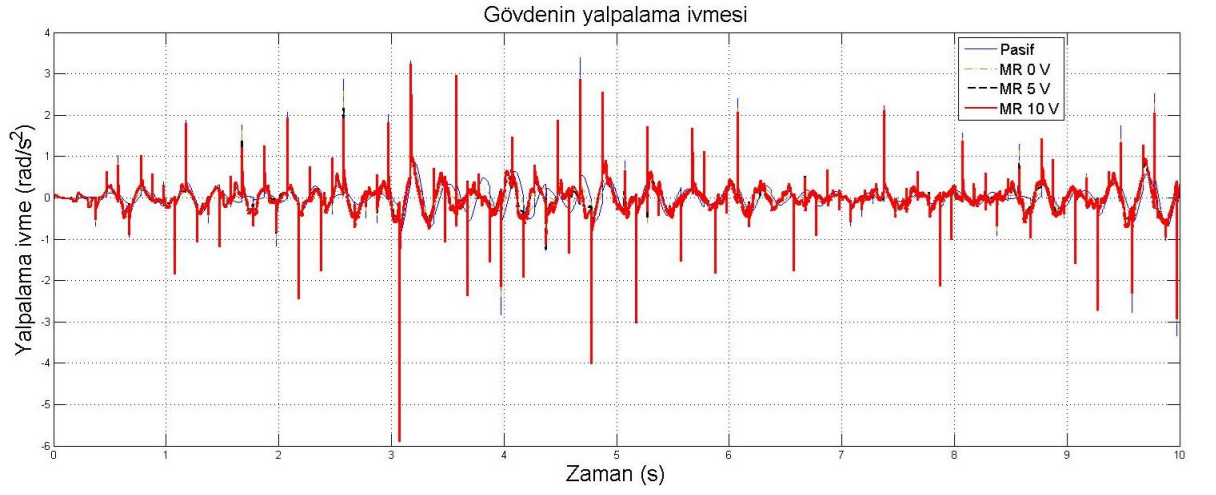
Şekil 4. 7 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



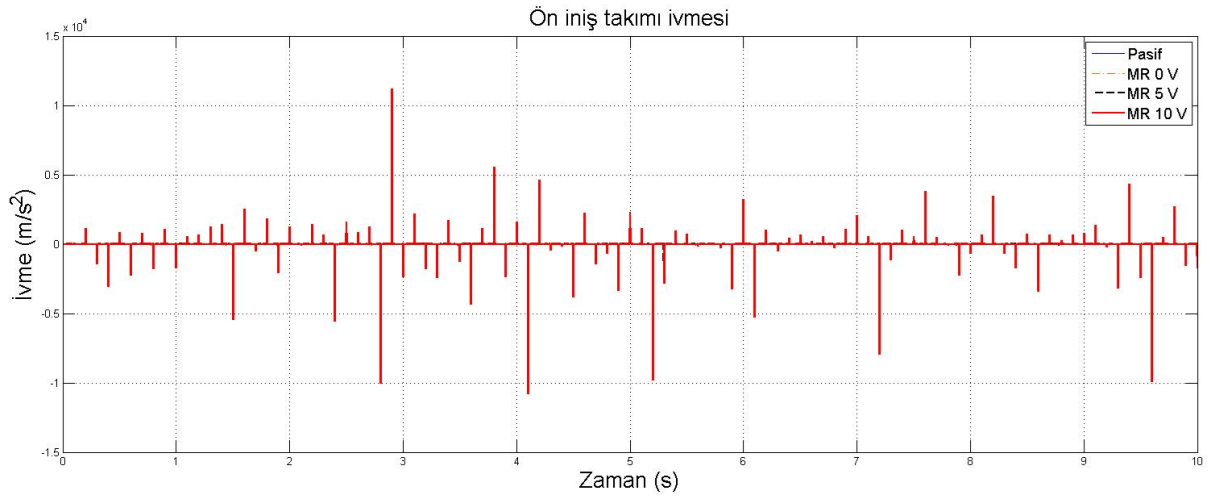
Şekil 4. 8 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



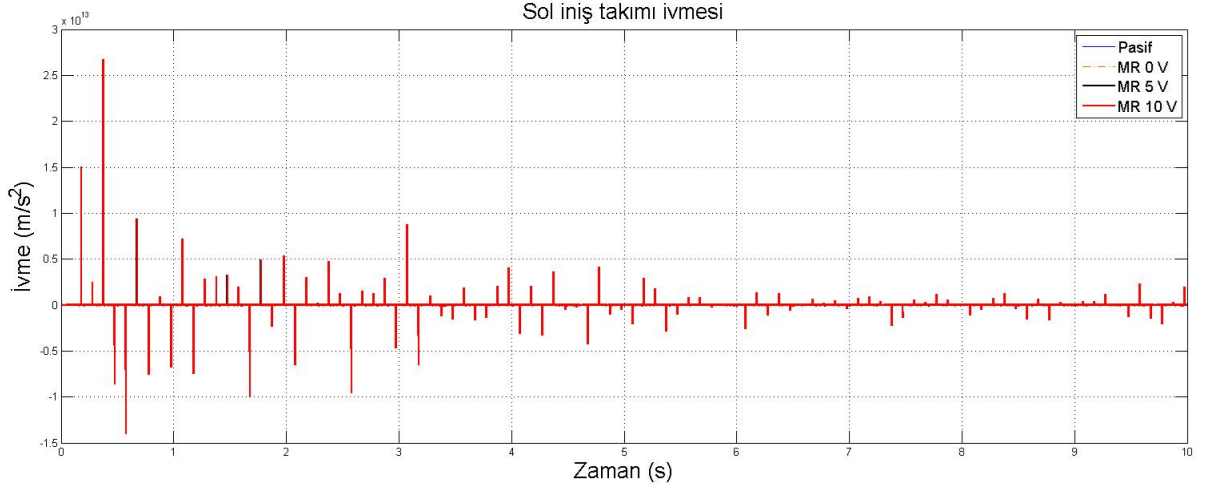
Şekil 4. 9 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



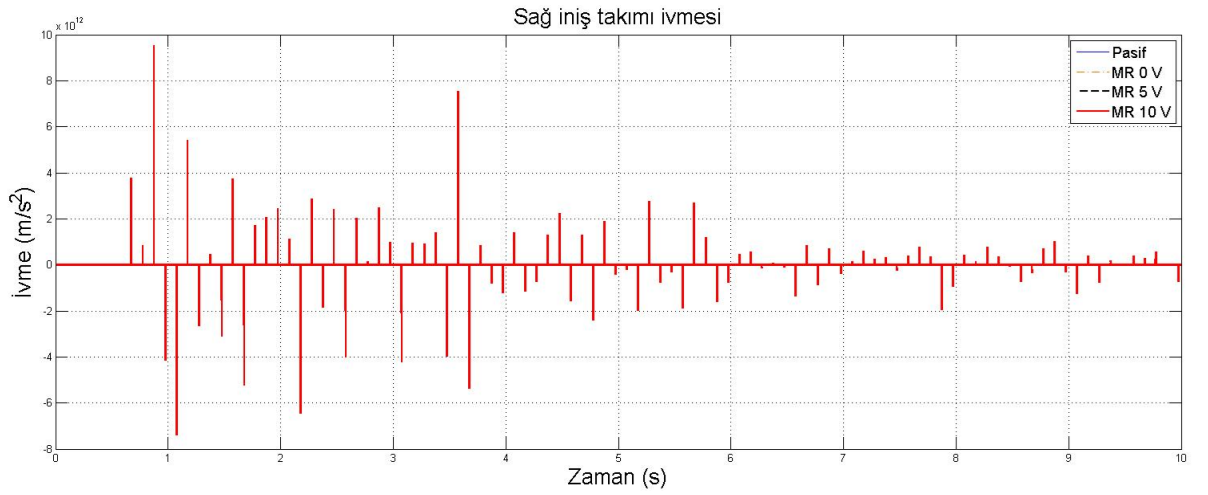
Şekil 4. 10 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 4. 11 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 4. 12 Uçak sol iniş takımı ivmesi

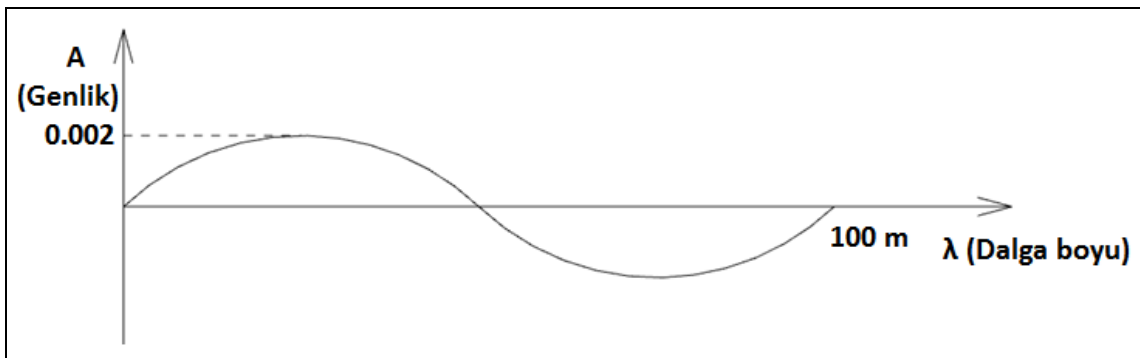


Şekil 4. 13 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

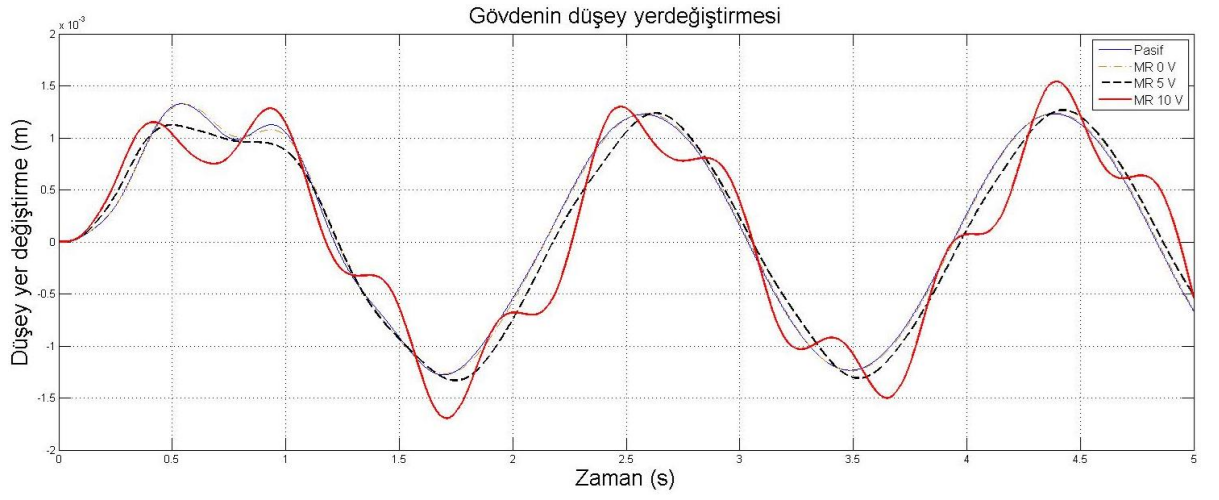
Modellenen uçak iniş takımı modeline ait simülasyon sonuçları, pasif sistem üzerine uygulanan MR sönümleyiciler vasıtasıyla kullanılarak sistem modellenmiştir. Bu amaçla tasarlanan MR sönümleyiciler ile sisteme farklı değerlerde gerilimler (0, 5 ve 10 volt) verilerek titreşimin azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yer değişim ve ivme değerlerine göre en iyi sonucun MR 10 volt gerilim uygulandığında alındığı saptanmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışma ile; MR sönümleyiciye farklı oranlarda voltaj verilmiş olup, 10 volt gerilim uygulandığında uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde iyileşmeler sağlanmıştır. MR damperlerde oluşan sönüm kuvveti sayesinde uçak iniş takımı titreşimlerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

4.3.2 MR Sönümleyicili Uçak İniş Takımı Modeli (Sinüsoidal Yol Girişli)

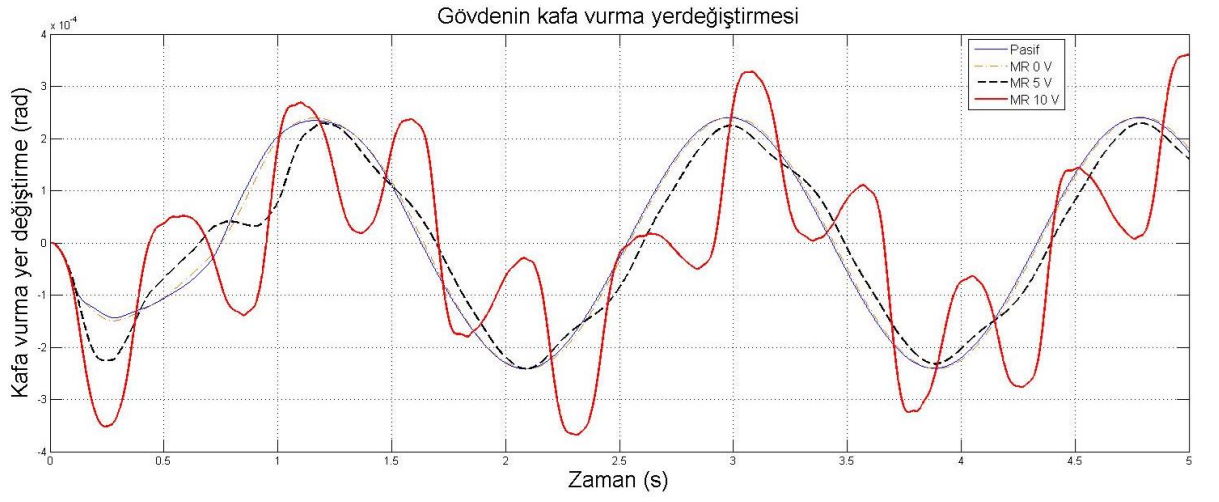
Yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modelinin taksi pozisyonunda hızı 55 km/h kabul edilmiştir. Modele yol fonksiyonu olarak her 100 metrelik mesafede 0.002 metrelik genlikte ve 3.4888 rad/s frekansta bir sinüsoidal dalga etki ettirilmiş olup profili Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Uçak ön ve sol iniş takımları arasında dt zaman gecikmesi ($dt=a+b/V$), arka sol ve sağ iniş takımları arasında ise 0.5 s’lik zaman gecikmesi göz önünde bulundurularak sistemin hareketleri hem MR sönümleyicili kıyaslamalarda hem de Bölüm 5’deki bulanık mantıklı kontrol uygulamasında incelenmiştir. Bu çalışmada MR sönümleyiciyi modellemek için, deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren geliştirilmiş bouc-wen modeli kullanılmıştır. Bu kabullere göre, yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli pasif ve MR dampere uygulanan gerilimler olan MR 0, 5 ve 10 voltluk duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Pasif ve yarı aktif MR dampere uygulanan gerilimler arasındaki karşılaştırma uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve ön-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmıştır. Uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme simülasyonları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 4.15 ile Şekil 4.26 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince çizgi, MR 0 volt durumu ince kesikli noktalı kahverengi çizgi, MR 5 volt durumu kalın kesikli siyah çizgi ve MR damperin geriliminin 10 volt ile belirlendiği durum ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



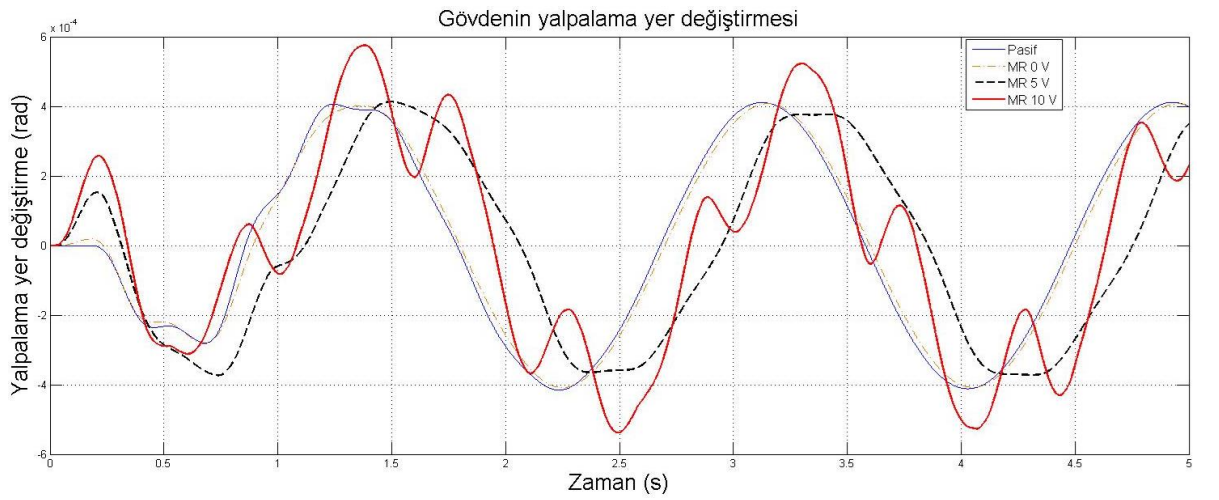
Şekil 4. 14 Uçak pist yol profili



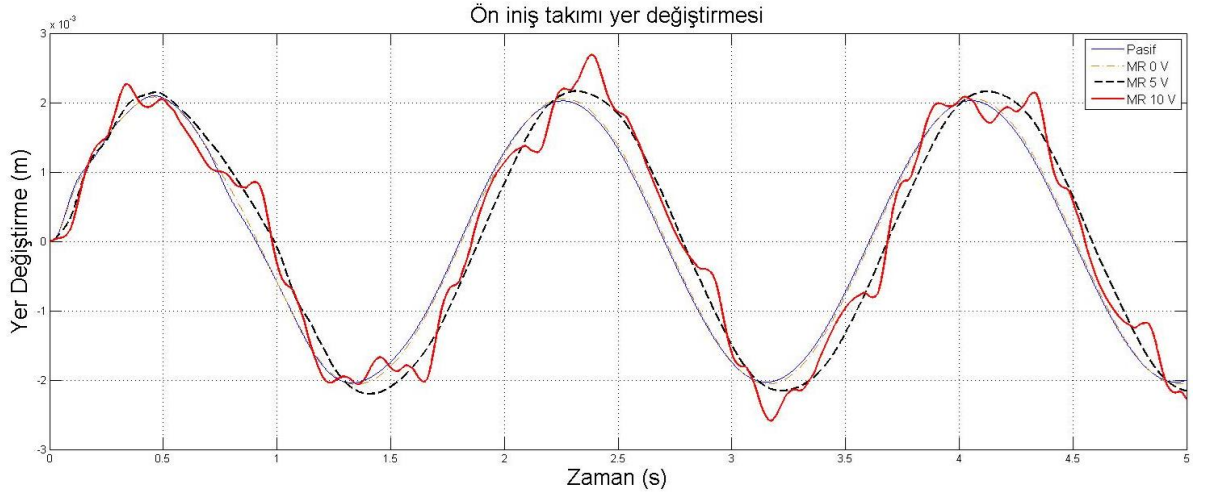
şekil 4. 15 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi



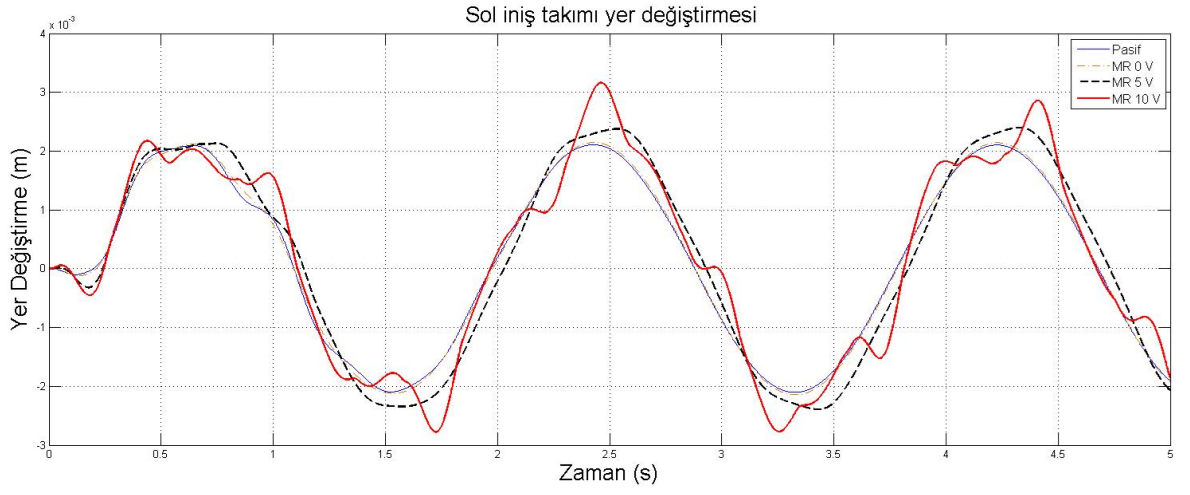
şekil 4. 16 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi



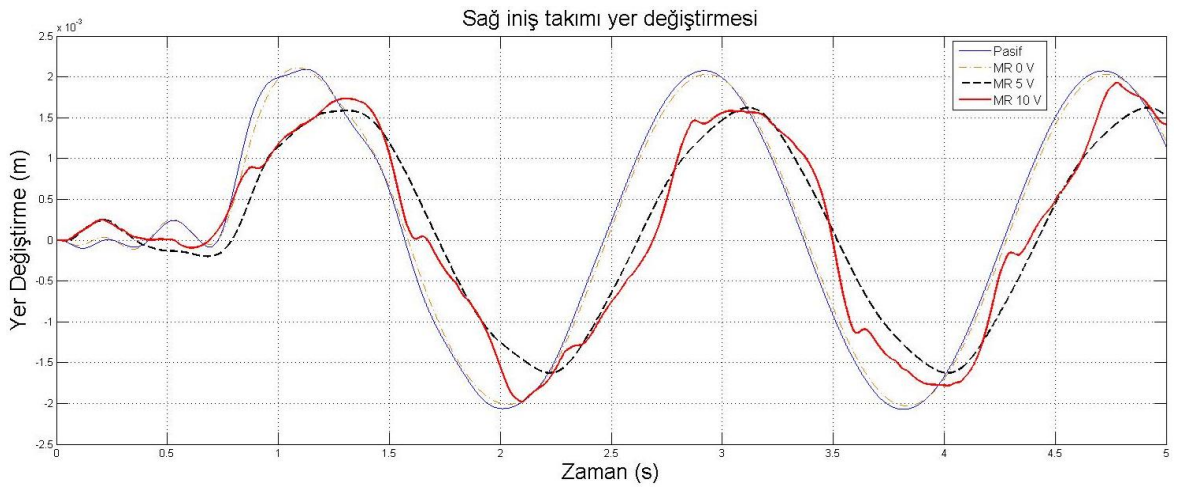
şekil 4. 17 Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi



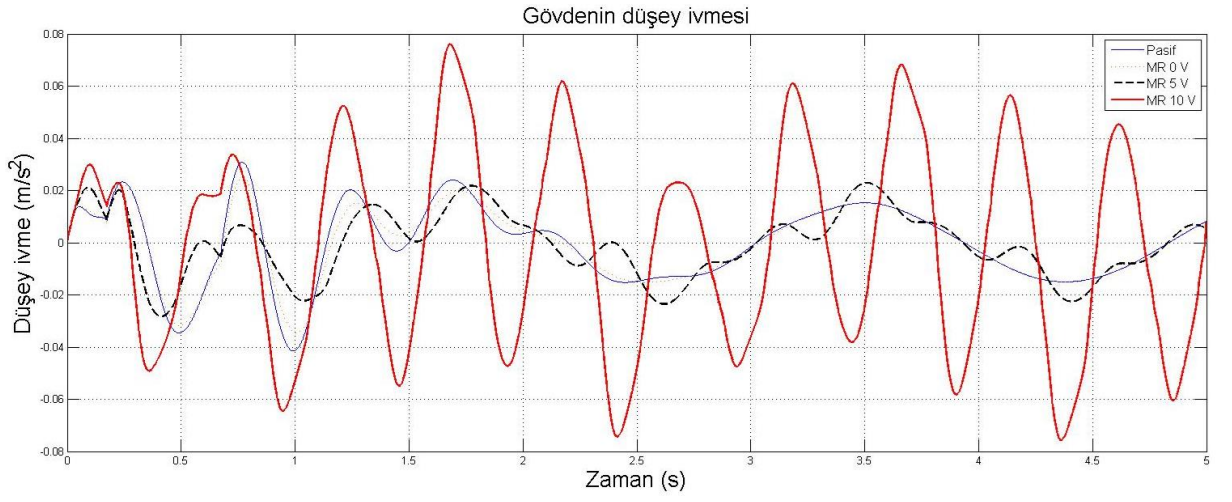
Şekil 4. 18 Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi



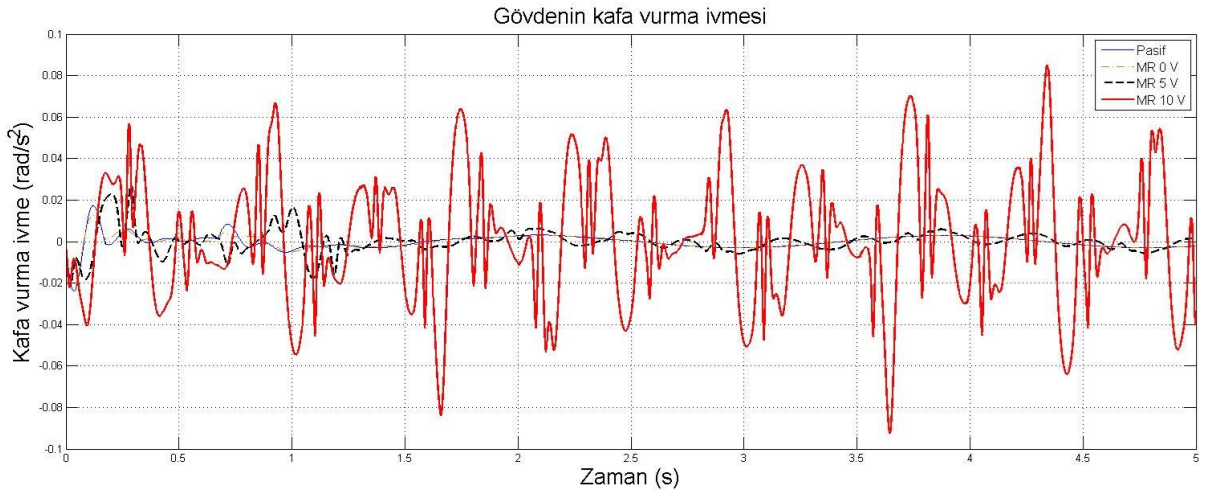
Şekil 4. 19 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



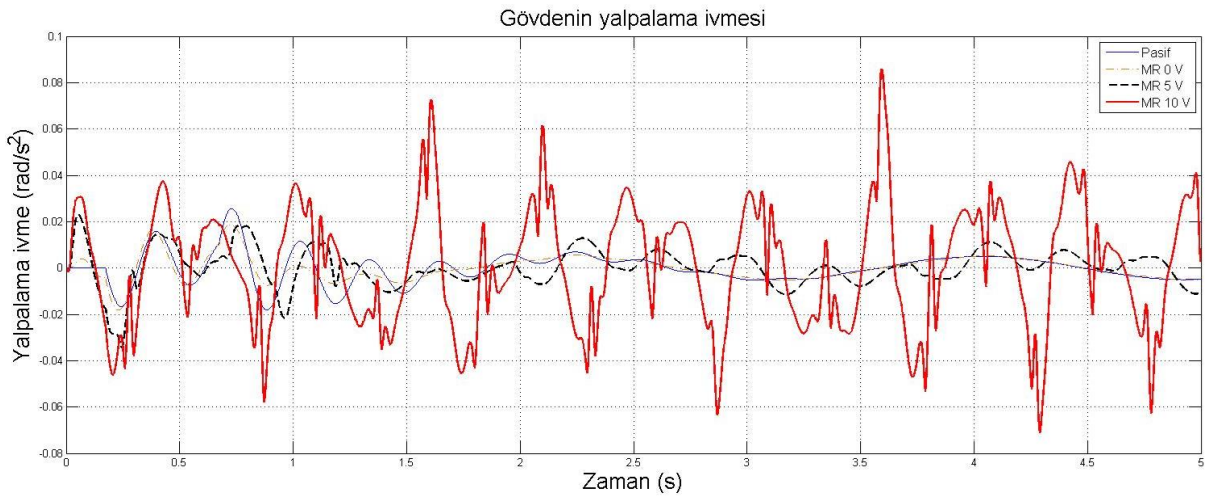
Şekil 4. 20 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



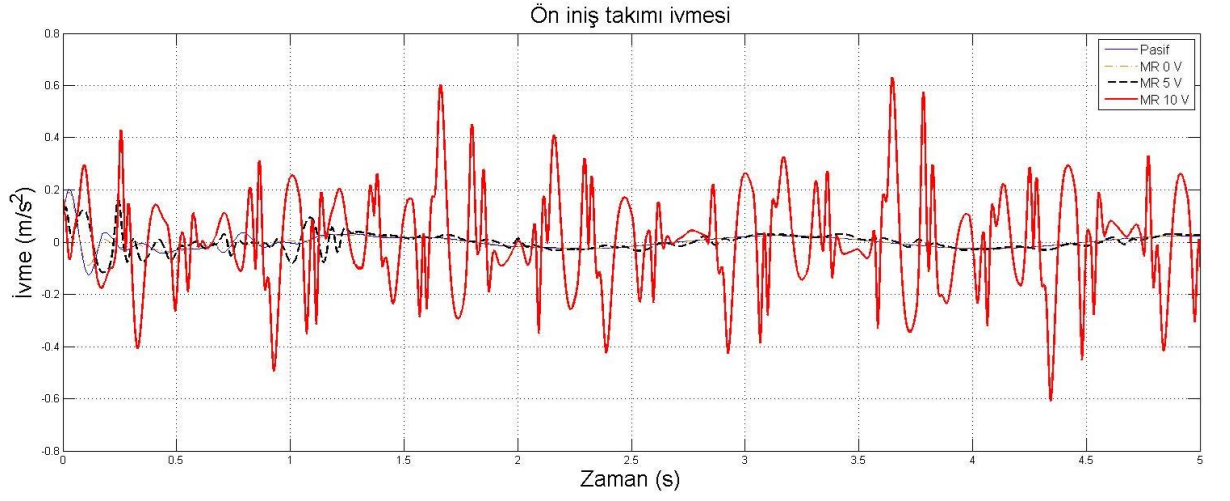
Şekil 4. 21 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



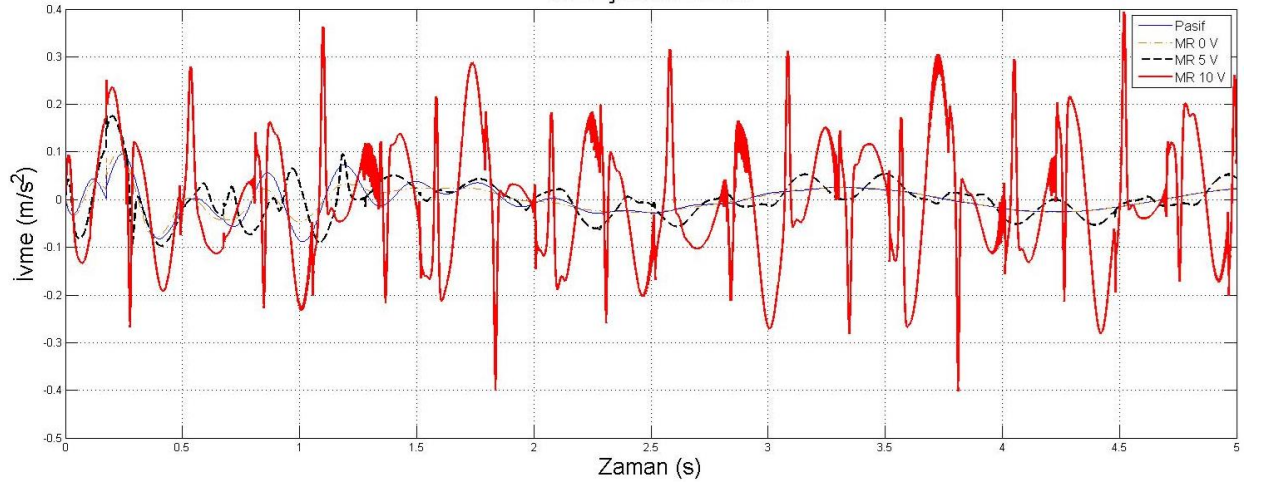
Şekil 4. 22 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



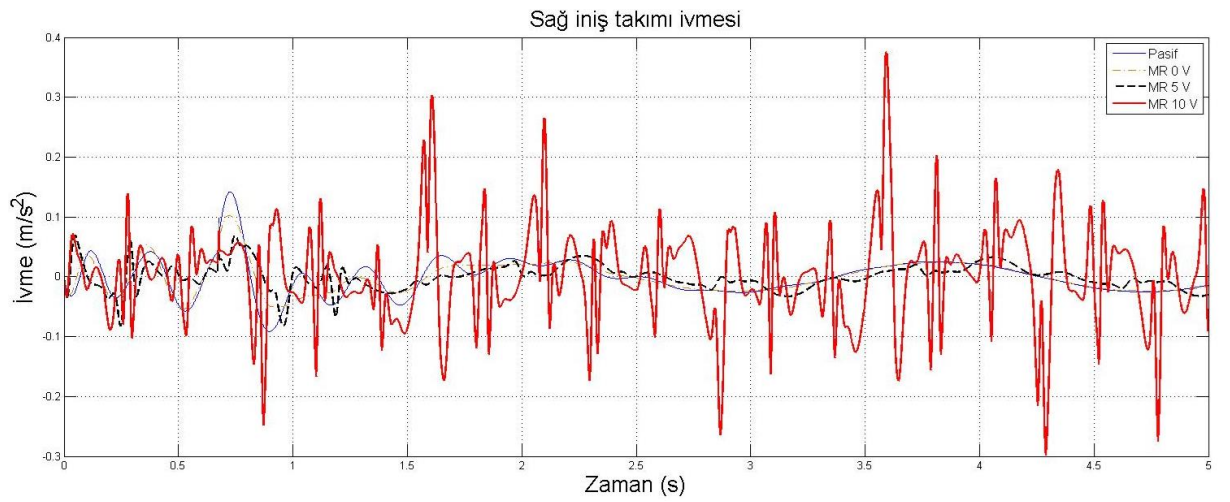
Şekil 4. 23 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 4. 24 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 4. 25 Uçak sol iniş takımı ivmesi



Şekil 4. 26 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

Modellenen uçak iniş takımı modeline ait simülasyon sonuçları, pasif sistem üzerine uygulanan MR sönümleyiciler vasıtasıyla kullanılarak sistem modellenmiştir. Bu amaçla tasarlanan MR sönümleyiciler ile sisteme farklı değerlerde gerilimler (0, 5 ve 10 volt) verilerek titreşimin azaltılması amaçlanmış olup, yer değişim ve ivme değerlerine göre en iyi sonucun MR 5 volt gerilim uygulandığında alındığı saptanmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışma ile; MR sönümleyiciye farklı oranlarda voltaj verilmiş olup, 5 volt gerilim uygulandığında uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde iyileşmeler sağlanmıştır. MR damperlerde oluşan sönüm kuvveti sayesinde uçak iniş takımı titreşimlerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

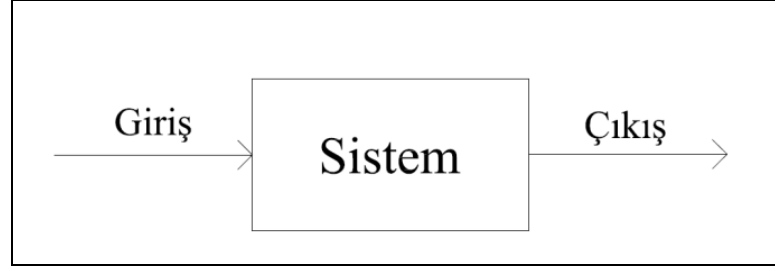
Bu sonuçlara göre, MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeline yol girişi olarak rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanmıştır. Rasgele yol girişinde, 10 volt gerilim uygulandığında MR sönümleyicinin uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin pasif, MR 0 ve 5 voltluk gerilime göre daha fazla iyileştiği görülürken, sinüsoidal yol girişi uygulandığında ise 5 volt gerilim verildiğinde MR sönümleyicinin uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin pasif, MR 0 ve 10 voltluk gerilime göre daha fazla iyileştiği görülmüştür.

UÇAK İNİŞ TAKIMI MODELİNİN KONTROLÜ

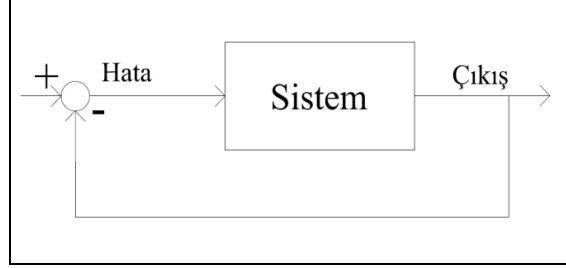
5.1 Kontrol Sistemleri

Günümüzde bilim ve teknoloji alanında her geçen gün yeni gelişmeler olmakta ve bu gelişmelere paralel olarak insanların yaşam standartları artarken, konfor anlayışları değişim göstermektedir. Teknolojinin insanlara sunduğu imkanlar sayesinde daha önce elle yapılan birçok işlem, artık insan müdahalesi olmadan oluşturulan kontrol sistemleri ile otomatik olarak yapılabilmektedir. Örnek verilecek olursa, günümüzde akıllı ev teknolojisi ev ve çevre güvenliğini sağlamakta ve ek olarak evin ısıtılması-soğutulması, yemek pişirme, garaj kapılarının vb. otomatik kontrolüdür. Buna ek olarak insanın kendisi de birçok otomatik kontrol sistemiyle donatılmış olup, çok sıcak ortamlarda vücut sıcaklık dengesinin korunması için terlememiz ve çok ışıklı ortamlarda göz bebeklerimizin küçülmesi vb. gibi birçok işlem otomatik kontrol ile sağlanabilmektedir. Çevremize bir göz attığımız da birçok otomatik kontrol sistemi görebiliriz ve bu durum insanlara daha iyi, konforlu ve ferah bir yaşam sağlar.

Sistemin elemanları yardımıyla sisteme uygulanan girişlerle, sistemden elde edilecek çıkışların belirlenmesi ve yönetilmesi kontrol sisteminin temel amacıdır. Kontrol sistemleri, açık ve kapalı çevrim kontrol sistemi olarak ikiye ayrılır. Sistemin durumuyla ilgili kontrole anlık bilgi gelmiyor ve sistem geri beslenmiyorsa açık çevrim, eğer kontrolcüye sistemin durumuyla ilgili anlık bilgi geri besleniyorsa buna da kapalı çevrim kontrol denir. Açık ve kapalı çevrim basit kontrol yapısı sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir [2].



Şekil 5. 1 Açık çevrim kontrolör [2]



Şekil 5. 2 Kapalı çevrim kontrolör [2]

5.2 Bulanık Mantık Teorisi

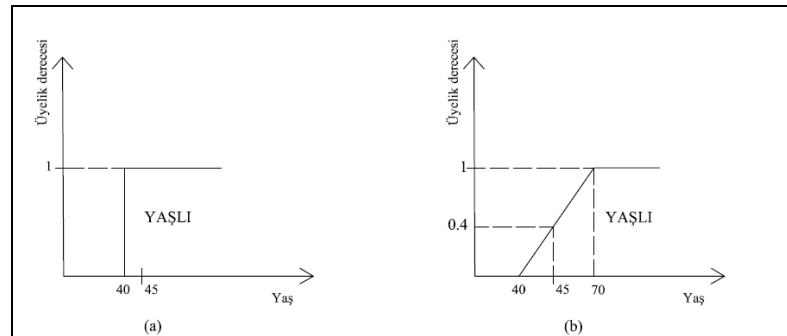
Bulanıklık, bir düşüncenin anlamında bulunabilen belirsizliktir [27]. Bulanık mantık teorisi, literatürde ilk olarak 1965 yılında matematiksel bir düşünce olarak Prof. L. A. Zadeh' in "Bulanık Kümeler (Fuzzy Sets)" isimli makalesi ile gündeme gelmiştir ve onun tarafından da geliştirilmiştir. Filozofçu Max Black tarafından 1930'larda belirsizliği açıklayıcı önemli kavramlar geliştirilmiş olsa da, Zadeh tarafından yayınlanan "Bulanık Kümeler" makale belirsizlik kavramında öncü kabul edilir. Zadeh, bu makalede, kesin olmayan sınırlara sahip nesnelerin oluşturduğu bulanık küme teorisini ortaya koymuştur. Zadeh'in bu makalesinin önemi sadece ihtimaller teorisine karşı duruşu ile ilgili değil, ayrıca ihtimaller teorisinin temelini oluşturan Aristo mantığına karşı da bir meydan okumadır. Zadeh haricinde Bulanık Mantık Kontrol (BMK) üzerine çalışmalar yapılmış olup bunlardan biri de Mamdani ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalardır. Daha sonra bu alandaki çalışmalar günümüze kadar ard arda gelmiştir. Bulanık kontrol sistemlerinin gelişmesinde önemli payı olan çalışmalar Çizelge 5.1'de sunulmuştur [28].

Çizelge 5. 1 Bulanık kontrolün gelişmesinde pay sahibi olan önemli çalışmalar [28]

Yıl	Yazarlar	Çalışmanın Konusu
1973	Zadeh	Dilsel yaklaşım
1974	Mamadani ve Assilian	Buhar makinesinin kontrolü
1976	Rutherford	Kontrol algoritmalarının analizi
1977	Willaeys	Optimal bulanık kontrol
1980	Tong	Atık su arıtma sistemleri
1983	Hirota ve Pedrycz	Rastlantısal bulanık kümeler (kontrol)
1983	Takagi ve Sugeno	Bulanık kontrol kurallarının türetilmesi
1983	Yasunobu, Miyamoto	Öngörülü bulanık kontrol
1984	Sugeno ve Murakami	Model arabanın park kontrolü
1985	Kiszka, Gupta	Bulanık sistemlerin kararlılığı
1985	Togai ve Watanabe	Bulanık çipi
1986	Yamakawa	Bulanık kontrol donanım sistemi

Bulanık mantık teorisi günlük konuşmalarda geçen dilsel değişkenlerin sistem modellenmesinde kullanılmasına dayalı bir kavram olup, makineler bir insanın davranışlarına benzer bir şekilde mantıksal uygulamalarla anlayabileceği ve özel verilerini işleyebilecekleri, aynı zamanda önsezi ve deneyimlerinden de faydalanarak çalışma yeteneği oluşturma durumuna izin veren bir bilgisayar mantık gelişimidir. Bu kabiliyeti kazandırırken klasik olarak kullanılan sayısal ifadeler yerine sembolik ifadeleri tercih eder ve bu durumun cihazlara aktarılması matematiksel bir temele dayanır.

Bulanık mantık kavramını kolay bir şekilde anlamak için insanların günlük konuşma ve idrak kabiliyetinden yola çıkarak, ‘biraz yavaş’, ‘pek az’, ‘biraz fazla’, ‘az aralanmış’, ‘çok pişmiş’, ‘biraz yavaş’, ‘kısmen doğru, vs. değerleri içeren mantık cümlelerine bakılarak, matematiksel açıdan bir durum ifade etmemelerine karşın, bir problemi çözme açısından günlük hayatta kullanılan ve sıkça karşılaşılan örnekler olduğu görülür. Bu durum Şekil 5.3’de basitçe gösterilmiştir. Şekil 5.3 (a)’da 40 yaş ve üzeri kesin yaşlı sınıfına girerken, Şekil 5.3 (b)’de ise bu yaş, kısmen yaşlı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 5. 3 (a) Kesin küme (b) Bulanık küme [2]

Bulanık mantığın en önemli özelliklerinden biri kişisel olup, nesnel olmayışıdır. Ortaya çıkan bu çoklu mantık içinden sadece birinin seçilmesiyle, 'Aristo Mantığı' adı verilen ve olayın doğruluğu ya da yanlışlığıyla ilgilenen mantığın uygulamalarda tekrar kullanılmasına ihtiyaç vardır. İşte bu şartlanmanın sonucunda gerçek hayatta çoklu mantık dışlanmış ve ikili mantığa göre sınıflandırmaya gidilmiş, bu durum nedeniyle de bir takım uygulamalarda yetersiz kalınmıştır. Çünkü 'Aristo Mantığı' nda yapılan bir iş ya doğrudur ya da yanlıştır [29].

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Bulanık mantıkta her şey $[0,1]$ aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok, az gibi dilsel ifadeler şeklindedir.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur ve her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
- Bulanık mantık tam olarak bilinmeyen veya eksik girilen bilgilere göre işlem yapma kabiliyetine sahiptir.
- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme kullanılır.

5.2.1 Bulanık Mantığın Avantajları

Bulanık mantığın klasik yaklaşımlara göre temelde sağladığı bazı avantajları ve sakıncalı olduğu durumları bulunmaktadır [30]. Avantajlı olduğu durumlar;

- Sistemin matematiksel modelinin çıkarılmasının çok güç olduğu durumlarda en önemli bilgiler iki kaynaktan gelir. Bunlardan biri algılayıcılar ki bunlar durum değişkenlerinin sayısal değerlerini gösterirler. Diğeri ise operatör deneyimleridir ki bunlarda sistem hakkında operatörün dilsel tanımlamaları ve kontrol talimatlarını içerirler. Bulanık kontrol bu bilgilerden yararlanırken klasik kontrol bu bilgilerden faydalanamaz. İyi mühendislik yaklaşımının mevcut olan bütün bilgilerin kullanımını gerektirdiği düşünülürse, sistem hakkındaki bilgilerin bu türden olduğu durumlarda bulanık kontrolün en iyi seçim olması,

- Bulanık mantık kavramının insanın kontrol stratejisine ve tarzına yakın olması sebebiyle anlaşılmasının kolay olması,
- Uygulamasında mutlaka matematiksel bir modele ihtiyaç duymadığından matematiksel modeli iyi tanımlanamamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemlere gereksinim duymaması,
- Yazılımın basit olması nedeniyle, sistemin daha ucuza mal edilmesi,
- İşlemlerin gerçekleşmesinin oldukça basit olması,
- Kesinlik arz etmeyen bilgilerin kullanılmasının söz konusu olması,
- Doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesine onay vermesi,
- Geleneksel kontrol teknikleriyle düzgün uyum göstermesi,
- Bulanık mantıkta kullanım ile insanların iletişimde kullandıkları sözel ifadelerin daha olumlu cevaplarının alınması,
- Üyelik değerlerinin kullanımı sayesinde, diğer kontrol tekniklerine göre daha esnek olmasıdır.

5.2.1.1 Bulanık Mantığın Sakıncaları

Bulanığın mantığın sakıncalı olduğu durumlar ise;

- Bulanık mantık uygulamalarında mutlaka kuralların uzman deneyimlerine dayanarak tanımlanması gerekir. Üyelik işlevlerini ve bulanık mantık kurallarını tanımlamak her zaman kolay değildir.
- Üyelik işlev değişkenlerinin belirlenmesinde kesin sonuç veren belirli bir yöntem olmadığından deneme yanılma yapılması gerekmektedir. Bu durumda ise önceden tespit yapılamayacağı için uzun zaman alabilir.
- Bulanık mantık yaklaşımında üyelik işlevlerinin değişkenlikleri sisteme özeldir, herhangi bir başka sisteme uyarlanması oldukça zordur.
- Bulanık mantık sistem kararlılığı, gözlemlenebilirliği ve denetlenebilirliği açısından ispatlanmış kesin bir yöntemi olmayışı ana sorunudur [30].

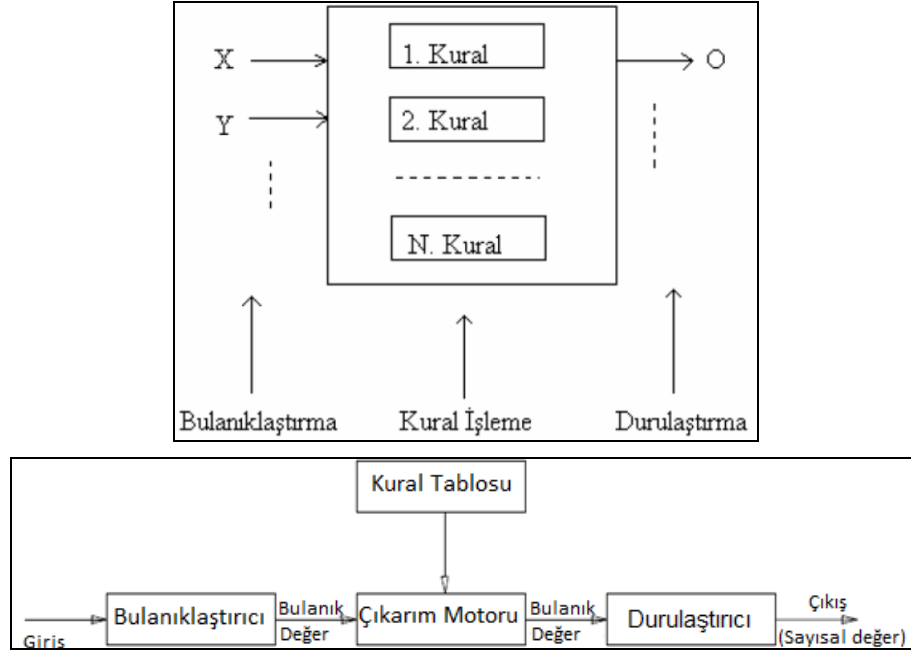
5.2.2 Bulanık Mantığın Uygulama Alanları

Bulanık mantıklı kontrol son yıllarda oldukça büyük bir uygulama alanı bulmuştur. Bulanık mantık üzerine yapılan çalışmaların yerine oturması ve çoğu alanda yararlı sonuçlar vermesi günümüzde kullanımında en önemli etkidir. Bulanık mantık üzerine araştırma-geliştirme çalışmaları hem uzay araştırmaları-havacılık endüstrisinde ve hem de TAI (Turkish Aerospace Industries)'de yapılmaktadır. Bulanık mantık, bir helikopter modelinin kontrolü, sözlü talimatla radyo kontrolü, yetersiz motor durumlarında otomatik rota girişi, deniz kurtarmaları için insansız helikopterlerin kontrolünde ve küçük bir ticari uçağın uçuş kontrol sisteminde kullanılmıştır. Ayrıca, bulanık mantık denetleyicisinin kullanımıyla, uçakta kullanılan iki adet sensörün herhangi bir arıza durumunda, hangisinin arızalı olduğunu belirlemek mümkün olmuş ve daha az donanım kullanılması sağlanmıştır. Sistemin güvenliğinin artırılmasının yanında, maliyette düşürülmüştür. Uçaklarda güç sistemine bakım planlaması yapılması uygulamasında ise, bulanık mantık uçaktaki ekipmanların güvenlik ve güvenilirliğini arttırmak, arıza meydana gelmeden önce muhtemel arızanın belirlenmesini tespit etmede kullanılmıştır. Havacılıkta özellikle şirketlerin kar yapabileceği bakım faaliyetlerinde bu uygulama oldukça önemlidir. Ayrıca, yapılan araştırmalar sonucu daha çok helikopter uçuş kontrol sistemlerinde uygulaması görülen bulanık kontrolün, bir uçağın son yaklaşma ve iniş aşamasındaki uygun kontrol kuvvetinin bulunması da incelenmiştir [29].

Bulanık mantığın havacılık sektörünün yanında oldukça büyük bir uygulama alanı olup, en önemli uygulama alanı çimento sanayiinde 1980 yılında olmuştur. İkinci ve aynı zamanda en önemli bulanık kontrol uygulaması 1987 yılında Japonya'da taşımacılık alanında gerçekleştirilmiştir. Hitachi firması, ilk olarak ulaştırma bakanlığına başvurmuş ve Sendai Metro sisteminde çalışan trenlerin otomatik olarak denetimi için bulanık mantık kullanımını önermiştir. Bu şekilde bulanık mantık kontrol uygulama alanları giderek genişleyerek günümüzde birçok firma bulanık mantıklı kontrol sistemi ile çalışan ürünler üretmektedir. Bunlara örnek olarak; elektrikli süpürgeler (Matsushita), çamaşır makineleri (Matsushita), yer altı treni (metro-Hitachi), televizyon (Sony), asansörler, fren sistemleri, su ısıtıcıları, helikopter kontrolü vb. verilebilir.

5.2.3 Bulanık Sistemler

Bulanık bir süreç üç farklı kademeden oluşmaktadır. Bu kademeler; sırası ile bulanıklaştırıcı birim, kural işleme (çıkarım motoru) birimi ve durulaştırıcı birim bilgileridir. Şekil 5.4’de genel bir bulanık sistem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5. 4 Bulanık sistem yapısının genel gösterimi [29]

Bu akış düzeninde, bulanıklaştırıcı birim, bulanık işlem sisteminin ilk birimi olarak devreye girmektedir. Kesin veya geri besleme sonuçları biçiminde bu birime giren bilgiler, burada bir ölçek değişikliğine uğrayarak bulanıklaştırılmakta ve kural işleme birimine gönderilmektedir. Kural işleme birimine gelen bilgiler, giriş bulanık değerlerin çıkış bulanık değerlerine tam olarak eşlenmesini sağlar. Kontrol amaçlarına uygun dilsel denetim kuralları buradan bulunur ve çıkarım motoruna verilir. Çıkarım motorunda ise kurallar bulanık mantık kurallarını uygulayarak bulanık çıkışlar verir. Burada insanın düşüncü şeklinin benzetimi yapılmaya çalışılmıştır. Son adımda ise; problemin yapısına uygun mantıksal karar önermeleri kullanılarak elde edilen sonuçlar durulaştırıcı birime gönderilir. Durulaştırıcı birime gönderilen bulanık küme ilişkilerinde, bir ölçek değişikliği daha gerçekleştirilerek bulanık haldeki bilgilerin her biri gerçel sayılara dönüştürülür [28].

5.2.3.1 Bulanıklaştırma İşlemi

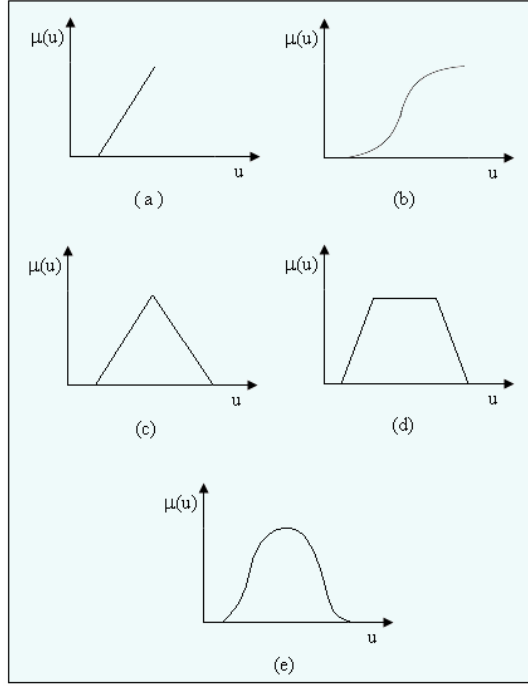
Fiziksel giriş bilgilerini, dilsel niteleyicilerle ifade edebileceğimiz bulanık mantık bilgileri şekline çevirme işlemine bulanıklaştırma adı verilir. Ancak, bu bilgilerin tamamının mutlaka kesin bilgiler olması söz konusu değildir. Bulanıklaştırma işlemi önemli ölçüde kesin olmayan bilgiyi de içine alır ve bulanıklaştırır. Bulanıklaştırma sonucu elde edilen değişkenlere dilsel değişkenler denir ve işlemle birlikte tüm giriş değişkenlerinin değerleri, üyelik derecesi olarak buraya atanır.

Bulanıklaştırıcı, klasik mantık yapısındaki kümeye ait verileri bulanık hale getirmektir. x_0 sayısal giriş ve x bulanık çıkış olmak üzere bulanıklaştırıcı sembolik olarak aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [27].

$$x = \text{bulanıklaştırıcı}(x_0)$$

Matematikte, benzer özellikler gösteren elemanların bir arada gruplandırılmasıyla 'küme' adı verilen kavram oluşturulur. Klasik matematikte bir konunun bir bölümünün o kümeye ait olması gibi bir kavram düşünülmez ve kabul edilmez. Bu sınırlama, problemlerin her zaman uygun bir çözüme kavuşturulabilmesine engel teşkil etmektedir. Pratikte genel olarak, klasik küme şeklinde beliren değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık küme, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin hepsinin, 1'e eşit üyelik derecesine sahip olacak yerde, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülür. Bu durumda, bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul edilir. Bu belirsizliklerin, sayısal olmayan durumlardan kaynaklanması halinde bulanıklıktan söz edilir. Bulanıklaştırma sürecinde ele alınan üyelik fonksiyonları, problemin yapısına ve amacına uygun olmalıdır. Genel anlamda üyelik fonksiyonları sezgisel, matematik, geometrik ya da istatistiksel yaklaşımlara dayandırılabilir.

Bulanık kümelerin kullanışlılığı, farklı kavramlara uygun üyelik derecesi fonksiyonlarını oluşturabilme becerisine dayanmaktadır. Üyelik fonksiyonu ise, küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren eğriye denmektedir. Çok sayıda üyelik fonksiyonu tipi olmakla beraber pratikte en sık kullanılanlar sırasıyla monotonik, sigmoid, üçgen, yamuk ve çan eğrisi olup Şekil 5.5' de gösterilmektedir.



Şekil 5. 5 Bulanıklaştırma süreci üyelik fonksiyonları: a) Monotonik, b) Sigmoid, c) Üçgen, d) Yamuk, e) Çan eğrisi [28]

Üçgen, yamuk ve çan eğrisi şeklinde çizilen fonksiyonlara bakıldığında, bir bulanık ifadenin üç özelliği anlaşılabilir. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Bir kümede bulunan öğelerden en az bir tanesinin en büyük üyelik derecesi olan 1'e sahip olması gerekmektedir. Bu duruma bulanık kümenin normal olması denir.
- Üyelik derecesi 1 olan öğeye yakın, sağdaki ve soldaki öğelerinde üyelik dereceleri 1'e yakın olmalıdır. Bu durumda bulanık kümenin monoton olduğu anlaşılır.
- Üyelik derecesi 1'e eşit öğeden sağa ve sola eşit mesafede gidildiğinde, buradaki öğelerinde üyelik derecelerinin birbirine eşit olması gerekir. Bu duruma da bulanık kümenin simetrik özelliği adı verilir.

5.2.3.2 Kural İşleme Birimi

Kural tabanında, sistemin bilgi girişlerinin alabileceği çeşitli değerlere göre mantıki olarak uygunluk gösteren sistem çıkış değerleri, kural satırları haline getirilerek, kural tabanı oluşturulur. Bulanık mantıkta kurallar, 'eğer ... ise, ... olsun' şeklinde koşullu durumlarla formüle edilirler. Tüm girdi değişkenleri, sözel değişken değerlere

çevrilerek, bulanık sonuç çıkarma adımı, güncel durum için kurallara dayandırılarak uygulanır ve çıkışta sözel değişkenlerin değerleri hesaplanır.

Basit olarak bir sistem için kural tabanı geliştirdiğimizde, sistem çıkışını etkileyebilecek ölçülebilen giriş değerleri tespit edilmelidir. Giriş bilgisine ait değer uzayı, üyelik fonksiyonları ile bölgelere ayrılarak, dilsel ifadelerle isimlendirilir ve aynı zamanda her giriş değeri için bir üyelik ağırlığı tespit edilmiş olur. Böylece her giriş değerinin, ait olduğu bir bölgesi ve bir üyelik ağırlığı olur. Kural tabanı, her biri bir bölgeyi temsil eden dilsel ifadelerle düzenlenir. Örneğin “1. giriş sıcak, 2. giriş normal ise, çıkış yüksektir.” gibi bir kural satırında görüldüğü gibi, kural tabanını oluşturan bilgiler, tamamen dilsel ifadelerdir. Fakat her kural satırındaki, tespit edilmiş olan çıkış değeri, birim fonksiyonlarla oluşturulmuş ise, sayısal değerlerle de ifade edilebilir. Bu durumda oluşturulacak kural satırları “1. Giriş sıcak. 2. giriş normal ise, çıkış 1.5’tur.” şeklinde bir kuralın benzeri olabilir. Kural satırları birbirlerine “veya” bağlacı ile bağlanır ve her kural satırında girişler ve çıkışlar arasında “ve” bağlacı kullanılır.

Kural tabanında, giriş değerleri ve kontrol çıkışı değerlerinin birbirleri arasında “ve” ifadesi, ayrı davranışları ifade eden kural kümeleri arasında “veya” ifadesi kullanılır.

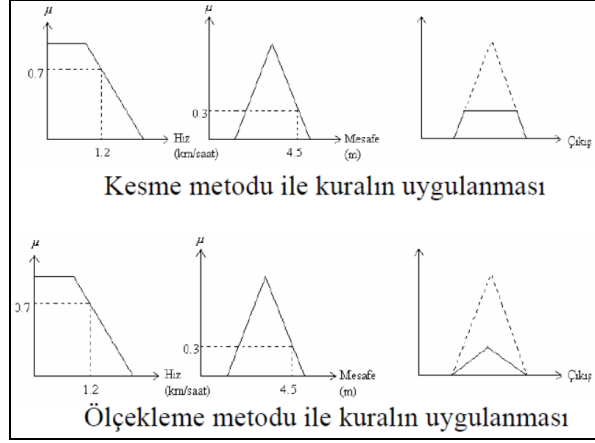
Kontrol tabanını oluşturan kurallar aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Her kural bağımsız bilgi parçasını içerir.
- Yeni kurallar diğer kurallardan bağımsız olarak kural tabanına eklenebilir.
- Eski kurallar diğer kurallardan bağımsız olarak değiştirilebilir.
- Kontrol sisteminin kararlarını ve çözümlerini içerir [30].

Bulanık mantıkta karşılaşılan, bulanık muhasebe ya da diğer bir deyişle bulanık kural, bilinen gerçeklerin oluşturduğu bir küme için sonuçların türetildiği bir işlem katıdır [28].

Birden fazla bulanık girdinin işin içine girmesi durumunda, bu fonksiyonlardan iki farklı yöntem ile çıkış fonksiyon grafiği elde edilebilir. Metotların adları şunlardır:

- Kesme Metodu
- Ölçekleme Metodu (Şekil 5. 6)



Şekil 5. 6 Kesme ve ölçekleme metodu ile kuralın uygulanması gösterimi [29]

5.2.3.3 Durulaştırma İşlemi

Bulanık sistemden elde edilen çıkış bulanık bir sayıdır. Kontrol işleminin yapılabilmesi için, kontrol işaretinin bulanık olmayan, sayısal bir işaret olması gerekir. Bu ünite, çıkarım ünitesinden gönderilen kontrol işaretinin fiziksel ve kesin sayılara getirilmesini sağlamaktadır. z bulanık çıkışı ve z_0 'da gerçek sayı olan kontrol çıkışı olmak üzere durulaştırıcı sembolik olarak aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [27].

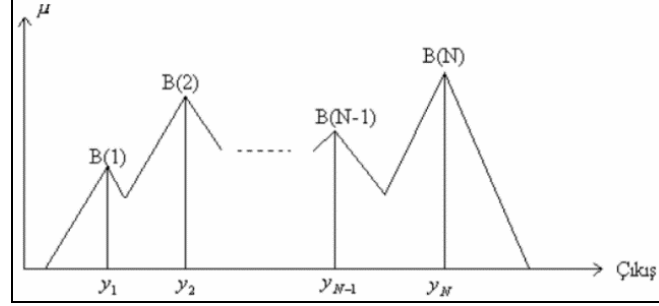
z_0 = durulaştırıcı (z)

Pratik uygulamalarda, özellikle mühendislik plan, proje ve tasarımlarında boyutlandırmalar için kesin sayısal değerlere gerek duyulmaktadır. Yapay zeka çalışmalarındaki bulanık değişken, küme, mantık ve sistemlerin bulanık olabilecek çıkarımlarının kesin sayılar haline dönüştürülmesi gerekir. Bulanık olan bilgilerin kesin sonuçlar haline dönüştürülmesi için yapılan işlemlerin tümüne birden durulaştırma işlemleri adı verilir. Durulaştırma işleminde kullanılan yöntemlerden ikisi yükseklik ve ağırlık merkezi yöntemidir [29].

Yükseklik yönteminin kullanılması için tepeleri olan çıkarım bulanık kümelerine gerek vardır. Yükseklik metoduna göre durulaştırma işlemi yapıldığında, kesin sonuç aşağıdaki ifadeden elde edilir.

$$y_0 = \frac{\sum \mu(y_i)y_i}{\sum \mu(y_i)} \quad (5.1)$$

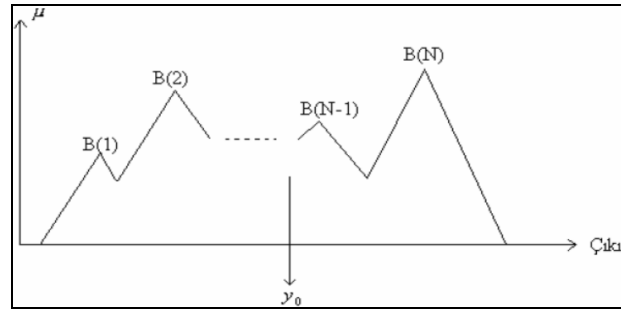
Denklem (5.1)'de görülen y_i değerleri, bulanıklaştırmada oluşmuş her bir fonksiyonun üyelik derecesi en büyük olan elemanlarıdır. $\mu(y_i)$ değerleri ise, bu elemanlara karşılık gelen üyelik derecelerini belirtir [29].



Şekil 5. 7 Yükseklik metodunun gösterimi [29]

Burada B(1), B(2) ... B(N) her bir kurala karşılık gelen çıkışları göstermektedir. Durulaştırma işlemlerinde, yaygın olarak kullanılan işlemlerden biri de ağırlık merkezi yöntemidir. Adından anlaşılacağı gibi bu yöntemle, çıkış fonksiyonunun altında kalan alanın ağırlık merkezi eşitlik (5.2)'deki ifadeden faydalanılarak bulunur [29].

$$y_0 = \frac{\int \mu(y)y}{\int \mu(y)} \quad (5.2)$$

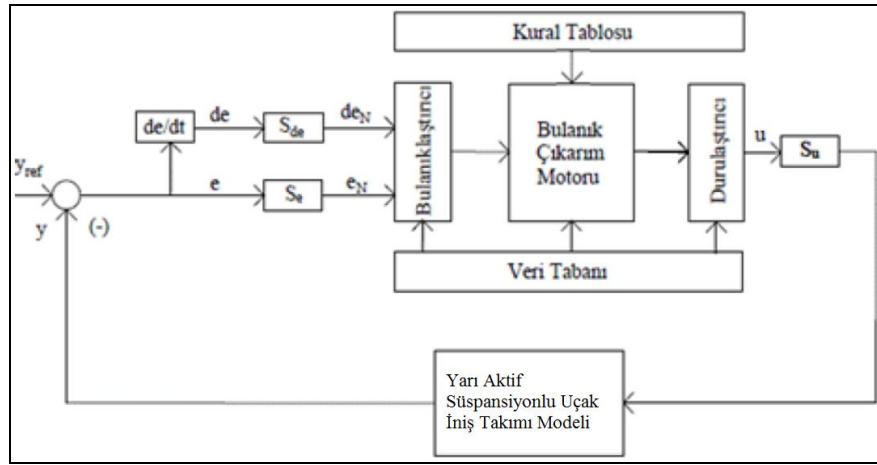


Şekil 5. 8 Ağırlık merkezi yönteminin gösterimi [29]

5.3 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü

Klasik bulanık mantıklı kontrolör yapısı iki giriş bir çıkışlıdır (Şekil 5.9). Uçak iniş takımı modeli için yapılan tasarımda (y), MR sönümleyicinin üst ucundaki yer değişimi olarak tanımlanırken, (dy) ise MR sönümleyicinin üst uç noktasındaki hız olarak ifade edilmektedir. Çıkış sinyali olan (u), ise gerilimdir. Tasarlanan kontrolcünün üyelik

fonksiyonları, Şekil 5.10'da verilmektedir. Bu dilsel değerler durulaştırma adımında nümerik çıkış değerlerine dönüştürülmektedir. Girişler için kullanılan dilsel değerler: XNB (Negatif Büyük), XNS (Negatif Küçük), Z (Sıfır), XPS (Pozitif Küçük), XPB (Pozitif Büyük) şeklindedir. Çıkış için kullanılan dilsel değerler ise: UNBB (Negatif Çok Büyük), UNB (Negatif Büyük), UNM (Negatif Orta), UNS (Negatif Küçük), UZ (Sıfır), UPS (Pozitif Küçük), UPM (Pozitif Orta), UPB (Pozitif Büyük), UPBB (Pozitif Çok Büyük), VN (Negatif), VZ (Sıfır), VP (Pozitif) şeklindedir. Girişler $[-1, 1]$, çıkış ise gerilim negatif olamayacağından $[0, 1]$, aralığında normalize edilmiştir.

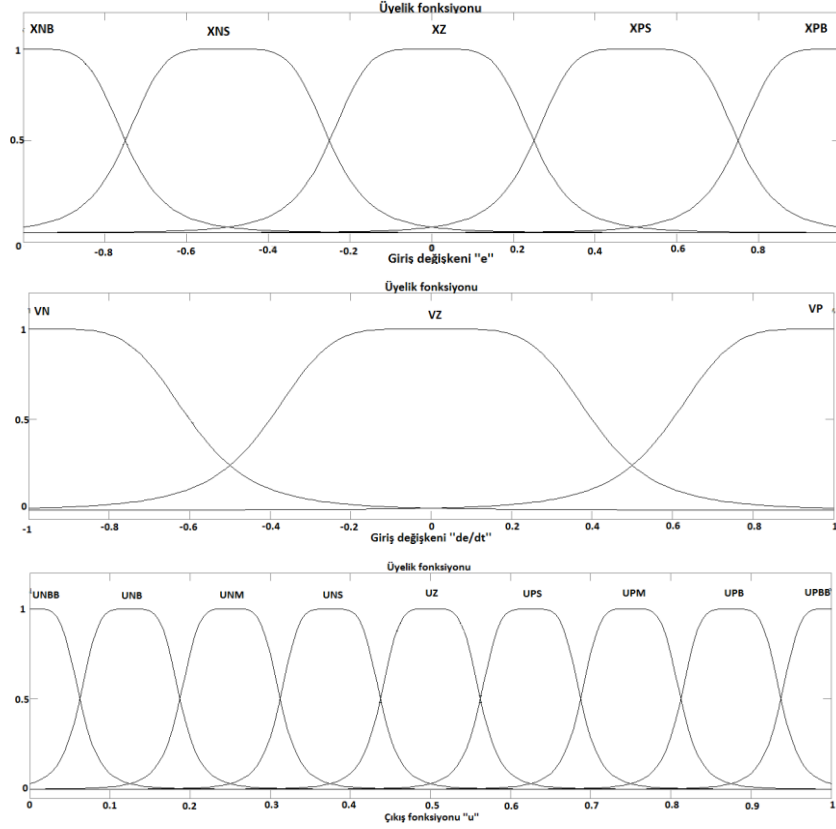


Şekil 5. 9 Bulanık mantıklı kontrolörün genel yapısı

Bulanık mantıklı kontrolcünün üyelik fonksiyonlarına göre giriş ve çıkış dilsel değerleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan kural tablosu Çizelge 5.2'de verilmiştir [19].

Çizelge 5. 2 Bulanık mantıklı kontrolör için kural tablosu [19]

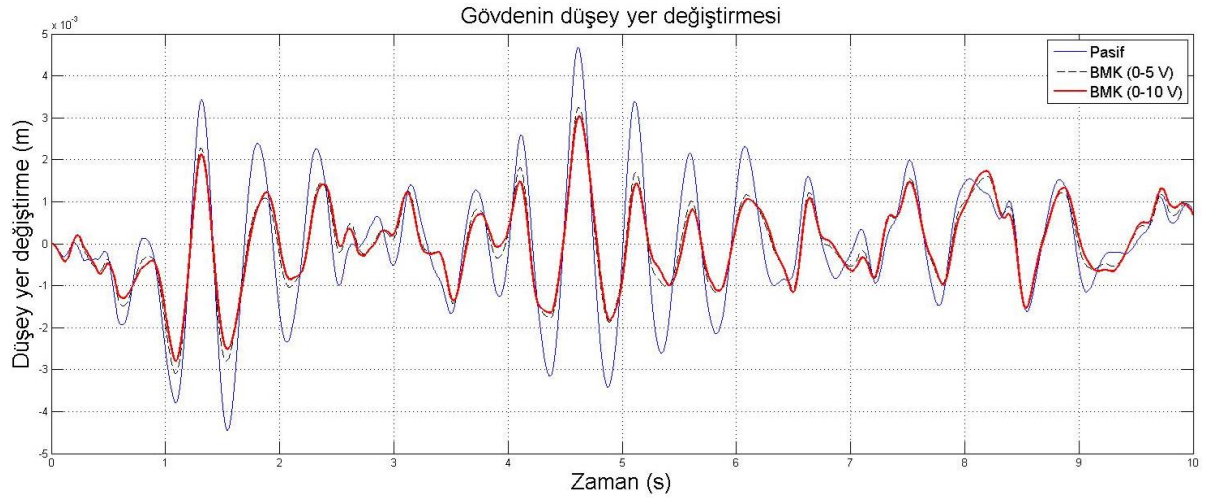
$\begin{matrix} y \\ dy \end{matrix}$	VN	VZ	VP
XNB	UNB	UNM	UNS
XNS	UNM	UNS	UZ
XZ	UNS	UZ	UPS
XPS	UZ	UPS	UPM
XPB	UPS	UPM	UPB



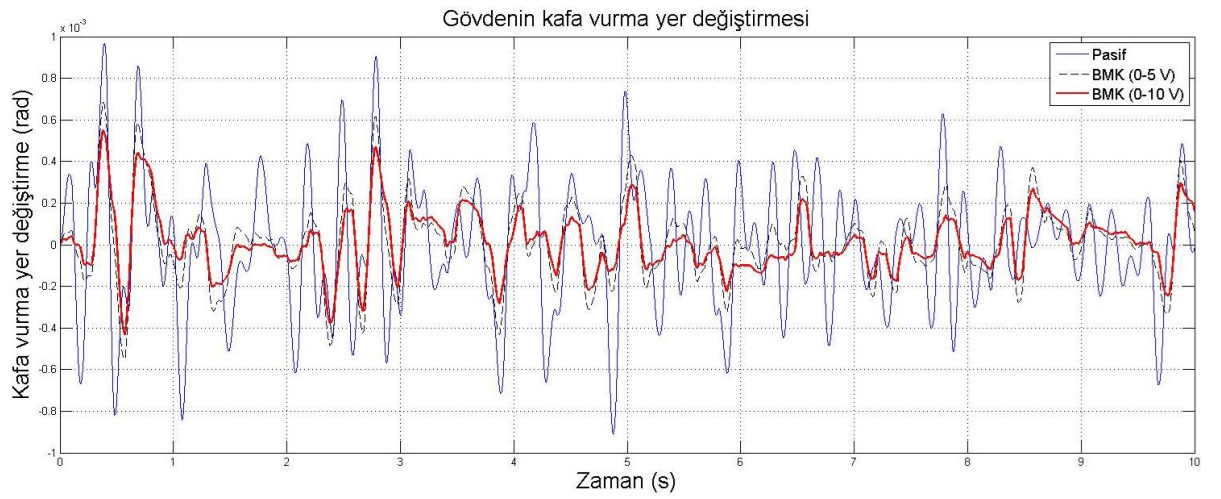
Şekil 5. 10 Girişler ve çıkış için kullanılan üyelik fonksiyonları [19]

5.3.1 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü (Rasgele Yol Girişli)

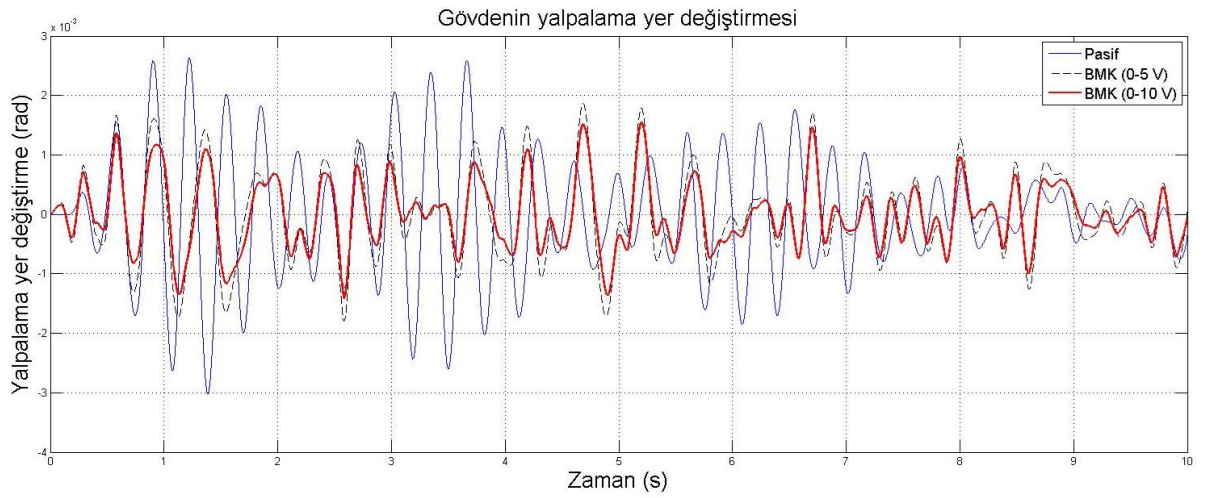
Uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin bulanık mantıklı kontrolü Bölüm 4.3.1'deki MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli için kabul edilen durumlara göre incelenmiştir. Bu kabullere göre, yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli pasif ve Bulanık Mantık Kontrol (BMK) kontrolcüye uygulanan gerilimler olan 0-5 ve 0-10 volt arasındaki duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Pasif ve BMK kontrolcüye uygulanan gerilimler arasındaki karşılaştırma uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve ön-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmıştır. Uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme simülasyonları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.11 ile Şekil 5.22 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince çizgi, BMK kontrolcüye uygulanan 0-5 volt durumu ince kesikli siyah çizgi ve 0-10 volt ile belirlendiği durum ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



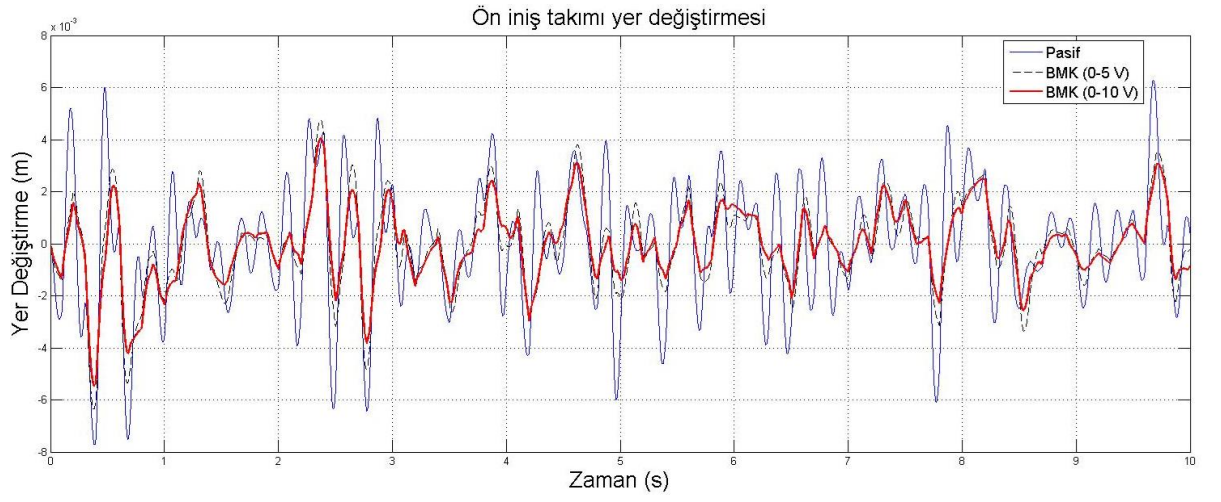
Şekil 5. 11 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi



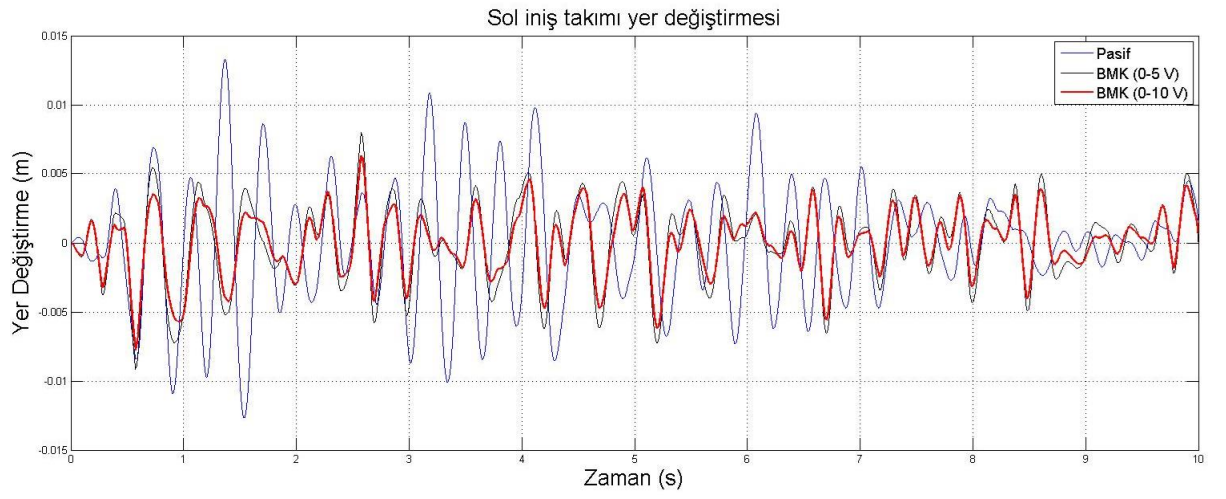
Şekil 5. 12 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi



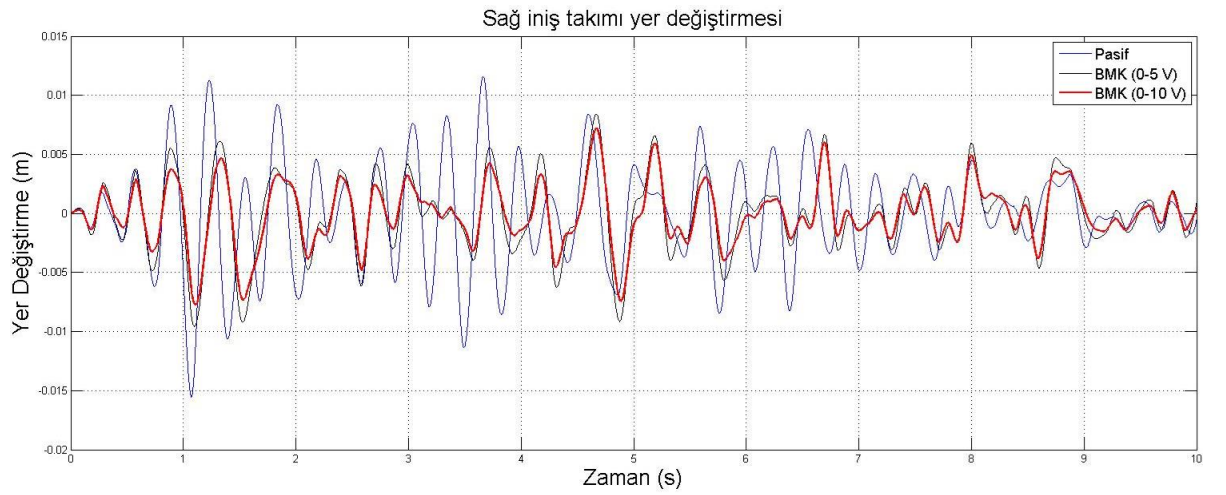
Şekil 5. 13 Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi



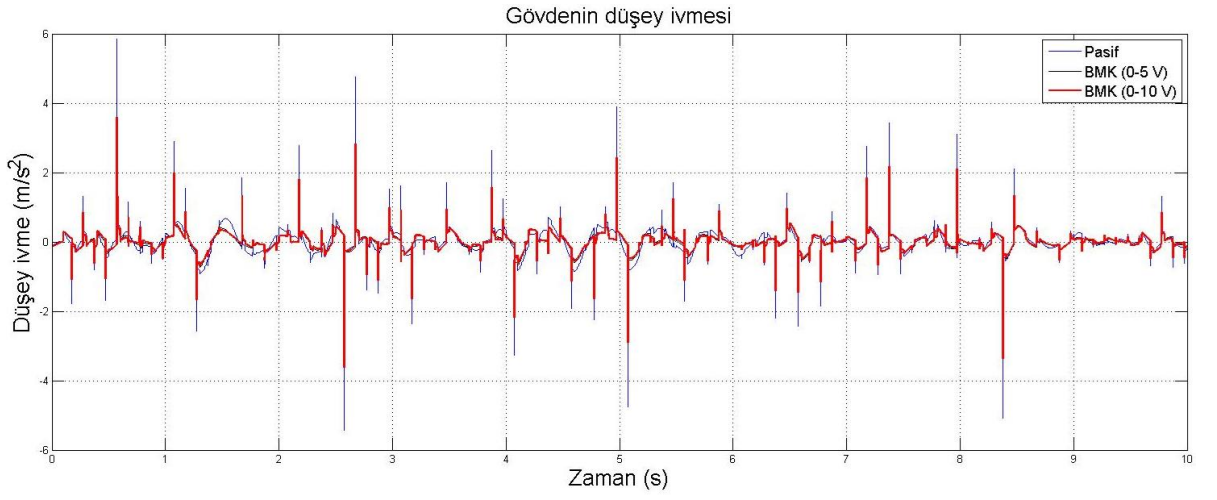
Şekil 5. 14 Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi



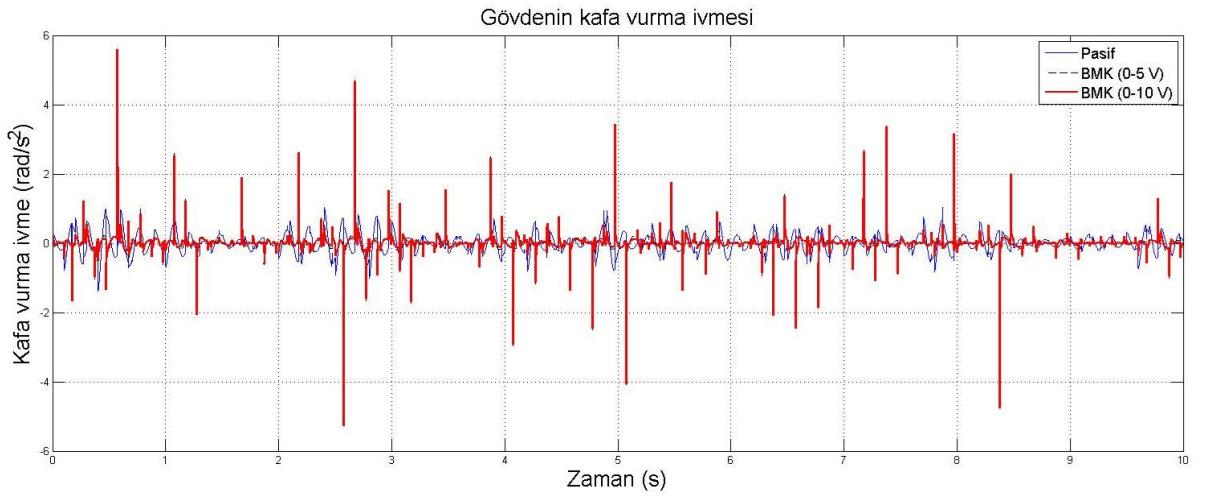
Şekil 5. 15 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



Şekil 5. 16 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



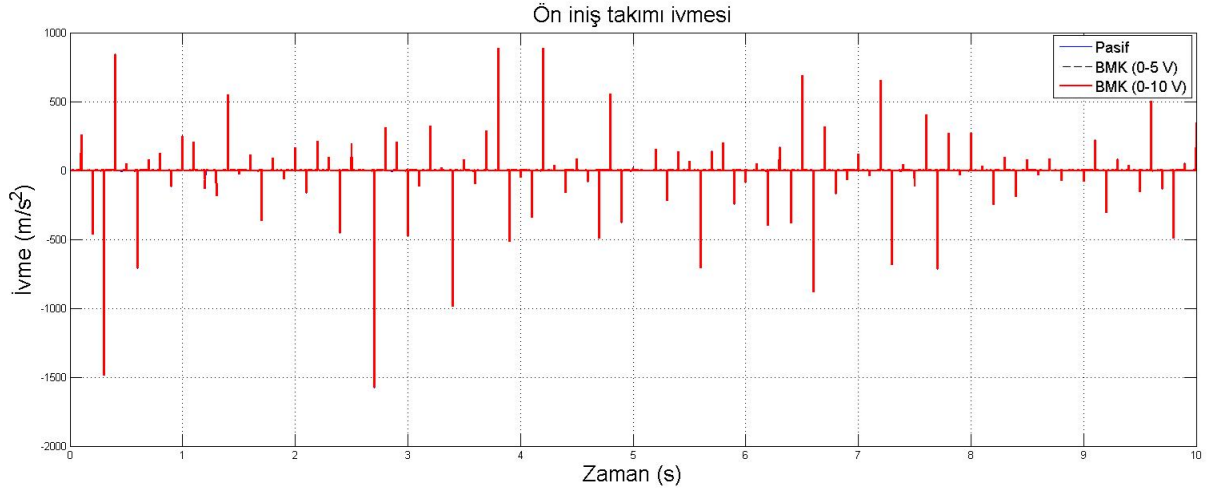
Şekil 5. 17 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



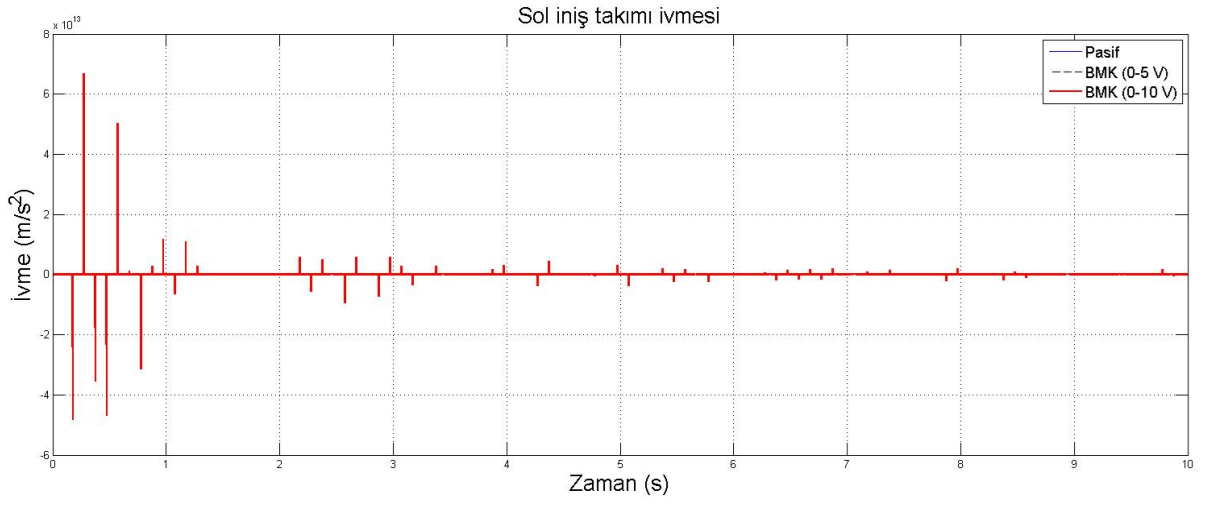
Şekil 5. 18 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



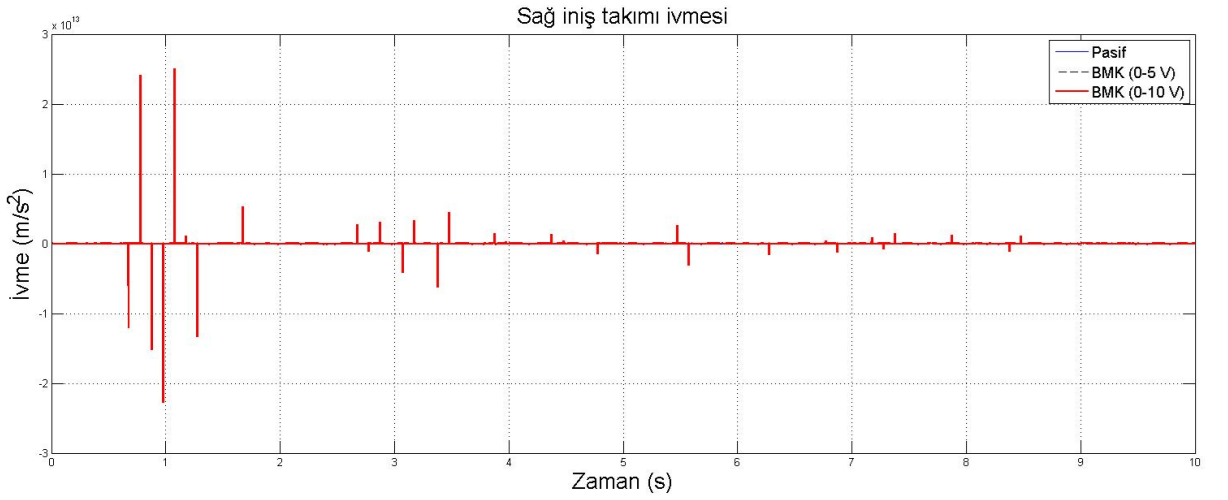
Şekil 5. 19 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 5. 20 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 21 Uçak sol iniş takımı ivmesi

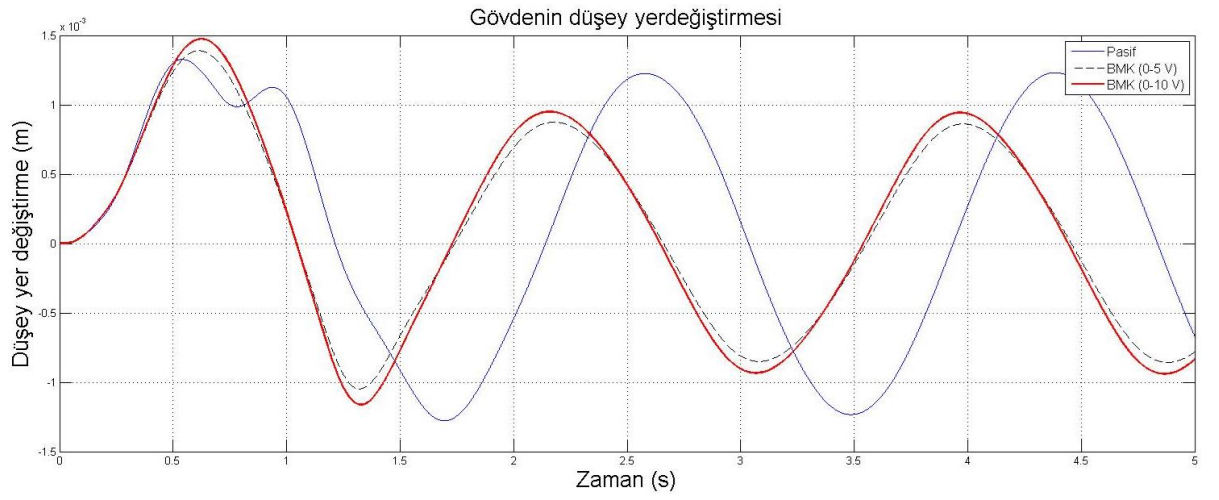


Şekil 5. 22 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

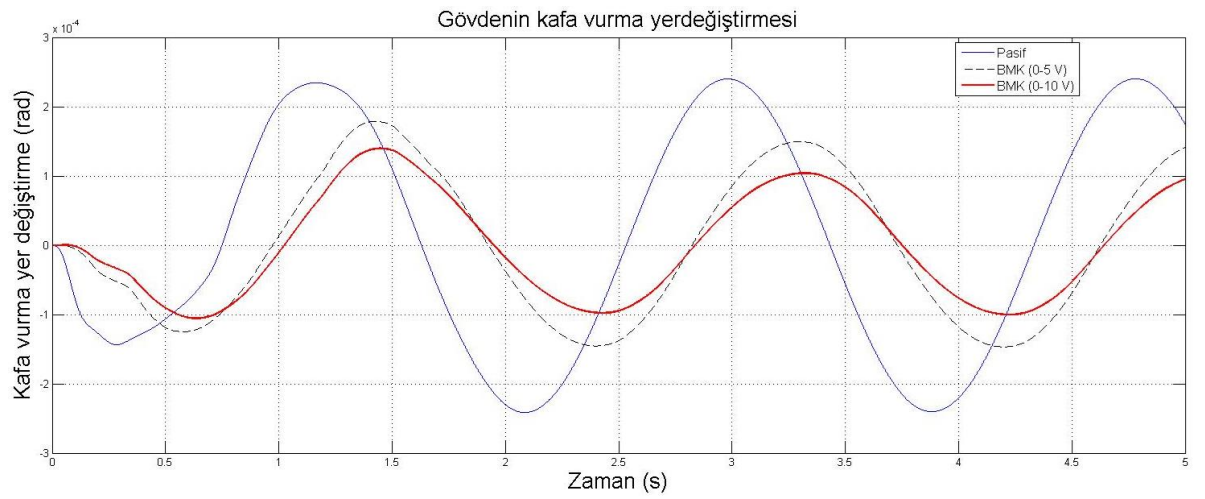
Bulanık mantıklı kontrolcüye uygulanan gerilimler olan 0-5 ve 0-10 volt arasındaki durum ile pasif süspansiyon sistemi simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, 0-10 volt arası gerilim uygulandığında uçak hareketlerindeki iyileşmenin, 0-5 volt arası iyileşmeye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Bu sebeple uçak iniş takımlarının MR damperle yarı aktif bulanık mantıklı kontrolü sayesinde uçak iniş takımı titreşim genliklerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

5.3.2 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin Bulanık Mantıklı Kontrolü (Sinüsoidal Yol Girişli)

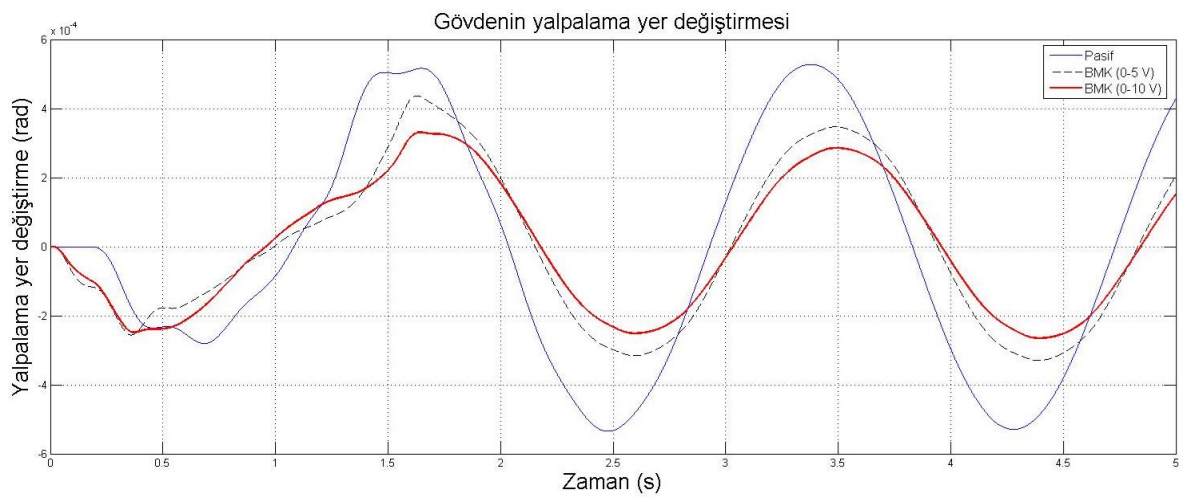
Uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin bulanık mantıklı kontrolü Bölüm 4.3.2'deki MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli için kabul edilen durumlara göre incelenmiş olup tek farklı değişiklik olarak uçak arka sol ve sağ iniş takımları arasında 1 s'lik zaman gecikmesi göz önünde bulundurularak sistemin hareketleri incelenmiştir. Bu kabullere göre, yarı aktif MR sönümleyicili uçak iniş takımı modeli pasif ve BMK kontrolcüye uygulanan gerilimler olan 0-5 ve 0-10 volt arasındaki duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Pasif ve BMK kontrolcüye uygulanan gerilimler arasındaki karşılaştırma uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve ön-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmıştır. Uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme simülasyonları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 5.23 ile Şekil 5.34 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince çizgi, BMK kontrolcüye uygulanan 0-5 volt durumu ince kesikli siyah çizgi ve 0-10 volt ile belirlendiği durum ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



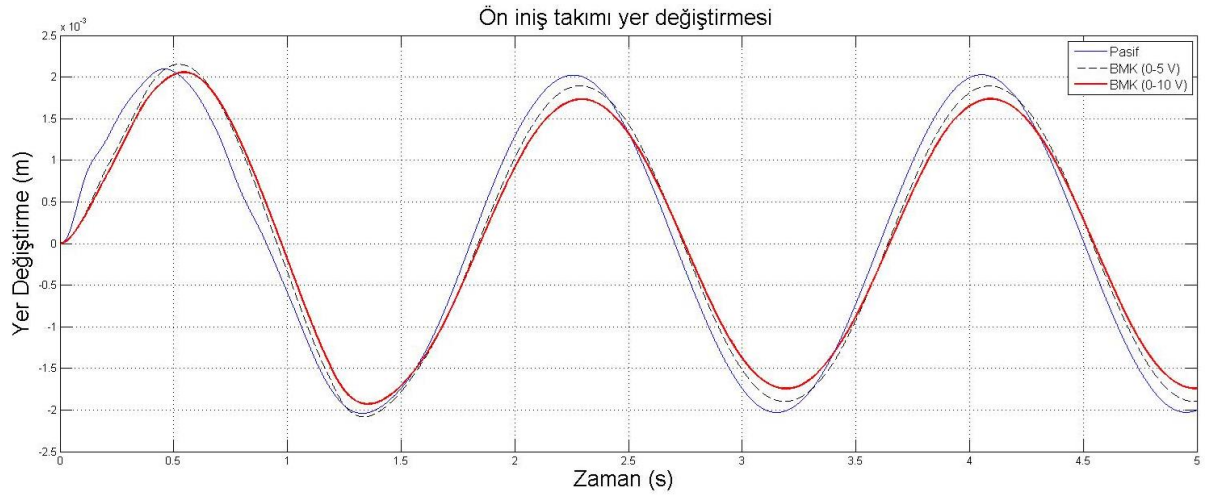
şekil 5. 23 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi



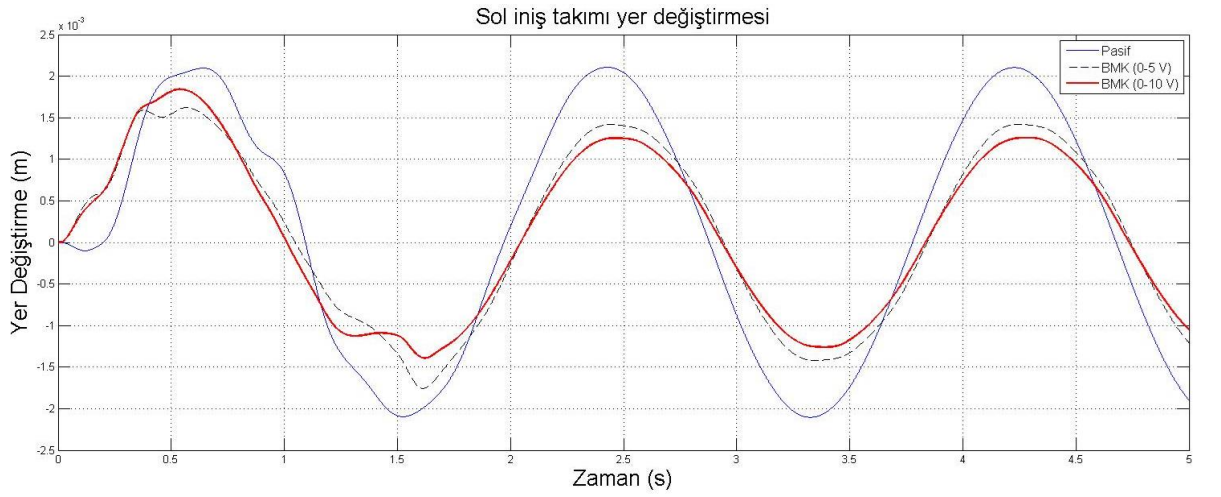
şekil 5. 24 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi



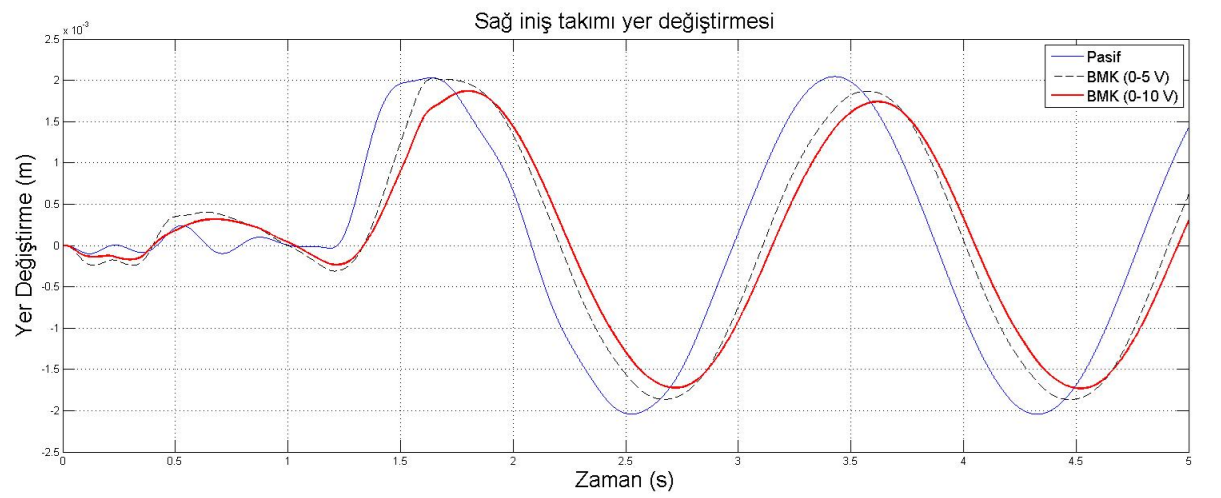
şekil 5. 25 Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi



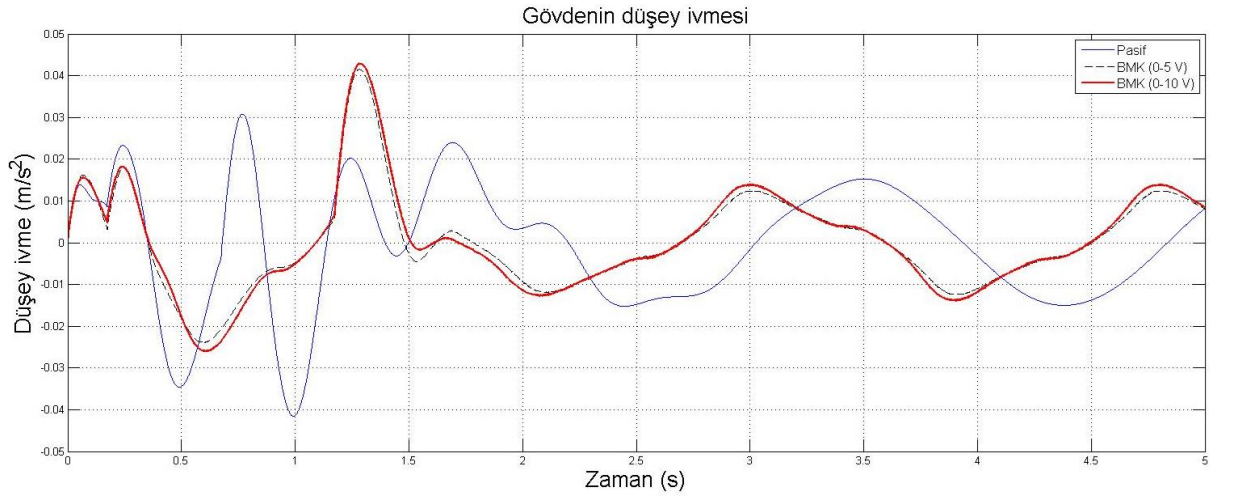
Şekil 5. 26 Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi



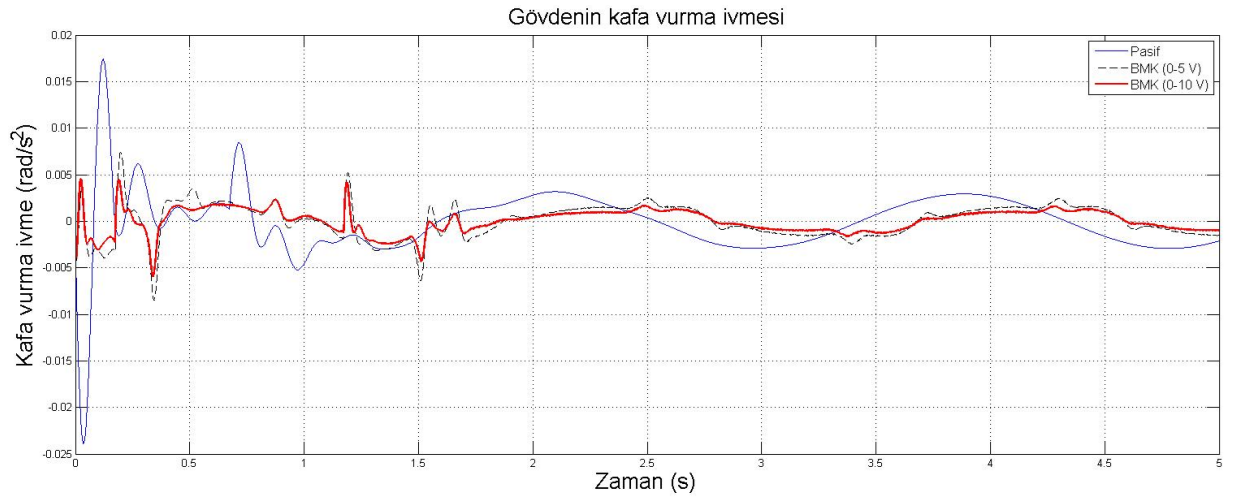
Şekil 5. 27 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



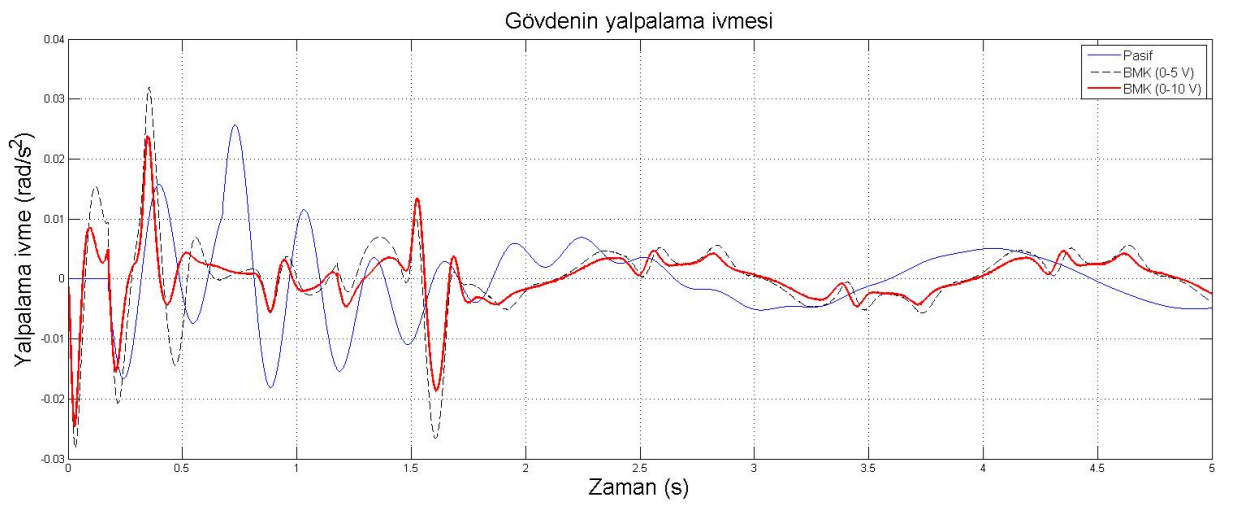
Şekil 5. 28 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



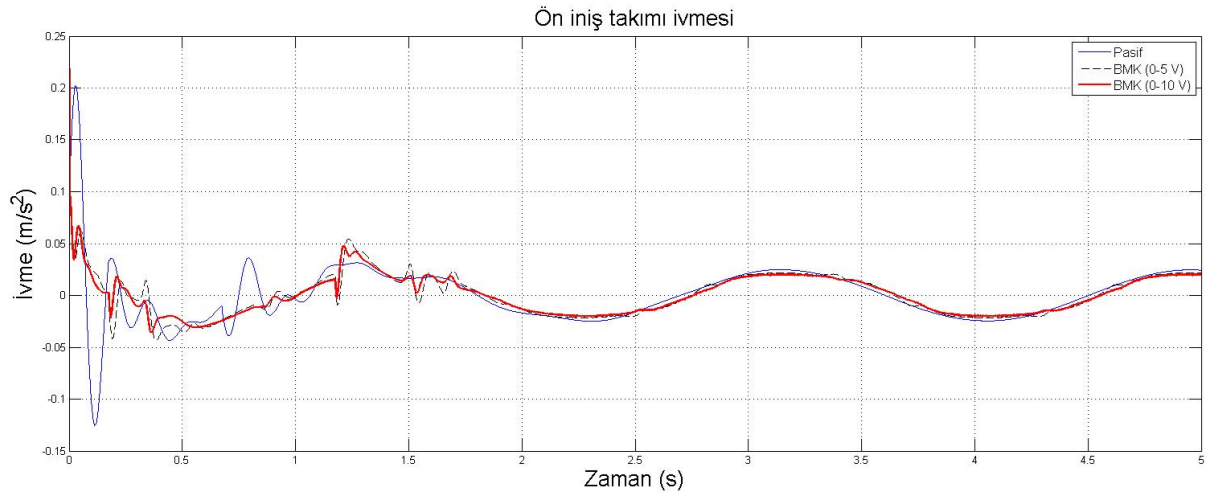
Şekil 5. 29 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



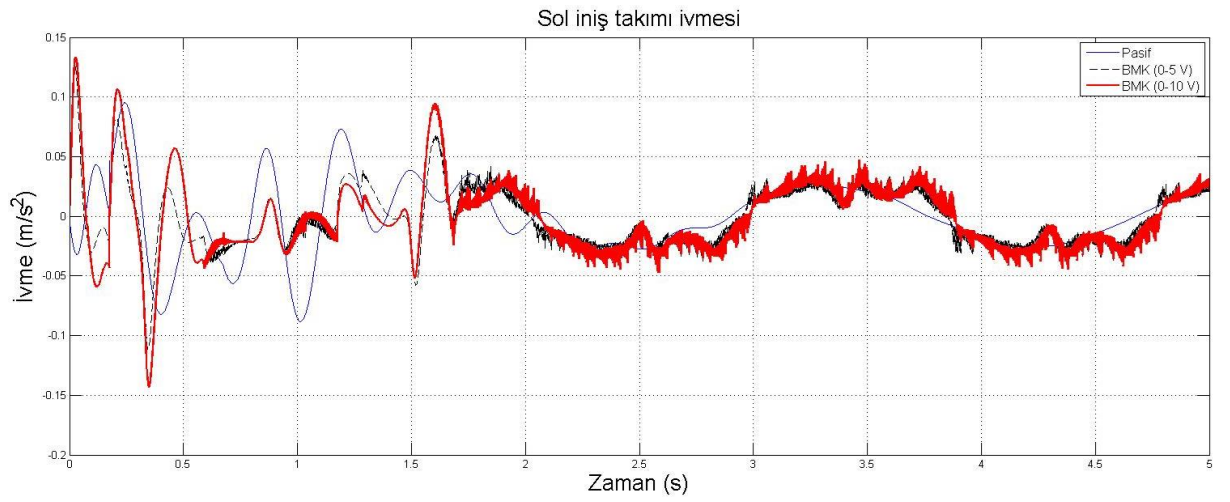
Şekil 5. 30 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



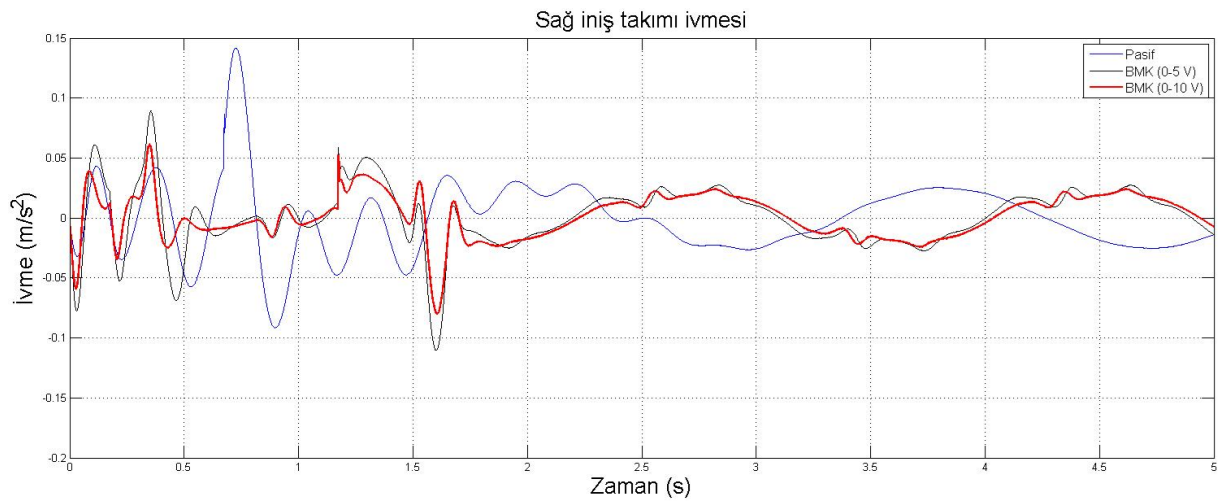
Şekil 5. 31 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 5. 32 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 33 Uçak sol iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 34 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

BMK kontrolcüye uygulanan gerilimler olan 0-5 ve 0-10 volt arasındaki durum ile pasif süspansiyon sistemi simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, 0-10 volt arası gerilim uygulandığında uçak hareketlerindeki iyileşmenin, 0-5 volt arası iyileşmeye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ile n-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde iyileşmeler sağlanmıştır. Bu sebeple uçak iniş takımının BMK kontrolü sayesinde iniş takımı titreşim genliklerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

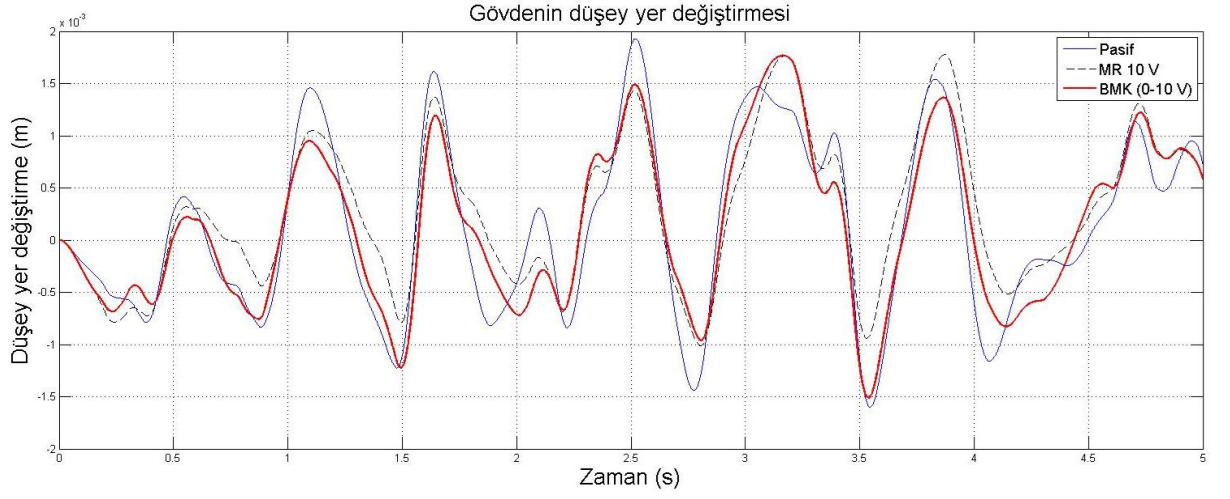
Bu sonuçlara göre, MR sönümleyicili uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin bulanık mantıklı kontrolü için yol girişi olarak rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanmıştır. Modele rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanıp, 0-10 volt arası gerilim verildiğinde, BMK kontrolcünün uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin, pasif ve BMK 0-5 volta göre daha fazla iyileştiği sonucuna ulaşılmıştır.

5.4 Uçak Iniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolünün Simülasyonlarının Karşılaştırılması

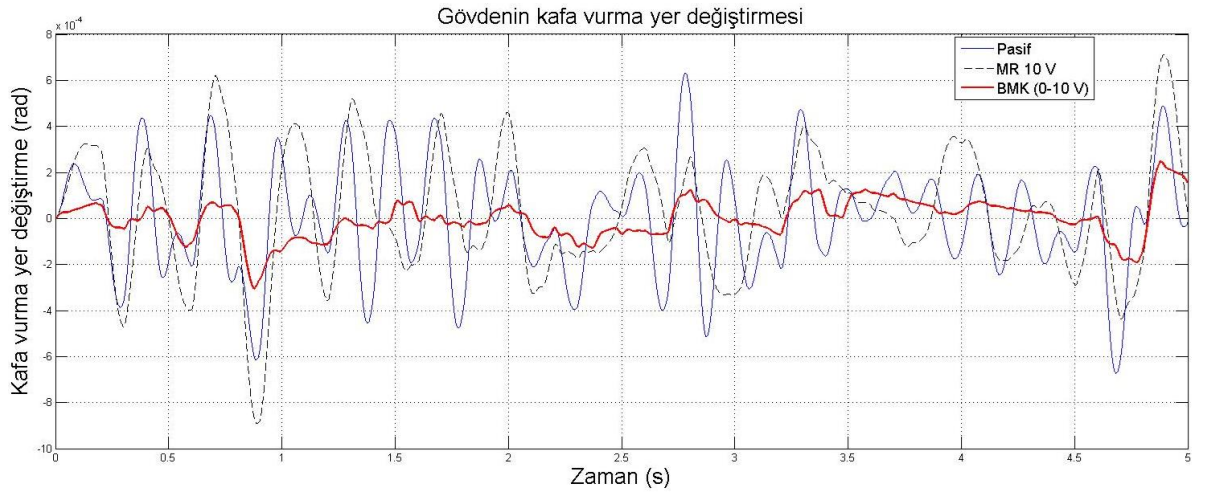
Bu kısımda ise, uçak iniş takımı modeline yukarıda uygulanan rasgele ve sinüsoidal yol girişlerindeki karşılaştırmalardan alınan veriler neticesinde pasif, en uygun voltaj değerlerine göre MR ve BMK kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır.

5.4.1 Uçak Iniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolü (Rasgele Yol Girişli)

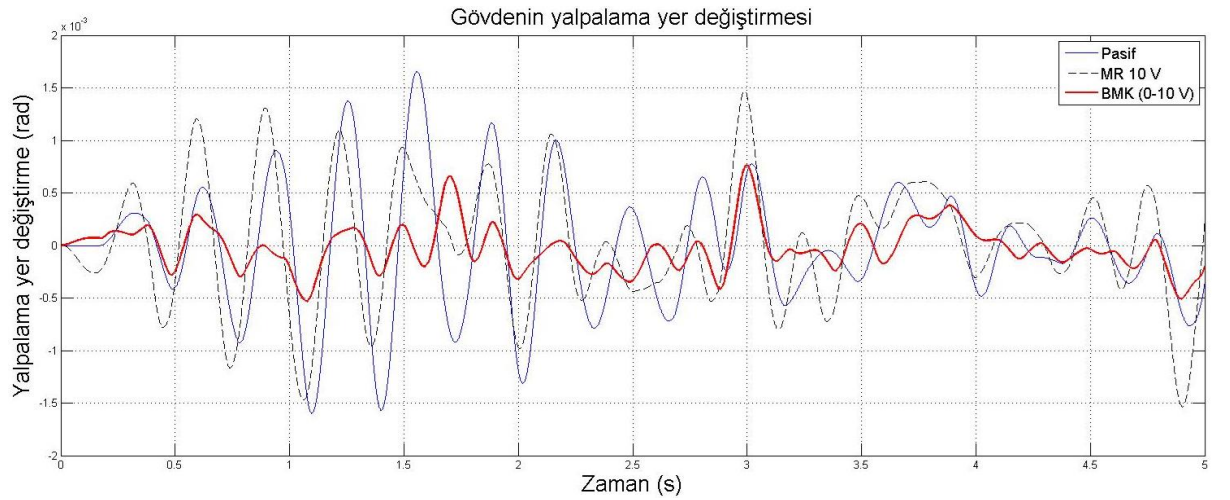
Uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin MR damperle yarı aktif bulanık mantıklı kontrolü, pasif ve Bölüm 4.3.1-5.3.1’de bulunan en uygun voltaj değerleri olan MR 10 V ve BMK (0-10 V) için kontrol performanslarının karşılaştırılması uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve n-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmış olup simülasyonları karşılaştırmalı olarak sırasıyla şekil 5.35 ile şekil 5.46 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince izgi, MR 10 V ince kesikli siyah çizgi ve BMK kontrolcüye uygulanan 0-10 voltluk gerilim ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



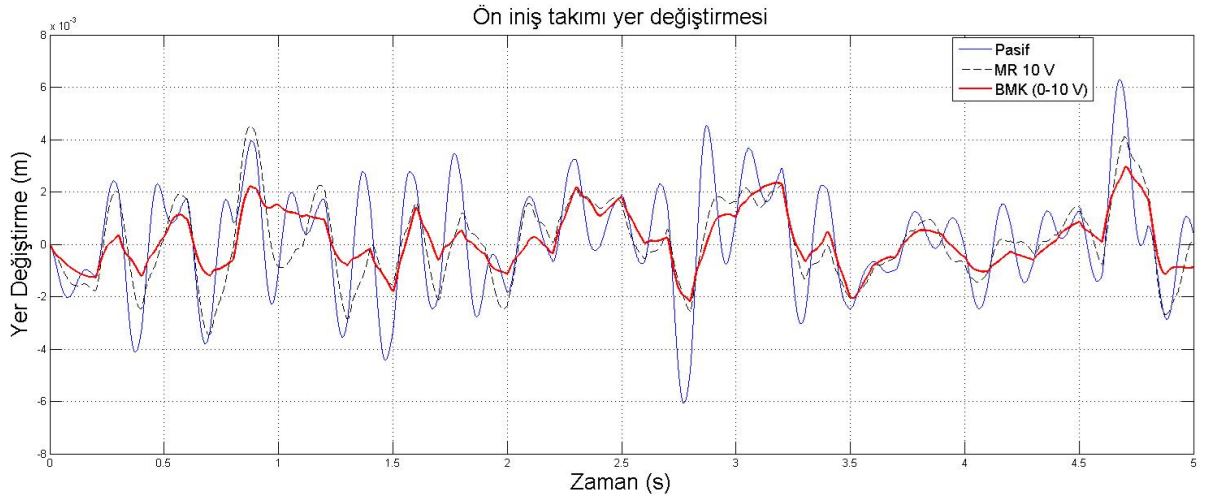
Şekil 5. 35 Uçak gövdesinin düşey yer değiştirmesi



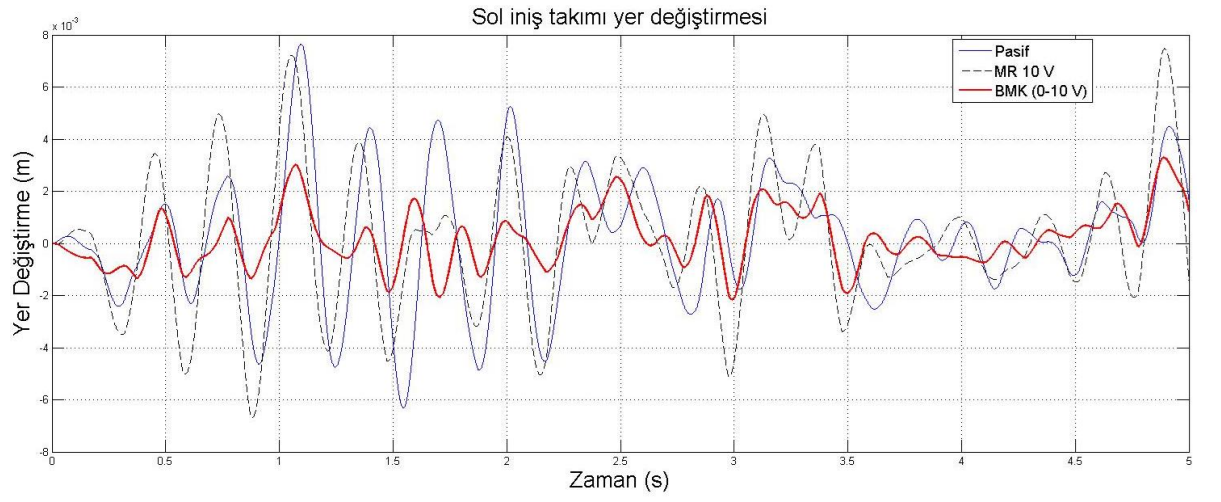
Şekil 5. 36 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değiştirmesi



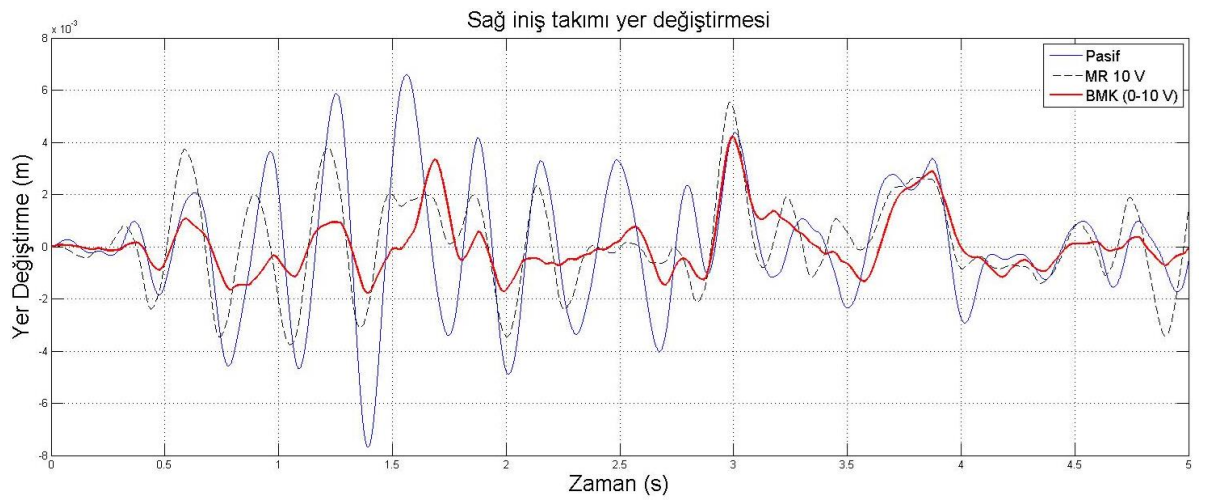
Şekil 5. 37 Uçak gövdesinin yalpalama yer değiştirmesi



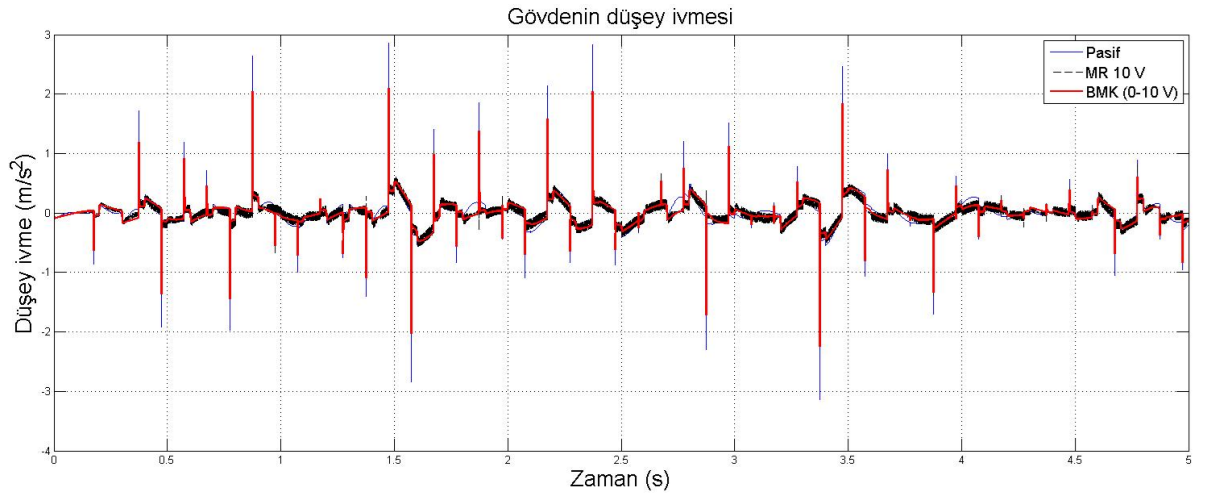
Şekil 5. 38 Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi



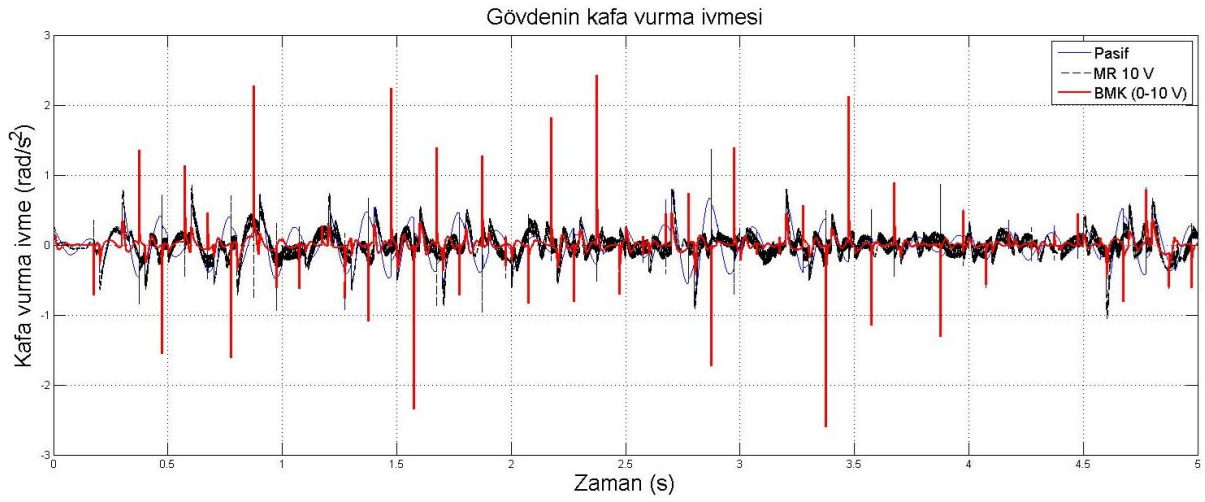
Şekil 5. 39 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



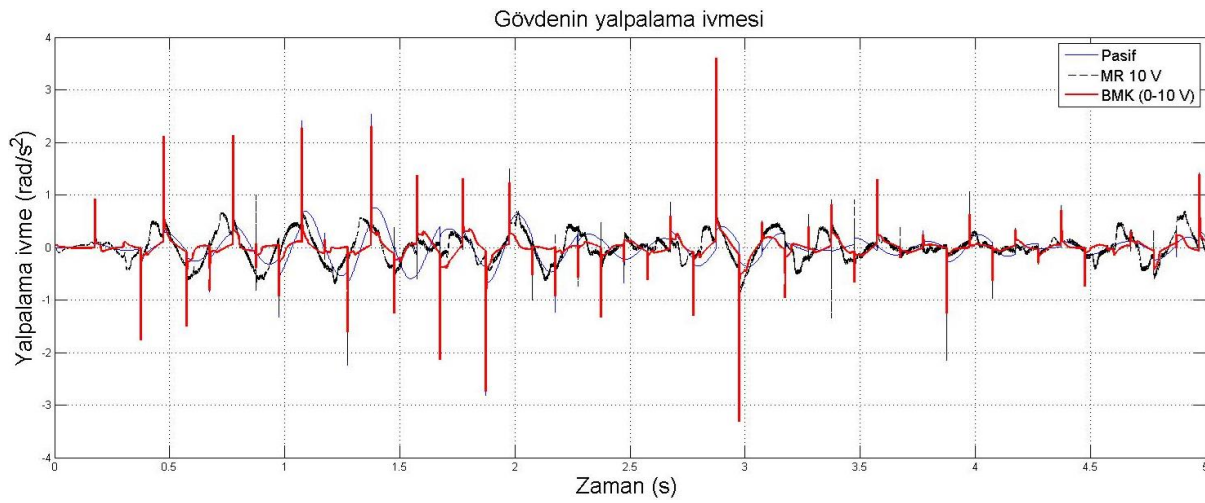
Şekil 5. 40 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



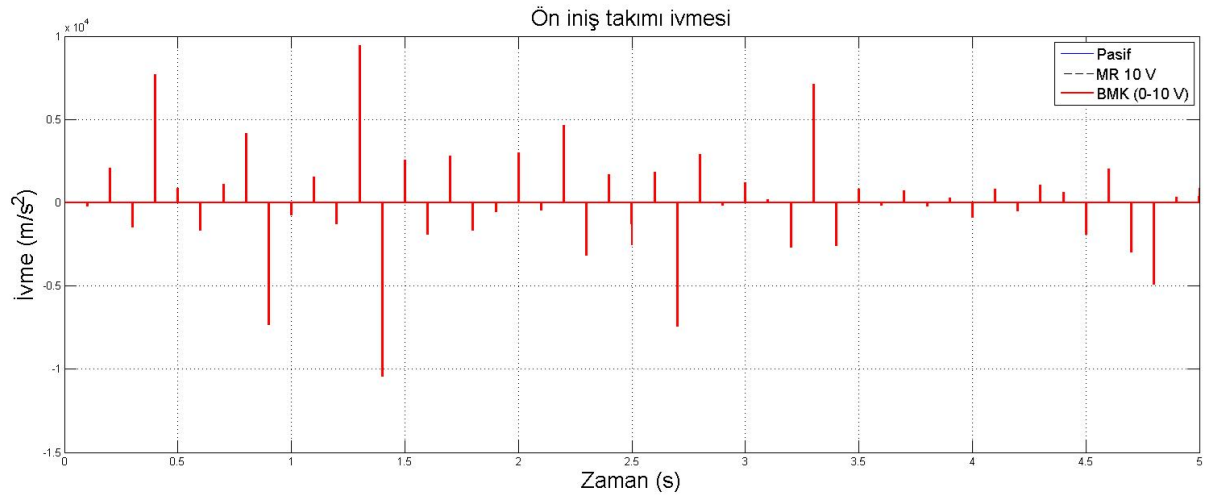
Şekil 5. 41 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



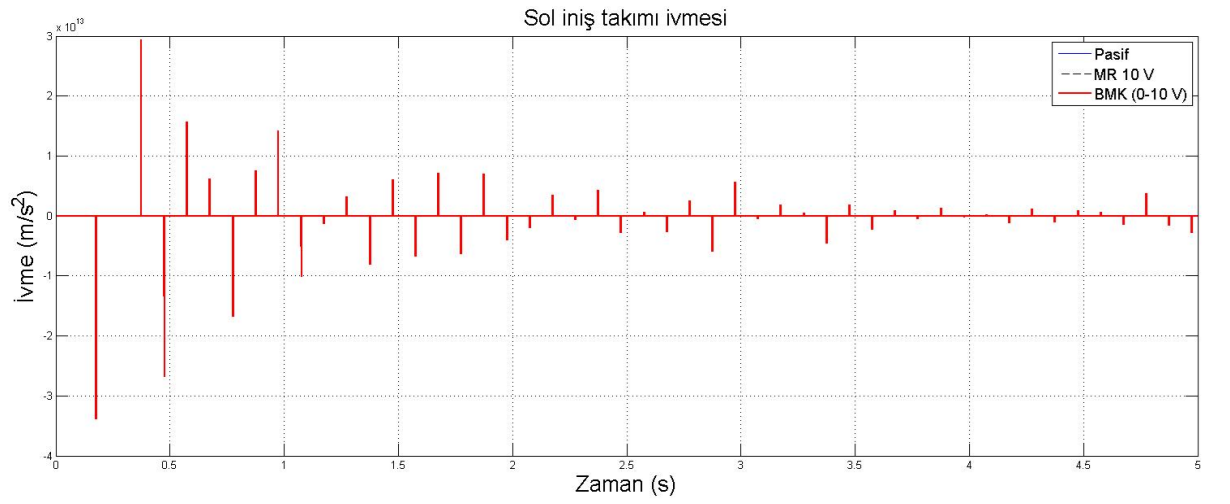
Şekil 5. 42 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



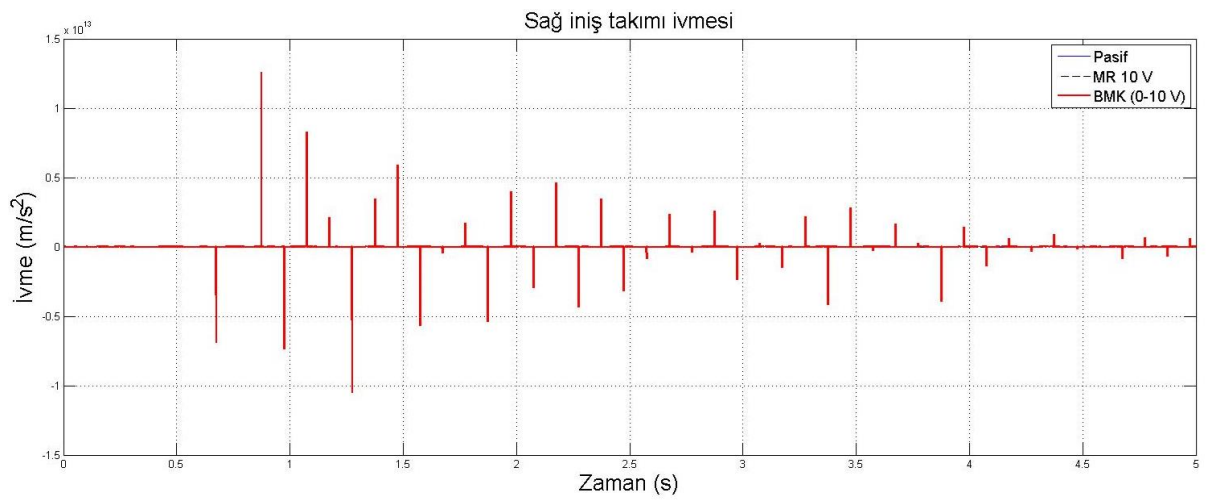
Şekil 5. 43 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 5. 44 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 45 Uçak sol iniş takımı ivmesi

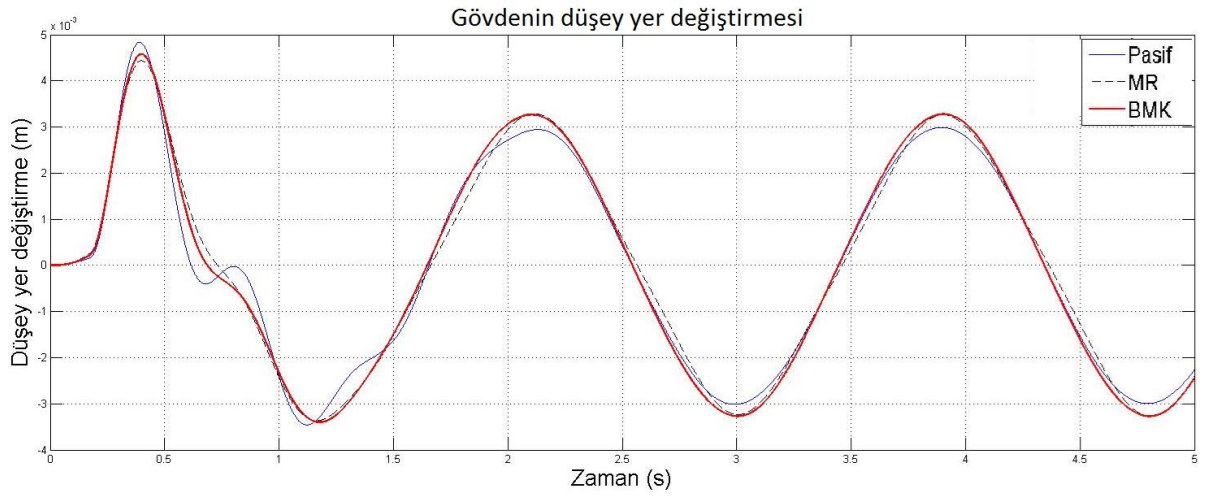


Şekil 5. 46 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

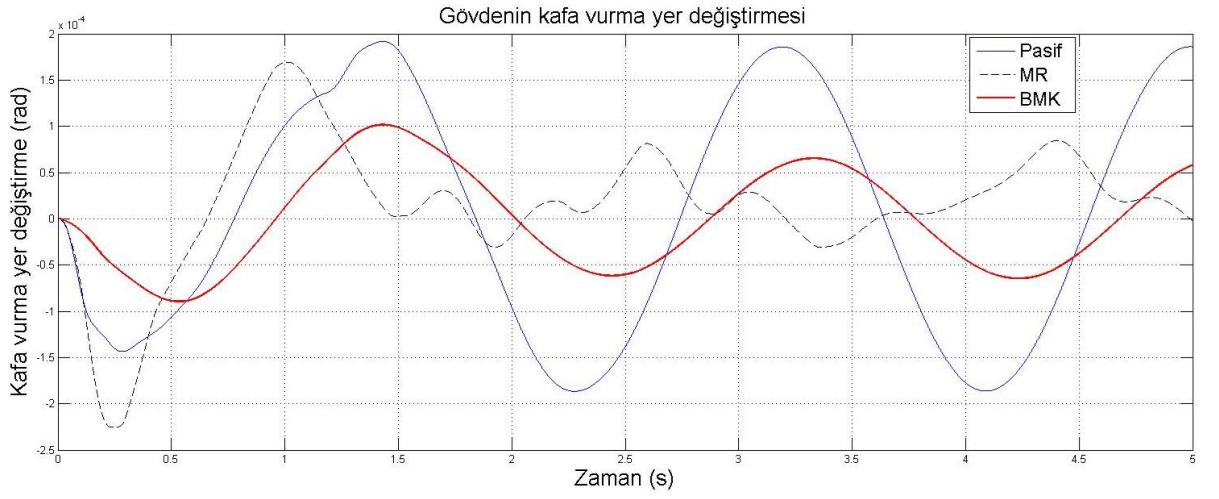
Yarı aktif uçak iniş takımı modeline ait süspansiyon sistemi için pasif, en uygun voltaj değerleri olan MR 10 V ve BMK kontrolcüye uygulanan gerilim olan 0-10 volt arasındaki duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde BMK kontrolcüye uygulanan 0-10 volt arasındaki gerilim ile uçak gövdesinin düşey, kafa vurma, yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde, MR 10 V ve pasif duruma göre iyileşmeler sağlanmıştır. Bu verilere göre uçak iniş takımlarının MR damperle yarı aktif bulanık mantıklı kontrolü sayesinde uçak iniş takımı titreşim genliklerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

5.4.2 Uçak İniş Takımı Süspansiyon Sisteminin MR Damperle Yarı Aktif Bulanık Mantıklı Kontrolü (Sinüsoidal Yol Girişli)

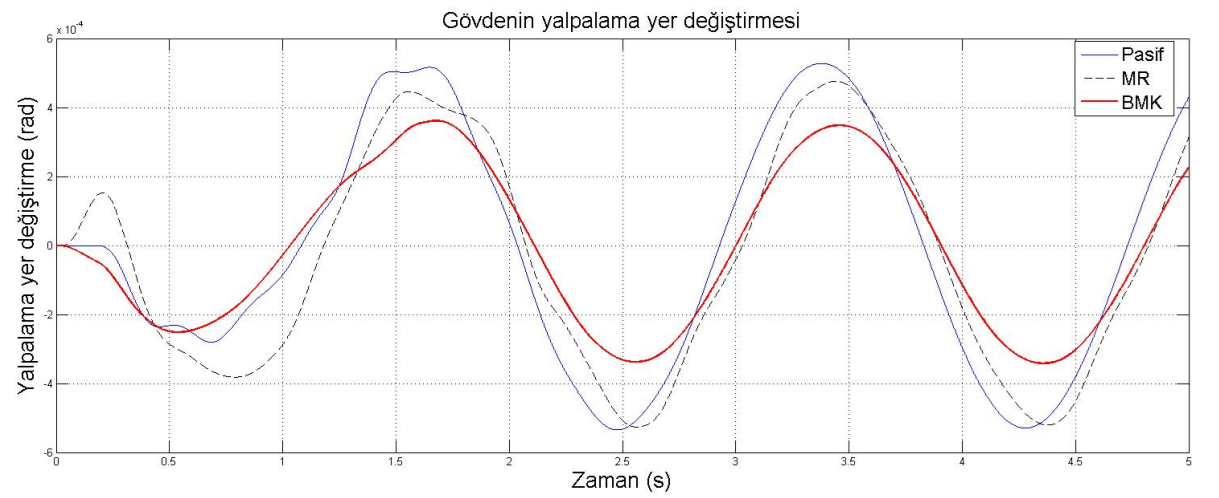
Uçak iniş takımı süspansiyon sisteminin MR damperle yarı aktif bulanık mantıklı kontrolü, pasif ve Bölüm 4.3.2-5.3.2’de bulunan en uygun voltaj değerleri olan MR 5 V ve BMK (0-10 V) için kontrol performanslarının karşılaştırılması uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma, yalpalama ve ön-sol-sağ iniş takımlarının hareketinin durumuna göre yer değiştirme ve ivmesi açısından yapılmıştır. MR için voltajın 10 V alınmamasının sebebi voltajın arttırılmasıyla beraber 5 V’a göre daha kötü sonuçların alınmasıdır. Bu sebeple, karşılaştırmadaki MR için en iyi sonucu veren MR 5 V tercih edilmiştir. Uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme simülasyonları karşılaştırmalı olarak, sırasıyla Şekil 5.47 ile Şekil 5.58 arasında gösterilmektedir. Burada, pasif durum düz mavi ince çizgi, MR 5 V ince kesikli siyah çizgi ve BMK kontrolcüye uygulanan 0-10 volt gerilim ise düz kırmızı kalın çizgi ile gösterilmektedir.



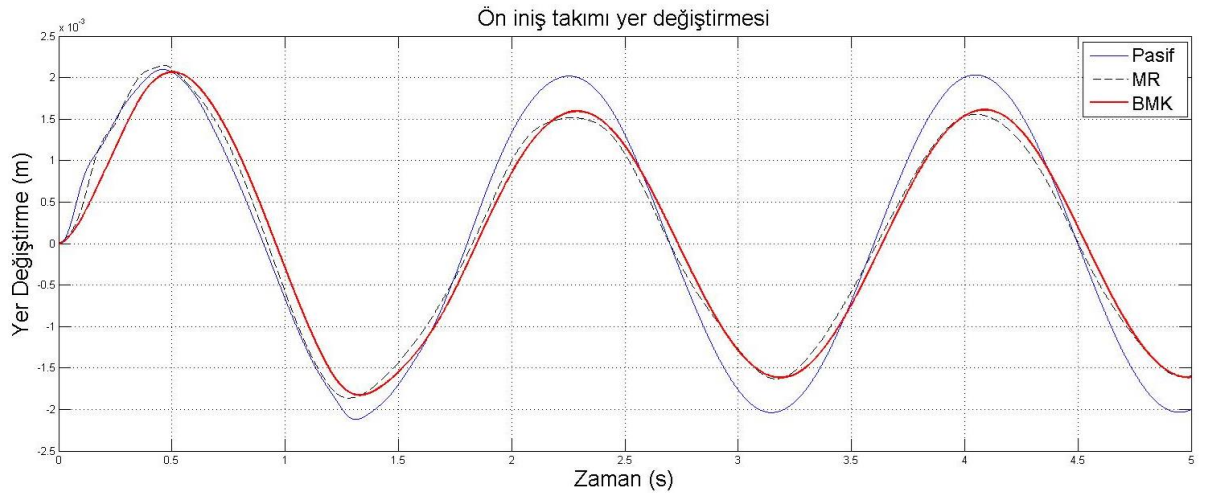
Şekil 5. 47 Uçak gövdesinin düşey yer değıştirmesi



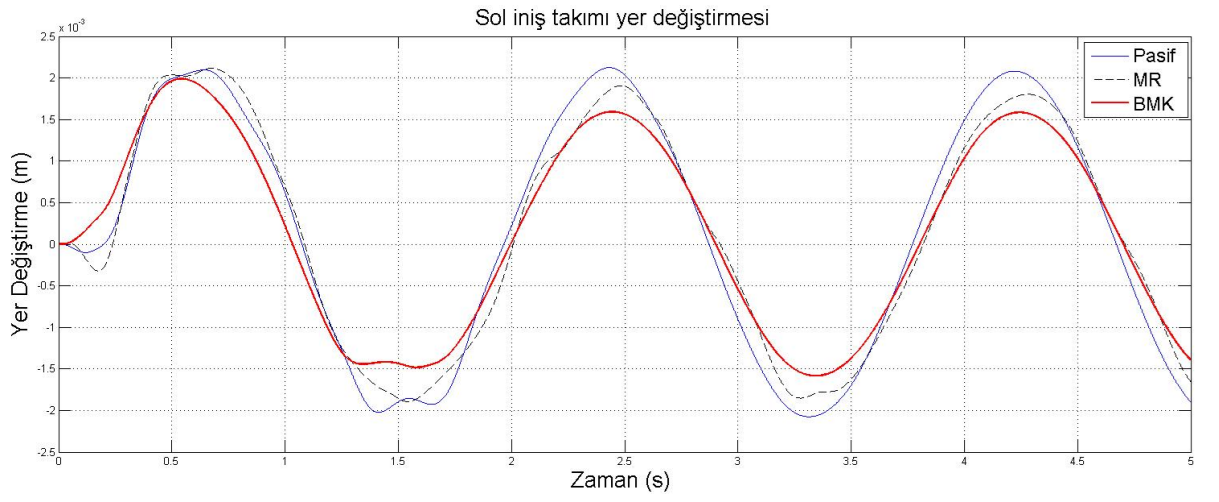
Şekil 5. 48 Uçak gövdesinin kafa vurma yer değıştirmesi



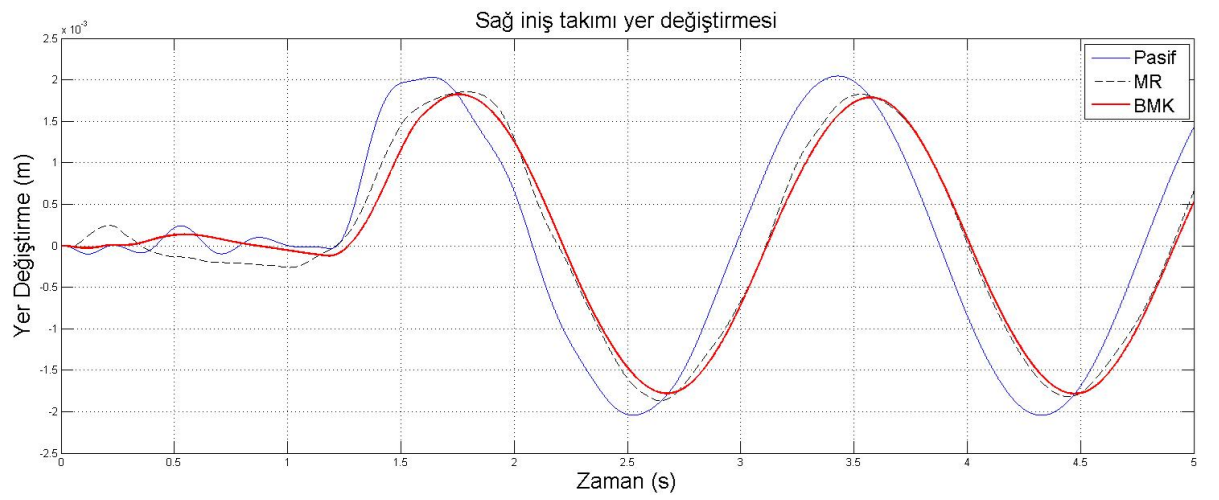
Şekil 5. 49 Uçak gövdesinin yalpalama yer değıştirmesi



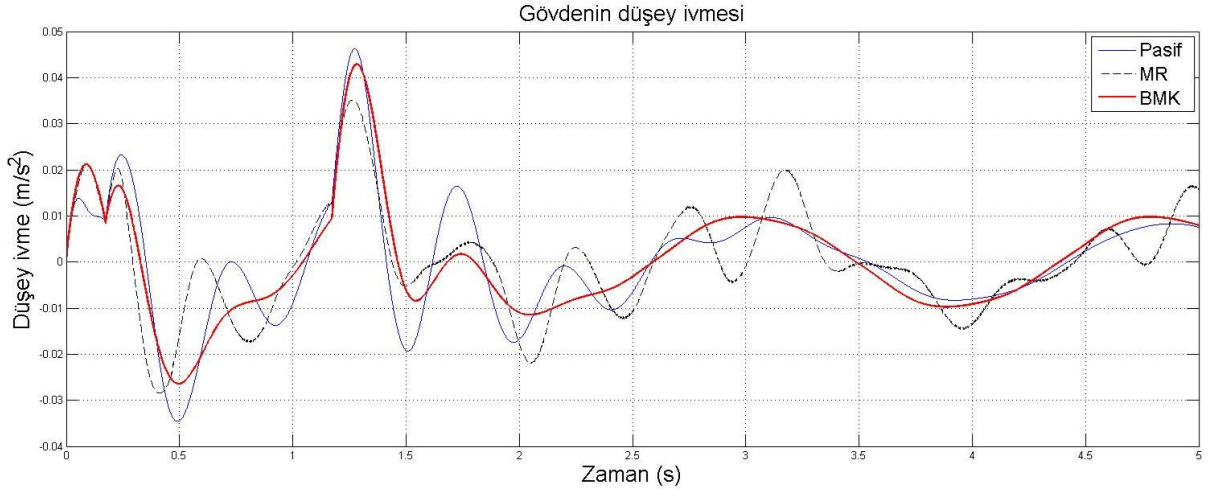
Şekil 5. 50 Uçak ön iniş takımı yer değiştirmesi



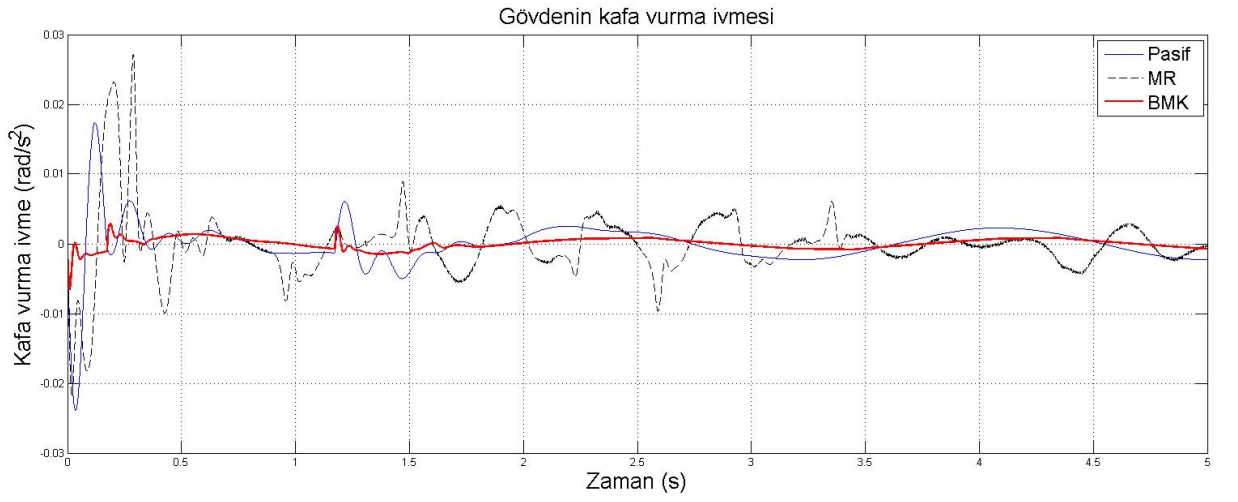
Şekil 5. 51 Uçak sol iniş takımı yer değiştirmesi



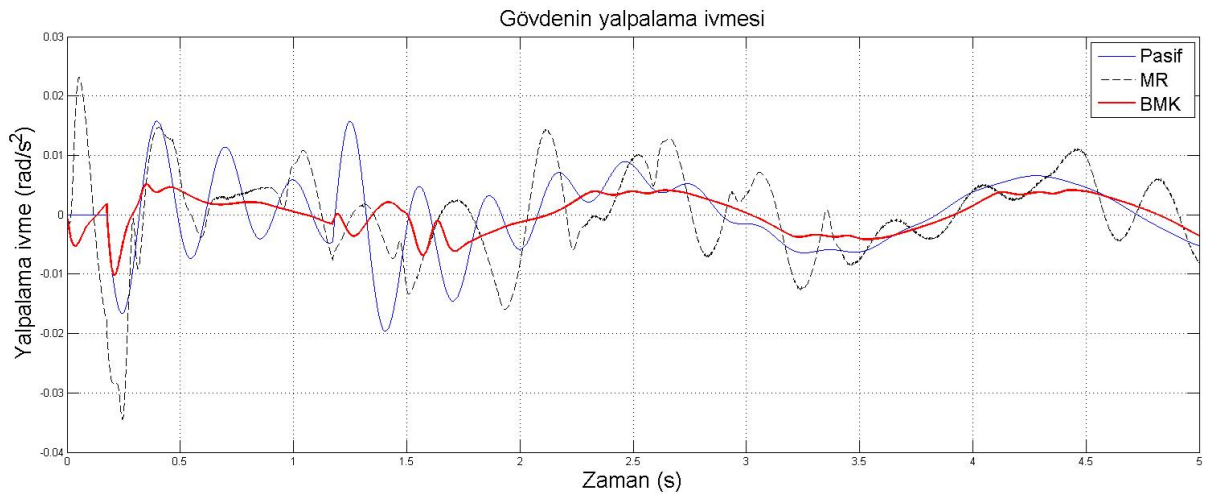
Şekil 5. 52 Uçak sağ iniş takımı yer değiştirmesi



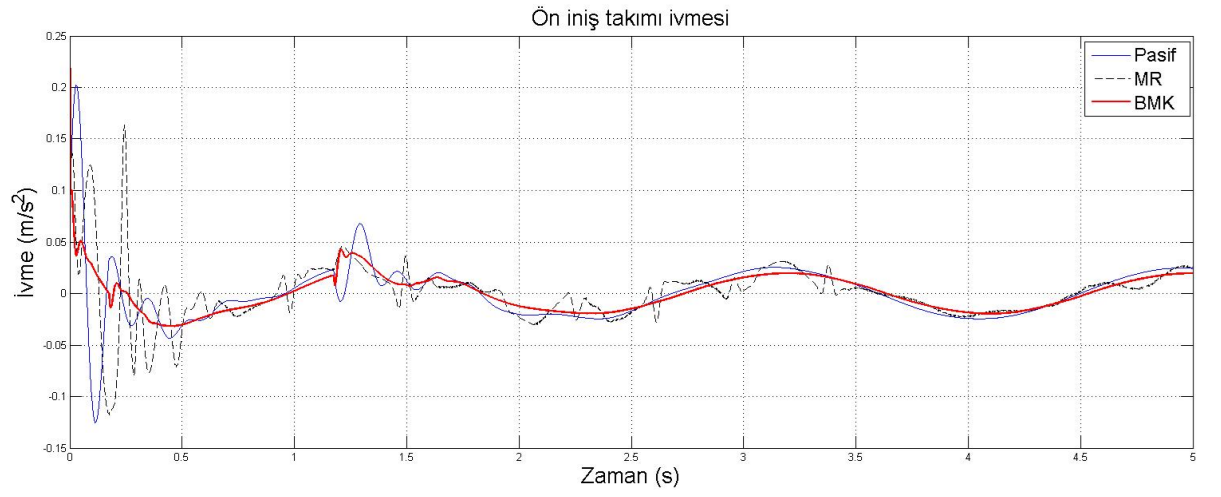
Şekil 5. 53 Uçak gövdesinin düşey ivmesi



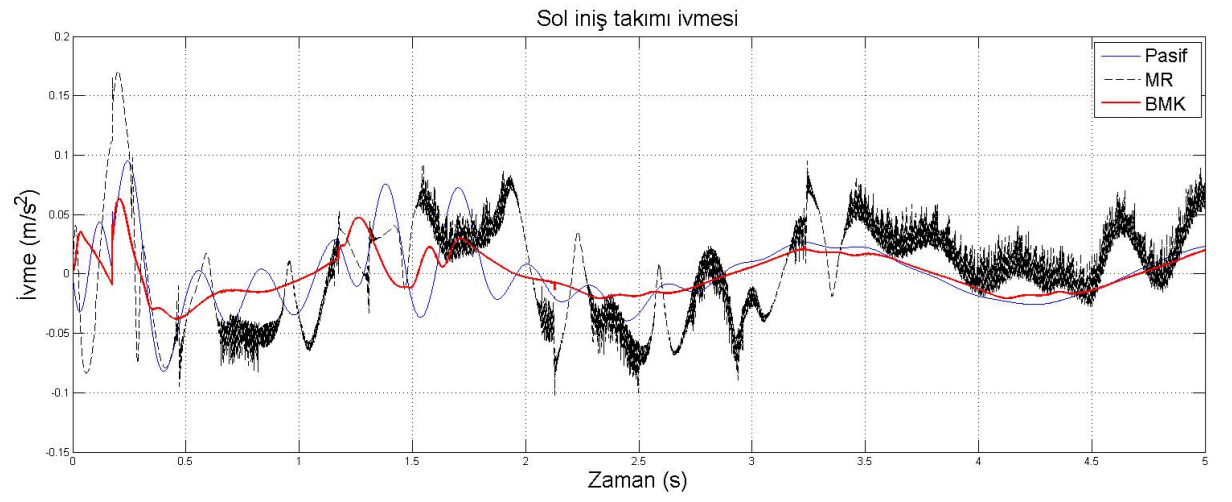
Şekil 5. 54 Uçak gövdesinin kafa vurma ivmesi



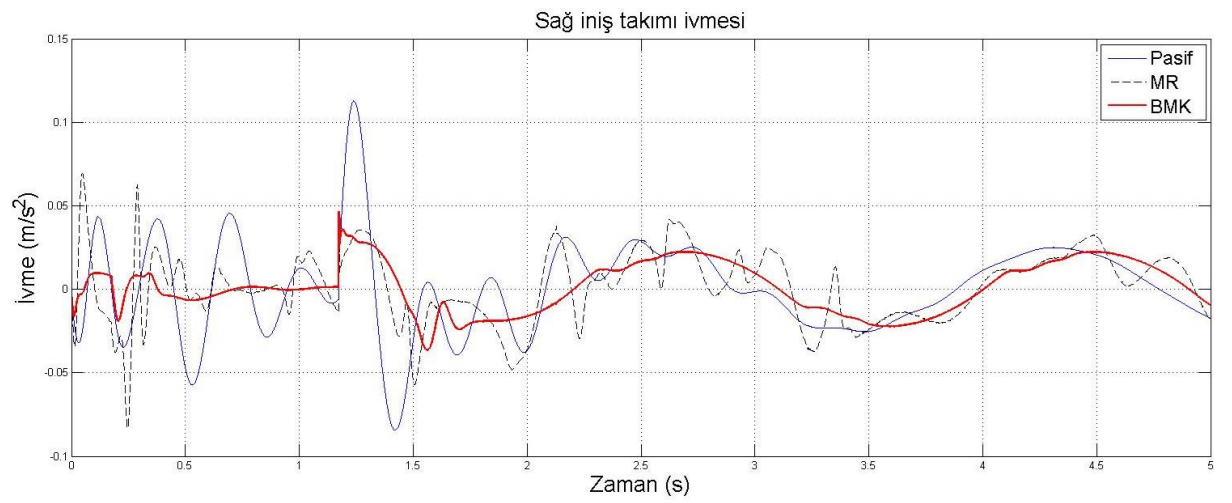
Şekil 5. 55 Uçak gövdesinin yalpalama ivmesi



Şekil 5. 56 Uçak ön iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 57 Uçak sol iniş takımı ivmesi



Şekil 5. 58 Uçak sağ iniş takımı ivmesi

Yarı aktif uçak iniş takımı modeline ait süspansiyon sistemi için pasif, en uygun voltaj değerleri olan MR 5 V ve BMK kontrolcüye uygulanan gerilim olan 0-10 volt arasındaki duruma göre performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde BMK kontrolcüye uygulanan 0-10 volt arasındaki gerilim ile uçak gövdesinin düşey, kafa vurma, yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımlarının yer değiştirme ve ivme hareketlerinde, MR 5 V ve pasif duruma göre iyileşmeler sağlanmıştır. Bu sebeple uçak iniş takımlarının MR damperle yarı aktif bulanık mantıklı kontrolü sayesinde uçak iniş takımı titreşim genliklerinin azaldığı, MATLAB-Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uçağın taksi pozisyonundaki seyri sırasında yolculuk konforunun, güvenliğinin ve insan sağlığına olumsuz etkisinin iyileştirilmesi amacıyla yönelik olarak, yol yüzeyindeki düzgünsüzlüklerin yol açtığı titreşimlerin giderilmesi için yarı aktif süspansiyon sistemi olan MR süspansiyon sistemi kullanılmıştır. Yarı aktif süspansiyon sistemi tercih edilmesinin sebebi, aktif süspansiyona yakın performans sergilemesi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlarıdır. Lineer olmayan karaktere sahip MR sönümleyiciyi, matematiksel olarak modellemek için en uygun cevabı veren geliştirilmiş bouc-wen modeli kullanılmıştır. MR sönümleyici modeli, MATLAB-Simulink programı yardımıyla oluşturulmuştur.

Uçak iniş takımı, altı serbestlik dereceli olarak modellenmiştir. Tam uçak iniş takımı modeli, önce pasif süspansiyon sistemi üzerine eklenen MR sönümleyicilere göre modellenmiştir. Sisteme ait matematiksel modelin hareket denklemleri, Newton yasaları kullanılarak elde edilmiştir. Modele yol profili olarak, rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanmıştır. MR sönümleyiciye farklı oranlarda voltaj verilerek uçak iniş takımının yer değiştirme ve ivme hareketi simülasyonlarla incelenmiştir. Rastele yol girişinde, 10 volt gerilim uygulandığında MR sönümleyicinin uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin pasif, MR 0 ve 5 voltluk gerilime göre daha fazla iyileştiği görülürken, sinüsoidal yol girişi uygulandığında ise 5 volt gerilim verildiğinde, MR sönümleyicinin uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin pasif, MR 0 ve 10 voltluk gerilime göre daha fazla iyileştiği görülmüştür. Simülasyon sonuçları, uçak iniş

takımındaki MR dampere verilen voltaj ile sönüm oranının değiştiği ve titreşimlerin azaldığı görülmektedir.

Uçak iniş takımı modelinde oluşturulan simülasyon çalışmalarında, yarı aktif kontrolü daha da iyileştirmek amacıyla ayrıca kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Bu kontrolcü Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemidir. Kontrolcü tasarımları Matlab-Simulink paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında, taksi hareketi yapan bir uçakta bozucu yol etkisinden kaynaklı uçak gövdesinde oluşan titreşimlerin yarı aktif kontrol ile bastırılması amaçlanmıştır. Bulanık mantıklı kontrol sisteminin olumlu katkısını incelemek amacıyla yapılan simülasyon çalışmalarında, sistem kontrol altındayken ve kontrol altında değilken (pasif) ki titreşim durumları incelenmiştir. Modele rasgele ve sinüsoidal yol girişi uygulanıp, 0-10 volt arası gerilim verildiğinde, BMK kontrolcünün uçağa verilen yol girişini izleme kabiliyetinin, pasif ve BMK 0-5 volta göre daha fazla iyileştiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarından da görüleceği üzere, tasarlanan bulanık mantık kontrolcü, uçak gövdesinin yapmış olduğu düşey, kafa vurma ve yalpalama ile ön-sol-sağ iniş takımı hareketlerinin, yer değiştirme ve ivme genliklerini bastırarak, bulanık mantıklı kontrol yönteminin titreşim sönümlemedeki başarısını ortaya koymuştur.

Son olarak, uçak iniş takımı modeline uygulanan rasgele ve sinüsoidal yol girişlerindeki karşılaştırmalardan alınan veriler neticesinde pasif ile en uygun voltaj değerlerine göre MR ve BMK kontrolcü performansları karşılaştırıldığında, en olumlu sonuçların bulanık mantıklı kontrole uygulanan 0-10 volt gerilim değerlerinde alındığı saptanmıştır.

Sonuç olarak, yolcuların konforu, güvenliği ve mekanik aksamın yıpranması açısından farklı yol profillerinde uçak iniş takımı titreşimlerinin MR sönümleyici ile bulanık mantıklı kontrolünün pasif ve MR'lı sisteme göre daha başarılı cevaplar verdiği görülmüştür. Yarı aktif süspansiyon sisteminin, aktif süspansiyona göre daha az maliyet, daha az güç tüketimi ve emniyet açısından problem olmadığı göz önüne alındığında, yapılan çalışma da olumlu sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu sebeple yarı aktif süspansiyon sisteminin, yakın gelecekte çok daha fazla kullanım alanı bulacağı aşikardır.

KAYNAKLAR

- [1] Gharapurkar, A. A., (2014). Robust Semi-Active Control Of Aircraft Landing Gear System Equipped With Magnetorheological Dampers, Master Thesis, Concordia University Graduate Program, Montreal, Quebec Canada.
- [2] Paksoy, M. ve Guclu, R., (2013). Taşıt Titreşimlerinin MR Sönümleyici İle Yarı Aktif Bulanık Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [3] Sforza, P. ve M., (2014). Commercial Airplane Design Principles, Chapter 7, Landing Gear Design, 251-300.
- [4] Astori, P., (2009). Numerical Models For Aircraft Systems, Chapter 5, Landing Gear System, Politecnico Di Milano.
- [5] Zapateiro, M., Pozo, F., Rossell, J., M., Karimi, H., R. ve Luo, N., (2011). "Landing Gear Suspension Control Through Adaptive Backstepping Techniques With H^∞ Performance", International Federation Of Automatic Control, 4809-4814, Milano, Italy.
- [6] Mikulowski, G. ve Holnicki-Szulc, J., (2003). "Adaptive Aircraft Shock Absorbers," AMAS Workshop On Smart Materials And Structures, 63-72.
- [7] Kruger, W., (2002). "Design And Simulation Of Semi-Active Landing Gears For Transport Aircraft," Mechanics Of Structures And Machines, 30(4):493-526.
- [8] Ghiringhelli, G. L., (2000). "Testing Of A Semi-Active Landing Gear Control For A General Aviation Aircraft", Journal Of Aircraft, 37(4):606-616, Politecnico Di Milano, Italy.
- [9] Sivakumar, S. ve Haran, A.P., (2013). "Mathematical Model And Vibration Analysis Of Aircraft With Active Landing Gears", Journal Of Vibration And Control, SAGE, 0(0):1-17.
- [10] Corsetti, C., D. ve Dillow, J., D., (1972). A Study Of The Practibility Of Active Vibration Isolation Applied To Aircraft During The Taxi Condition, Master Thesis, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Ohio, USA, July.

- [11] Jahromi, A., F., Gharapurkar, A., A., Xie, W. ve Bhat, R., (2013). "Semi-Active Control Of Aircraft Landing Gear System Using H-Infinity Control Approach", IEEE, Las Vegas, 679-686.
- [12] Hua-Lin, L., Yong, C., Qi, H. ve Jian, L., (2009). "Fuzzy PID Control For Landing Gear Based On Magneto-Rheological (MR) Damper," International Conference On Apperceiving Computing And Intelligence Analysis., IEEE, Chengdu., 22-25.
- [13] Wang, H., Xing, J.T., Price, W.G. ve Li, W., (2008). "An Investigation Of An Active Landing Gear System To Reduce Aircraft Vibrations Caused By Landing Impacts And Runway Excitations," Journal Of Sound And Vibration, 317(1-2):50-66.
- [14] Sivakumar, S. ve A. P. Haran, (2012). "Parametric Analysis And Vibration Control Of Landing Gear With PID Controller," European Journal Of Scientific Research, 89(3):441-453.
- [15] Zapateiro, M., Pozo, F., M.Rossell, J., Karimi, H., Luo, N., (2011). "Landing Gear Suspension Control Through Adaptive Backstepping Techniques With H_{∞} Performance," Preprints of the 18th IFAC World Congress., Milano., Italy, 4809-4814.
- [16] Khani, M., (2010). Magneto-Rheological (MR) Damper For Landing Gear System, Master Thesis, Concordia University Graduate Program, Montreal, Quebec Canada.
- [17] Güçlü, R., (2004). "The Fuzzy-Logic Control Of Active Suspensions Without Suspension-Gap Degeneration", Strojnicki Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering, 50(10):462-468.
- [18] Güçlü, 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.
- [19] Güçlü, R., (2005). "Fuzzy Logic Control Of Seat Vibrations Of A Non-Linear Full Vehicle Model", Nonlinear Dynamics, 40(1):21-34.
- [20] Güçlü, R. Ve Yagiz, N., (2004). "Comparison Of Different Control Strategies On A Vehicle Using Sliding Mode Control", Ir. Journal Of Science And Technology, IJST, 28(4B):413-422.
- [21] Engin, T., Öz, H., Morgül, Ö., Soydan, Y., Şahin, İ., Fırat, M. ve Yazıcı, İ., (2008). Yeni Nesil Yarı-Aktif Bir Süspansiyon Sisteminin Tasarımı, İmalatı Ve Optimizasyonu, Proje No: 104M157, Sakarya.
- [22] Çakır, Ç. ve Muğan, A., (2006). Pasif ve Yarı Aktif Kamyon Kabini Süspansiyon Sistemleri Tasarımı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [23] Yabansu, Y. C. ve Muğan, A., (2008). Magnetoreolojik Damperli Yarı Aktif Süspansiyon Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

- [24] Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain., M.K. ve Carlson, J.D., (1997). "Phenomenological Model Of A Magnetorheological Damper", Journal Of Engineering Mechanics, ASCE, 123(3):230-238.
- [25] Eligar, S. ve Banakar, R. M., (2014). "A Model Based Approach For Design Of Semiactive Suspension Using Variable Structure Control", International Journal Of Technical Research and Applications, 2(6):81-85.
- [26] Du, H., Li, W. ve Zhang, N., (2012). "Integrated Seat and Suspension Control for a Quarter Car With Driver Model", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(9):3893-3908.
- [27] Erdem, A. ve Demirören, A., (2007). Bulanık Mantık Kontrolör Yardımı ile Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [28] Metin, M. ve Güçlü, R., (2007). Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [29] Kıyak, E. ve Kahvecioğlu, A., (2003). "Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 1(2):63-72.
- [30] Yazıcı, H. ve Güçlü, R. (2006)., Çok Serbestlik Dereceli Bir Yapının Titreşimlerinin Bulanık Mantıkla Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

KONTROL KURALLARI**A-1 Bulanık Mantıklı Kontrol Kuralları**

- 1 - Eğer ($y = \text{XNB}$) ve ($dy = \text{VN}$) ise ($u = \text{UNB}$) Değilse
- 2 - Eğer ($y = \text{XNS}$) ve ($dy = \text{VN}$) ise ($u = \text{UNM}$) Değilse
- 3 - Eğer ($y = \text{XZ}$) ve ($dy = \text{VN}$) ise ($u = \text{UNS}$) Değilse
- 4 - Eğer ($y = \text{XPS}$) ve ($dy = \text{VN}$) ise ($u = \text{UZ}$) Değilse
- 5 - Eğer ($y = \text{XPB}$) ve ($dy = \text{VN}$) ise ($u = \text{UPS}$) Değilse
- 6 - Eğer ($y = \text{XNB}$) ve ($dy = \text{VZ}$) ise ($u = \text{UNM}$) Değilse
- 7 - Eğer ($y = \text{XNS}$) ve ($dy = \text{VZ}$) ise ($u = \text{UNS}$) Değilse
- 8 - Eğer ($y = \text{XZ}$) ve ($dy = \text{VZ}$) ise ($u = \text{UZ}$) Değilse
- 9 - Eğer ($y = \text{XPS}$) ve ($dy = \text{VZ}$) ise ($u = \text{UPS}$) Değilse
- 10 - Eğer ($y = \text{XPB}$) ve ($dy = \text{VZ}$) ise ($u = \text{UPM}$) Değilse
- 11 - Eğer ($y = \text{XNB}$) ve ($dy = \text{VP}$) ise ($u = \text{UNS}$) Değilse
- 12 - Eğer ($y = \text{XNS}$) ve ($dy = \text{VP}$) ise ($u = \text{UZ}$) Değilse
- 13 - Eğer ($y = \text{XZ}$) ve ($dy = \text{VP}$) ise ($u = \text{UPS}$) Değilse
- 14 - Eğer ($y = \text{XPS}$) ve ($dy = \text{VP}$) ise ($u = \text{UPM}$) Değilse
- 15 - Eğer ($y = \text{XPB}$) ve ($dy = \text{VP}$) ise ($u = \text{UPB}$) Değilse

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin BALTA
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.09.1989 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : huseyinbalta01@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Çengelköy Süper Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-Devam Ediyor	Emlak Konut GYO A.Ş.	Makine Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Balta, H. ve Güçlü, R. (2016). “Uçak İniş Takımının MR Damperle Yarı Aktif Kontrolünün Yapılması”, Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 8(1):11-21.