

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RAYLI BİR TAŞITIN DİNAMİK MODELİNİN
OLUŞTURULMASI ve TİTREŞİM KONTROLÜ**

Makine Mühendisi Aydın ÖREN

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Kontrol Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER (YTÜ)

İSTANBUL, 2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. LOKOMOTİFİN DİNAMİK MODELİ	2
2.1 Dinamik Analiz Modeli	2
2.2 Zorlayıcı ve Bozucu Kuvvetler	7
2.2.1 Boylamsal Kuvvetler (x doğrultusundaki)	7
2.2.2 Düşey Kuvvetler (y doğrultusundaki)	9
2.2.3 Yanal Kuvvetler (z doğrultusundaki)	10
3. SIMMECHANICS MODELİ	11
3.1 SimMechanics	11
3.1.1 Model Uzayı ve Koordinat Sistemleri	12
3.1.2 Gövde Elemanları (Bodies)	13
3.1.3 Bağlar (Joints)	15
3.1.4 Kuvvet Elemanları (Force Elements)	16
3.1.5 Sensör ve Aktüatörler (Sensors and Actuators)	17
3.1.6 Bir Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper Sisteminin Modellenmesine Örnek ..	17
3.2 Lokomotifin SimMechanics Modeli	24
3.2.1 Ray - Tekerlek Seti Temas Katı	24
3.2.2 Boji – Tekerlek Seti Bağlantı Katı	26
3.2.3 Kabin-Boji Bağlantı Katı	28
3.2.4 Giriş Katı	30
3.2.5 Kontrol Katı	31
3.2.5.1 Bulanık Sistemler	32
3.2.5.2 Yanal Kontrolcü Tasarımı	37
3.2.5.3 Düşey Kontrolcü Tasarımı	42
4. SİMÜLASYON UYGULAMALARI	44
4.1 I.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)	44
4.2 II.Senaryo (Yanal Doğrultuda ve Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)	49
4.3 Kabin Titreşimlerinin Frekans Alanında Gözlemlenmesi	52
4.4 Kabinin Birim Basamak Fonksiyona Cevabı	55

4.5	Kabin Titreşimlerinin Aktif Kontrolü.....	57
4.5.1	I. Senaryoda Aktif Titreşim Kontrolü.....	58
4.5.2	II. Senaryoda Aktif Titreşim Kontrolü	60
4.6	SimMechanics Modelinin Görselleştirilmesi	64
5.	SONUÇLAR.....	66
	KAYNAKLAR.....	67
	EKLER	69
Ek-1	Parametreler ve bulanık mantık kontrolcüsünün ölçekleme çarpanları.....	69
	ÖZGEÇMİŞ.....	70

SİMGE LİSTESİ

a	İki ray arası genişliğin yarısı
a_{loc}	Lokomotifin ivmesi
A	Taşıtın rüzgar yönüne dik duran projeksiyon alanı
A_i	Öncül kısımdaki giriş değişkenini niteleyen dilsel değişken
b_w	Ray–tekerlek temas noktasının düşey eksene olan y yönündeki mesafesi
b_1	Tekerlek–seti ekseni ile z ekseni doğrultusunda çalışan I.süspansiyonun ekseni arası y yönündeki mesafe
b_2	Boji ekseni ile z ekseni doğrultusunda çalışan II.süspansiyonun ekseni arası y yönündeki mesafe
B_i	Soncul kısımdaki çıkış değişkenini niteleyen dilsel değişken
B_b	Pnömatik frenleme oranı
c_{1x}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, x ekseni doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{1y}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, y ekseni doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{1z}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, z ekseni doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun sönüm katsayısı
c_2	Boylamsal tren dinamik modelinde I. vagon ile II.vagon arasındaki bağlantının sönüm katsayısı
c_{2y}	Boji ile kabin arasındaki, y ekseni doğrultusunda çalışan, II.süspansiyonun sönüm katsayısı
c_{2z}	Boji ile kabin arasındaki, z ekseni doğrultusunda çalışan, II.süspansiyonun sönüm katsayısı
C	Herhangi bir dinamik sistemin sönüm katsayısı
C_d	Taşıtın aerodinamik direnç katsayısı
C_w	Tekerlek–ray arasındaki dinamik sürtünme katsayısı formülündeki boyutsuz iklim katsayısı
d_p	Tekerlek–seti ekseni ile x ekseni doğrultusunda çalışan I.süspansiyonun ekseni arası y yönündeki mesafe
d_s	Boji ekseni ile x ekseni doğrultusunda çalışan II.süspansiyonun ekseni arası y yönündeki mesafe
δ_L	Sol tekerlek için temas açısı
δ_R	Sağ tekerlek için temas açısı
Δt	Lokomotifin seyir hızının hesaplanacağı zaman artımı
$\Delta z_{2,3,4}$	Ray elemanı üzerindeki II., III., IV.analiz noktalarındaki yanal yer değiştirme değerleri
Δz_{ort}	Ray elemanı üzerindeki yanal ortalama yer değiştirme değeri
$\Delta y_{2,3,4}$	Ray elemanı üzerindeki II., III., IV.analiz noktalarındaki düşey yer değiştirme değerleri
Δy_{ort}	Ray elemanı üzerindeki düşey ortalama yer değiştirme değeri
$e_{z1,z2,z3}$	I., II., III.yanal kontrolcü için birincil girişler
$\dot{e}_{z1,z2,z3}$	I., II., III.yanal kontrolcü için ikincil girişler
$e_{z1,z2,z3}$	I., II., III.yanal kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hata değeri
$\dot{e}_{z1,z2,z3}$	I., II., III.yanal kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hatanın türevi
$e_{y1,\dots,y6}$	I., ..., VI.düşey kontrolcü için birincil girişler
$\dot{e}_{y1,\dots,y6}$	I., ..., VI.düşey kontrolcü için ikincil girişler

$e_{y1, \dots, y6}$	I., ..., VI.düsey kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hata değeri
$\dot{e}_{y1, \dots, y6}$	I., ..., VI.düsey kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hatanın türevi
f_{11}	Yanal doğrultudaki sünme katsayısı
f_{12}	Yanal / yanal sapma açısı doğrultularındaki sünme katsayısı
f_{22}	Yanal sapma açısı doğrultusundaki sünme katsayısı
f_{33}	Boylamsal doğrultudaki sünme katsayısı
F	Uzaydaki bulanık küme
$F(t)$	Zamanın fonksiyonu olarak değişen zorlayıcı dış kuvvet
$F_{Zr1}(t)$	Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine yanal doğrultuda etki eden ray düzgünsüzlük fonksiyonu
$F_{Yr1}(t)$	Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünsüzlük fonksiyonu
$F_{Yr2}(t)$	Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünsüzlük fonksiyonu
F_{Ad}	Aerodinamik direnç kuvveti
F_b	Pnömatik fren kuvveti
F_{cr}	Lokomotifin etki eden kurp direnç kuvveti
F_g	Lokomotifin etki eden rampa direnç kuvveti
Φ_k	Lokomotifin kafa vurma (y ekseninde dönme) yönündeki serbestlik derecesi
$\Phi_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin yalpalama yönündeki serbestlik derecesi
F_{Lxw1}	Sol tekerlek için boylamsal sünme teriminin en genel ifadesi
F_{Lzw1}	Sol tekerlek için yanal sünme teriminin en genel ifadesi
F_{net}	Lokomotifin etki eden net kuvvet
F_{pr}	Lokomotifin etki eden yuvarlanma ataleti ve aerodinamik direnç kuvvetleri toplamı
F_r	Lokomotifin etki eden yavaşlatıcı kuvvet
$F_{t/db}$	Lokomotifin çekiş ve dinamik fren kuvveti
F_{xw1}	Tekerlek–seti için boylamsal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali
F_z	Ray elemanına uygulanan yanal statik kuvvet
F_{zw1}	Tekerlek–seti için yanal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali
F_y	Ray elemanına uygulanan düşey statik kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
G_{e_z}	Yanal hatalar için giriş ölçekleme çarpanı
$G_{\dot{e}_z}$	Yanal hataların türevleri için giriş ölçekleme çarpanı
G_{u_z}	Yanal kontrol kuvvetleri için çıkış ölçekleme çarpanı
h_1	Tekerlek–seti ekseninde ile bojinin ağırlık merkezi arası z yönündeki mesafe
h_2	Bojinin ağırlık merkezi ile bojinin kabine bağlandığı nokta arası z yönündeki mesafe
h_3	Bojinin kabine bağlandığı nokta ile kabinin ağırlık merkezi arası z yönündeki mesafe
J_{xk}	Kabinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
$J_{xb1,2,3}$	I., II., III.bojinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
$J_{xt1, \dots, 6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
J_{yk}	Kabinin kafa vurma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti

$J_{yb1,2,3}$	I., II., III.bojinin kafa vurma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
J_{zk}	Kabinin yanal sapma açısı hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
$J_{zb1,2,3}$	I., II., III.bojinin yanal sapma açısı hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
$J_{zt1,...,6}$	I., ...,VI.tekerlek-setinin yanal sapma açısı hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti
k_{hy}	Ray elemanının düşey yöndeki yay katsayısı (Hertz-y)
k_{hz}	Ray elemanının yanal yöndeki yay katsayısı (Hertz-z)
k_{1x}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, x eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun yay katsayısı
k_{1y}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, y eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun yay katsayısı
k_{1z}	Tekerlek–seti ile boji arasındaki, z eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun yay katsayısı
k_2	Boylamsal tren dinamik modelinde I.vagon ile II.vagon arasındaki bağlantının yay katsayısı
k_{2x}	I. ve III.Bojilerdeki hareketi kabine ileten rijit çubuğun x eksenini doğrultusundaki yay katsayısı
k_{2xb}	II.Bojide ile kabin arasındaki x eksenini doğrultusundaki yay katsayısı
k_{2y}	Boji ile kabin arasındaki, y eksenini doğrultusunda çalışan, II.süspansiyonun yay katsayısı
k_{2z}	Boji ile kabin arasındaki, z eksenini doğrultusunda çalışan, II.süspansiyonun yay katsayısı
K_i	Bulanık mantık sistemindeki i.kural
L_b	İki boji arası x yönündeki mesafenin yarısı
L_d	Aynı bojide bulunan iki tekerlek–seti eksenleri arası x yönündeki mesafenin yarısı
λ_{Yr1}	Yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonunun dalga boyu
λ_{Zr1}	Düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonunun dalga boyu
λ_{Zr2}	Düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük fonksiyonunun dalga boyu
M	Herhangi bir dinamik sistemin kütlesi
M_k	Kabinin kütlesi
M_{loc}	Lokomotifin kütlesi
M_{Lzt1}	Sol tekerlek için yanal sapma açısı sünme teriminin en genel ifadesi
$M_{b1,2,3}$	I., II. ve III.bojinin kütlesi
$M_{t1,...,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin kütlesi
M_{zt1}	Tekerlek–seti için yanal sapma açısı sünme teriminin sadeleştirilmiş hali
μ_d	Tekerlek–ray arasındaki dinamik sürtünme katsayısı
$\mu_F(u)$	Üyelik fonksiyonu
$N_{t/db}$	Hız veya dinamik fren kademesi
v	İleri yöndeki gerçek lokomotif hızı
P	Pnömatik fren silindirin çalışma basıncı
P_{maks}	Lokomotifin maksimum çekiş gücü
ψ	Tekerlek ile ray arasındaki yanal sapma açısı farkı
ψ_k	Lokomotifin yanal sapma açısı (y eksenini etrafında dönme) yönündeki serbestlik derecesi
$\psi_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin yanal sapma açısı yönündeki serbestlik derecesi
$\psi_{t1,...,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin yanal sapma açısı yönündeki serbestlik derecesi
q_j	Genelleştirilmiş koordinatlar (Serbestlik dereceleri)
Q_j	Genelleştirilmiş kuvvetler (Zorlayıcı dinamik kuvvetler, Kontrol kuvvetleri)

r	Bulanık kural adedi
ref_{Z_c}	Lokomotifin yanal yöndeki yer değiştirme hatası için referans değer
$ref_{\dot{z}_c}$	Lokomotifin yanal yöndeki hız hatası için referans değer
r_L	Sol tekerlek için yuvarlanma yarıçapı
r_R	Sağ tekerlek için yuvarlanma yarıçapı
R	Kurp yarıçapı
R_1	Tekerleğin nominal yuvarlanma yarıçapı
R_1	Tekerleğin yanal yuvarlanma yarıçapı
R_2	Rayın yuvarlanma yarıçapı ($\approx \infty$)
R_2	Rayın yanal yuvarlanma yarıçapı
ρ	Havanın yoğunluğu
$\rho_{\text{çelik}}$	Çeliğin özkütlesi
θ	K_3 ve K_4 'e bağlı açı değeri
θ_k	Lokomotifin yalpalama (x eksenini etrafında dönme) yönündeki serbestlik derecesi
$\theta_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin yalpalama yönündeki serbestlik derecesi
$\theta_{t1,\dots,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin yalpalama yönündeki serbestlik derecesi
u	Uzayın elemanı olan bir değer
$u_{1,2,3}$	I., II., III.kontrolcü çıkışları
U	Uzay
$U_{Z1,2,3}$	I., II., III.bojideki yanal kontrolcü kuvveti
\wedge	Birleşim işlemini gerçekleştiren mantıksal “ve” operatörü
V_1	Lokomotifin bir zaman adımı önceki seyir hızı
V	Lokomotifin seyir hızı
ω_{Zr1}	Yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı
ω_{Yr1}	Düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı
ω_{Yr2}	Düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı
\tilde{x}	Öncül kısımdaki giriş değişkenlerince tanımlanan koşul
X_k	Lokomotifin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi
$X_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi
$X_{t1,\dots,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi
\tilde{y}	Soncul kısımdaki çıkış değişkenlerince tanımlanan sonuç
Z_c	Lokomotifin yanal yöndeki serbestlik derecesi
Z_{r1}	Yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonunun genliği
$Z_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin yanal yöndeki serbestlik derecesi
$Z_{t1,\dots,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin yanal yöndeki serbestlik derecesi
Y_k	Lokomotifin düşey yöndeki serbestlik derecesi
Y_{r1}	Düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonunun genliği
Y_{r2}	Düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük fonksiyonunun genliği
$Y_{b1,2,3}$	I., II., III.bojinin düşey yöndeki serbestlik derecesi
$Y_{t1,\dots,6}$	I., ..., VI.tekerlek–setinin düşey yöndeki serbestlik derecesi

KISALTMA LİSTESİ

MAM	Marmara Araştırma Merkezi (Tübitak)
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları
CS	Koordinat Sistemi (Coordinate System)
WCS	World Koordinat Sistemi (World Coordinate System)
GCS	Ground Koordinat Sistemi (Ground Coordinate System)
CG	Ağırlık Merkezi (Center of Gravity)
OBOT	Ön Boji Ön Tekerlek Seti
OBAT	Ön Boji Arka Tekerlek Seti
OB	Ön Boji
ORBOT	Orta Boji Ön Tekerlek Seti
ORBAT	Orta Boji Arka Tekerlek Seti
ORB	Orta Boji
ABOT	Arka Boji Ön Tekerlek Seti
ABAT	Arka Boji Arka Tekerlek Seti
AB	Arka Boji
GOVDE	Kabin
BMK	Bulanık Mantık Kontrol

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Erken dönem demiryolu lokomotifi (George Stephenson, 1814).....	1
Şekil 2.1	Dinamik analiz modeli (Atalay, 2009).....	3
Şekil 2.2	Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji düşey bağlantı detayları (Atalay, 2009)	4
Şekil 2.3	Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji düşey bağlantı detayları (Atalay, 2009)	4
Şekil 2.4	Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları (Atalay, 2009)	5
Şekil 2.5	Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları (Atalay, 2009)	5
Şekil 2.6	Dinamik analiz modeline perspektif bakış kesiti (Atalay, 2009).....	6
Şekil 2.7	Boylamsal hareket dinamik modeli (Iwnicki, 2006).....	7
Şekil 2.8	Lokomotif eksi direnç kuvveti (Iwnicki, 2006)	8
Şekil 2.9	Düşey ray düzgünlükleri (Atalay, 2009)	9
Şekil 2.10	Yanal ray düzgünlüğü (Atalay, 2009)	10
Şekil 3.1	SimMechanics Koordinat Sistemleri (SimMechanics User Guide, 2009).....	13
Şekil 3.2	SimMechanics Body Bloğu (SimMechanics User Guide, 2009)	13
Şekil 3.3	Body Blok Parameters Penceresi	14
Şekil 3.4	Custom Joint Bloğu ve Blok Parameters Penceresi	15
Şekil 3.5	Joint Spring&Damper Bloğu ve Block Parameters Penceresi	16
Şekil 3.6	Tek Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper Modeli	18
Şekil 3.7	Tek Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper SimMechanics Modeli	18
Şekil 3.8	Mechine Enviroment Block Parameters Penceresi	19
Şekil 3.9	Ground Block Parameters Penceresi.....	19
Şekil 3.10	Body Block Parameters Penceresi	20
Şekil 3.11	Custom Joint Block Parameters Penceresi.....	21
Şekil 3.12	Joint Spring&Damper Block Parameter Penceresi	22
Şekil 3.13	Body Actuator ve Source Blok Parameters Penceresi	23
Şekil 3.14	Darbe Fonksiyonu	23
Şekil 3.15	Body Sensor Block Parameters Penceresi	24
Şekil 3.16	Ön Boji Ön Tekerlek Seti SimMechanics Modeli	25
Şekil 3.17	Sünme Alt Sistemi	26
Şekil 3.18	Ön Boji SimMechanics Modeli	27
Şekil 3.19	Sensor alt sistemi	28
Şekil 3.20	Kabin - Ön Boji Bağlantısı	28
Şekil 3.21	Kabin - Orta Boji Bağlantısı	29
Şekil 3.22	Kabin - Arka Boji Bağlantısı	30
Şekil 3.23	Bozucu Girişler	31
Şekil 3.24	Kontrolcü ve Bozucu Girişler	32
Şekil 3.25	Bir bulanık sistemin içyapısı (Eksin, 2006).....	32
Şekil 3.26	Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları (Metin, 2007)	34
Şekil 3.27	Ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma (Eksin, 2006).....	36
Şekil 3.28	Yanal denge konumu etrafındaki hata durumları (Atalay, 2009)	37
Şekil 3.29	Yanal kontrolcü alt sistemi	38
Şekil 3.30	Yanal kontrolcü: I. Boji-Kabin arasında (Fuzzy-PD Zb1).....	38
Şekil 3.31	Yanal yer değiştirme girişleri için üyelik fonksiyonları	40
Şekil 3.32	Yanal hız girişleri için üyelik fonksiyonları	40
Şekil 3.33	Yanal kontrolcü çıkışlarının üyelik fonksiyonları	41

Şekil 3.34	Yanal yer değiştirme, hız girişleri ve kontrolcü çıkışının üyelik fonksiyonlarının yüzey gösterimi	41
Şekil 3.35	Düşey kontrolcülerdeki hata durumları (Atalay, 2009)	42
Şekil 3.36	BMK algoritmasının simulink modeli	43
Şekil 3.37	Bulanık mantık kontrolcüsünün simulink modeli (Fuzzy-PD Yb1 sag).....	43
Şekil 4.1	I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu	44
Şekil 4.2	I.Senaryoda kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	45
Şekil 4.3	I.Senaryoda kabinde oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	45
Şekil 4.4	I.Senaryoda I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	46
Şekil 4.5	I.Senaryoda I.bojide oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri.....	46
Şekil 4.6	I.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	47
Şekil 4.7	I.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	47
Şekil 4.8	Yanal ray düzgünlüğü (Atalay, 2009)	49
Şekil 4.9	II.Senaryoda kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	49
Şekil 4.10	II.Senaryoda kabinde oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri ...	50
Şekil 4.11	II.Senaryoda I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	50
Şekil 4.12	II.Senaryoda I.bojide oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri ...	51
Şekil 4.13	II.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	51
Şekil 4.14	II.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan açısallık titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri	52
Şekil 4.15	Kabinin doğrusal titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı.....	53
Şekil 4.16	Kabinin düşey titreşimleri için Sezer ve Atalay (2011)' un bulunduğu kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı (Z:Düşey doğrultu, Y: Yanal doğrultu).....	53
Şekil 4.17	Kabinin açısallık titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı	54
Şekil 4.18	Kabinin açısallık titreşimleri için Sezer ve Atalay (2011)' un bulunduğu kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı ($\theta_c = R_x, \varphi_c = R_z, \psi_c = R_y$).....	54
Şekil 4.19	Düşey birim basamak girişe karşılık kabinin doğrusal cevabı.....	55
Şekil 4.20	Düşey birim basamak girişe karşılık kabinin açısallık cevabı	55
Şekil 4.21	Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin doğrusal cevabı	56
Şekil 4.22	Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin açısallık cevabı	56
Şekil 4.23	Düşey ve Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin kontrollü ve kontrolsüz doğrusal cevapları	57
Şekil 4.24	Düşey ve Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin kontrollü ve kontrolsüz açısallık cevapları.....	57
Şekil 4.25	I.Senaryoda kabinin doğrusal titreşimlerin için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar	58
Şekil 4.26	I.Senaryoda kabinin açısallık titreşimlerin için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar	58
Şekil 4.27	I.Senaryoda aktif kontrolcünün yanallık aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri	59
Şekil 4.28	I.Senaryoda aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri	59
Şekil 4.29	II.Senaryoda kabinin doğrusal titreşimleri için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar	60
Şekil 4.30	Sezer ve Atalay (2011)' ın kabinin doğrusal titreşimleri için bulunduğu kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar (Z:Düşey doğrultu, Y: Yanal doğrultu)	60
Şekil 4.31	II.Senaryoda kabinin açısallık titreşimleri için bulunan kontrolsüz ve kontrollü	

	sonuçlar	61
Şekil 4.32	Sezer ve Atalay (2011)' in kabinin açısal titreşimleri için bulunduğu kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar ($\theta_c = R_x, \varphi_c = R_z, \psi_c = R_y$)	61
Şekil 4.33	II.Senaryoda aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri	62
Şekil 4.34	Sezer ve Atalay (2011)' in aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinden uyguladığı kontrol kuvvetleri.....	62
Şekil 4.35	II.Senaryoda aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri	63
Şekil 4.36	Sezer ve Atalay (2011)' in aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uyguladığı kontrol kuvvetleri.....	63
Şekil 4.37	SimMechanics modelinin sağdan görünüşü.....	64
Şekil 4.38	SimMechanics modelinin üstten görünüşü	64
Şekil 4.39	SimMechanics modelinin önden görünüşü.....	65
Şekil 4.40	SimMechanics modelinin izometrik görünüşü	65

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 BMK kural tablosu (Güçlü, 2005)	39

ÖNSÖZ

Bu tez, TÜBİTAK KAMAG ve TCDD desteği ile TÜBİTAK MAM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü'nün liderliğinde yürütülen ve Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Semih Sezer'in de danışmanlığını yaptığı TRENSİM projesini desteklemek amacıyla yapılmıştır.

Çalışmamda yardımlarını ve sabırlarını esirgemeyen değerli insanlara;

Yrd. Doç. Dr. Semih Sezer: Yaptığı bilimsel katkıları, umutsuz anlarımdaki destekleri, okul ve iş hayatımın kesiştiği noktalarda gösterdiği anlayış ve sabrı için,

KİPAŞ Ltd. Ailesi: Değerli patronlarım *Sn. İrfan ÇELİMLİ* ve *Sn. A. Levent KUZAY* ile tüm çalışma arkadaşlarıma iş hayatı ile yüksek lisans öğreniminin gereklerini yerine getirirken bana gösterdikleri anlayış ve her türlü maddi manevi yardımları için,

Ailem ve Sevdiklerim: Hayatımın her aşamasında sevgi ve hoşgörü ile yanımda oldukları için, en içten duygularıyla teşekkür ederim.

ÖZET

Bu tez çalışmasında; bir lokomotifin 54 serbestlik dereceli dinamik modeli, Matlab-Simulink yazılımında SimMechanics araçları (SimMechanics Toolbox) kullanılarak kurulmuş, farklı bozucu ray girişleri için kabin hareketleri incelenmiş ve bulanık kontrolcü (Fuzzy Logic) uygulanarak aktif titreşim kontrolü yapılmaya çalışılmıştır.

Matlab-Simulink yazılımı, Simmechanics araçları ile mekanik sistemlerin dinamik modellenmesi ve analizine esnek ve kolay bir yöntem sunmaktadır. Bu amaçla ilk yapılması gereken; mekanik sistemin elemanlarını, birbirleri ile olan etkileşimlerini, özelliklerini ve bozucu etkileri doğru ve eksiksiz bir şekilde saptamak ve fiziksel modelini çıkarmaktır. Sonrasında Simmechanics modelini kurmak, tanımlamalarını yapmak ve sonuçları yorumlamak kalmaktadır.

Çalışmamda, Atalay (2009)' un yüksek lisans tezinde kullandığı dinamik model referans alınıp sırasıyla; Simmechanics modeli kurulmuş, bulanık mantık kontrolcü uygulanmış ve kontrollü-kontROLSÜZ sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Raylı taşıtlar, raylı taşıt dinamiği, aktif titreşim kontrolü, bulanık mantık kontrol, Matlab, Simulink, SimMechanics.

ABSTRACT

In the context of this thesis, 54 DOF dynamic model of a locomotive was established in Matlab-Simulink with SimMechanics toolbox. Vibrations that caused by lateral and vertical rail disruptive functions, were simulated and active vibration control was made with Fuzzy Logic Control.

In Matlab-Simulink software, SimMechanics Toolbox offers an easy and flexible method for dynamic modelling and analysis of a mechanical system. With this goal first step is that physical features of machine parts should be determined exactly and interactions between them should be examined carefully. Then easily, SimMechanics model can be set up and physical features of machine parts can be defined.

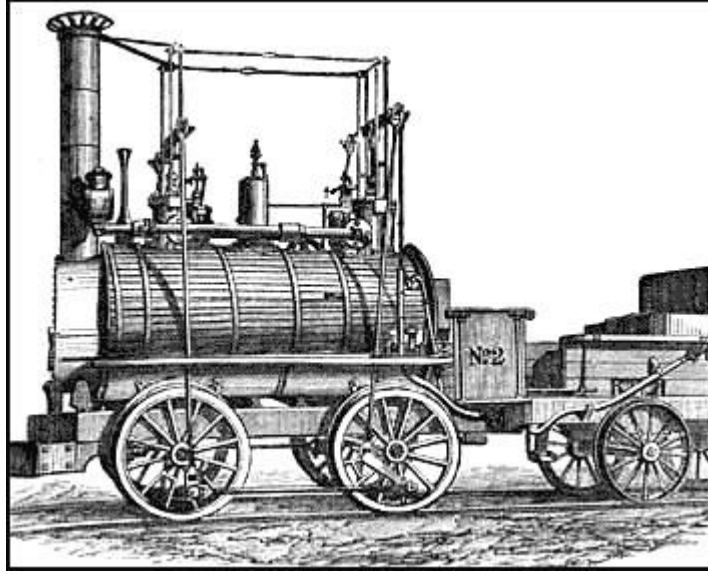
In this study, a dynamic model studied by Atalay (2009) before, was used. Respectively SimMechanics model was established, active vibration control was made, controlled and uncontrolled results were compared.

Keywords: Rail vehicles, rail vehicle dynamics, active control of vibrations, fuzzy logic control, Matlab, Simulink, SimMechanics.

1. GİRİŞ

Ulaşım ve taşımacılık, yeryüzündeki serüvenine çıplak ayak yayan başlayan insanoğlunun önemli ihtiyaçlarından biri olagelmıştır. Dolayısıyla bu alanda yaşanan büyük sıçramalar her zaman tarihin akışını değiştirmiş ve değiştirmeye devam edecektir. Atların evcilleştirilmesi, tekerleğin, deniz taşıtlarının, raylı taşıtların, arabaların, uçakların ve son olarak da uzay araçlarının icadı bu alandaki büyük gelişmelerdir.

1500'lü yılların ortalarında Almanya'da kullanılmaya başlanan lokomotifler atlar tarafından çekilmekteydi. Buharlı makinelerin icadı ile ilk buharlı lokomotif, 1804 yılında İngiltere'de Richard Trevithick ve Andrew Vivian tarafından imal edilmiştir. Bundan sonra büyük etkinlik kazanmış ve yaygınlaşmıştır.



Şekil 1.1 Erken dönem demiryolu lokomotifi (George Stephenson, 1814)

Yurdumuzdaki ilk demiryolu hattının inşasına 23 Eylül 1856 da İzmir-Aydın arasında Osmanlı döneminde başlanmıştır. Ne var ki bu teknolojiyi ithal eder konumda olduğumuzdan Cumhuriyetin kuruluşuna kadar ancak 6.818 km hat inşa edilebilmiştir.

Kurtuluş savaşının kazanılmasında demiryolları önemli rol oynar. Cepheye asker, silah ve erzak taşınmasında, yani savaşın lojistiğinde sağladığı başarılarla demiryolunun önemi ortaya çıkmıştır. Bu dönemde demiryollarının işletilmesinden Behiç ERKİN sorumludur ve başarısından dolayı TBMM takdirnamesi ve İstiklal Madalyası ile onurlandırılmıştır.

Cumhuriyet sonrası dönemde, sınırlarımız içinde Osmanlıdan miras kalan 4000 km demiryolu hattı, büyük bir atılımla 1940 yılına kadar 8637 km' ye çıkarılır. Fakat bu ivme günümüze değin devam ettirilememiştir. Türkiye ulaşım sistemi içerisinde karayolu-demiryolu yük taşıma paylarına bakıldığında, karayolu yük taşıma oranı % 94, demiryolu yük taşıma payı ise % 4'dür [6]. Hızlı tren teknolojisi ancak 2009 yılında kullanılmaya başlanmıştır ve bu teknolojiyi de ithal etmekteyiz.

1800' lü yıllardan beri insanoğlunun hizmetinde olan raylı taşımacılık halen önemini devam ettirmektedir. Enerji tasarrufu sağlaması, güvenli, ucuz, konforlu ve hızlı olması, trafik kazalarının önlenmesinde karayolu taşımacılığına alternatif olması, yapım maliyetlerinin ucuz olması, çevre dostu olması gibi birçok üstünlüğe sahiptir. Bu nedenlerle halen üzerinde çalışılan bir konu olmakta ve geliştirilmeye devam etmektedir.

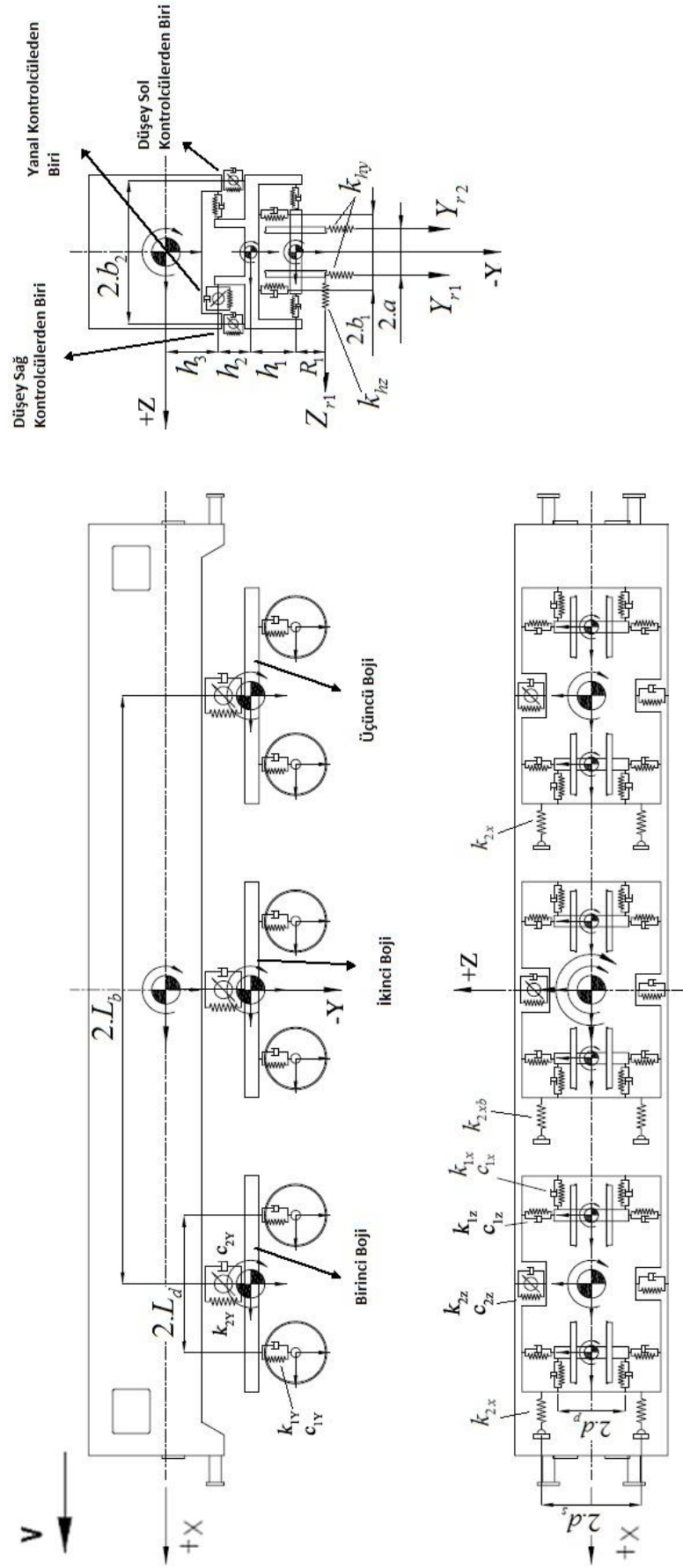
2. LOKOMOTİFİN DİNAMİK MODELİ

2.1 Dinamik Analiz Modeli

Lokomotif dinamiği incelenirken Japonya menşeli Toshiba marka E43000 elektrikli ana hat lokomotifini referans alınarak Mangmang vd., (2004) tarafından incelenen model kullanılmıştır.

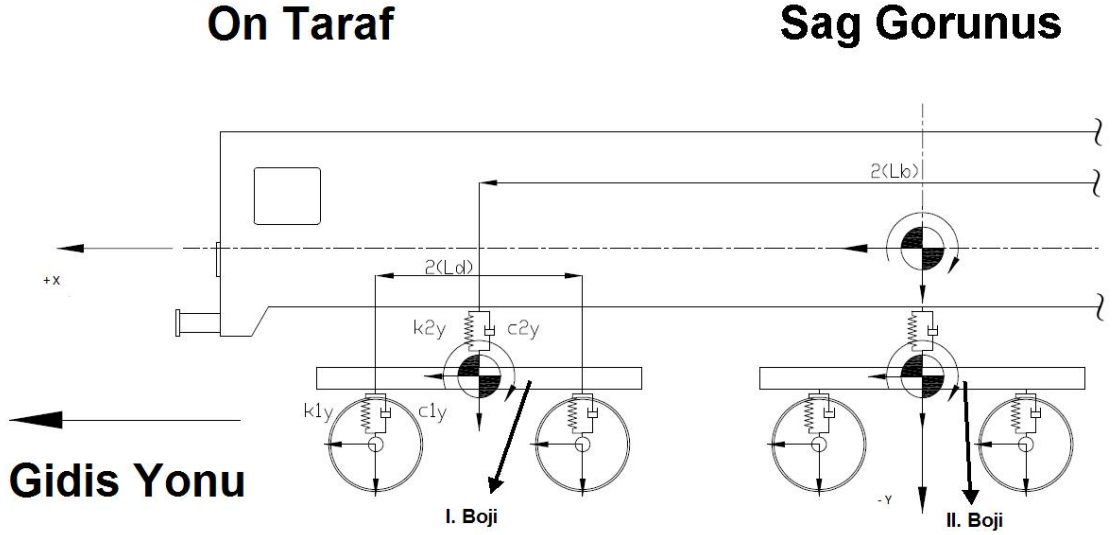
Şekil 2.1'deki dinamik analiz modelinde görülebileceği üzere lokomotif kabin, bojiler ve tekerlek setleri olmak üzere üç alt elemandan oluşmaktadır.

Kabinin, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_k , Y_k , Z_k ve x ekseninde etrafında dönme (yalpalama) θ_k , z ekseninde etrafında dönme (kafa vurma) φ_k , y ekseninde etrafında dönme (yanal sapma açısı) ψ_k serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Titreşim analizi yapılacak ana eleman kabindir, çünkü kütlesi ve kütleli atalet momentlerinin diğer alt elemanlara oranla çok büyük olması kabini, dinamik kuvvetlerden en fazla etkilenen yapı haline getirmiştir.

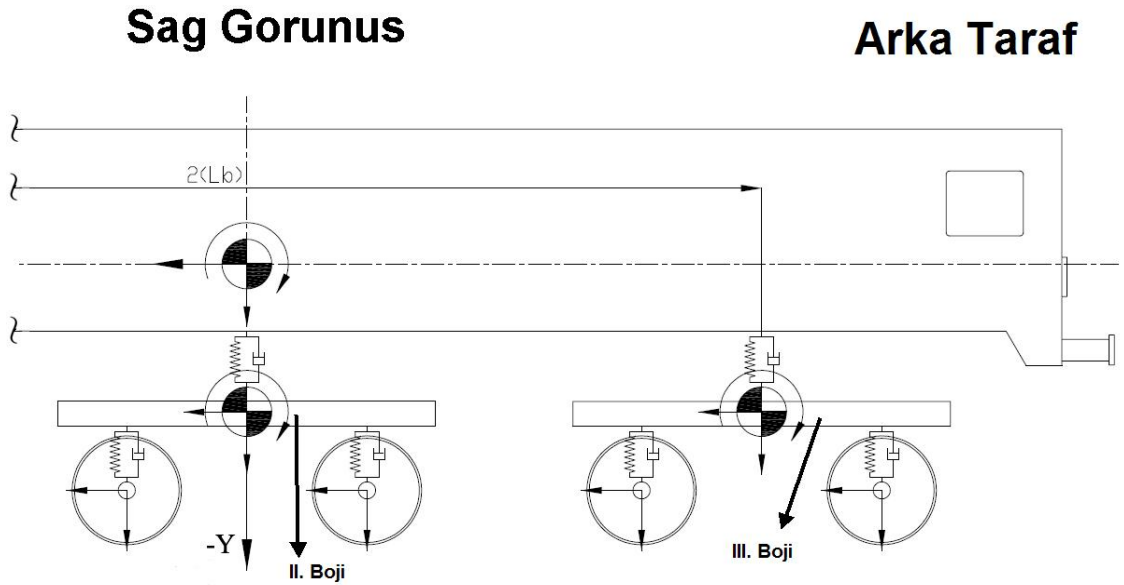


Şekil 2.1 Dinamik analiz modeli (Atalay, 2009)

Bojilerin, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_{bn} , Y_{bn} , Z_{bn} ve x ekseninde dönme (yalpalama) θ_{bn} , z ekseninde dönme (kafa vurma) φ_{bn} , y ekseninde dönme (yanal sapma açısı) ψ_{bn} serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Üç tane boji ($n=3$) olduğuna göre bojilerden toplam 18 serbestlik derecesi gelmektedir.

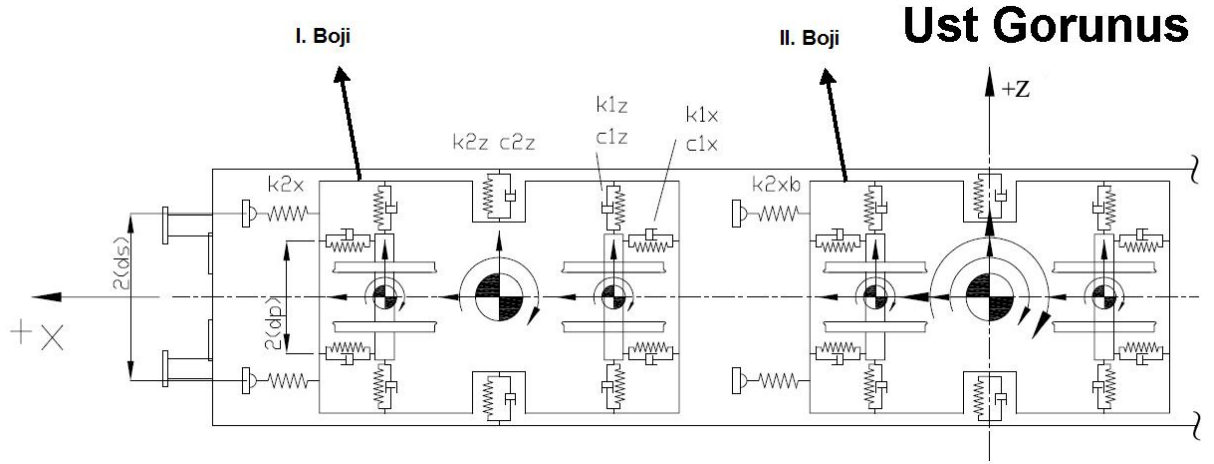


Şekil 2.2 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji düşey bağlantı detayları (Atalay, 2009)

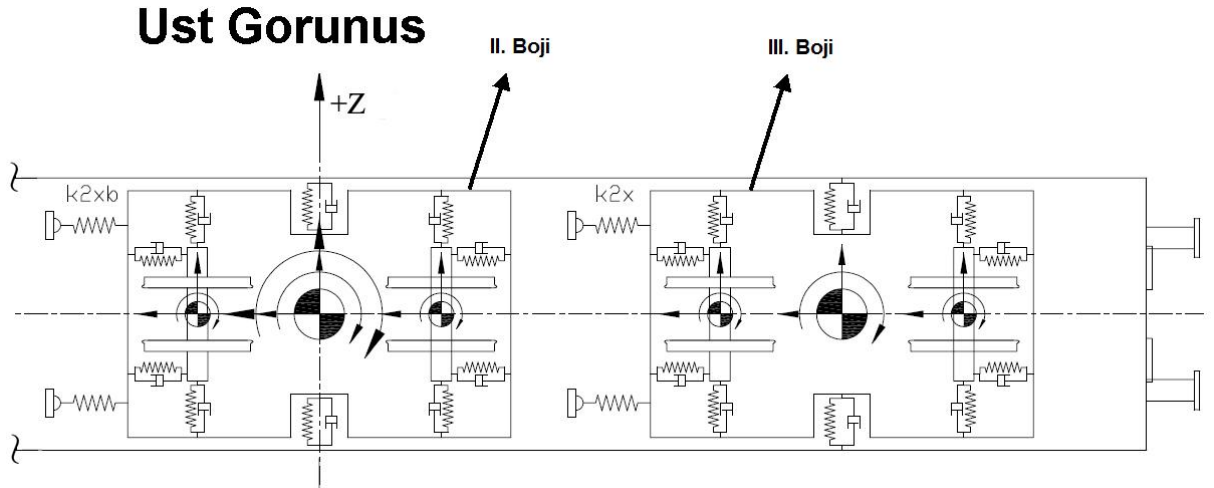


Şekil 2.3 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji düşey bağlantı detayları (Atalay, 2009)

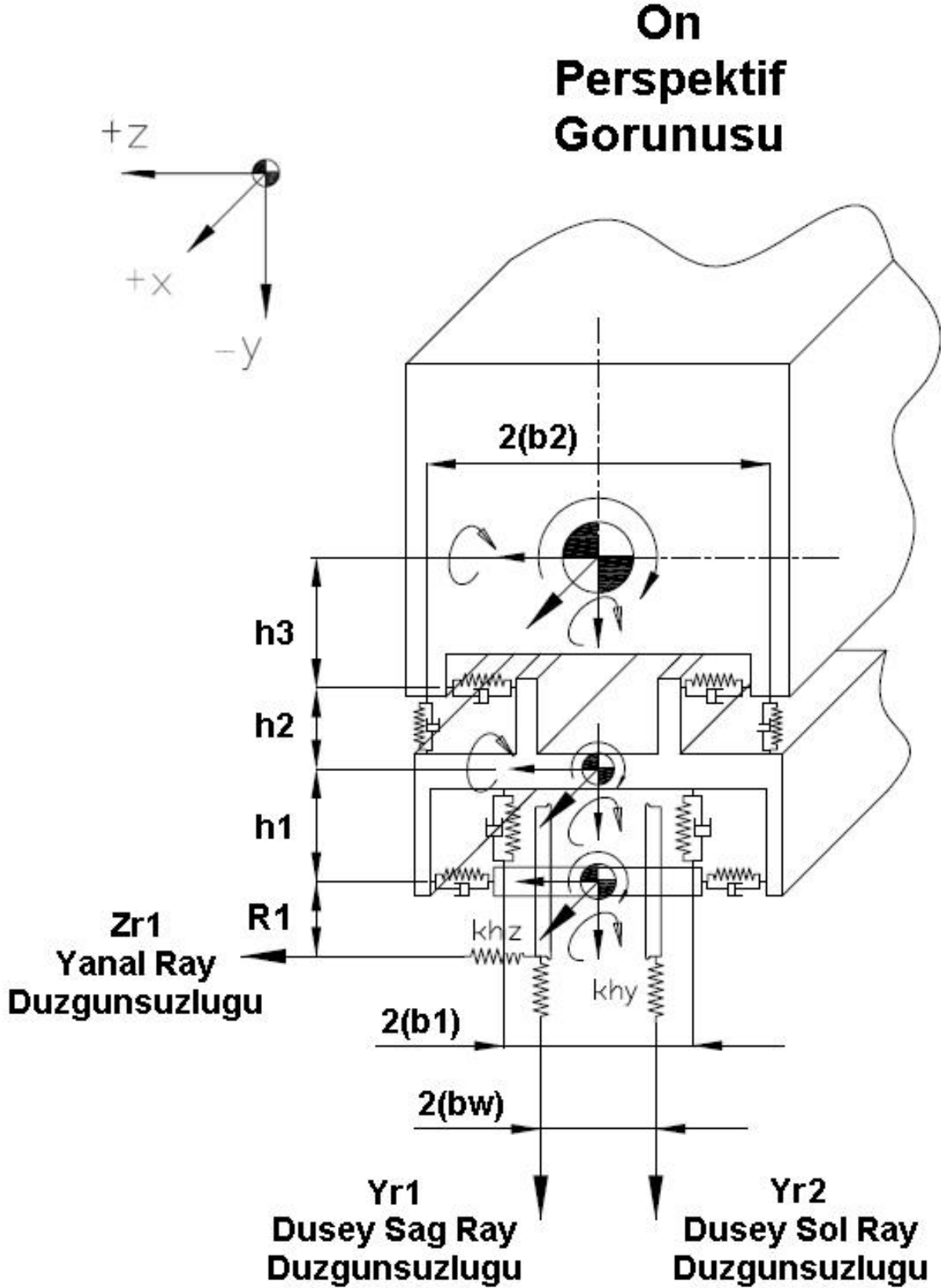
Tekerlek–setlerinin de x , y , z kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_m , Y_m , Z_m ve x ekseninde dönme (yalpalama) θ_m , y ekseninde dönme (yanal sapma açısı) ψ_m serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 5 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Altı tane tekerlek seti ($n=6$) olduğuna göre tekerlek setlerinden toplam 30 serbestlik derecesi gelmektedir.



Şekil 2.4 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları (Atalay, 2009)



Şekil 2.5 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları (Atalay, 2009)



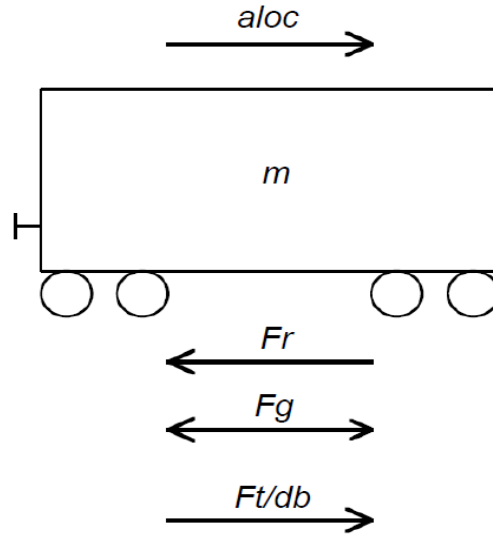
Şekil 2.6 Dinamik analiz modeline perspektif bakış kesiti (Atalay, 2009)

Dinamik analiz modeli kurulurken bazı kabullerde bulunulmuştur:

- Kabin, bojiler ve tekerlek-setlerinin rijit oldukları ve denge konumları etrafında küçük salınımlar yaptıkları varsayılmıştır.
- Kabinin ön ve arka tarafları ile sol ve sağ tarafları kütle merkezine göre simetrik olduğu kabul edilmiştir.
- Raylı taşıtın düz ray üzerinde ve raya teğet olarak ilerlediği varsayılmıştır.
- Kabin, bojiler ve tekerlek-setleri arasındaki birincil ve ikincil süspansiyonlardaki yay ve sönüm katsayılarının lineer oldukları varsayılmıştır.

2.2 Zorlayıcı ve Bozucu Kuvvetler

2.2.1 Boylamsal Kuvvetler (x doğrultusundaki)



Şekil 2.7 Boylamsal hareket dinamik modeli (Iwnicki, 2006)

Şekil 2.7' de lokomotif üzerine boylamsal doğrultuda etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.

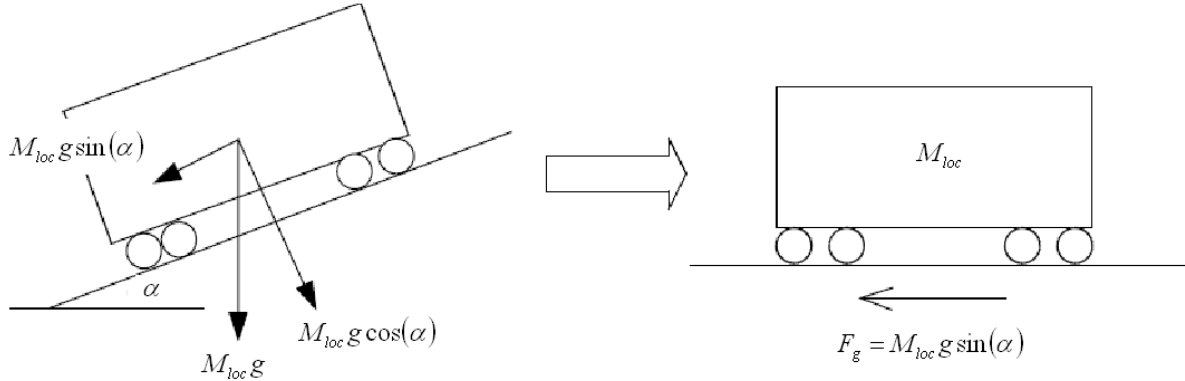
Burada:

a_{loc} : Lokomotifin ivmesi $[m/s^2]$ ve M_{loc} : Lokomotifin kütlesi $[kg]$ olmak üzere atalet kuvvetinin bileşenleridir.

$F_{t/db}$: Çekiş veya dinamik fren kuvvetleri $[N]$, direnç kuvvetlerini yenerek artı yönde ya da

atalet kuvvetlerini yenerek eksi yönde lokomotifi ivmelendiren kuvvetlerdir. Boylamsal hareketin kaynağı olan bu kuvvetler, her bojiye iki adet olmak üzere toplam altı elektrik motoru tarafından üretilmektedir.

F_g : Rampa direnç kuvvetleri \vec{N}_r , rampa tırmanırken eksi ya da rampa inerken artı yönde lokomotifi ivmelendiren kuvvetlerdir. Başka bir ifade ile şekil 2.8’ de gösterildiği gibi ağırlık kuvvetlerinin boylamsal bileşenleridir.



Şekil 2.8 Lokomotive etki eden rampa direnç kuvveti (Iwnicki, 2006)

F_r : Yavaşlatıcı kuvvetlerin toplamı \vec{N}_r , (2.1) eşitliğinde belirtilen kuvvetlerden oluşmaktadır.

$$F_r = F_{pr} + F_{cr} + F_b \quad (2.1)$$

F_{pr} : Yuvarlanma ve Aerodinamik Direnç Kuvveti [N], tekerlek-setlerinin yuvarlanmaya karşı göstereceği dirençten ve havanın viskoz sönüm etkisinden kaynaklanmaktadır. Hızlanma üzerinde negatif etkisi vardır.

F_{cr} : Kurp Direnç Kuvveti [N], lokomotif bir viraja (kurp) girdiği zaman oluşan yavaşlatıcı kuvvetlerdir.

F_b : Pnömatik Fren Kuvveti, lokomotifi yavaşlatmak ya da durdurmak için fren mekanizması tarafından üretilen kuvvetlerdir.

(2.2) eşitliğinde en genel boylamsal kuvvet dengesi verilmiştir. Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı üzere eşitliğin sağ tarafındaki bazı kuvvetler zaman zaman ortaya çıkmaktadır. Örneğin, düz bir yol boyunca rampa kuvvetleri sıfır olacak ya da çok yavaş hızlarda aerodinamik direnç kuvvetleri ihmal edilebilecektir.

$$M\ddot{X} = F_{t/db} - (F_{pr} + F_{cr} + F_b) - F_g \quad (2.2)$$

Analizimizde lokomotifin düz bir hat boyunca sabit 120 km/h hızla ilerlediği varsayılmıştır. Dolayısıyla (2.2) eşitliğinin sağ tarafı sıfır olması gerekmektedir. Fakat, Bölüm 2.2.2 de anlatılan düşey ray düzgünsüzlükleri dolayısıyla boylamsal doğrultuda bozucu kuvvetler oluşmaktadır. Ayrıca ray-tekerlek etkileşimleri dolayısıyla sünme kuvvetleri de ekti etmektedir.

Boylamsal sünme kuvveti (Kalker, 1967)

$$F_{xtn} = 2 \left[f_{33} \left(-\frac{a\dot{\psi}_{tn}}{V} \right) \right] \quad (2.3)$$

F_{xtn} : Boylamsal doğrultuda n. tekerlek setine etkiyen sünme kuvveti

f_{33} : Boylamsal doğrultudaki sünme katsayısı

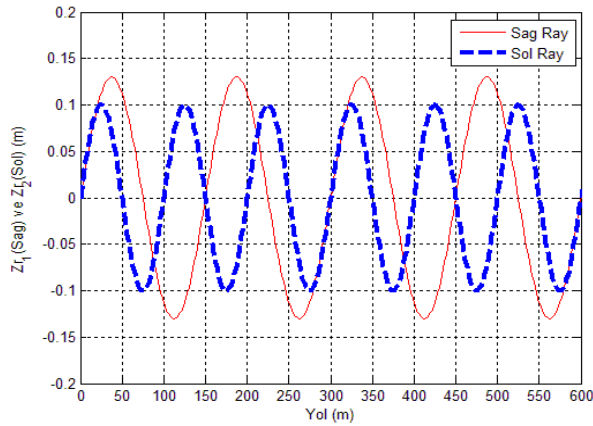
$\dot{\psi}_{tn}$: n. tekerlek setinin düşey eksen etrafında dönme hızı

a : İki ray arasındaki genişliğin yarısı

V : Lokomotifin hızı (Analizimizde 120 km/h)

2.2.2 Düşey Kuvvetler (y doğrultusundaki)

Lokomotifimize düşey doğrultuda, ray düzgünsüzlükleri ve sünme momentleri etkimektedir. SimMechanic modelimizi analiz ederken, Şekil 2.9' deki ray düzgünsüzlüğü ve (2.4) deki sünme ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 2.9 Düşey ray düzgünsüzlükleri (Atalay, 2009)

Yanal sapma açısı doğrultusundaki sünme momenti (Kalker, 1967)

$$M_{ym} = 2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Z}_m}{V} + \psi_m \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_m}{V} \right) \right] \quad (2.4)$$

M_{ym} : Düşey eksen etrafında n. tekerlek setine etkiyen sünme momenti

f_{12} : Yanal / yanal sapma açısı doğrultusundaki sünme katsayısı

f_{22} : Yanal sapma açısı doğrultusundaki sünme katsayısı

ψ_m : n. tekerlek setinin düşey eksek etrafında dönmesi

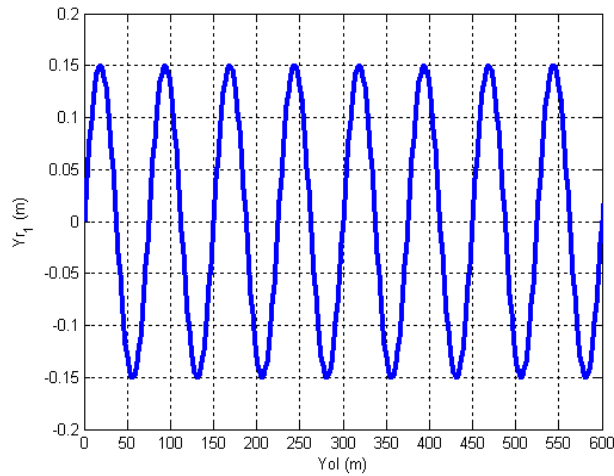
$\dot{\psi}_m$: n. tekerlek setinin düşey eksek etrafında dönme hızı

\dot{Z}_m : n. tekerlek setinin yanal doğrultudaki hızı

V : Lokomotifin hızı (Analizimizde 120 km/h)

2.2.3 Yanal Kuvvetler (z doğrultusundaki)

Yanal doğrultuda da ray düzgünsüzlükleri ve sünme kuvvetleri etkimektedir. SimMechanics modelimizi analiz ederken Şekil 2.10' deki ray düzgünsüzlüğü ve (2.5) deki sünme ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Yanal ray düzgünsüzlüğü (Atalay, 2009)

Yanal sünme kuvveti (Kalker, 1967)

$$F_{z_m} = 2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Z}_m}{V} - \psi_m \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_m}{V} \right) \right] \quad (2.5)$$

F_{z_m} : Yanal doğrultuda n. tekerlek setine etkiyen sünme kuvveti

f_{11} : Yanal doğrultusundaki sünme katsayısı

f_{12} : Yanal / yanal sapma açısı doğrultusundaki sünme katsayısı

ψ_m : n. tekerlek setinin düşey eksek etrafında dönmesi

$\dot{\psi}_m$: n. tekerlek setinin düşey eksek etrafında dönme hızı

\dot{Z}_m : n. tekerlek setinin yanal doğrultudaki hızı

V : Lokomotifin hızı (Analizimizde 120 km/h)

3. SIMMECHANICS MODELİ

Bu bölümde SimMechanics araçları ve modelleme hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra lokomotifin SimMechanics modeli verilmiştir.

3.1 SimMechanics

SimMechanics, Simulink altında mekanik sistemlerin modellenmesine olanak tanıyan bir araç kutusudur (Toolbox). Bu araçlar ile;

- Ayırık sistemlerin (rijit gövdeli) üç boyutlu mekanik modelleri oluşturulabilmekte,
- Mekanik hareket benzetimi ve analizleri yapılabilmekte,
- Sistemi oluşturan rijit gövdelerin geometrik bilgileri Pro/ENGINEER ve SolidWorks gibi CAD yazılımlarından alınabilmekte,
- Hidrolik, pnömatik ve elektriksel sistemler ile bütünleşik modeller kurarak kontrolcü uygulanabilmekte,
- Mekanik model C koduna dönüştürülebilmektedir.

Sıradan bir Simulink modeli matematiksel bir modeldir. Öncesinde, analitik yöntemlerle diferansiyel denklemlerin çıkarılması gerekmektedir. Simulink modeli bu diferansiyel denklemleri çözmekte ve analize olanak sağlamaktadır.

SimMechanics modeli ise mekanik sistem elemanlarının kütle, atalet gibi fiziksel özelliklerini, birbirleri ile olan geometrik ve kinematik ilişkilerini tanımlayan fiziksel bir modeldir. Diferansiyel denklem takımları, yazılım tarafından kurulur ve çözülür.

Tahmin edilebileceği üzere SimMechanics modelleri tasarım aşamasında kolaylık sunsa da diferansiyel denklem takımlarının çıkarılması ve çözümünde yavaş kalmaktadır.

Bir SimMechanics modeli, birbiri ile bağlı bloklardan oluşan bir blok diyagramdır. Her bir blok, kütle, yay, damper, aktüatör vb bir mekaniksel elemanı veya bir alt sistemi temsil etmektedir. Bloklar üzerine çift tıklanarak "Block Parameters" penceresinden, temsil ettiği mekaniksel elemana ait fiziksel özellikleri, konumu ve diğer bloklarla olan ilişkisi kolaylıkla tanımlanabilmektedir.

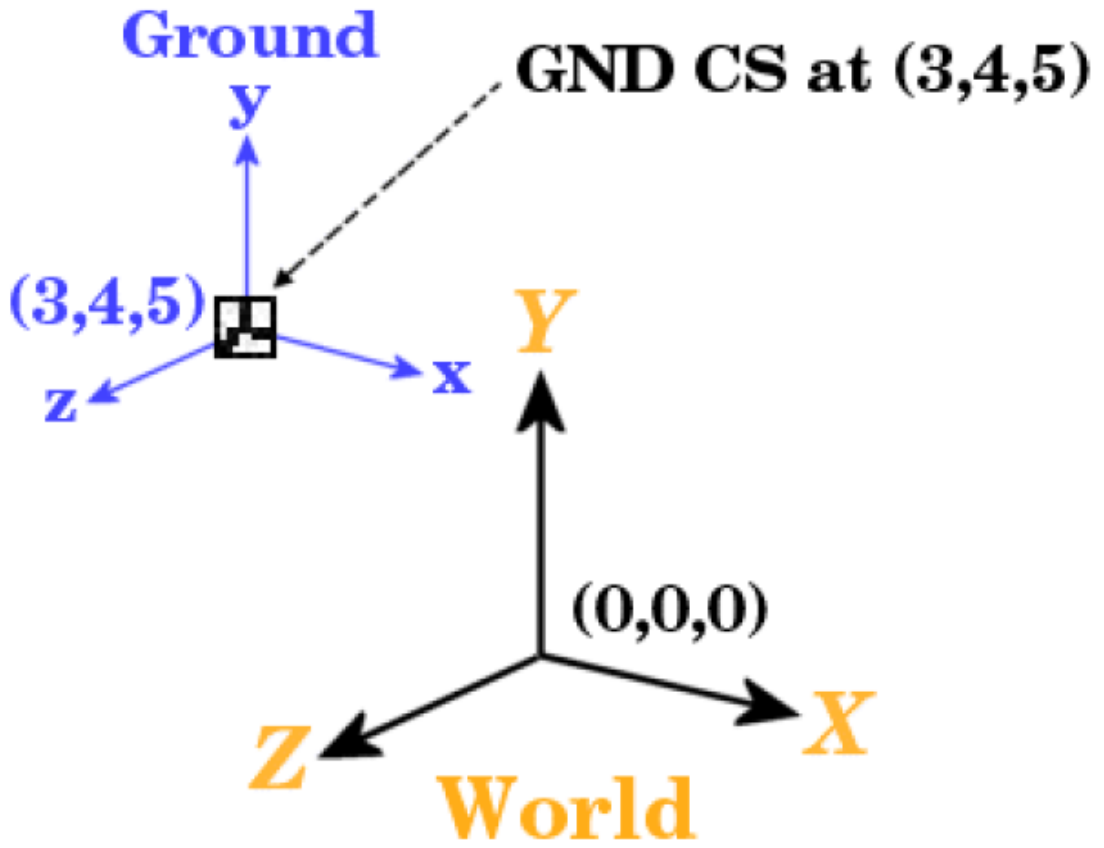
3.1.1 Model Uzayı ve Koordinat Sistemleri

SimMechanics' te mekanik sistemin, içinde bulunduğu var sayılan ortama model uzayı denir. Dünya sistemine birebir benzerdir ve mekanik sistemlerin referans aldığı sonsuz kütleyle Ground (Yeryüzü, Zemin) denir.

Model uzayındaki ana (master) koordinat sistemi World Coordinate System (WCS) olarak adlandırılır. Merkezi (origin) $[x \ y \ z] = [0, 0, 0]$ noktasında bulunur ve sabittir.

Ground üzerinde de WCS' yi referans alan bir çok koordinat sistemi tanımlanabilir ve Ground Coordinate System (GCS) olarak adlandırılır. GCS lerin eksen takımları WCS eksen takımlarına paralel ve aynı doğrultudadır. Merkezleri WCS' yi referans alınarak tanımlanır ve sabittir.

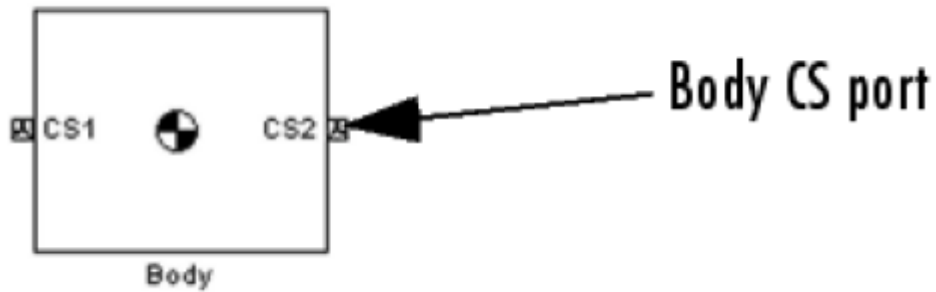
Rijit makine parçaları üzerindeki koordinat sistemleri Body Coordinate System olarak adlandırılır ve kısaca CS veya CG (Orijini ağırlık merkezi olan koordinat sistemi) ile gösterilir. WCS ya da herhangi bir CS yi referans alarak tanımlanabilir. WCS' den farklı bir yönetime sahip olabilir ve hareket edebilir.



Şekil 3.1 SimMechanics Koordinat Sistemleri (SimMechanics User Guide, 2009)

3.1.2 Gövde Elemanları (Bodies)

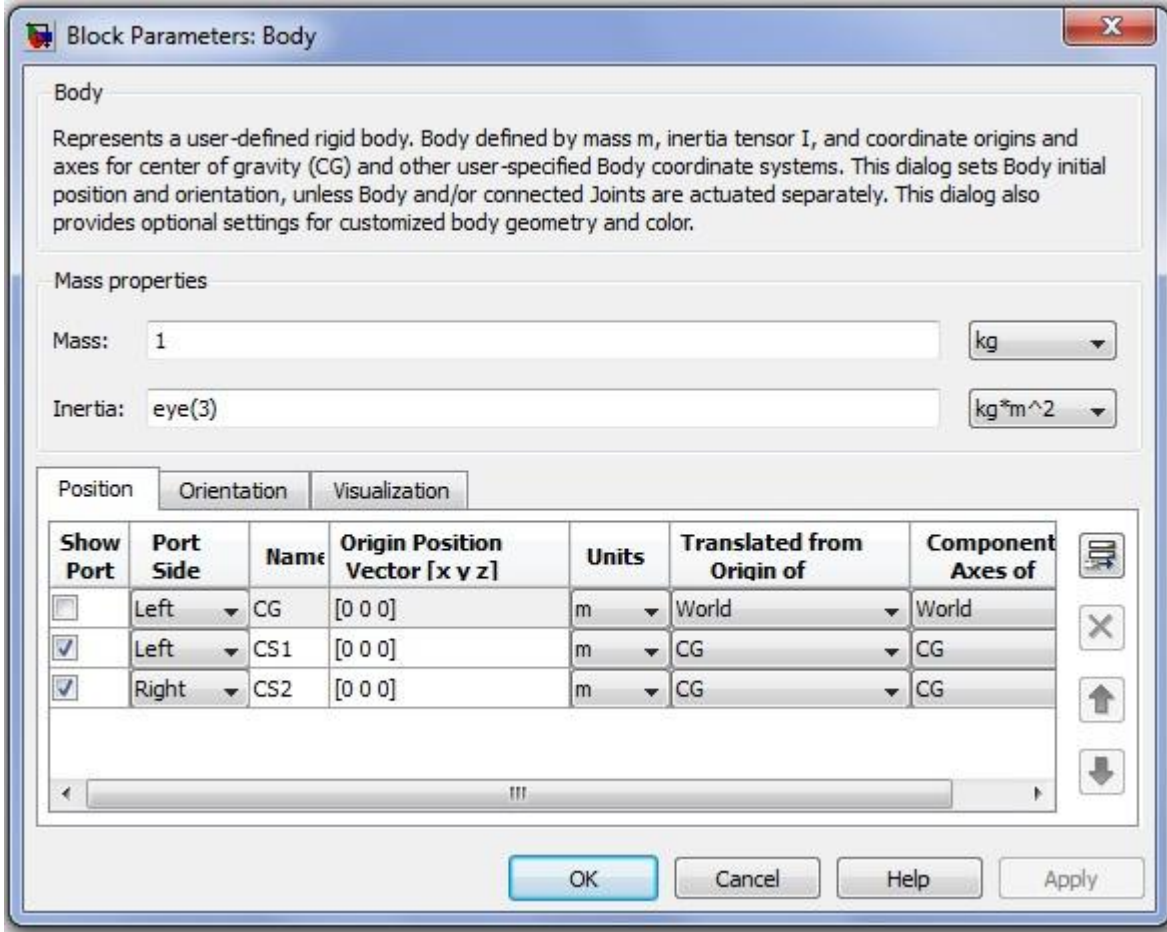
Bir makinenin temel elemanı olan gövde parçaları, SimMechanics altında Gövde (Body) olarak adlandırılır ve ayırık sistemlerdeki rijit kütle elemanına karşılık gelir.



Şekil 3.2 SimMechanics Body Bloğu (SimMechanics User Guide, 2009)

Şekil 3.2' de görülen Gövde bloğu üzerine çift tıklanarak açılan Blok Parameters

penceresinden kütle, ataleti ve eksen takımları (CS: Coordinate System) tanımlanır.



Şekil 3.3 Body Blok Parameters Penceresi

Şekil 3.3' de bir Body bloğuna ait Blok Parameters penceresi görülmektedir. Buradan bloğun temsil ettiği makine parçasının;

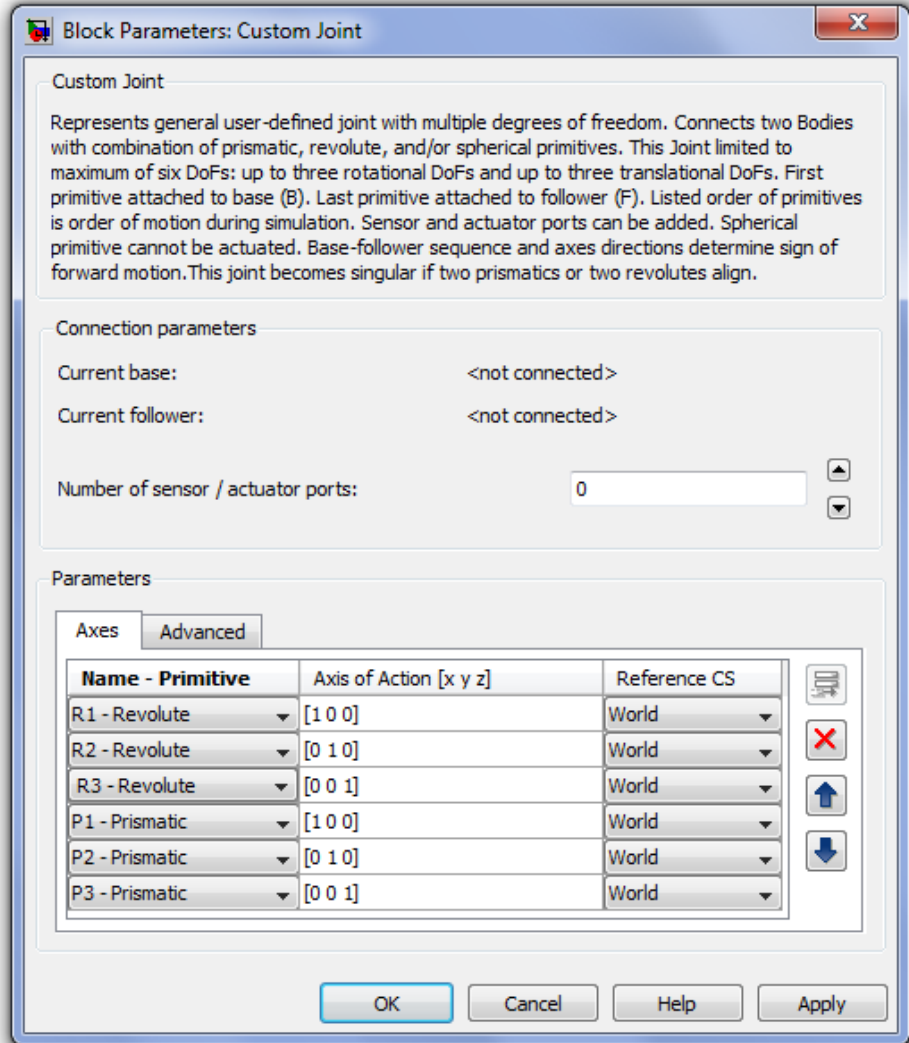
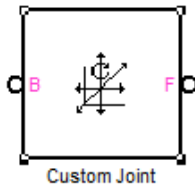
- Mass: Kütle, ataletini tanımlanır.
- Inertia: Ağırlık merkezine göre kütleli ataleti tanımlanır.
- Position Sekmesi: Makine parçası üzerinde koordinat sistemleri tanımlanır. Ağırlık merkezini orijin kabul eden en az bir eksen takımı tanımlanmak zorunludur.
- Orientation Sekmesi: Gövde bloğu eksen takımlarının WCS göre yönelimleri tanımlanır.

Blok parametreleri tanımlanırken ortak bir birim sistemini kullanmak, karşılaşılan hataları minimize edeceği gibi anlaşılabilirliğini de arttıracaktır. Bu tez çalışmasının bütününde tanımlamalar, kg-m-sn birimlerinde yapılmıştır.

3.1.3 Bağlar (Joints)

Jointler (Joints), iki gövde bloğu arasındaki göreceli hareket kabiliyetini tanımlayan bloklardır. Tek başlarına fiziksel bir bağ anlamına gelmeyip, sisteme kısıtsız serbestlik derecesi eklemektedirler.

Modelimizde, tüm serbestlik derecelerinin birbirinden bağımsız olarak tanımlanabildiği Custom Joints bloğu kullanılmıştır.



şekil 3.4 Custom Joint Bloğu ve Blok Parameters Penceresi

şekil 3.4' de görülen Costum Joint Blok Parameters penceresi, F (Follower) portuna bağlı Gövdeninin, B (Base) portuna bağlı gövdeye göre hareket kabiliyetini tanımlamaktadır. Buna göre takipçi (follower) gövde, Word Koordinat sistemini referans alarak;

- X yönünde doğrusal,

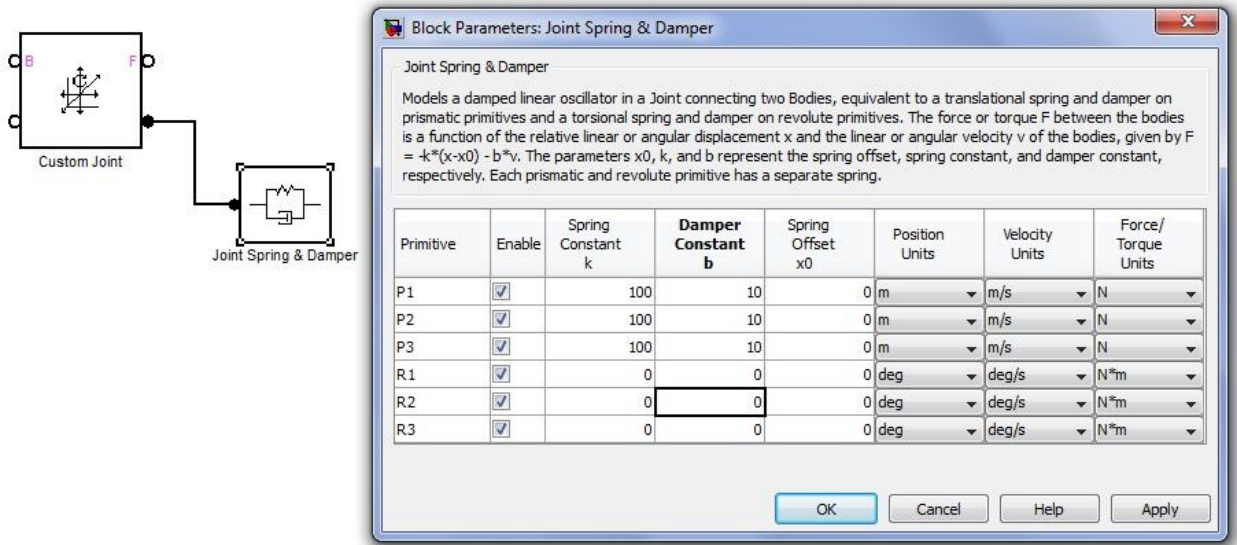
- Y yönünde doğrusal,
- Z yönünde doğrusal,
- X etrafında dönme,
- Y etrafında dönme,
- Z etrafında dönme olmak üzere altı serbestlik derecesine sahiptir.

Ayrıca bu blok üzerinde Sensor ve Actuator portları tanımlanarak, gövde üzerine kuvvet uygulanabilmekte ve ölçme yapılabilmektedir.

3.1.4 Kuvvet Elemanları (Force Elements)

Ayrık sistemlerdeki yay ve sönüm elemanlarına karşılık gelen bu bloklar, iki gövde arasındaki fiziksel bir bağlantıyı ifade etmektedirler. Gövdelerin denge konumuna göre olan hareketlerinde, konum ve hızla orantılı olarak harekete ters doğrultuda kuvvet üretirler. Kısaca sistemi denge konumuna getirmeye çalışırlar.

Body Spring&Damper ve Joint Spring&Damper olmak üzere iki türü vardır. Gövde bloğunun denge konumu etrafında hareketi söz konusu olduğunda bir anlam ifade ettiklerinden, her zaman bir Joint Bloğu ile beraber kullanılmaları gerekmektedir. Şekil 3.5' de Joint Spring&Damper bloğunun kullanılmasına bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.5 Joint Spring&Damper Bloğu ve Block Parameters Penceresi

3.1.5 Sensör ve Aktüatörler (Sensors and Actuators)

Aktüatör bloğu elektrik motoru, hidrolik ve pnömatik silindir gibi kuvvet üreticilerine karşılık gelir. Gövde, Joint ve Sürücü bloklarına zamana bağlı kuvvet ve hareket uygularlar. Bu bloklarla başlıca;

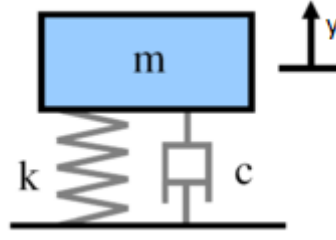
- Bir gövde veya joint bloğuna zamanın bir fonksiyonu olan kuvvet ve moment uygulanabilir.
- Bir joint veya driver bloğunun konum, hız ve ivmesi zamanın fonksiyonu olarak tanımlanabilir.
- Bir joint bloğunun başlangıçtaki konum ve hız bilgisi (Initial conditions) tanımlanabilir.
- Bir gövde bloğunun kütle ve/veya ataleti zamanın fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

Lokomotif modelimizde Joint Actuator ve Body Actuator olmak üzere iki tip Aktüatör bloğu kullanılmıştır. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere; ilki bir joint bloğuna, ikincisi ise doğrudan gövde bloğuna bağlanabilmektedir.

Sensor blokları, gövde ve joint bloklarına bağlanarak fiziksel değerlerinin algılanmasında kullanılırlar. Body Sensor ve Joint Sensor olmak üzere iki tipi vardır. Adlarından da anlaşılacağı üzere; ilki bir gövde bloğuna doğrudan bağlanarak konum, hız ve ivme değerlerini ölçmede, ikinci ise bir joint bloğuna bağlanarak jointin tanımladığı serbestlik derecelerinden istenilen bir tanesinde konum, hız, ivme ve tepki kuvvetlerinin algılanmasında kullanılır.

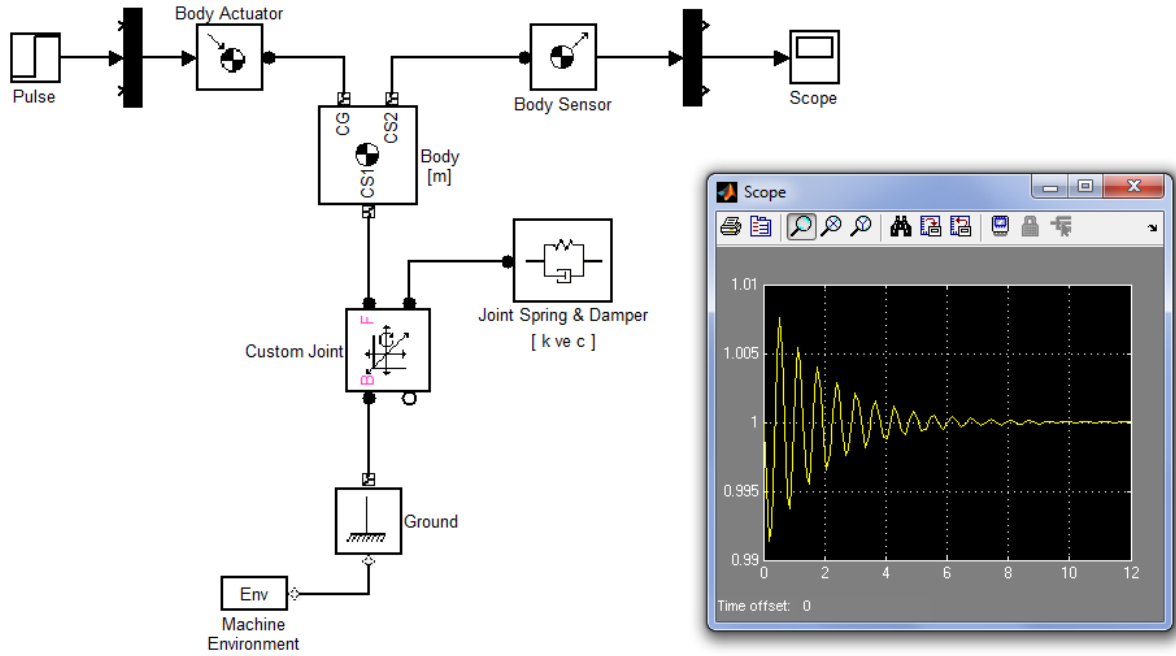
3.1.6 Bir Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper Sisteminin Modellenmesine Örnek

Buraya kadar, Simechanic model uzayı ve modellemede kullanılan temel bloklar tanıtılmaya çalışıldı. Anlatılanları basit bir örnek ile pekiştirmeden, tezin asıl amacı olan lokomotif modeline geçmek anlaşılabilirliğini zorlaştıracaktır. Bu nedenle titreşim sistemlerinin en basit problemi olan bir serbestlik dereceli kütle-yay-damper sisteminin modellenmesine bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.6 Tek Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper Modeli

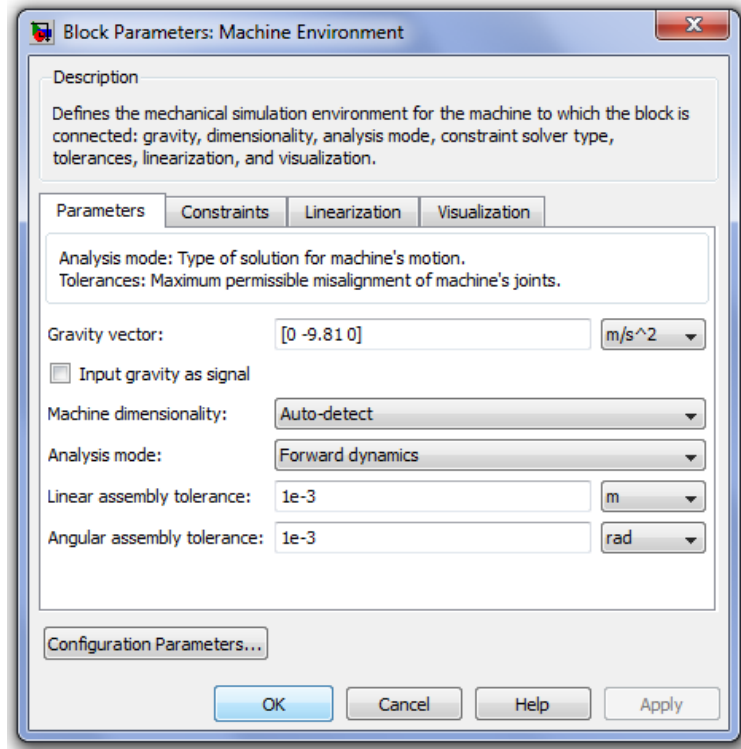
SimMechanics modelini kuracağımız sistemin fiziki modeli Şekil 3.6’ de görülmektedir. “m” kütlesi, “y” yayı ve “c” damperi ile zemine bağlı olup, düşey “y” eksenini doğrultusunda hareket kabiliyetine sahiptir.



Şekil 3.7 Tek Serbestlik Dereceli Kütle-Yay-Damper SimMechanics Modeli

Şekil 3.7’ de örnek sistemimizin SimMechanics modeli ve m kütlesinin darbe fonksiyonuna karşılık konum grafiği görülmektedir. Beklendiği üzere, sistemimiz bir sönüm elemanı içerdiğinden sönümlü bir titreşim oluşmuştur.

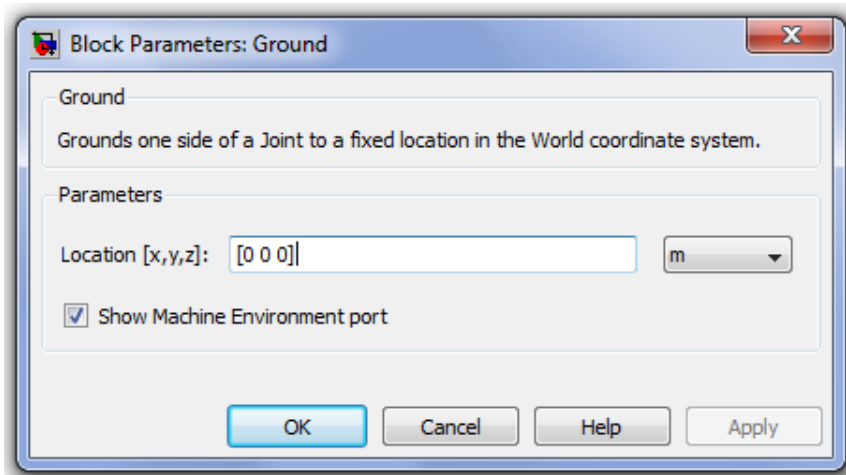
Örnek modelimizi Machine Environment bloğundan başlayarak açıklamaya çalışalım. Bu blok, model uzayının fiziksel özelliklerini tanımlar.



Şekil 3.8 Mechine Enviromet Block Parameters Penceresi

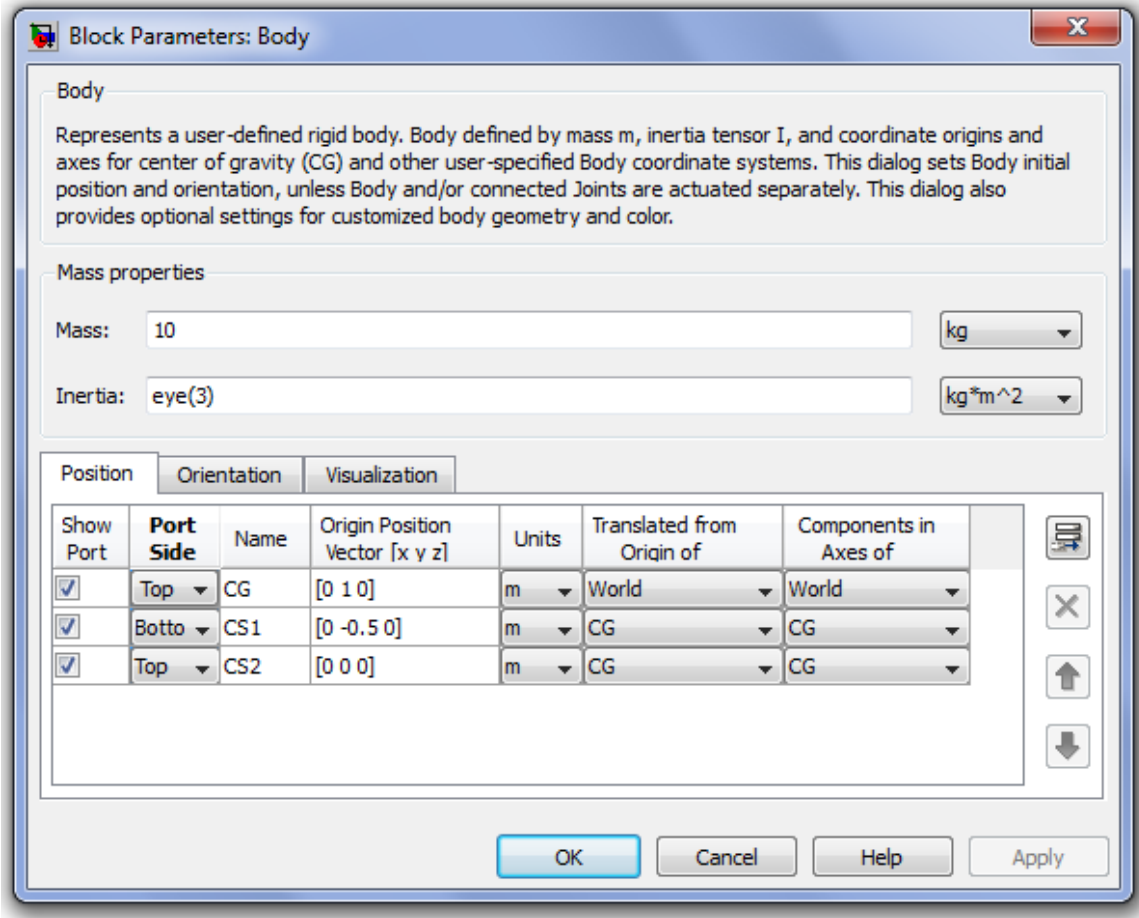
Şekil 3.8’ de Mechine Enviromet Block Paramets penceresi görülmektedir. Gravity Vector alanı yer çekim ivmesini tanımlar ve resimdeki haliyle $-y$ yönünde $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak tanımlıdır.

Ground bloğu, zemin üzerinde m kütesine referans olan koordinat sistemini tanımlar. Bir SimMechanics modeli en az bir tane Ground bloğu içermek zorundadır. Örnek modelimizde GCS’ nin merkezi (origin), WCS merkezinde alınmıştır.



Şekil 3.9 Ground Block Parameters Penceresi

Body bloğu “m” kütlesini temsil etmektedir. Üzerinde tanımlı her koordinat sistemi bir bağlantı portu olarak bloğa eklenmektedir.

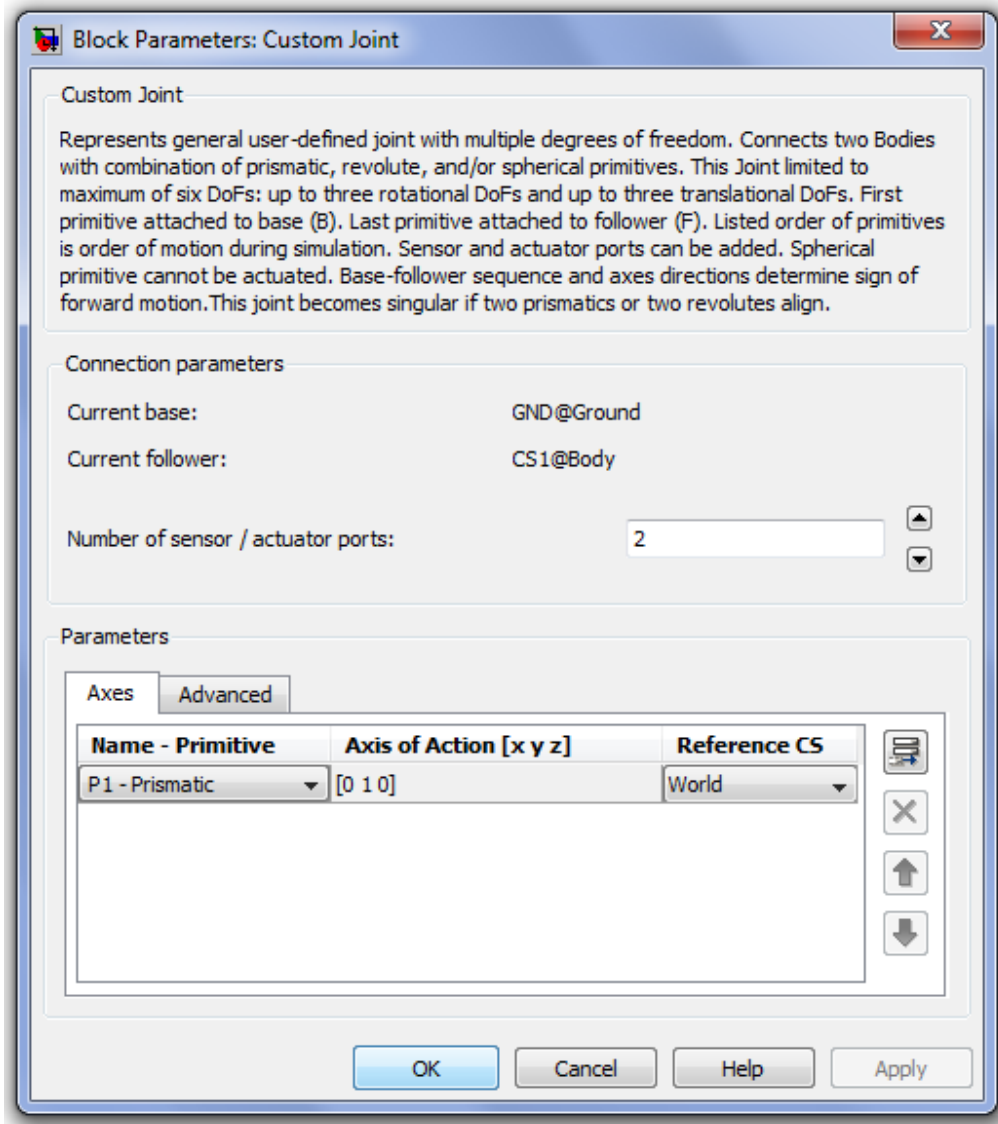


Şekil 3.10 Body Block Parameters Penceresi

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere m kütlesi üzerinde üç adet koordinat sistemi tanımlıdır. CG koordinat sisteminin merkezi, bloğun ağırlık merkezindedir ve WCS' yi referans olarak model uzayında [0 1 0] konumunda tanımlanmıştır. Diğer iki koordinat sistemi CG' yi referans olarak CS1=[0 -0.5 0] ve CS2=[0 0 0] konumlarında tanımlıdır.

Orientation sekmesi, body koordinat sistemi eksen takımlarının yönelimlerini, referans bir koordinat sisteminin eksen takımına göre tanımlamak için kullanılır. Örnek modelimizde tüm eksen takımlarının, CWS eksen takımına paralel olduğu varsayıldığından herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Buraya kadar, model uzayımızın fiziki özellikleri ile eksen takımları tanımlanmış ve m kütlesi model uzayında bir konuma yerleştirilmiştir. Fakat henüz, m kütlesinin nasıl bir hareket kabiliyetine sahip olduğu, başka bir değişle herhangi bir serbestlik derecesi tanımlanmamıştır.

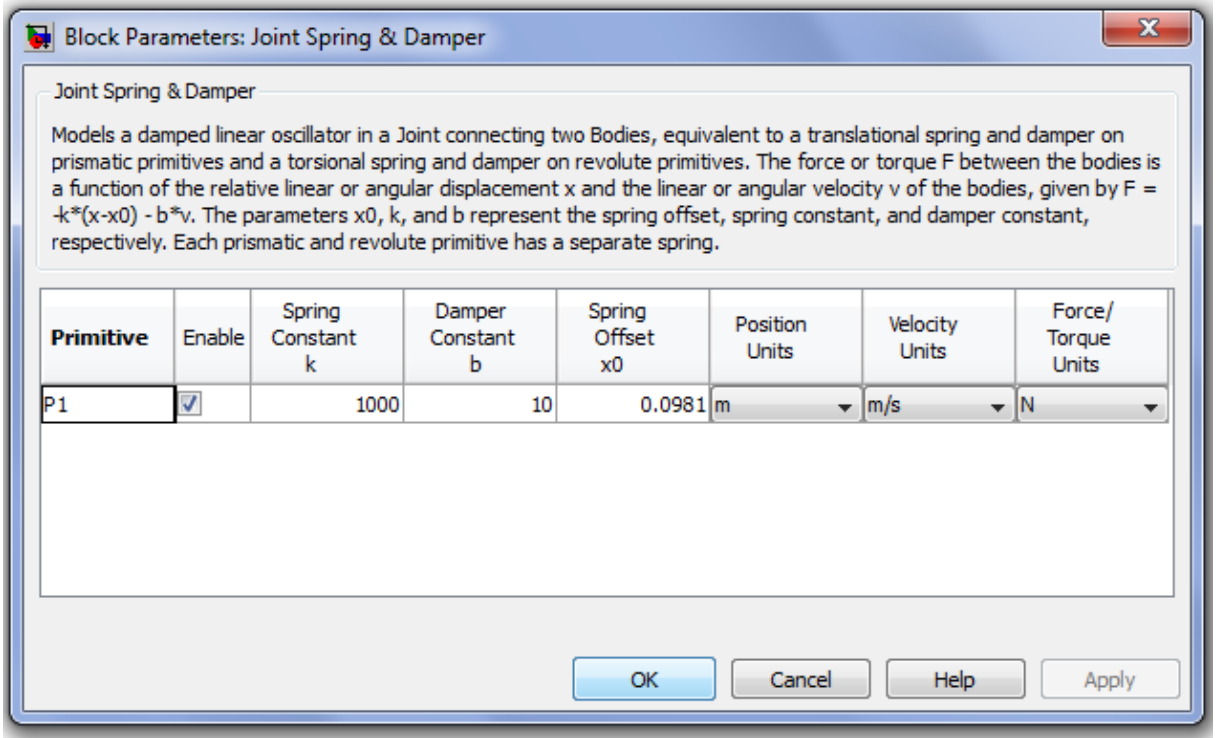


Şekil 3.11 Custom Joint Block Parameters Penceresi

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere m kütesine y ekseninde doğrusal bir serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Bu tanım sadece hareket kabiliyetini ifade etmekte olup, fiziksel bir bağ meydana getirmez.

Zemin ile m kütesi arasındaki fiziksel bağı Joint Spring&Damper bloğu tanımlar. Fiziki modelimizdeki yay ve sönüm elemanlarına karşılık gelir. Eğer bu blok kullanılmıyaydı m kütesi model uzayında -y doğrultusunda düşmeye başlayacak ve sonsuza kadar devam edecekti.

Şekil 3.12’ de “k” ve “c” sabitlerinin nasıl tanımlandığı gösterilmiştir. Bu penceredeki “Spring Offset x0”, k yayının t=0 anındaki sıkıştırma miktarıdır ve yay sabitiyle çarpıldığında “m” kütesinin ağırlığına eşit olmalıdır.

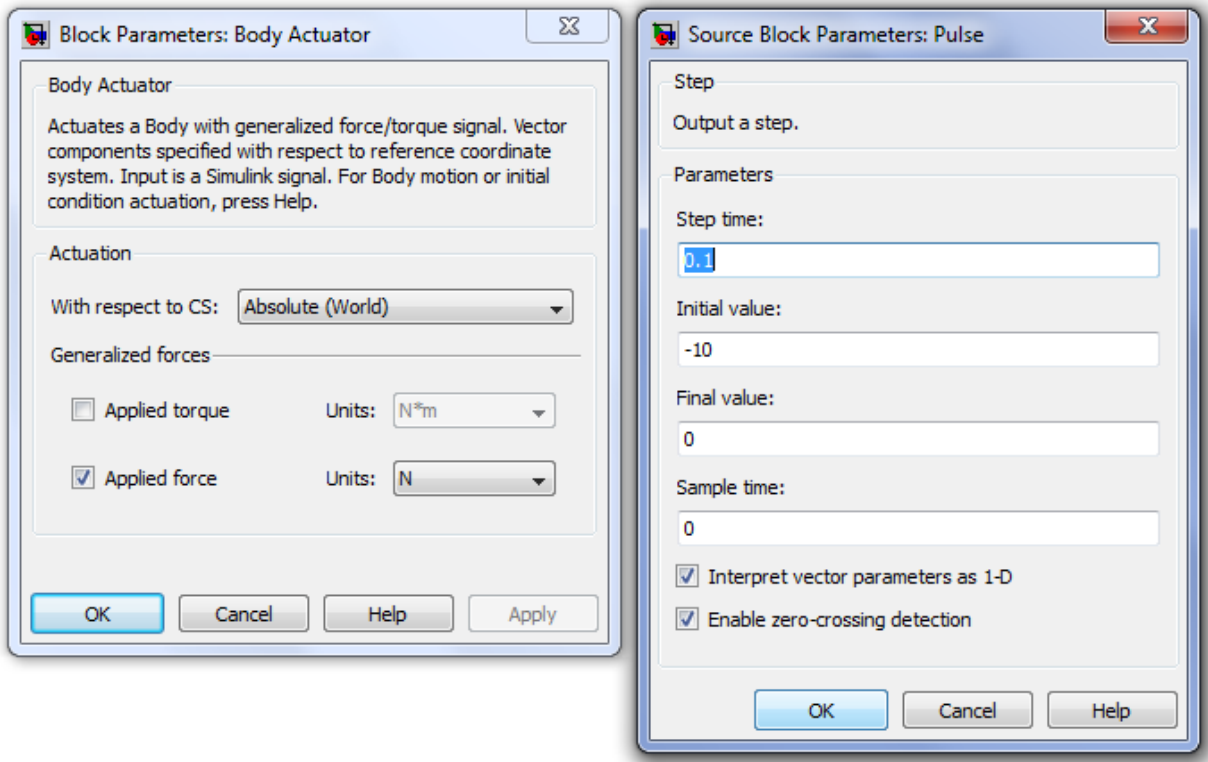


Şekil 3.12 Joint Spring&Damper Block Parameter Penceresi

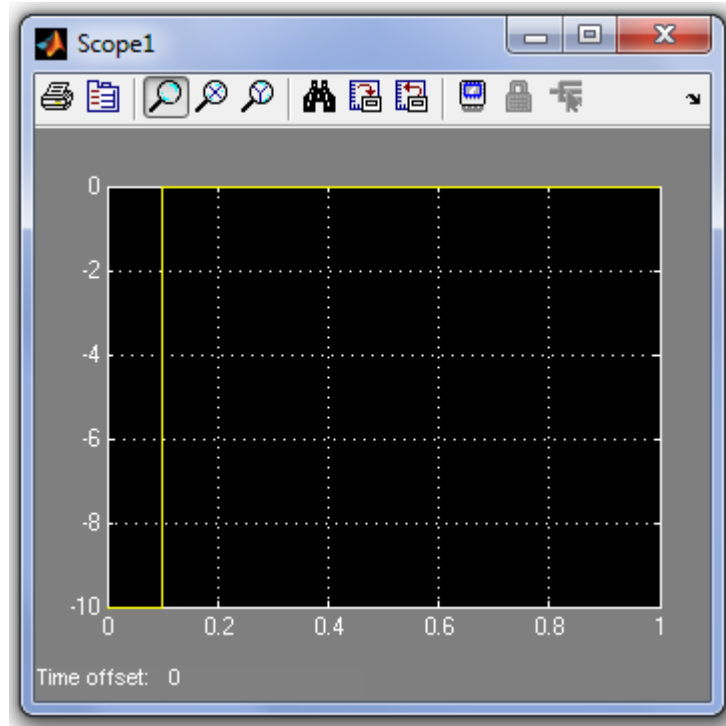
Joint Spring&Damper bloğunun eklenmesiyle Şekil 3.6’ de gösterilen sistemin modellenmesi tamamlanmıştır. Fakat yapılan çalışmanın bir anlam kazanabilmesi için sisteme bir kuvvet uygulayıp, davranışlarının gözlemlenebilmesi gerekmektedir. Bunun için Body Actuator ve Body Sensor blokları kullanılmıştır.

Body Actuator bloğu, “m” kütesinin ağırlık merkezine N biriminde kuvvet uygular. Kuvvetin sayısal değeri, Source bloğunda darbe fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.13 ve 3.14’ den görüleceği üzere, $t=0 - 0.1$ aralığında -10 N luk bir kuvvet “m” kütesinin ağırlık merkezine uygulanmaktadır.

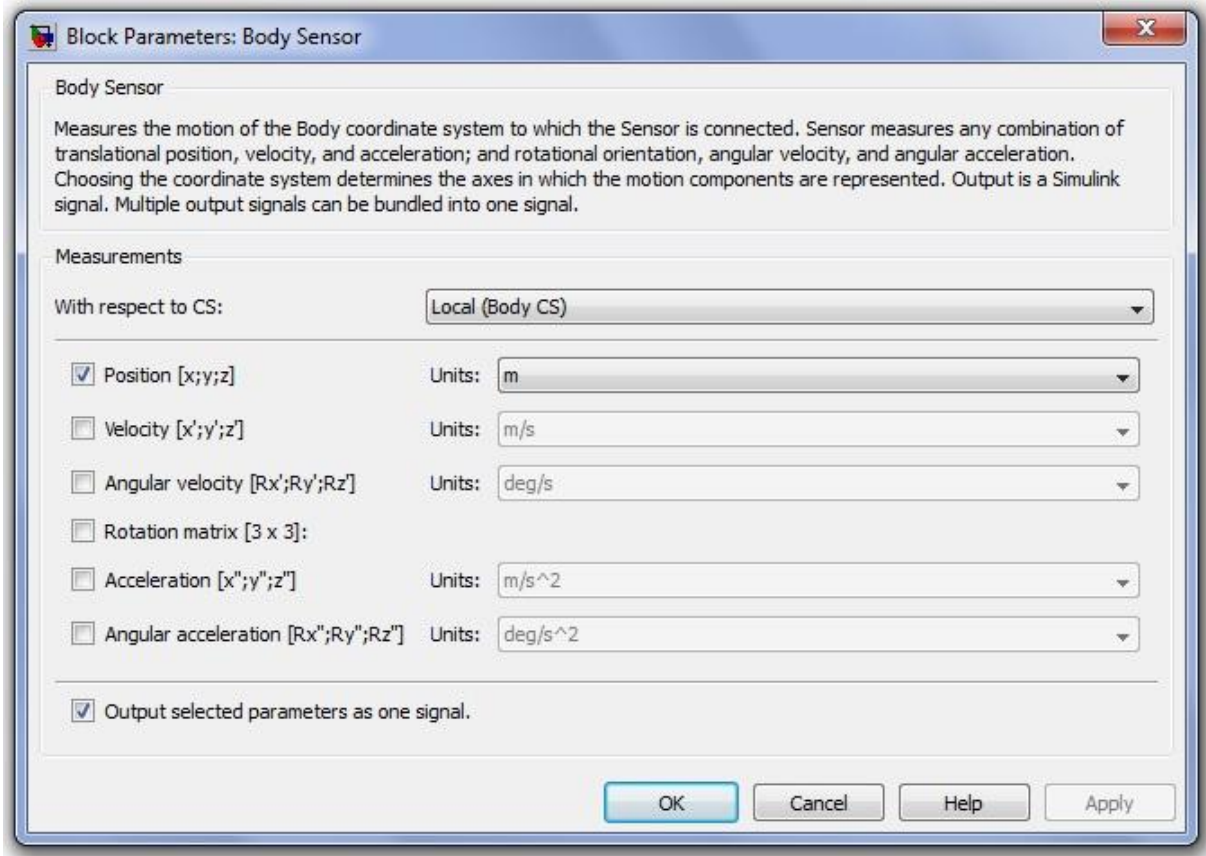
“m” kütesinin yaptığı hareket, Sensor bloğu ile algılanmakta ve Scope bloğunda grafik olarak elde edilmektedir. Sensor “m” kütesinin ağırlık merkezine bağlı olup, WCS yi referans olarak ölçüm yapmaktadır.



Şekil 3.13 Body Actuator ve Source Blok Parameters Penceresi



Şekil 3.14 Darbe Fonksiyonu



Şekil 3.15 Body Sensor Block Parameters Penceresi

3.2 Lokomotifin SimMechanics Modeli

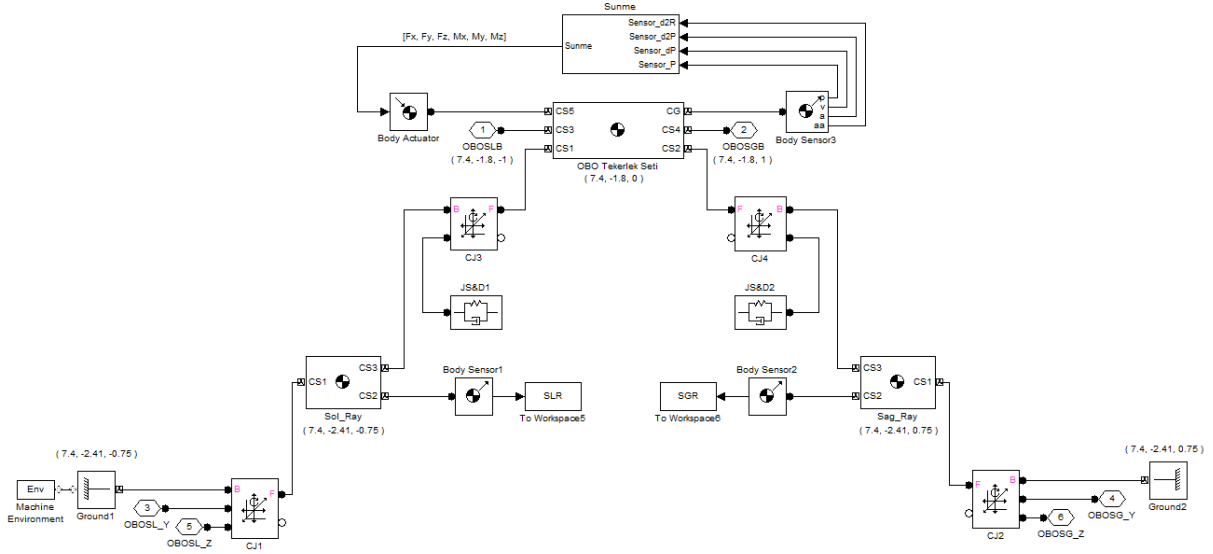
Lokomotif modelimiz, Şekil 2.1' de görüldüğü üzere, altı tekerlek seti, üç boji ve bir gövdeden oluşmaktadır. Hepsini bir çalışma ortamında tanımlayıp, aralarındaki bağıntıları yapmak, hem modelin anlaşılabilirliğini azaltacak hem de işlemleri zorlaştıracaktır. Bu nedenle birbirine benzeyen tekerlek setleri ve bojiler alt sistem olarak tanımlanmıştır.

Titreşim analizi yapılacak ana eleman kabindir. Çünkü konfor açısından titreşimlerinin belirli sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir. Bu nedenle incelemede kolaylık sağlaması için kabin gövdesinin ağırlık merkezi model uzayımızda [0 0 0] noktasında ve diğer tüm elemanlar da bu noktaya göre tanımlanmıştır.

3.2.1 Ray - Tekerlek Seti Temas Katı

Şekil 3.16' da Ön Boji Ön Tekelek Seti'nin (OBOT) SimMechanics modeli verilmiştir. Yapı itibariyle tüm tekerlek setleri aynı olmakla birlikte, model uzayındaki konumları farklılık göstermektedir. Şekilde OBOT' a ait gövde bloklarının model uzayındaki konumları, blok

adlarının altına parantez içinde yazılmıştır.



Şekil 3.16 Ön Boji Ön Tekerlek Seti SimMechanics Modeli

İlk olarak “OBO Tekerlek Seti” gövde bloğu eklenir. Kütlesi, kütleli atalet momenti, model uzayındaki konumu (CG koordinat sisteminin konumu) tanımlanır. Diğer bloklarla olan bağlantı noktaları (CS1, CS2 vb.) CG’ yi referans olarak tanımlanır.

OBO Tekerlek Seti $CS1=[7.4, -1.8, -1]$ ve $CS2=[7.4, -1.8, 1]$ noktalarından Custom Joint blokları ile raylara bağlıdır. x, y ve z eksenlerinde doğrusal, x ve y etrafında dönme olmak üzere 5 serbestlik derecesi tanımlanmıştır.

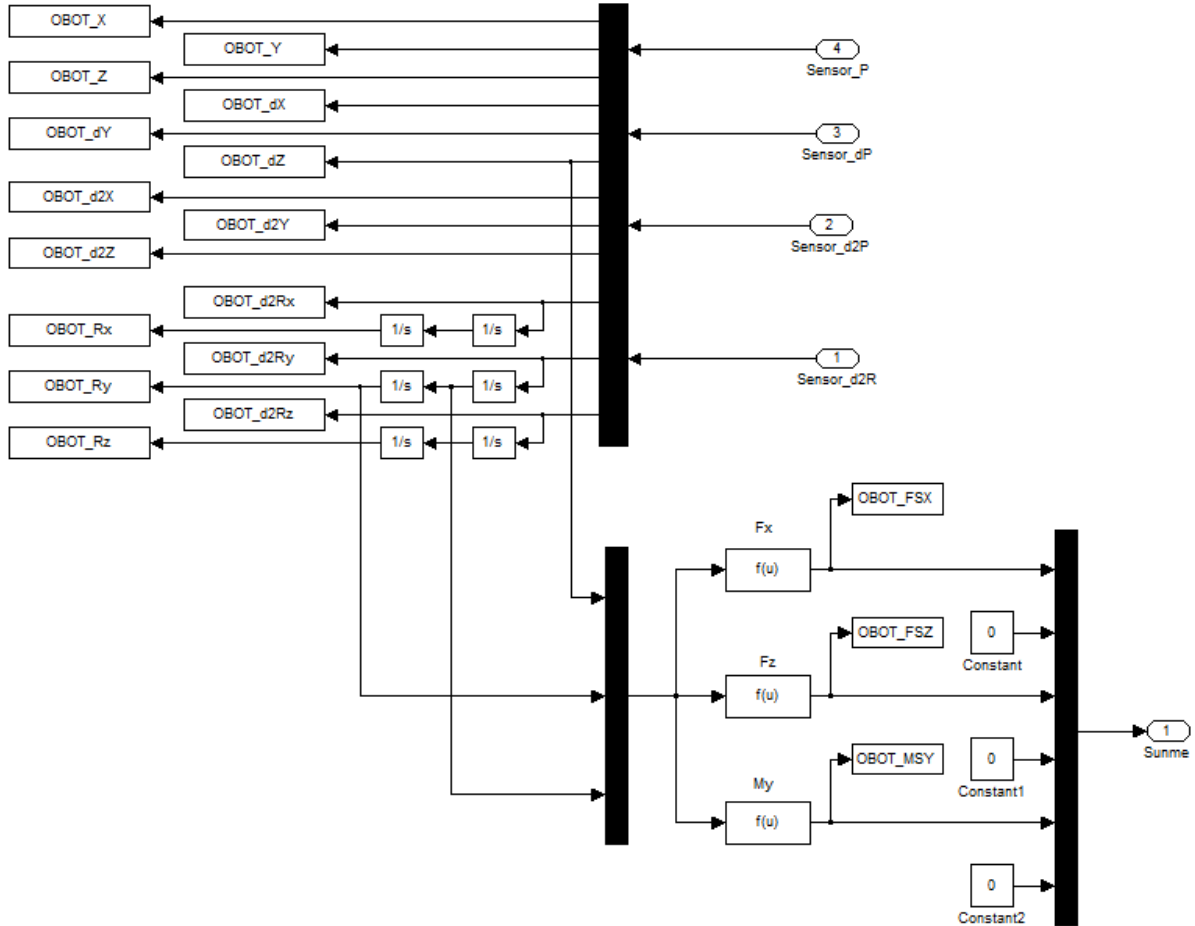
Joint Spring&Damper (JS&D1 ve JS&D2) blokları rayların düşey ve yanal doğrultudaki esnekliliklerini (k_{hy} ve k_{hz}) tanımlar. Burada Şekil 2.1’ de verilen fiziksel modelden farklı olarak x doğrultusuna da yay eklenmiştir (k_{hx}). Böylece x doğrultusunda sistemin sonsuza gitmesi önlenmiştir.

Sol_Ray ve Sag_Ray blokları, lokomotifin üzerinde ilerlediği rayın tekerlek seti ile temas eden parçasını tanımlar. Ray düzgünlükleri bu bloklar üzerinden sisteme etki ettirilir. Bu bloklar doğrudan zemine bağlıdır.

Tekerlek setlerinin alt sistemler olarak tanımlanacaklarını daha önce belirtmiştik. Alt sistemlere veri giriş ve çıkışları portlar ile yapılır. Bu amaçla Tekerlek setlerinin boji ile olan bağlantı noktaları için OBOSLB (1) ve OBOSGB (2) ve bozucu ray girişlerini için OBOSL_Y, OBOSL_Z, OBOSG_Y ve OBOSG_Z portları eklenmiştir.

Ray-tekerlek etkileşimleri dolayısıyla yavaşlatıcı kuvvet ve momentlerin oluştuğundan

Bölüm 2.2’ de bahsedilmiş ve sünme olarak adlandırılan bu etkiler (2.3), (2.4) ve (2.5) eşitlikleri ile verilmiştir. Modelimize bu etkiyi ifade etmek için Sunme alt sistemi eklenmiştir. Body_Sensor üzerinden aldığı konum bilgisini kullanarak sünme etkilerini hesaplar. Çıkışında elde edilen matematiksel sinyal Body Actuator üzerinden Tekerlek setine etki ettirilir.



Şekil 3.17 Sünme Alt Sistemi

Yukarıdaki şekilde görülen F_x , F_z ve M_y fonksiyonları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$F_x : (2*(f33*((-a*u[3])/V2_ms))) \quad (3.1)$$

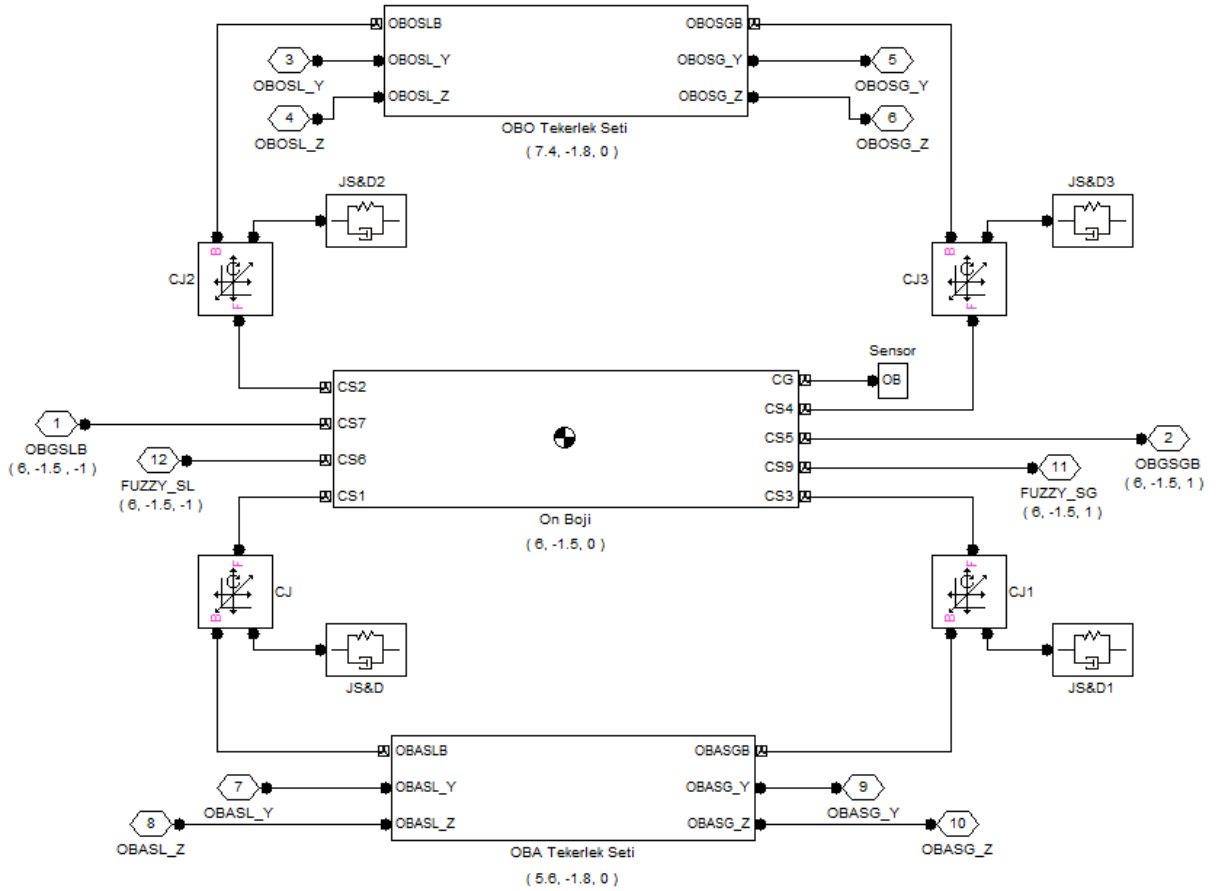
$$F_z : (2*(f11*((u[1]/V2_ms)-u[2])+f12*(u[3]/V2_ms))) \quad (3.2)$$

$$M_y : (2*(f12*(-u[1]/V2_ms+u[2])+f22*((u[3]/V2_ms)))) \quad (3.3)$$

3.2.2 Boji – Tekerlek Seti Bağlantı Katı

Bojiler yol düzgünlüklerinden kaynaklanan dinamik yol kuvvetlerini doğrudan gövdeye iletmeyip arada fazladan serbestlik derecesi sağlayarak dinamik damper görevi görürler. Daha

önce de belirtildiği gibi her bojide iki tekerlek seti bulunmaktadır.



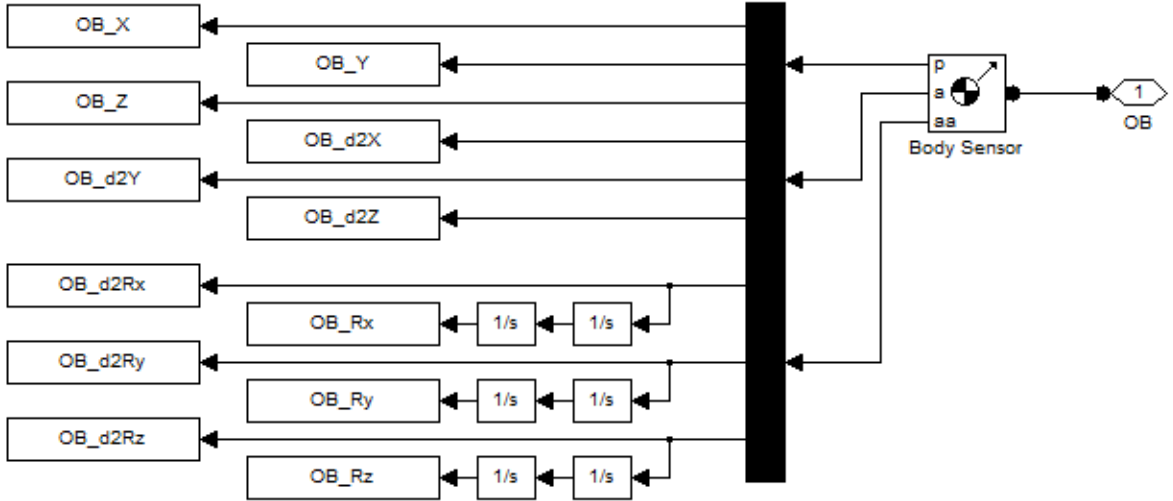
Şekil 3.18 Ön Boji SimMechanics Modeli

Şekil 3.18’ de Ön Boji SimMechanics modeli verilmiştir. Görüldüğü üzere tekerlek setleri custom jointler üzerinden boji gövdesine bağlıdır. Aralarında x,y, z eksenlerinde doğrusal ve x, y, z eksenleri etrafında dönme olmak üzere altı serbestlik derecesi tanımlanmıştır.

JS&D (Joint Spring&Damper) blokları, bağ noktalarındaki k_{1x} , k_{1y} , k_{1z} yay ve c_{1x} , c_{1y} ve c_{1z} sönüm elemanlarını tanımlar.

Boji gövdesinin kabin ve kontrolcü ile bağlantısı için sırasıyla OBOSLB, FUZZY_SL, OBOSGB ve FUZZY_SG bağlantı noktaları alt sisteme eklenmiştir. Bunlar haricinde görülen OBOSL_Y, OBOSL_Z, OBOSG_Y ve OBOSG_Z bağlantıları, doğrudan boji ile ilgili olmayıp, ray düzgünlüklerini tekerlek setlerine iletmek için kullanılmışlardır.

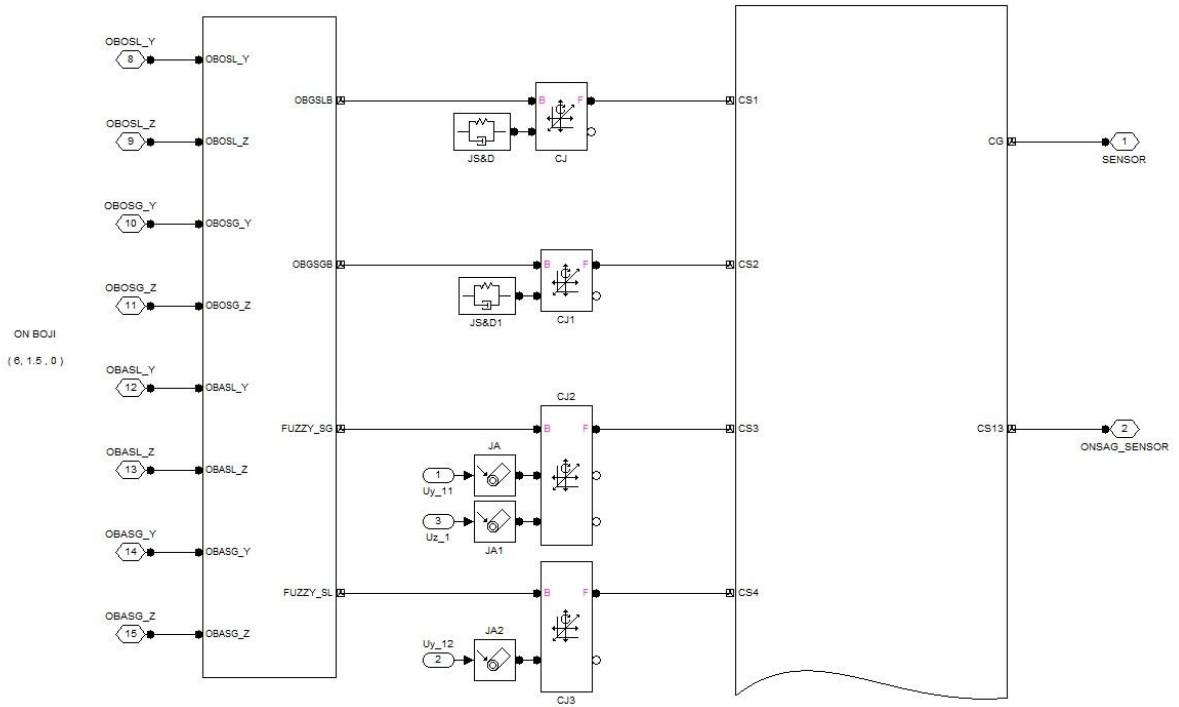
Sensor alt sistemi bojinin hareketlerini ölçmek ve MATLAB çalışma ortamına aktarmak için kullanılmaktadır. Şekil 3.19’ da verilmiştir.



Şekil 3.19 Sensor alt sistemi

3.2.3 Kabin-Boji Bağlantı Katı

Kabin titreşim analizinin yapılacağı ana eleman olup, üç boji ve dolayısıyla altı tekerlek setinden oluşur.



Şekil 3.20 Kabin - Ön Boji Bağlantısı

Şekil 3.20' de kabin gövdesi ile ön boji arasındaki bağlantı görülmektedir. CJ1 ve CJ2 custom jointleri, x, y, z eksenlerinde doğrusal ve x, y, z eksenleri etrafında dönme olmak üzere altı

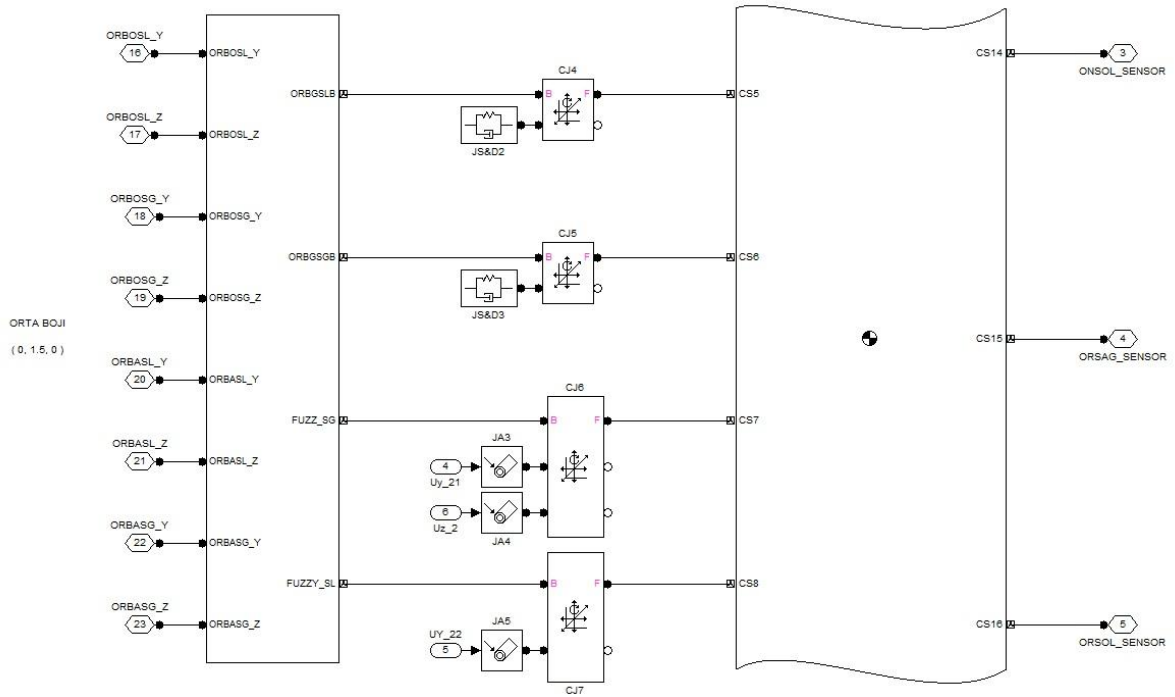
serbestlik derecesi tanımlamaktır.

Bir joint bloğuna en fazla bir tane kuvvet elemanı bağlanabildiğinden, kontrolcü kuvvetlerini kabine uygulamak üzere CJ3 ve CJ4 custom joint blokları eklenmiştir. Uy11, Uz1 ve Uy12 kontrolcü çıkışları, sırası ile JA, JA1 ve JA joint actuator blokları üzerinden kabine uygulanmaktadır.

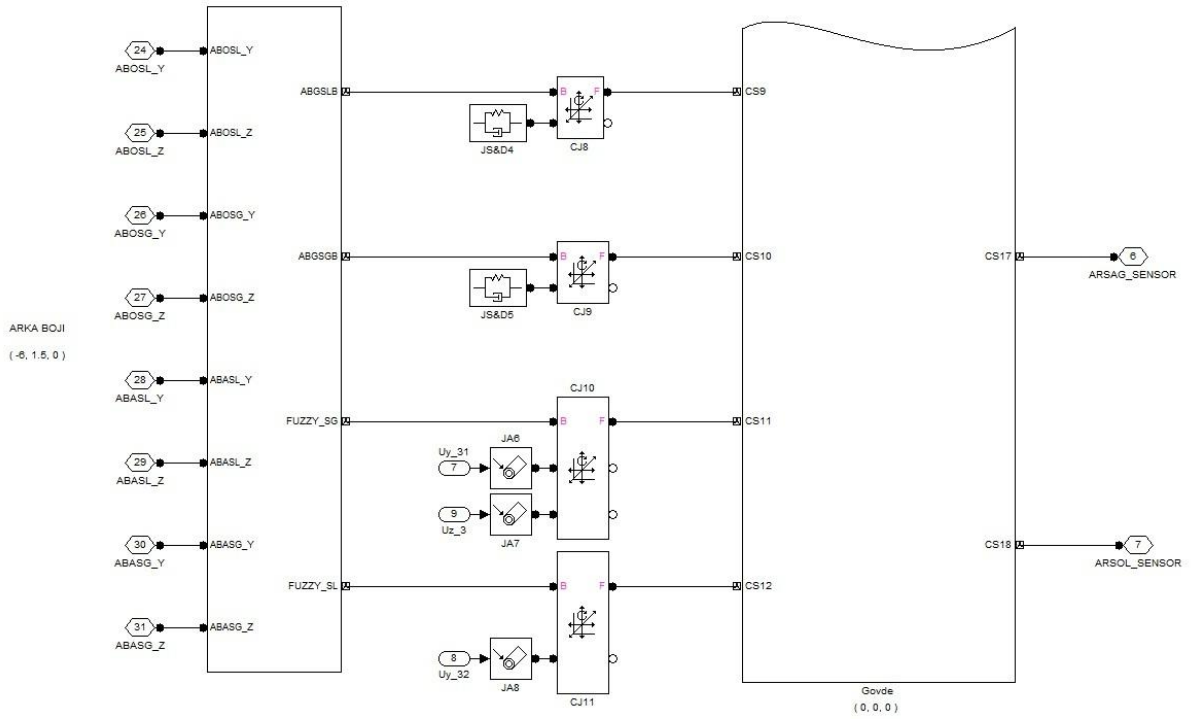
Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’ de sırasıyla orta boji ve arka boji bağlantıları verilmiştir. Kabin ile olan bağlantı ve ilişkileri ön boji ile aynı olmakla beraber, bağ noktalarında farklılıklar vardır.

Boji alt sistemlerinin sol tarafında görülen portlar kabin dinamiği ile doğrudan ilgili olmayıp, ray düzgünlüklerini tekerlek setlerine iletmek için kullanılmışlardır.

Kabin gövdesini sağ tarafında bulunan portlar, kabin hareketlerini ölçmek ve kontrolcü sistemine geri besleme yapmak için eklenmiştir.



Şekil 3.21 Kabin - Orta Boji Bağlantısı



Şekil 3.22 Kabin - Arka Boji Bağlantısı

3.2.4 Giriş Katı

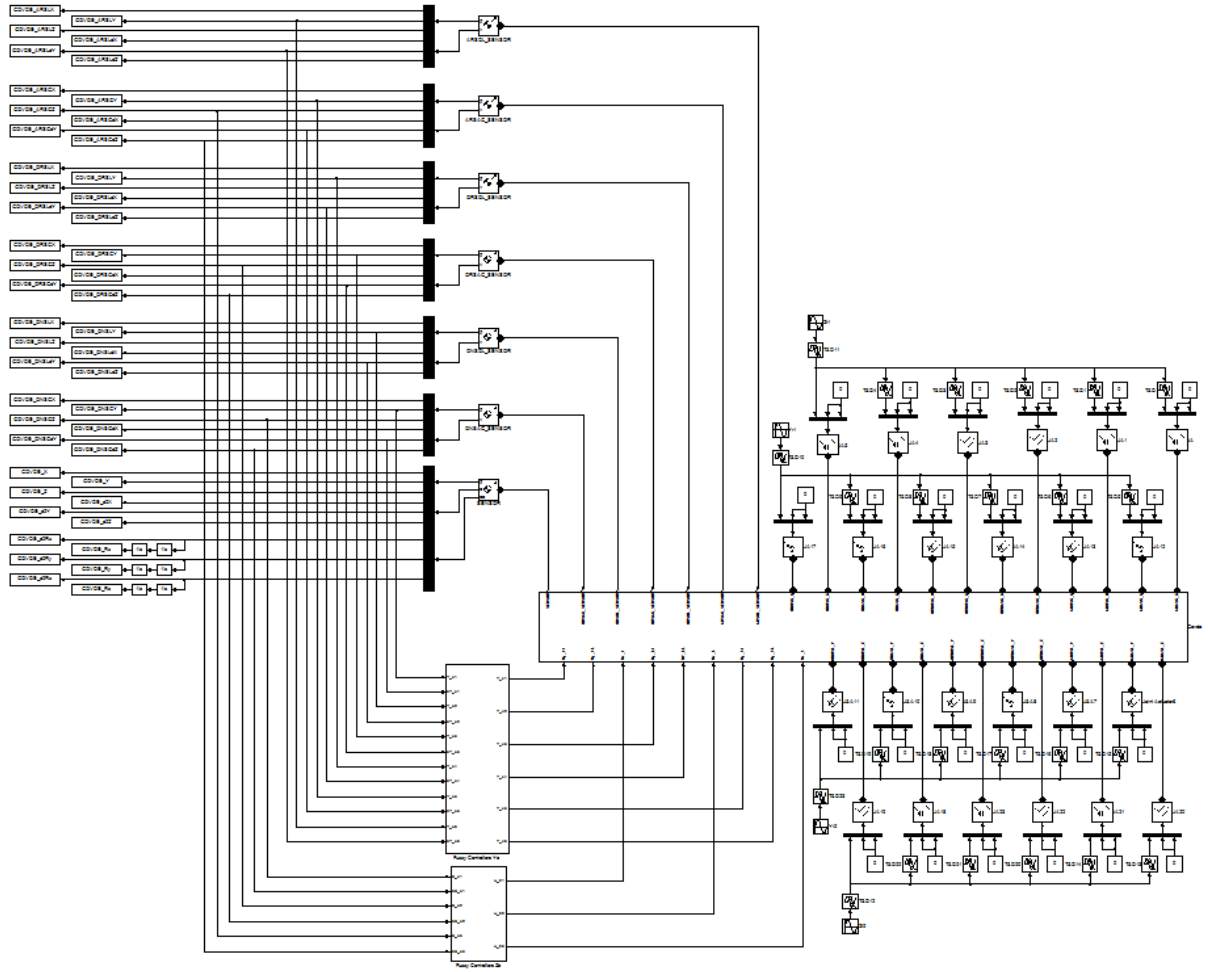
Lokomotifimizin düz bir hat boyunca sabit 120km/h lik bir hızla ilerlediği ve sadece ray düzgünlüklerinin sisteme etkideği Bölüm 2.2’ de anlatılmıştı. Bahsi geçen bozucu kuvvetler Şekil 3.23 de gösterildiği gibi modellenmektedir. Görülebileceği üzere sağ ve sol ray bozucu girişleri birer tarafta gruplanmıştır. Y_{r1} , Y_{r2} düşey doğrultuda ve Z_{r1} , Z_{r2} blokları yanal doğrultuda ray düzgünlük sinyallerini üreten Source bloklarıdır. Bu Sinyaller, tekerlek setleri arasındaki mesafe ve lokomotifin seyir hızı ile orantılı bir gecikme ile tekerlek setlerine uygulanmaktadır. Gecikme (3.4) eşitliği ile ifade edilmekte olup, bunun için T&D1...10 blokları kullanılmıştır.

$$td = \left[\frac{Xt_n - Xt_1}{V} \right] \quad (3.4)$$

td : Gecikme, [s].

$Xt_n - Xt_1$: Tekerlek setleri arasındaki mesafe, [m].

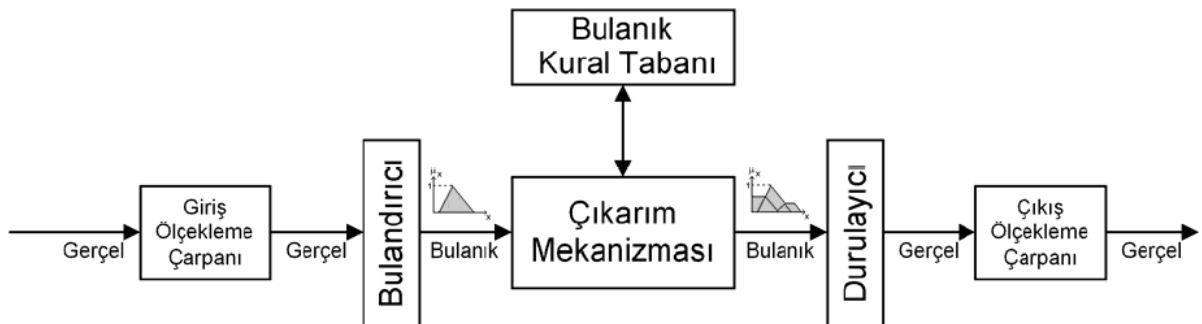
V : Lokomotifin seyir hızı, [m/s].



Şekil 3.24 Kontrolcü ve Bozucu Girişler

3.2.5.1 Bulanık Sistemler

Bir Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK), Şekil 3.25' de görüldüğü gibi Giriş Ölçekleme Çarpanı, Bulanıdırıcı, Kural Tablosu, Çıkarım Mekanizması, Durulayıcı ve Çıkış Ölçekleme Çarpanından oluşmaktadır.



Şekil 3.25 Bir bulanık sistemin içyapısı (Eksin, 2006)

Gerçel giriş, referans etrafındaki hata ve hatanın hızı olup sensörlerden okunan ham bilgiden hesaplanmaktadır. Bu değer, Giriş Ölçekleme Çarpanı ile giriş üyelik fonksiyonunun sınırları içinde kalacak şekilde ölçeklenerek kullanılır. Benzer şekilde Çıkış Ölçekleme Çarpanı da kontrolcü çıkışını aktrütör girişlerine uygulanacak gerçel sınırlara ölçekler. Örneğin; 0-1 aralığındaki bir Bulanık Mantık Kontrolcü çıkışı, 0-24 Volt aktüatör giriş değerine ölçeklenir.

En basit bulanık sistemin ana yapıları bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasıdır. Kural tabanında, bulanık EĞER – İSE kuralları bulunur. Kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim daha içerir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelerle dönüştürürken, durulayıcı, tersine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür. (Eksin, 2006)

Bulanık mantık ilkelerinin klasik kümelerden temel farkı, bir elemanın herhangi bir kümeye ait olması konusunda verilecek yanıtın klasik kümelerdeki gibi “evet” yada “hayır” gibi kesin olmayıp, bu elemanın ilgili kümeye ait olma olasılığının 0 ile 1 arasında değerler alabilen sürekli bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesidir. Herhangi bir elemanın üyelik fonksiyonundan aldığı değer üyelik derecesi olarak adlandırılır. Bulanıklaştırma işlemi, önemli ölçüde kesin olmayan bilgiyi de içine alır ve bulanıklaştırır. Bulanıklaştırma işlemi sonucu elde edilen değişkenlere dilsel değişken denir ve işlemle birlikte tüm giriş değişkenlerinin değerleri, üyelik derecesi olarak buraya atanır.

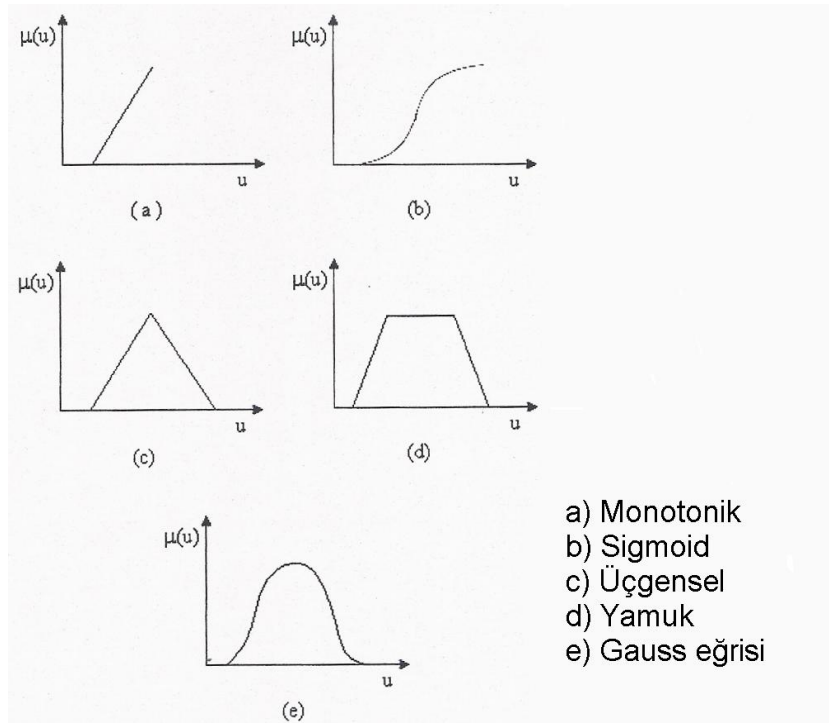
Bulanık modeller oluşturulurken değişik formlarda üyelik fonksiyonları seçilebilir. Üyelik fonksiyonunun tespiti, çok önemli bir basamaktır ve sistemin hassasiyetini belirler. Bu fonksiyonları oluşturmada özel bir kural yoktur. Fakat öncelikle, dilsel olarak ifade edilecek olan bölgelerin sayıları tespit edilmelidir. Örneğin, bir koşul önermesindeki dilsel niteleyiciler {Küçük, Orta, Büyük} bazı alanlarda yeterli olmayabilir. O zaman {Çok Küçük, Küçük, Orta, Büyük, Çok Büyük} daha fazla koşul ünitesi kullanılması gerekebilir. Daha sonraki hassasiyet ise, üyelik fonksiyonlarının şekilleriyle arttırılır. Yaygın üyelik fonksiyonları olarak monotonik, sigmoid, üçgen, yamuk, gauss eğrisi vb. fonksiyonlar sayılabilir. Şekil 3.26’de yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları görülmektedir.

Üyelik fonksiyonları sistem parametrelerini tanımlar. Bu fonksiyonların sayısına ve şekline ait hiçbir kısıtlama yoktur. Tamamıyla tasarımcının istek ve tecrübesine bağlıdır. Bu zamana kadar yapılmış çalışmalarda en çok üçgen, yamuk, çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanıldığı görülmektedir. Yine de bu fonksiyonlar, kontrolü yapılan sisteme göre çok

değişiklik gösterebilir. (Şen, 2001)

Üyelik fonksiyonları oluşturulurken normalize edilmiş tanım kümesi kullanıldığında bir ölçekleme çarpanına ihtiyaç duyulur. Özellikle bulanık kontrolcü tasarımında giriş ve çıkış ölçekleme çarpanlarının önemi büyüktür.

Bulanık çıkarım sistemi, bulanık **EĞER-İSE** kuralları adı verilen bulanık kurallara dayanan sistemlerdir. Çıkarım mekanizması karar verme işlemlerinde, bulanık kural tabanına gidip, üyelik fonksiyonlarıyla ilgili bilgileri ve değişik giriş değerleri için tespit edilmiş olan kontrol çıkışları bilgisini alır. Bu bakımdan bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizması sürekli ilişki içindedir.



Şekil 3.26 Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları (Metin, 2007)

Bulanık modelin temeli, bulanık **EĞER-İSE** kurallarından anlaşılacağı üzere, öncül ve soncul kısımlardan oluşmaktadır. Öncül kısımda sonuca sebep olan giriş değişkenleri ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler, soncul kısımda ise bu giriş değişkenlerine bağlı olarak ortaya çıkan sonuç değişkenleri yer alır.

Elde edilen bulanık model, bulanık kuralların türüne göre adlandırılır. Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanı dört farklı yapıda olabilmektedir. Kural

tabanı tipleri aşağıdaki gibidir:

- Mamdani tipi bulanık kural (Tez çalışmasında kullanılmıştır)
- Tekli tip bulanık kural
- Takagi – Sugeno tipi bulanık kural
- Tsukamoto tipi bulanık kural

Genel olarak Mamdani tipi bulanık kurallar aşağıdaki gibi yazılır;

EĞER $\tilde{x} \in A_i$ **İSE** $\tilde{y} \in B_i$ 'dir, ($i=1, 2, \dots, r$)

Burada \tilde{x} , öncül kısımdaki giriş değişkenlerince tanımlanan koşulu ve \tilde{y} ise soncul kısımdaki çıkış değişkenlerince tanımlanan sonuçlardır.

EĞER–İSE kuralları $A_i \rightarrow B_i$ (A_i gerektirir B_i) şeklinde olduğunda bulanık gerektirme kullanılır. Birleşme $(A_i \wedge B_i)$ kullanıldığı zaman, **EĞER–İSE** kuralları;

“A ve B’nin aynı anda sağlandığı(olduğu) doğrudur”

şeklinde yorumlanabilir. Bağıntı simetriktir ve ters çevrilebilir. Kesişim için minimum (\wedge) operatörü seçilirse $F_i = A_i \times B_i$ bağıntısına ait üyelik fonksiyonu;

$$\mu_{F_i}(x, y) = \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)) \quad (3.5)$$

ile elde edilir. Minimum işlemi, X ve Y ’nin kartezyen çarpımı uzayında, olası her x ve y çifti için hesaplanmıştır. Tüm modeli ifade eden bulanık F bağıntısı, Mamdani kural tablosunda yer alan r adet bulanık kuralın (bulanık bağıntı) birleşimi ile verilir.

$$F = \bigcup_{i=1}^r K_i \quad (3.6)$$

Birleşim için maksimum operatörü seçildiğinde F bağıntısına ilişkin bulanık üyelik fonksiyonu;

$$\mu_F(x, y) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y)) = \max_{1 \leq i \leq r} (\min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y))) \quad (3.7)$$

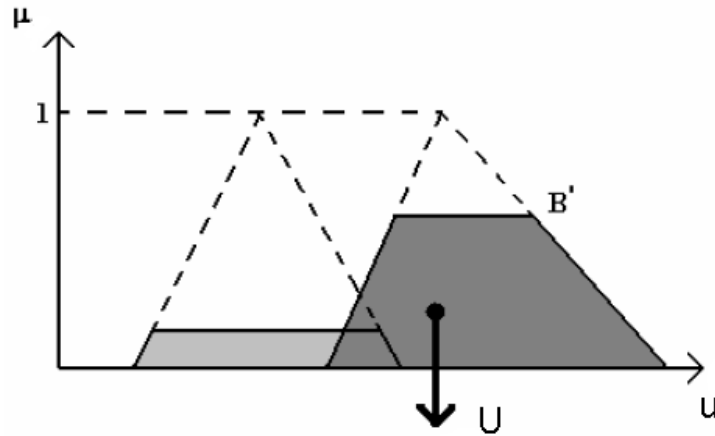
ile hesaplanır. Dilsel modelin çıkışı bağıntısal max-min (\circ) operasyonu;

$$\tilde{y} = \tilde{x} \circ F \quad (3.8)$$

ile elde edilir.

Durulayıcı, çıkarım ünitesinden gönderilen kontrol işaretinin fiziksel ve kesin sayılara getirilmesini sağlamaktadır. Durulayıcı bu işlemi çeşitli yöntemlere göre yapabilir. Bunlardan bazıları: (Metin, 2007)

- Ağırlıklı ortalama yöntemi,
- Ağırlık merkezi(Centroid) yöntemi, (Tez çalışmasında kullanılmıştır.)
- En geniş alan merkezi yöntemi,
- İlk ve son yükseliş yöntemi,
- Maksimum noktaların ortalaması yöntemi,
- Maksimum nokta yöntemi,



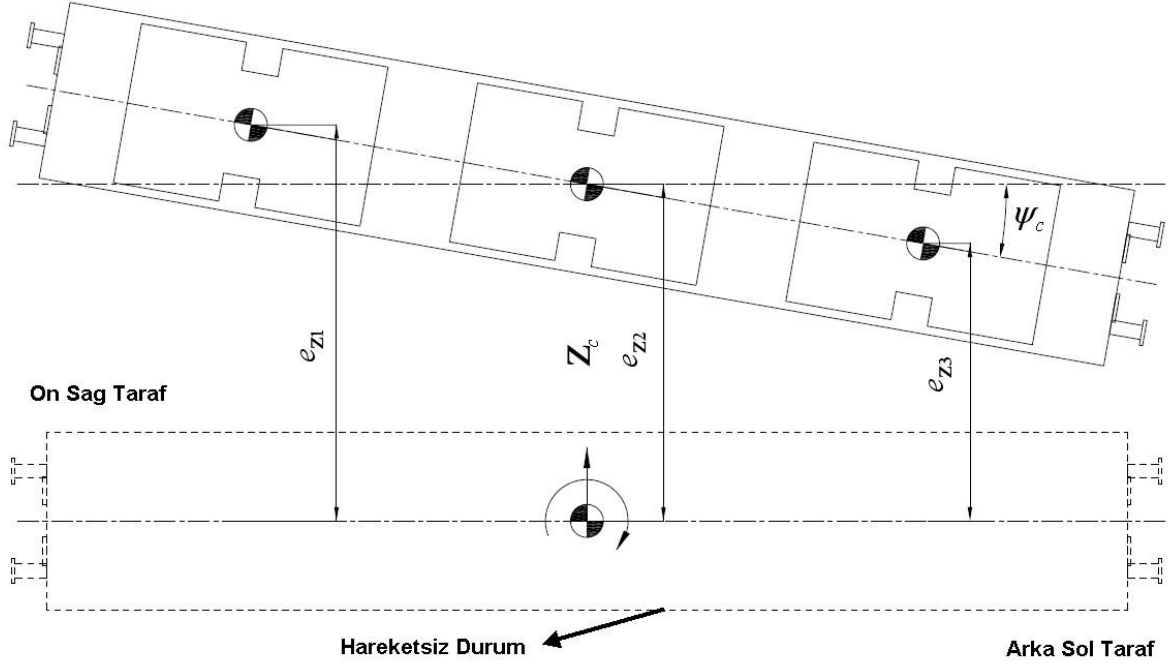
Şekil 3.27 Ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma (Eksin, 2006)

Tez çalışmasında durulaştırma yöntemi olarak Ağırlık Merkezi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem en çok kullanılan ve ağırlık merkezi hesabına dayanan bir yöntemdir. (Şekil 3.27)

$$U = \frac{\int \mu_{B'} \cdot u \, dU}{\int \mu_{B'} \, dU} \quad (3.9)$$

3.2.5.2 Yanal Kontrolcü Tasarımı

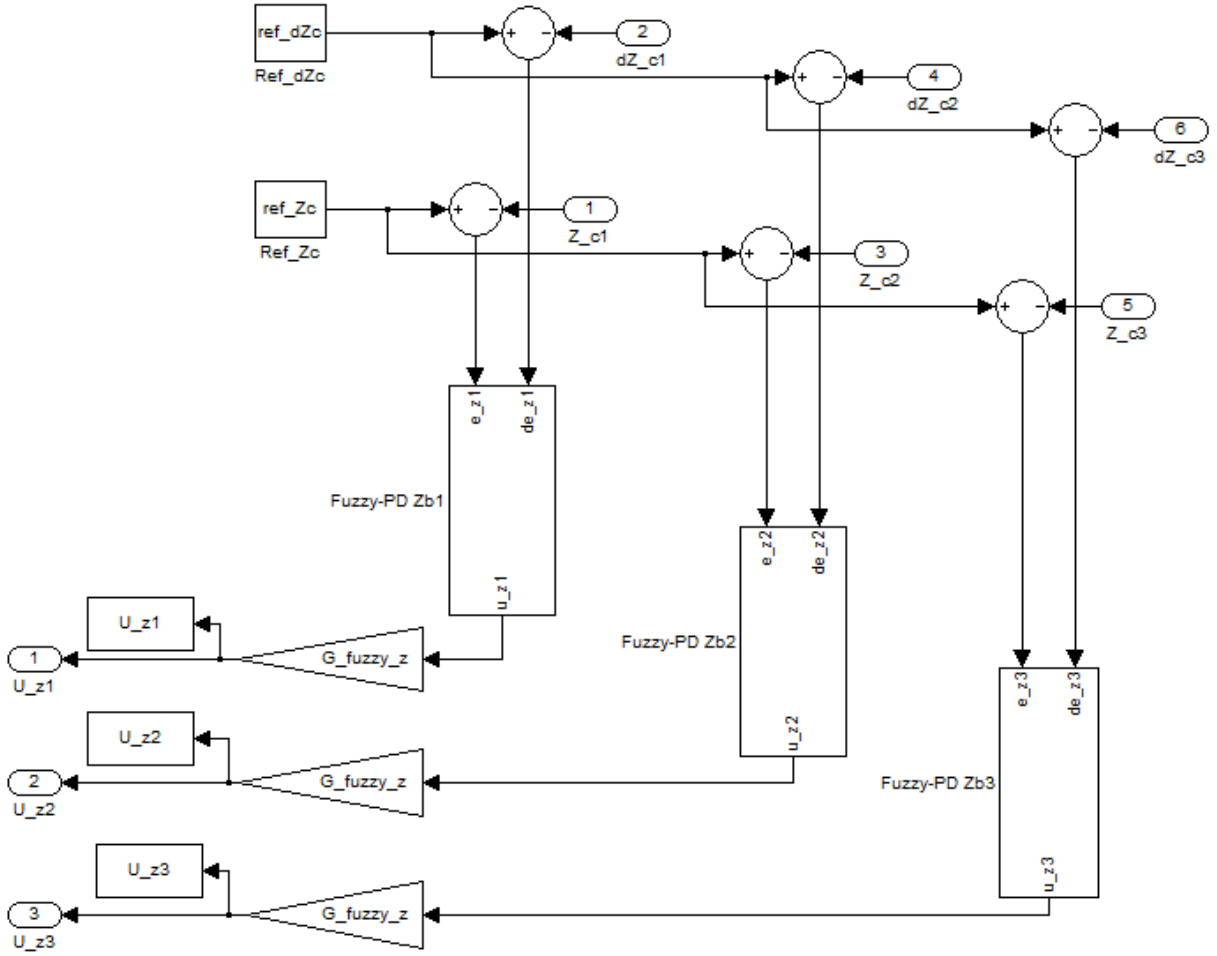
Lokomotifin yanal doğrultuda yaptığı titreşimler kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bunun için bojiler ile kabin arasındaki bağlantı noktalarına doğrusal aktüatörler ve sensörler konulmuştur. Düşey eksen etrafında dönmenin (yanal sapma açısı) söz konusu olduğu durumda, bu noktadaki hata değerleri birbirinden farklı olacaktır. Dolayısıyla birbirinden bağımsız üç farklı kontrolcü gerekmektedir. Bu durum Şekil 3.28’ de gösterilmiştir.



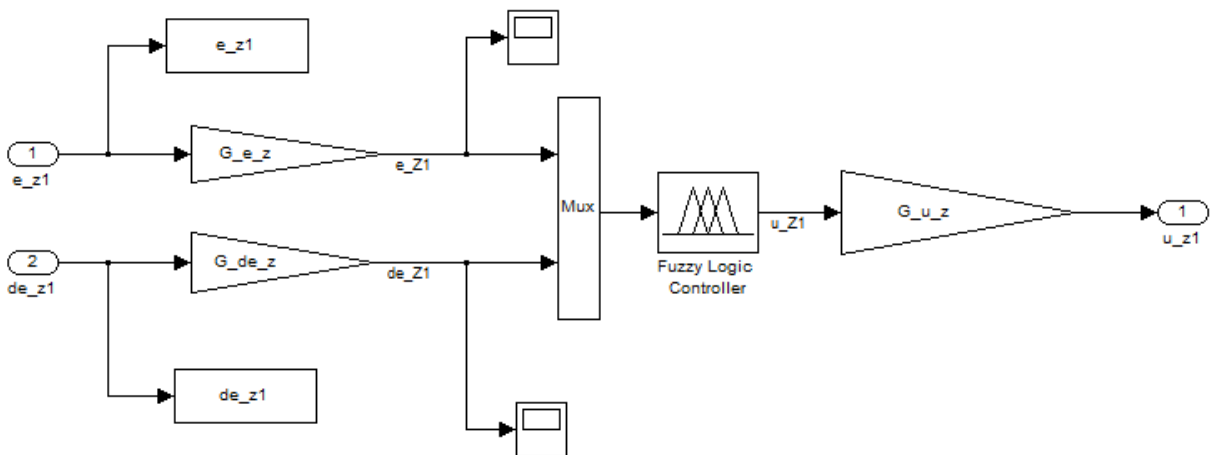
Şekil 3.28 Yanal denge konumu etrafındaki hata durumları (Atalay, 2009)

Yanal denge konumu etrafında oluşan; I. Boji-Kabin bağlantı noktasında e_{z1} , II. Boji-Kabin bağlantı noktasında e_{z2} , III. Boji-Kabin bağlantı noktasında e_{z3} hatalarına karşılık sırasıyla u_{z1} , u_{z2} ve u_{z3} kontrolcü kuvvetleri uygulanmaktadır.

Şekil 3.29’ de yanal kontrolcü alt sistemi (Fuzzy Controllers Z_c) verilmiştir. Burada referans değerlerden geri besleme sinyalleri çıkarılarak hatalar hesaplanmakta ve kontrolcü çıkışları bir ölçekleme çarpanıyla büyütülerek sisteme girilmektedir.



Şekil 3.29 Yanal kontrolcü alt sistemi



Şekil 3.30 Yanal kontrolcü: I. Boji-Kabin arasında (Fuzzy-PD Zb1)

Şekil 3.30' de I. Boji-Kabin arasındaki bulanık mantık kontrolcünün Simulink modeli

verilmiştir. Burada hatanın yönü, büyüklüğü, değişim hızı ve değişim yönü üzerinden bir çıkarım yapılarak kontrolcü çıkışları kestirilmeye çalışılmıştır. Bunun için e_{z1} , e_{z2} , e_{z3} hataları ile birlikte \dot{e}_{z1} , \dot{e}_{z2} , \dot{e}_{z3} zamanla değişimleri Fuzzy Logic Controller bloğuna giriş olarak uygulanmıştır.

G_{e_z} ve G_{de_z} çarpanları gerçek hata değerlerini giriş üyeli fonksiyonu mertebesinde ölçeklemek için konulmuştur. Benzer şekilde G_{u_z} çarpanı da kontrolcü çıkışlarını yanal aktüatörün giriş aralığında ölçeklemek için kullanılmaktadır.

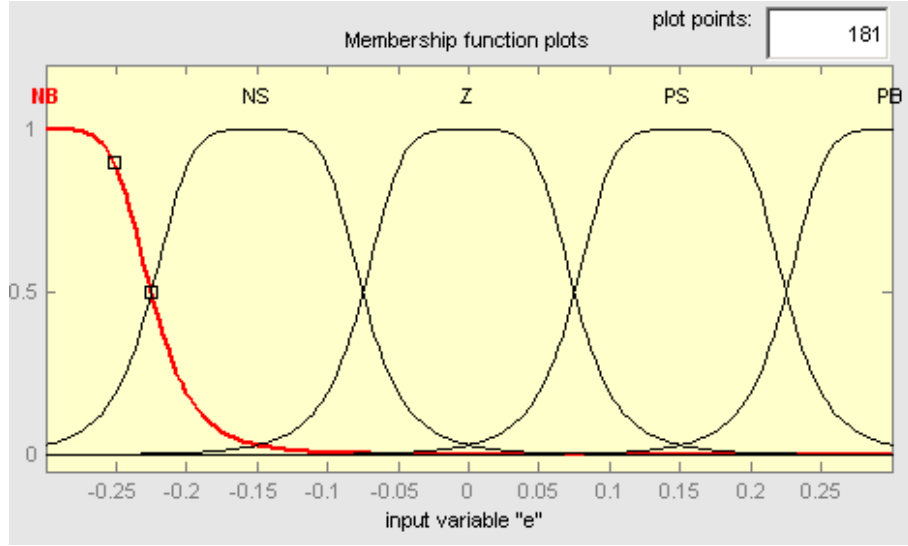
Çizelge 3.1 BMK kural tablosu (Güçlü, 2005)

Hata (e)	Hatanın Türevi (de/dt)		
	N	Z	P
NB	NB	NM	NS
NS	NM	NS	Z
Z	NS	Z	PS
PS	Z	PS	PM
PB	PS	PM	PB

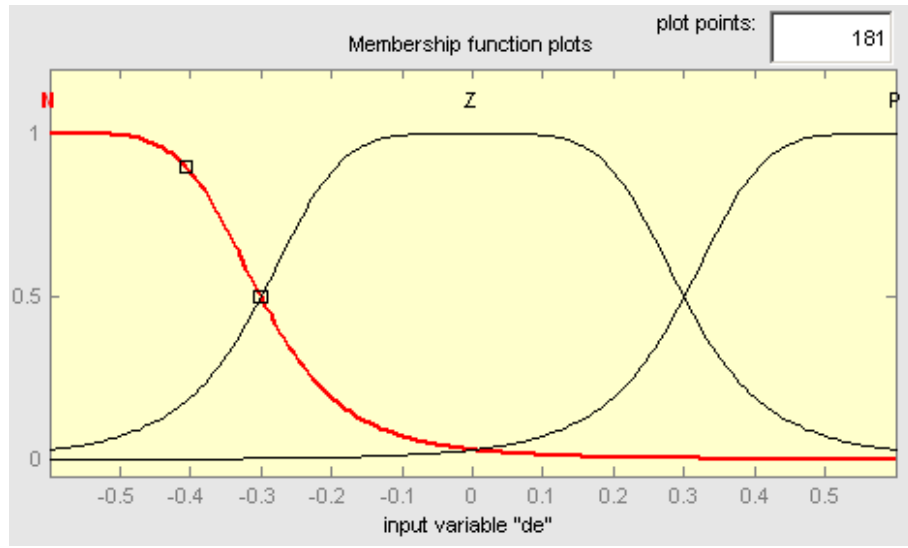
Kural tablosunda hata için B,M,S,P,Z,N; Büyük (Big), Orta (Medium), Küçük (Small), Pozitif (Positive), Sıfır (Zero), Negatif (Negative) anlamına gelmektedir ve dilsel niteleyicilerdir.

Hata için giriş üyelik fonksiyonunu aralığı [-0.3 0.3], hatanın türevi için üyelik fonksiyonu aralığı [-0.6 0.6] ve de kontrol kuvveti çıkışı için üyelik fonksiyonu aralığı [-1000 1000] olarak seçilmiştir.

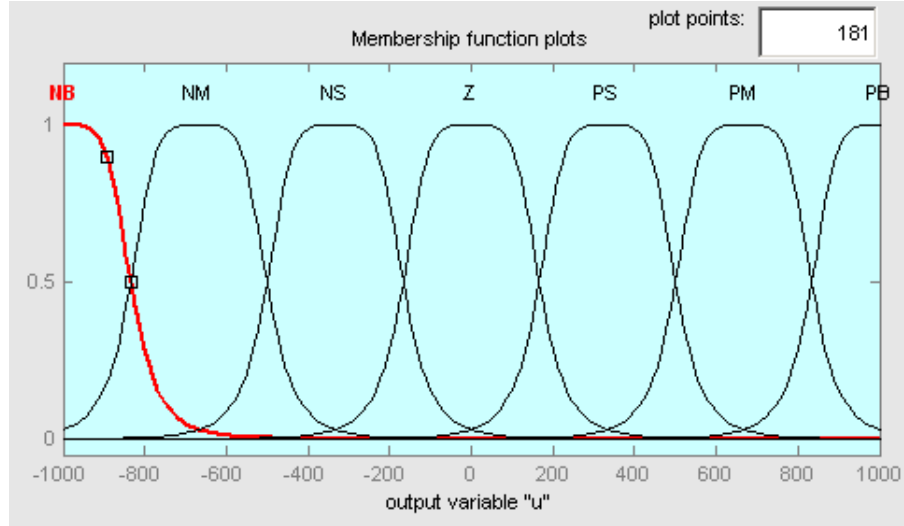
Üyelik fonksiyonu tipi olarak çan eğrisi seçilmesi ile daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca hareketli kütlelerin ve kütsel atalet momentlerinin büyük olduğunu göz önüne aldığımızda çan eğrisi tipli üyelik fonksiyonunun üçgensel tipli üyelik fonksiyonundan çok daha yumuşak kontrol kuvvetleri üretebildiği deneyerek görülmüştür.



Şekil 3.31 Yanal yer değiştirme girişleri için üyelik fonksiyonları



Şekil 3.32 Yanal hız girişleri için üyelik fonksiyonları

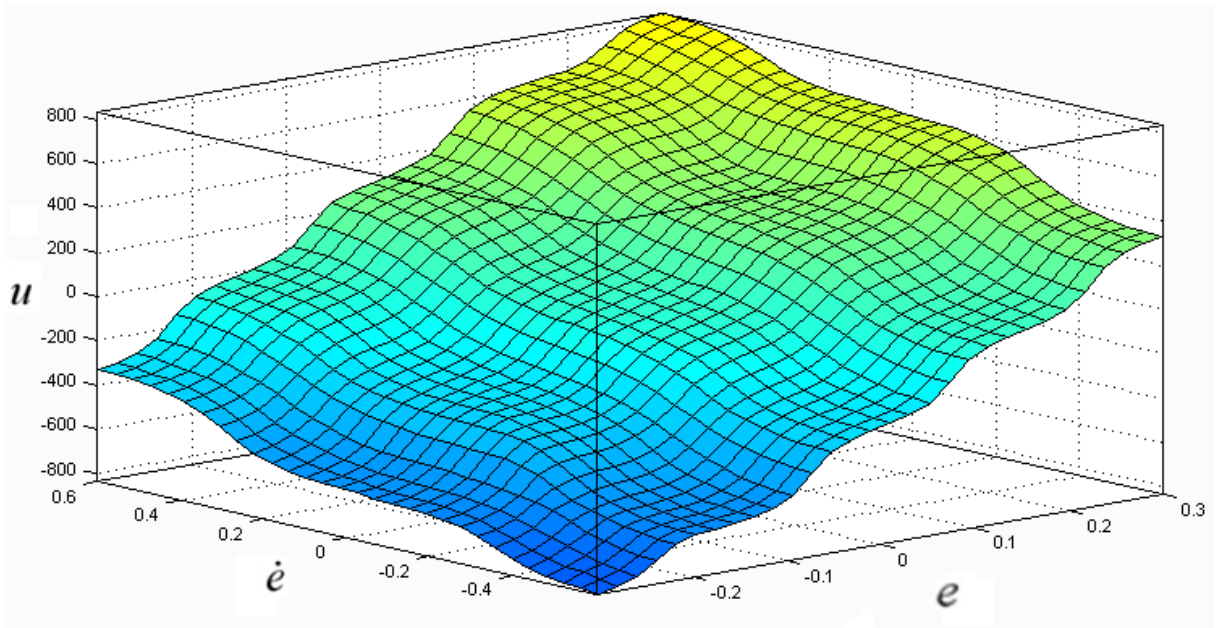


Şekil 3.33 Yanal kontrolcü çıkışlarının üyelik fonksiyonları

Çizelge 3.1’de verilen kural tablosundan ilk ve son kural aşağıdaki gibidir;

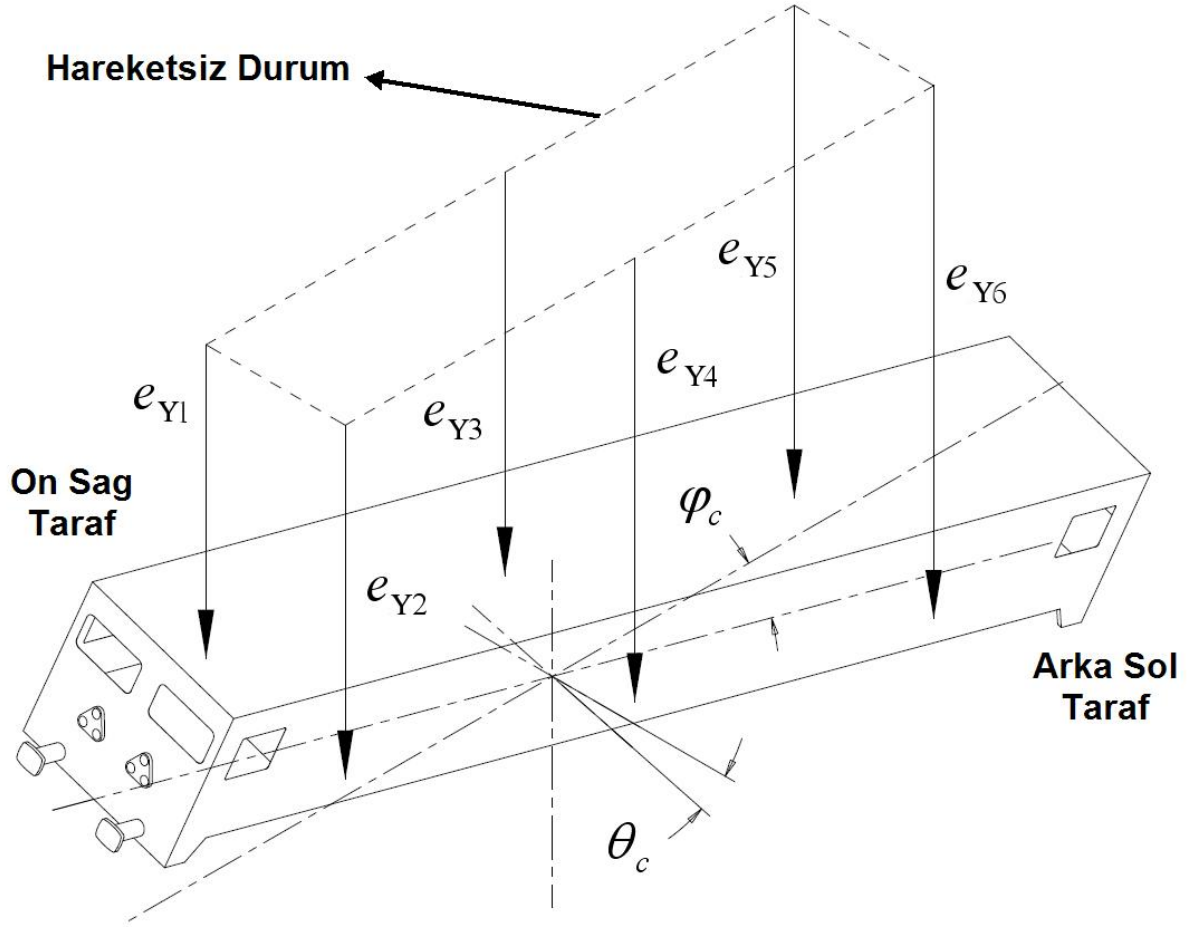
EĞER $e = N$ ve $de/dt = N$ **İSE** $u = NB$

EĞER $e = PB$ ve $de/dt = P$ **İSE** $u = PB$



Şekil 3.34 Yanal yer değiştirme, hız girişleri ve kontrolcü çıkışının üyelik fonksiyonlarının yüzey gösterimi

3.2.5.3 Düşey Kontrolcü Tasarımı

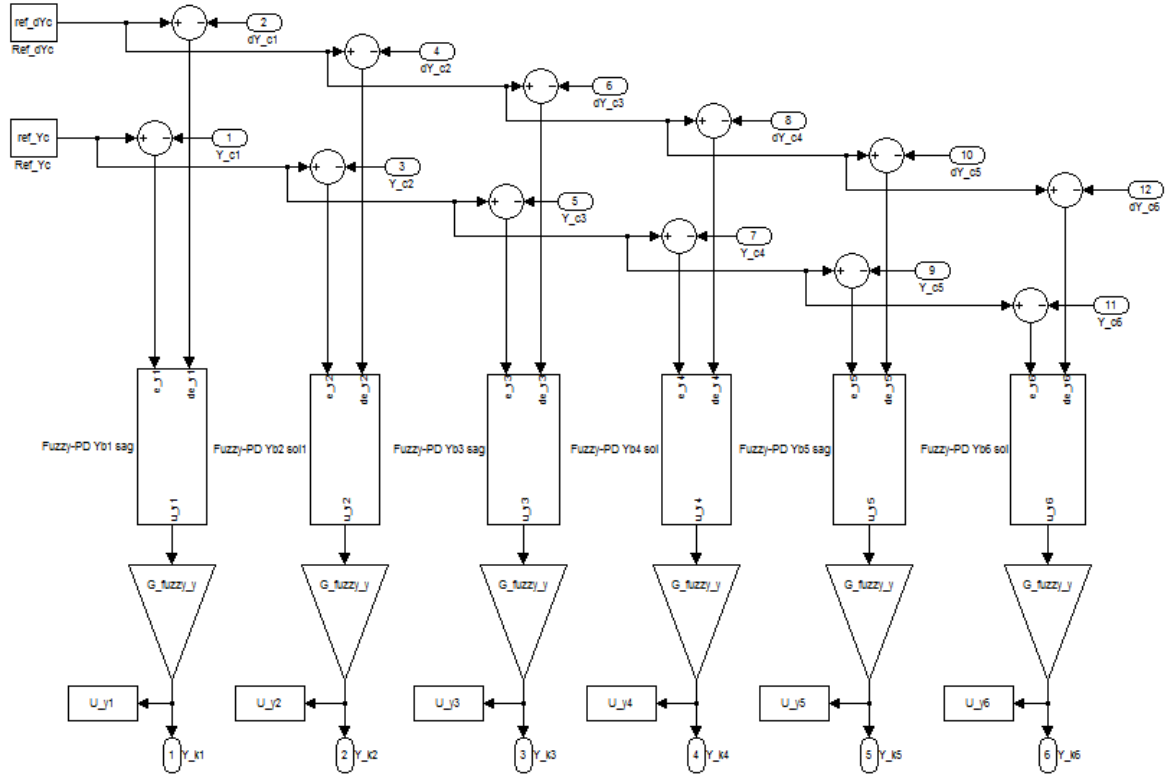


Şekil 3.35 Düşey kontrolcülerdeki hata durumları (Atalay, 2009)

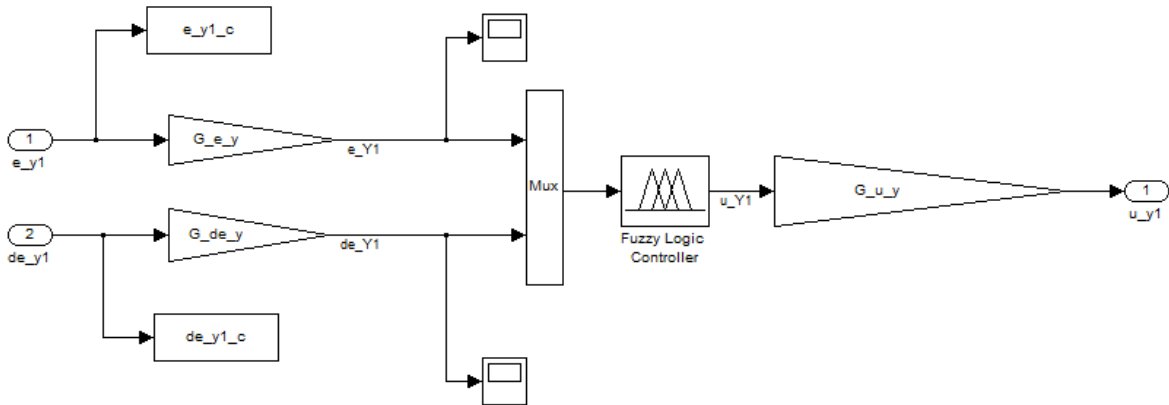
Lokomotifin düşey doğrultuda yaptığı titreşimler kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bunun için bojiler ile kabin arasındaki bağlantı noktalarına doğrusal aktüatörler ve sensörler konulmuştur. Lokomotifin yanal doğrultu (z) ve boylamsal doğrultu (x) etrafında yapacağı dönme hareketleri sonucu bu noktalardaki hata değerleri birbirinden farklı olacaktır. Dolayısıyla birbirinden bağımsız altı farklı kontrolcü gerekmektedir. Bu durum Şekil 3.35’ de gösterilmiştir.

Düşey denge konumu etrafında oluşan; e_{y1} , e_{y2} , e_{y3} , e_{y4} , e_{y5} ve e_{y6} hatalarına karşılık sırasıyla u_{z1} , u_{z2} , u_{z3} , u_{z4} , u_{z5} ve u_{z6} kontrolcü kuvvetleri uygulanmaktadır.

Şekil 3.3’ de düşey kontrolcü alt sistemi (Fuzzy Controllers Yc) verilmiştir. Burada referans değerlerden geri besleme sinyalleri çıkarılarak hatalar hesaplanmakta ve kontrolcü çıkışları bir ölçekleme çarpanıyla büyütülerek sisteme girilmektedir.



Şekil 3.36 BMK algoritmasının simulink modeli



Şekil 3.37 Bulanık mantık kontrolcüsünün simulink modeli (Fuzzy-PD Yb1 sag)

Düşey kontrol algoritması da yanal kontrol algoritmasının aynısıdır. Aynı tip üyelik fonksiyonları ve aynı kural tablosu kullanılmıştır. Düşey kontrolcülerin yanal kontrolcülerden farkı, hata ve hatanın türevi girişlerinin üyelik fonksiyon aralıklarının farklı olmasıdır. Düşey kontrolcülerdeki hatalar için giriş üyelik fonksiyonunu aralığı $[-0.15 \ 0.15]$, hatanın türevi için

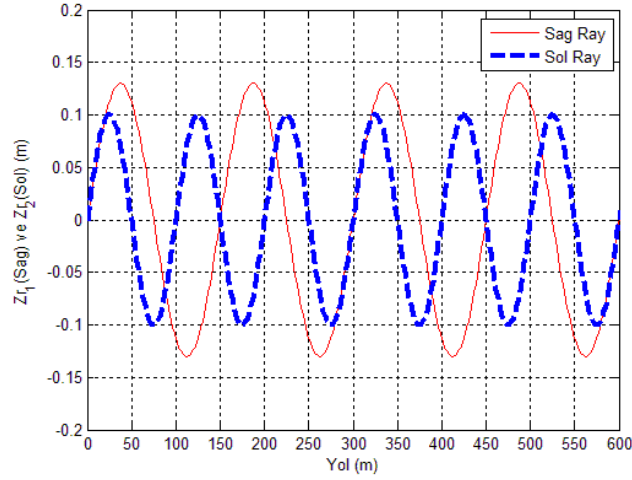
üyelik fonksiyonu aralığı $[-0.3 \ 0.3]$ olarak seçilmiştir. Düşey kontrolcülerin kontrol kuvveti çıkışları için üyelik fonksiyonu aralığı, yanal kontrolcülerdeki gibi $[-1000 \ 1000]$ olarak alınmıştır.

4. SİMÜLASYON UYGULAMALARI

Bu bölümde, oluşturulan lokomotif dinamik modeline çeşitli ray düzgünsüzlük fonksiyonları uygulanarak sistemin zaman düzlemindeki cevapları ve tetiklenen serbestlik dereceleri gözlemlenmiştir. Dinamik analiz, Matlab - Simulink yazılımı ortamında SimMechanics araçları ile gerçekleştirilmiştir.

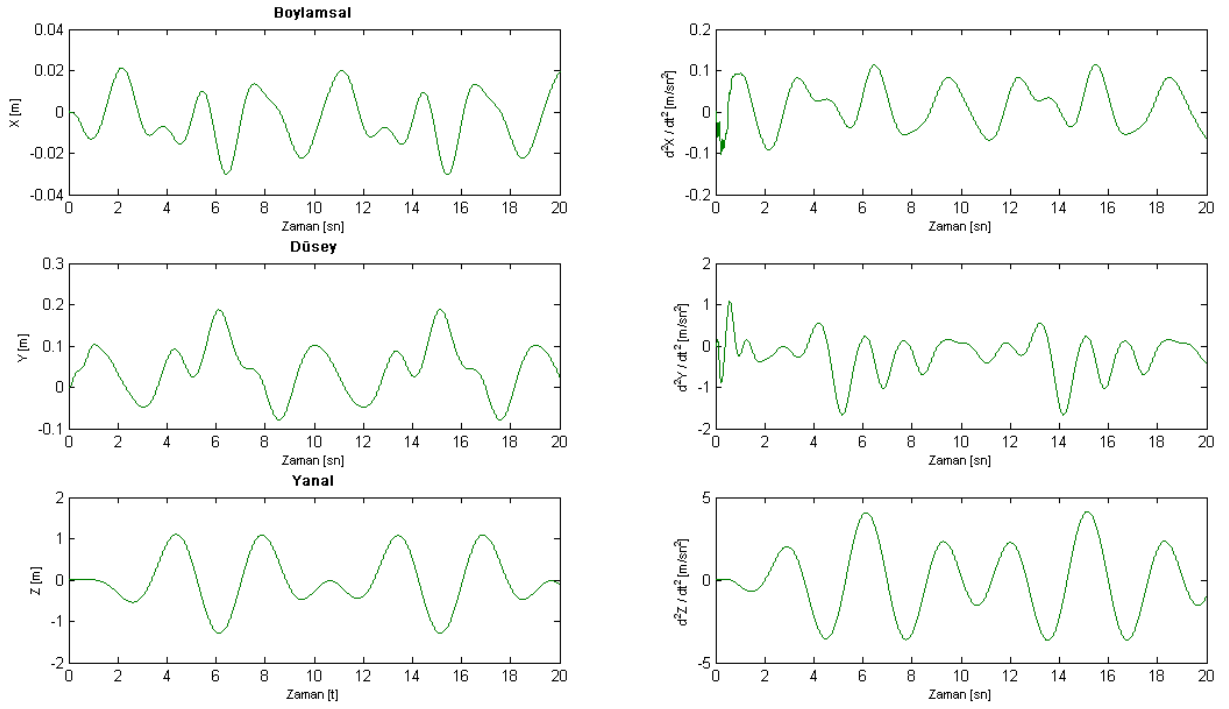
4.1 I.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)

Birinci senaryoda farklı genliğe ve dalga boyuna sahip sinüs fonksiyonları ray düzgünsüzlüğü olarak sisteme uygulanmıştır. (Şekil 4.1)

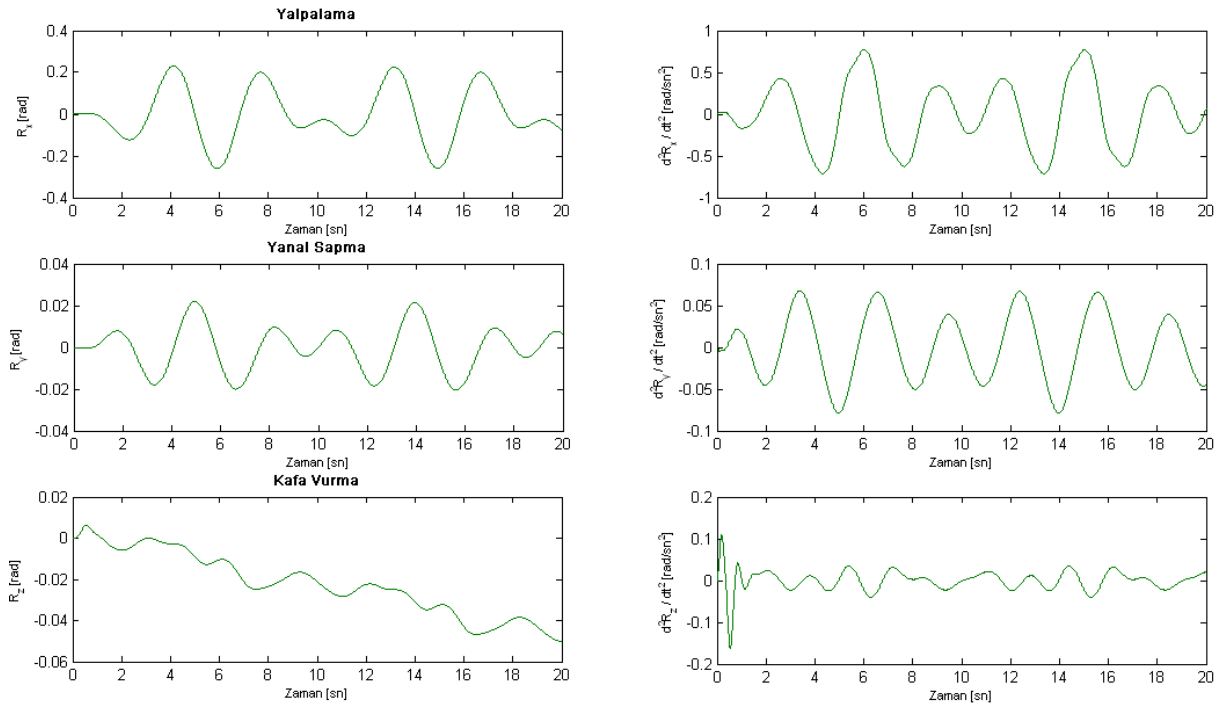


Şekil 4.1 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu

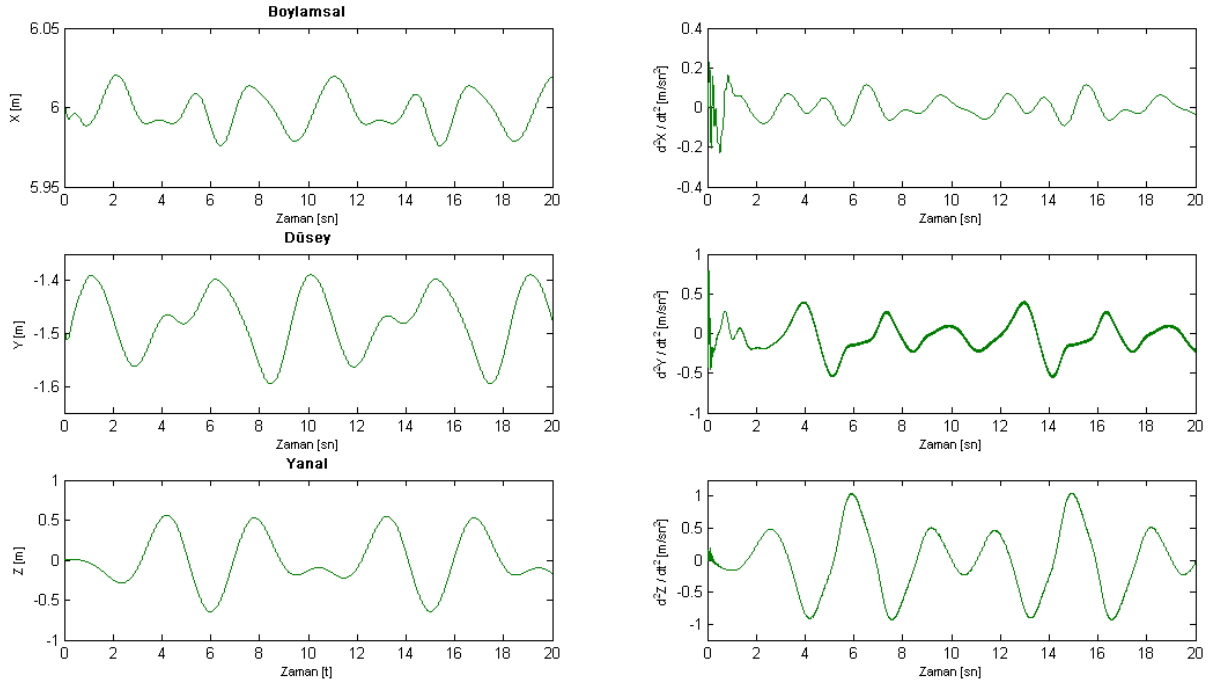
Ayrıca Bölüm (2.2)' de bahsi geçen sünme kuvvetleri ve dengesizlikler sisteme etki etmektedir.



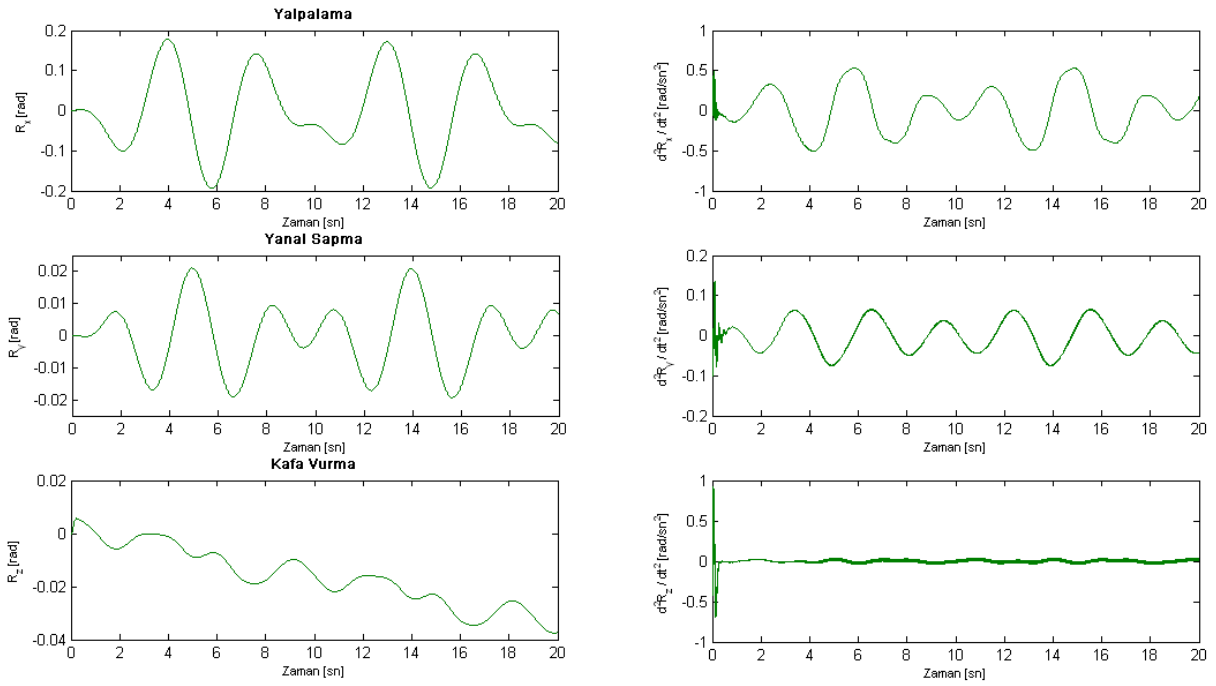
Şekil 4.2 I.Senaryoda kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



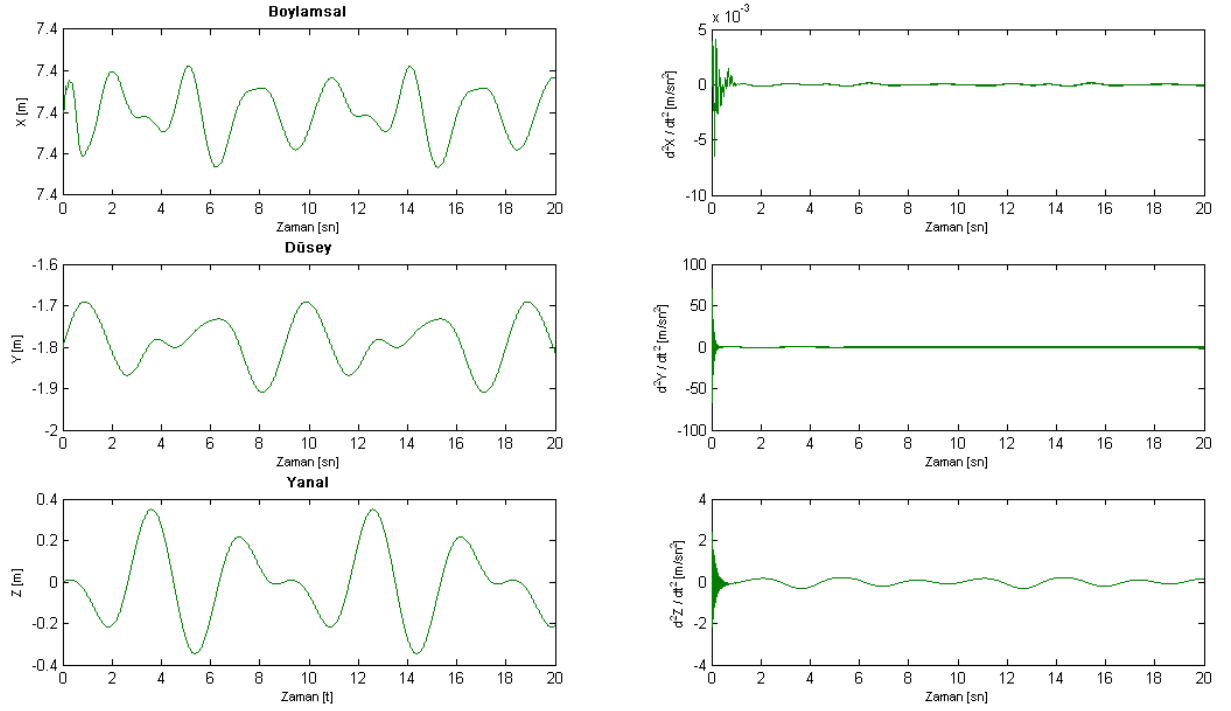
Şekil 4.3 I.Senaryoda kabinde oluşan açısall titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



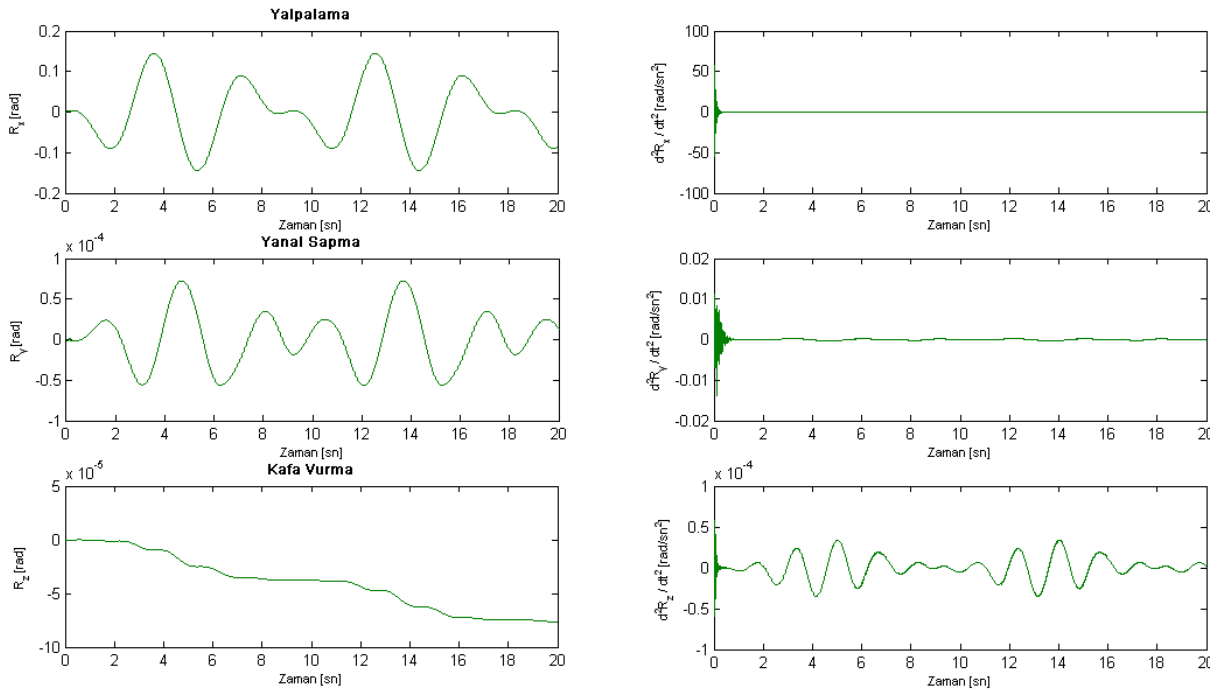
Şekil 4.4 I.Senaryoda I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 4.5 I.Senaryoda I.bojide oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 4.6 I.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 4.7 I.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Şekil 4.2' den Şekil 4.7' ye kadar Kabin, I. Boji ve I. Tekerlek Setinin doğrusal konum, doğrusal ivme, açısal konum ve açısal ivme grafikleri verilmiştir. Düşey ray düzgünsüzlükleri Y ve θ serbestlik derecelerinde doğrudan, diğer serbestlik derecelerini dolaylı olarak

tetiklemektedir.

Sistemin tüm serbestlik dereceleri tetiklenmektedir. Atalay (2009)' un çalışmasından farklı olarak boylamsal doğrultularda da hareket oluşmuştur. Bozucu etkilerin, lokomotifin hızına orantılı gecikmelerle tekerlek setlerine uygulanması dolayısıyla φ serbestlik derecesi tetiklenecek ve ağırlık kuvvetlerinin x doğrultusunda bileşenleri oluşacaktır. Boylamsal doğrultudaki hareketin kaynağı olan bu durum Bölüm (2.2) de anlatılan rampa direnç kuvvetlerine benzetilebilir.

Açısal hareketler dolayısıyla oluşan ağırlık kuvveti bileşenleri aşağıdaki gibidir:

- θ açısal hareketi dolayısıyla ağırlık kuvvetlerinin yanal bileşenleri (z) ortaya çıkmaktadır.

$$F_{tz} = G_t \sin \theta_t \quad (3.10)$$

$$F_{bz} = G_b \sin \theta_b \quad (3.11)$$

$$F_{kz} = G_k \sin \theta_k \quad (3.12)$$

- φ açısal hareketi dolayısıyla ağırlık kuvvetlerinin boylamsal (x) bileşenleri ortaya çıkmaktadır.

$$F_{bx} = G_b \sin \varphi_b \quad (3.13)$$

$$F_{kx} = G_k \sin \varphi_k \quad (3.14)$$

- Kabinin θ açısal hareketi dolayısıyla ağırlık merkezi boylamsal eksene göre kayarak moment oluşmaktadır.

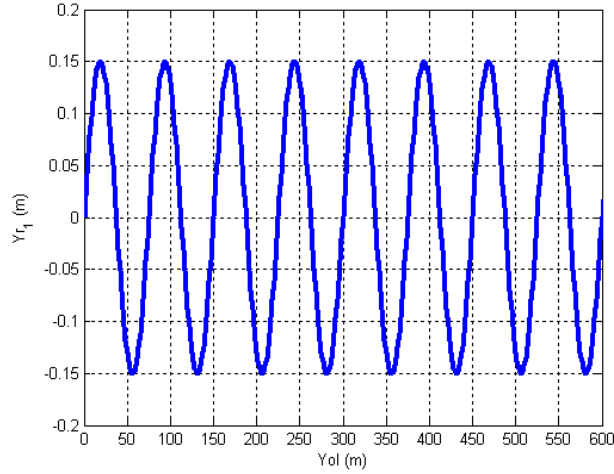
$$M_{k\theta} = G_k h_3 \sin \theta_k \quad (3.15)$$

- Kabinin φ açısal hareketi dolayısıyla ağırlık merkezi yanal eksene göre kayarak moment oluşturmaktadır.

$$M_{k\varphi} = G_k h_3 \sin \varphi_k \quad (3.16)$$

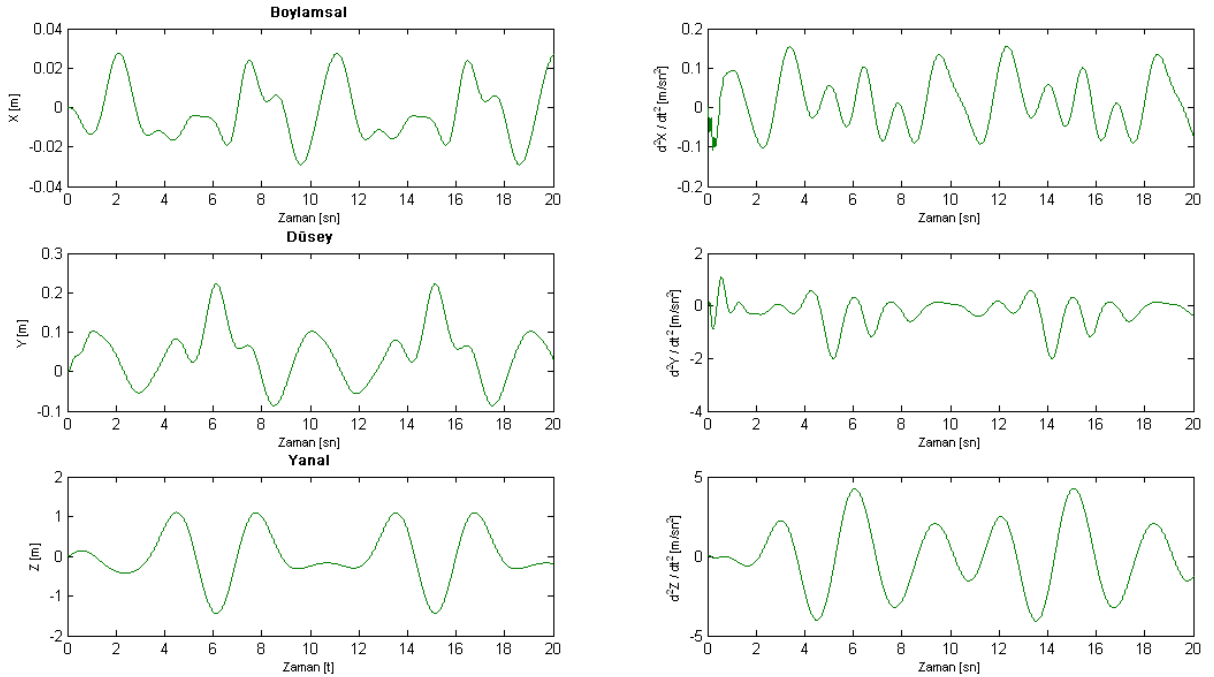
4.2 II.Senaryo (Yanal Doğrultuda ve Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)

İkinci senaryoda Şekil 3.1' deki düşey ray düzgünsüzlüklerine yanal ray düzgünsüzlüğü de eklenmiştir. Şekil 4.8' de görülen yanal ray düzgünsüzlüğü sağ ve sol rayların ikisine de birden etki etmektedir.

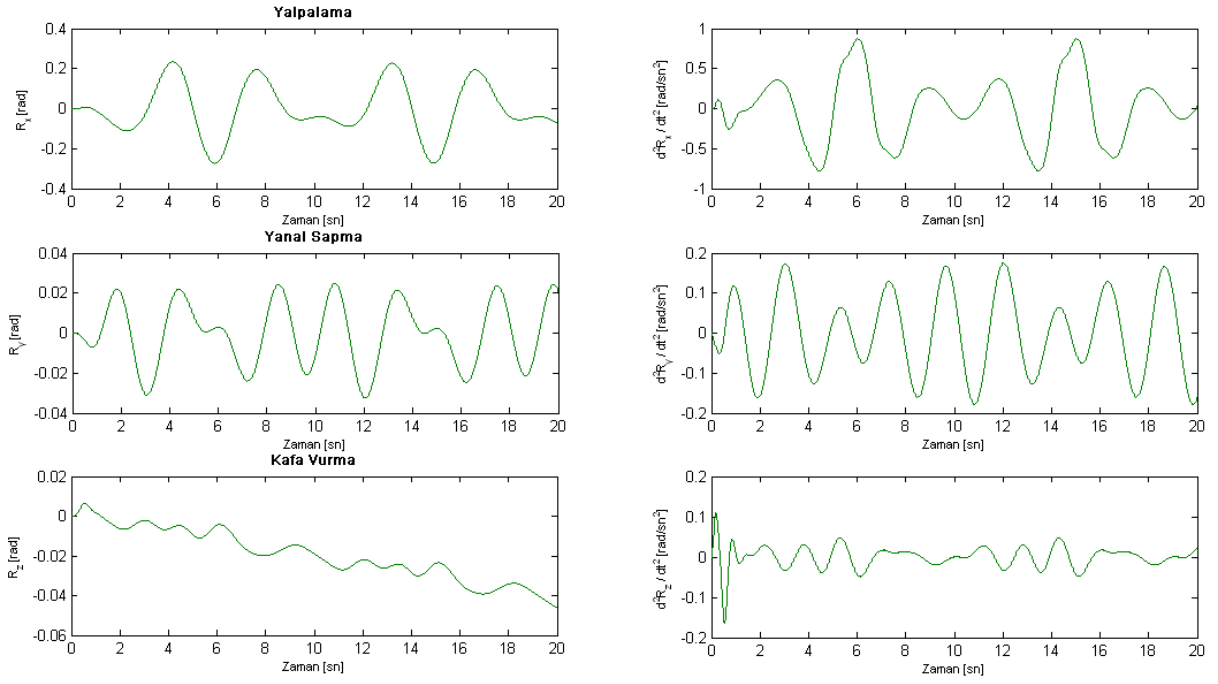


Şekil 4.8 Yanal ray düzgünsüzlüğü (Atalay, 2009)

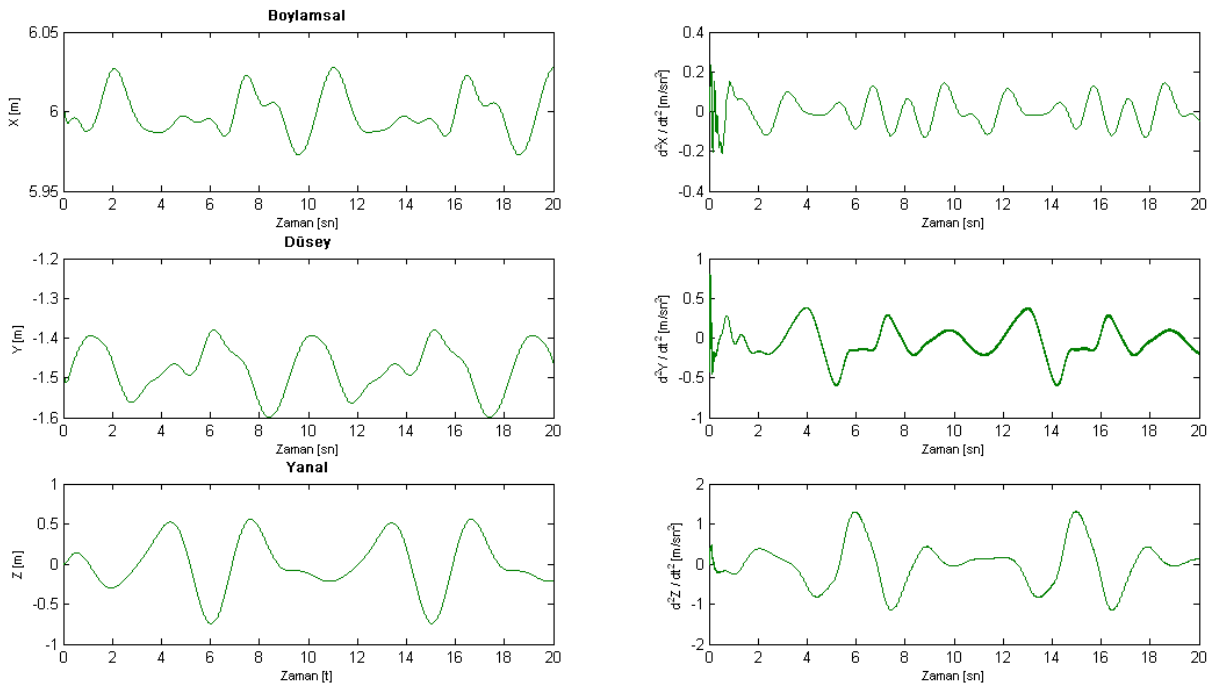
Ayrıca Bölüm (2.2)' de bahsi geçen sünme kuvvetleri ve dengesizlikler de sisteme etki etmektedir.



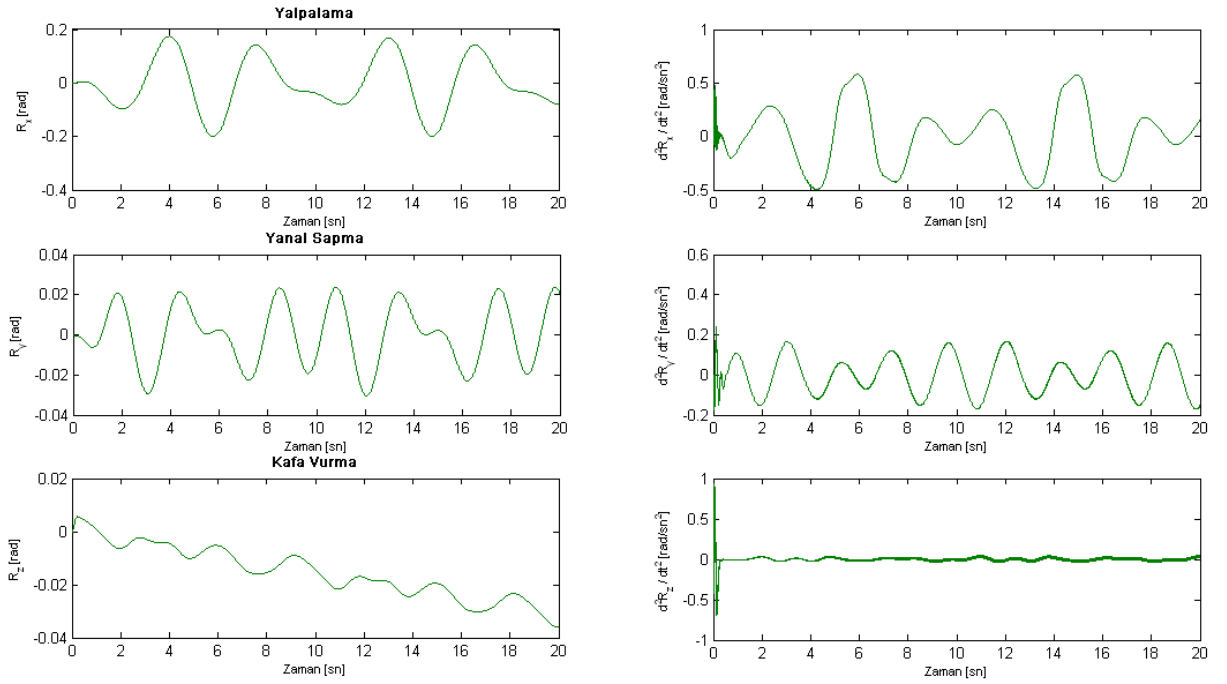
Şekil 4.9 II.Senaryoda kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 4.10 II.Senaryoda kabinde oluşan açılal titreşimlerin yer değıştirme ve ivmeleri



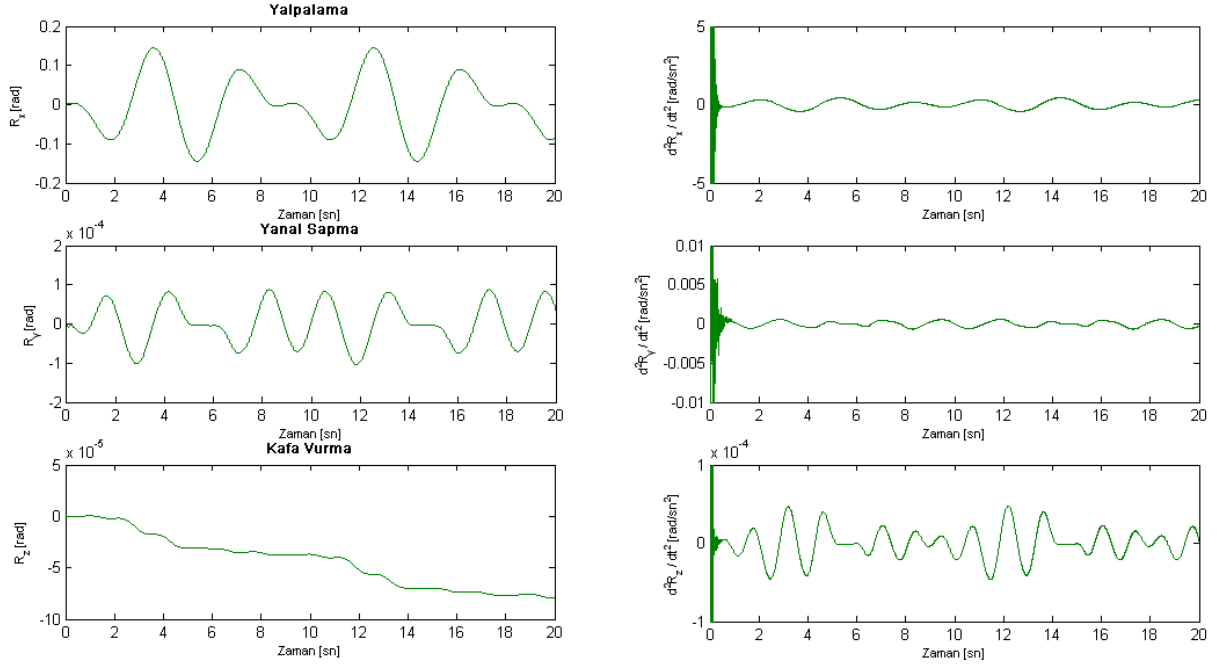
Şekil 4.11 II.Senaryoda I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değıştirme ve ivmeleri



Şekil 4.12 II.Senaryoda I.bojide oluşan açisal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 4.13 II.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

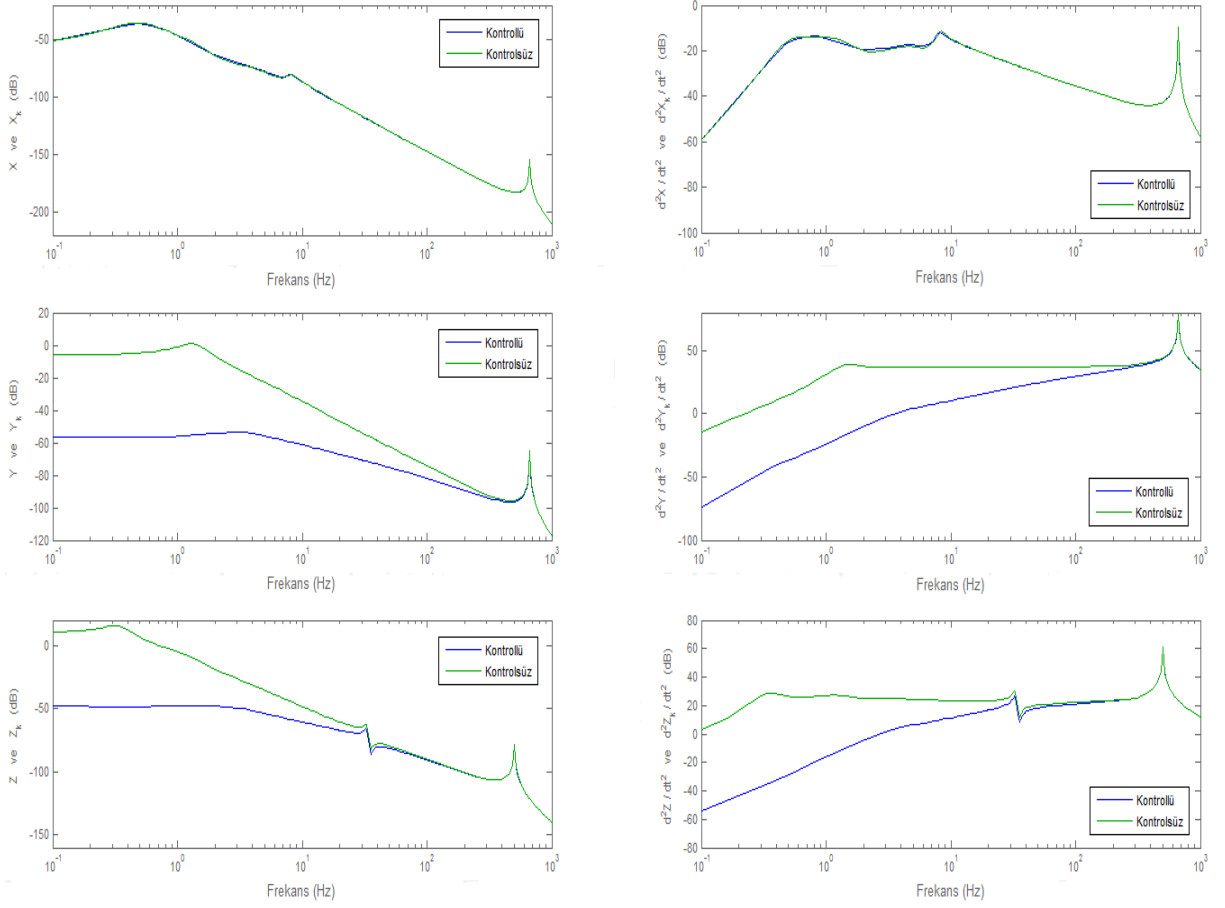


Şekil 4.14 II.Senaryoda I.tekerlek–setinde oluşan açılal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

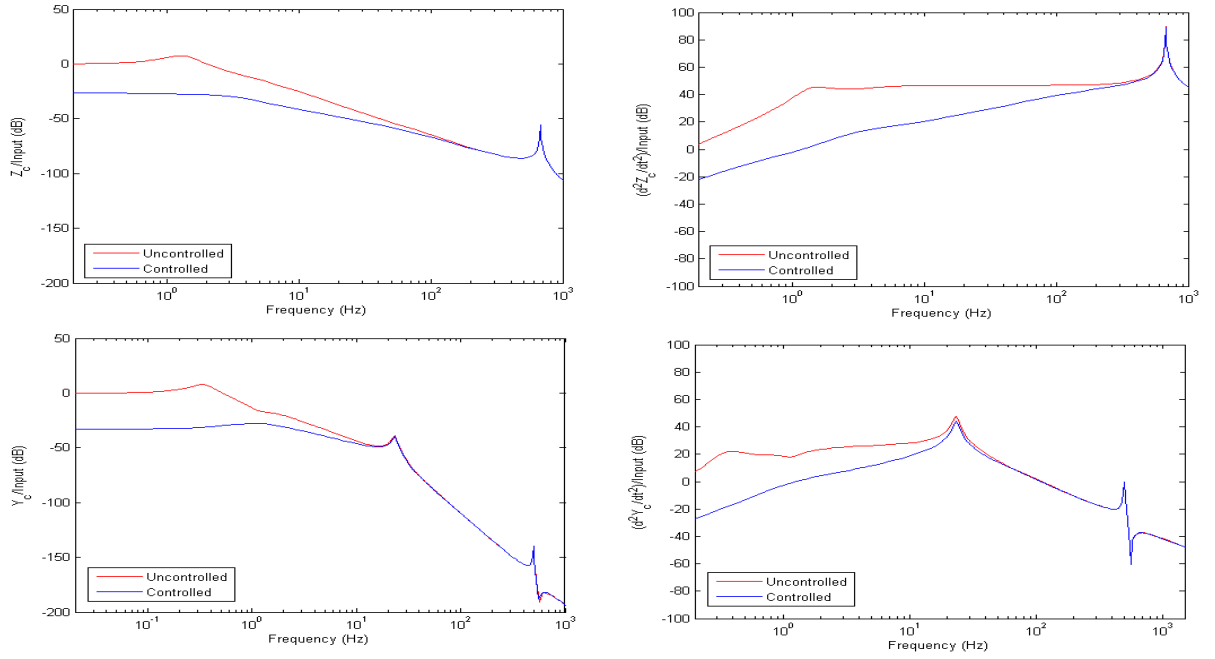
İkinci senaryoda da sistemin tüm serbestlik dereceleri tetiklenmektedir. Eklenen yanıl ray düzgünsüzlüğü düşey doğrultuda (Y) herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır. Yanıl (Z) ve yanıl sapma açısı (ψ) serbestlik derecelerini doğrudan, boylamsal (X) serbestlik derecesini dolaylı olarak tetiklemektedir.

4.3 Kabin Titreşimlerinin Frekans Alanında Gözlemlenmesi

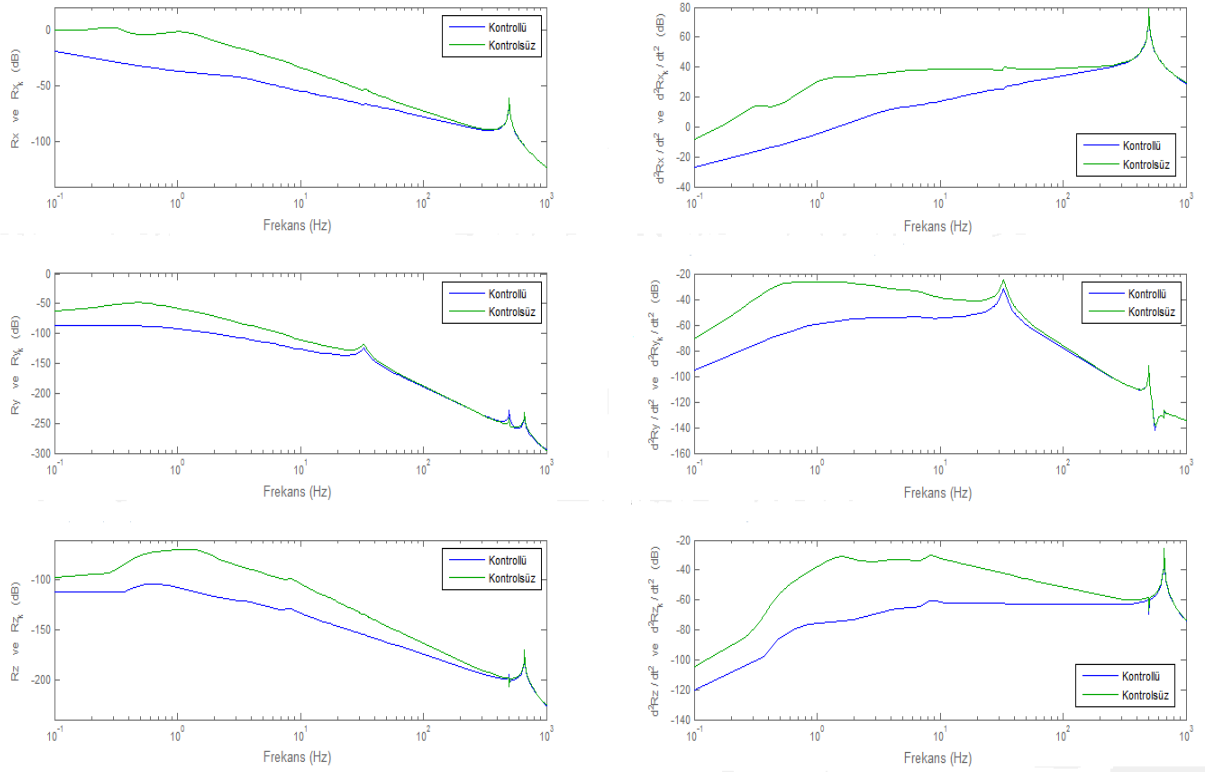
Şekil 4.15 den 4.20' ye kadar SimMechanics modelin kontrollü ve kontrolsüz frekans cevapları verilmiştir. Grafikler “SimMechanics altında Control and Estimation Tools Manager” araç kutusu kullanılarak çizdirilmiştir.



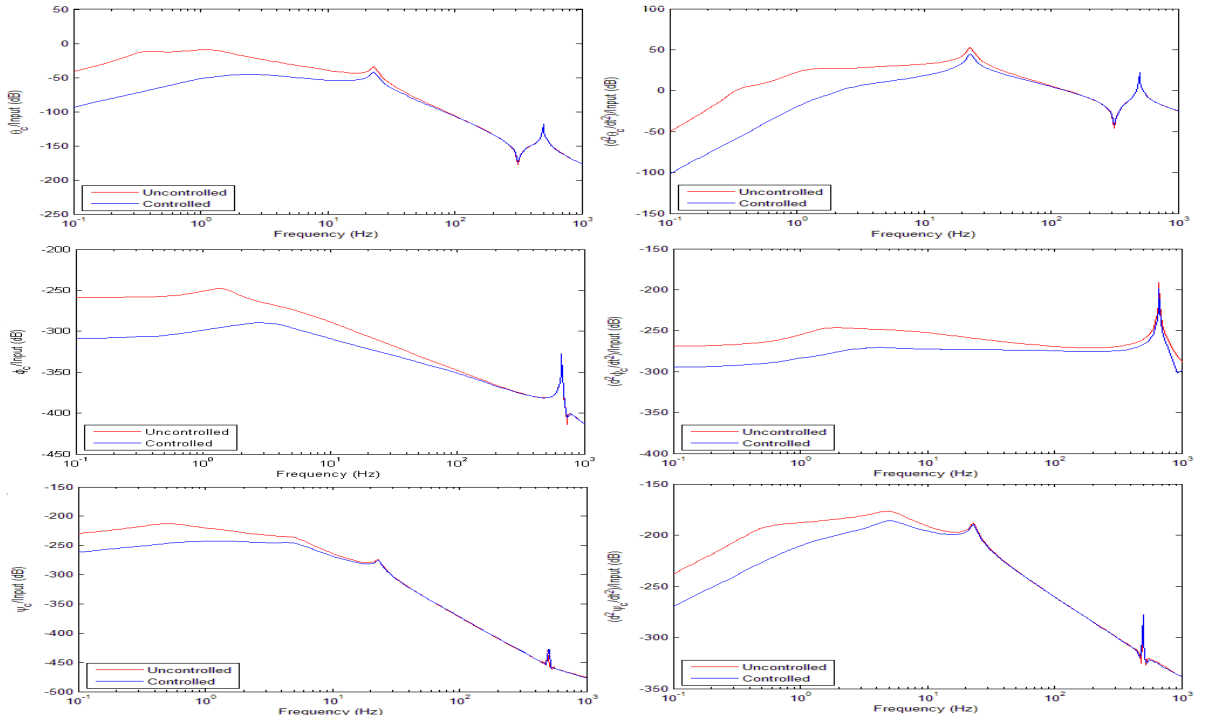
Şekil 4.15 Kabinin doğrusal titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı



Şekil 4.16 Kabinin düşey titreşimleri için Sezer ve Atalay (2011)' un bulduğu kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı (Z: Düşey doğrultu, Y: Yanal doğrultu)



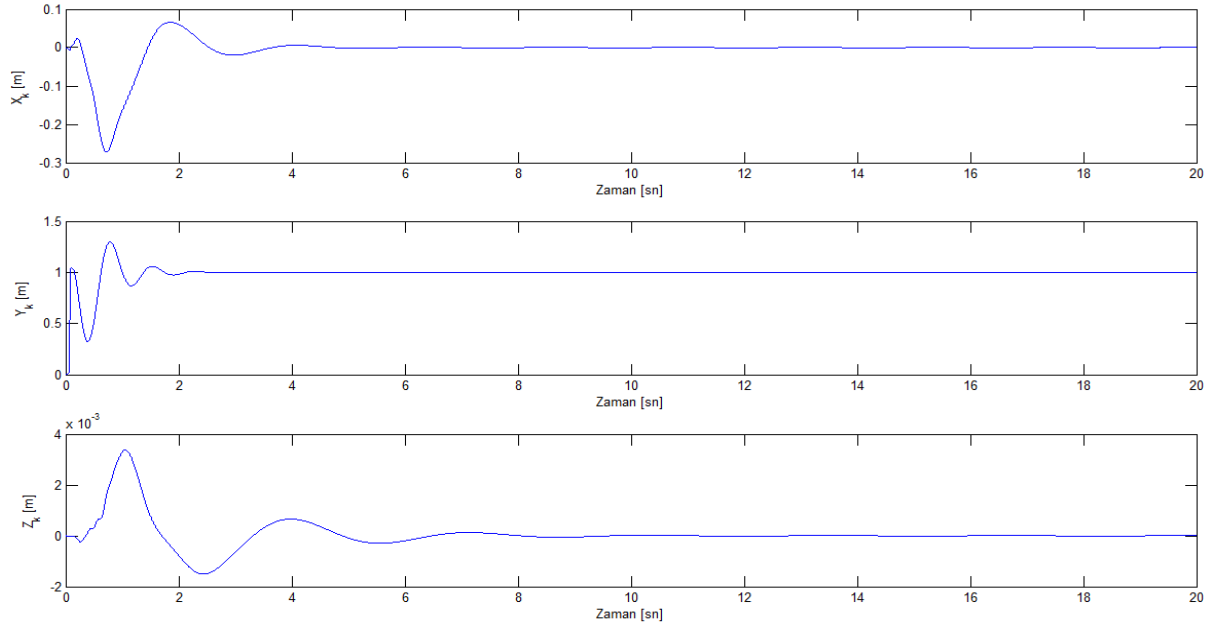
Şekil 4.17 Kabinin açışal titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı



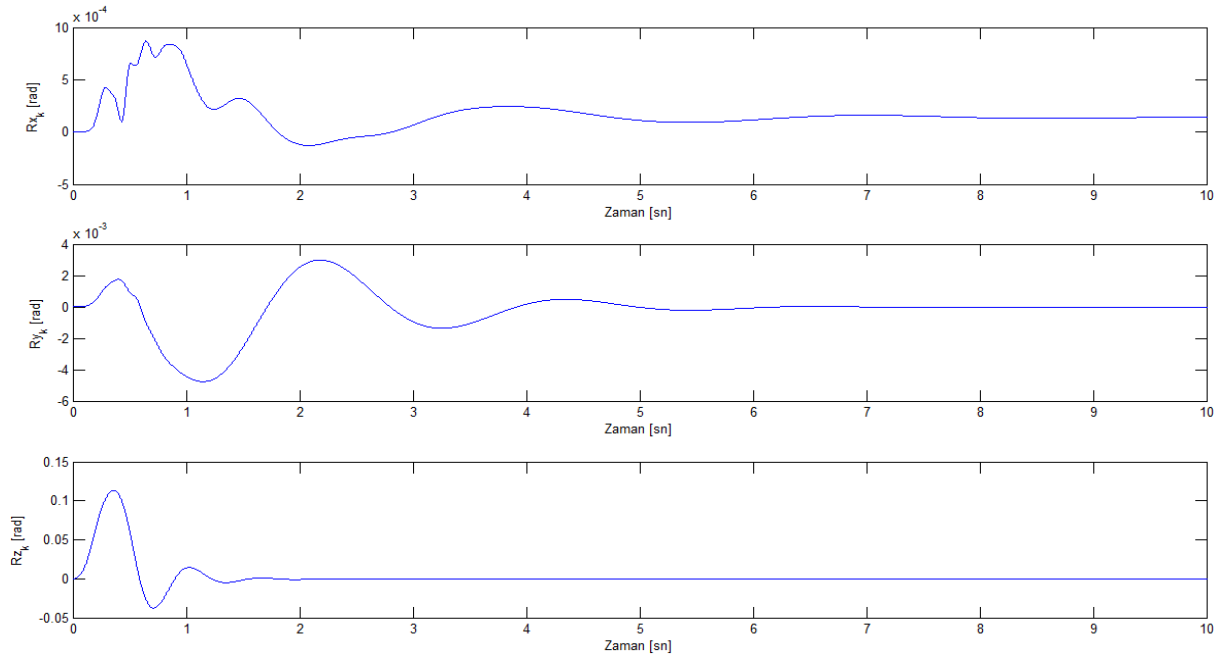
Şekil 4.18 Kabinin açışal titreşimleri için Sezer ve Atalay (2011)' un bulduğu kontrolsüz ve kontrollü frekans cevabı ($\theta_c = R_x$, $\phi_c = R_z$, $\psi_c = R_y$)

4.4 Kabinin Birim Basamak Fonksiyona Cevabı

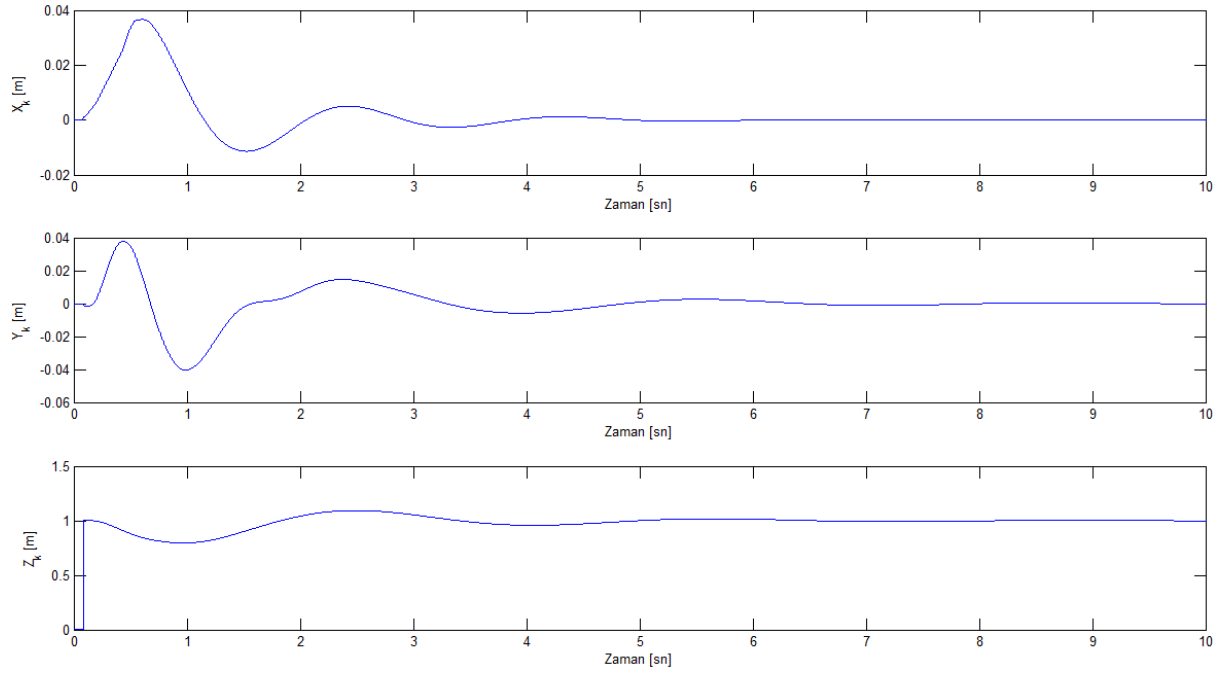
Modelimize düşey (y) ve yanal (z) birim basamak fonksiyonları ayrı ayrı ve bir arada etki ettirilerek birim basamak cevapları bulunmaya çalışılmıştır. Düşey ve yanal birim basamak girişin bir arada uygulandığı durum için kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



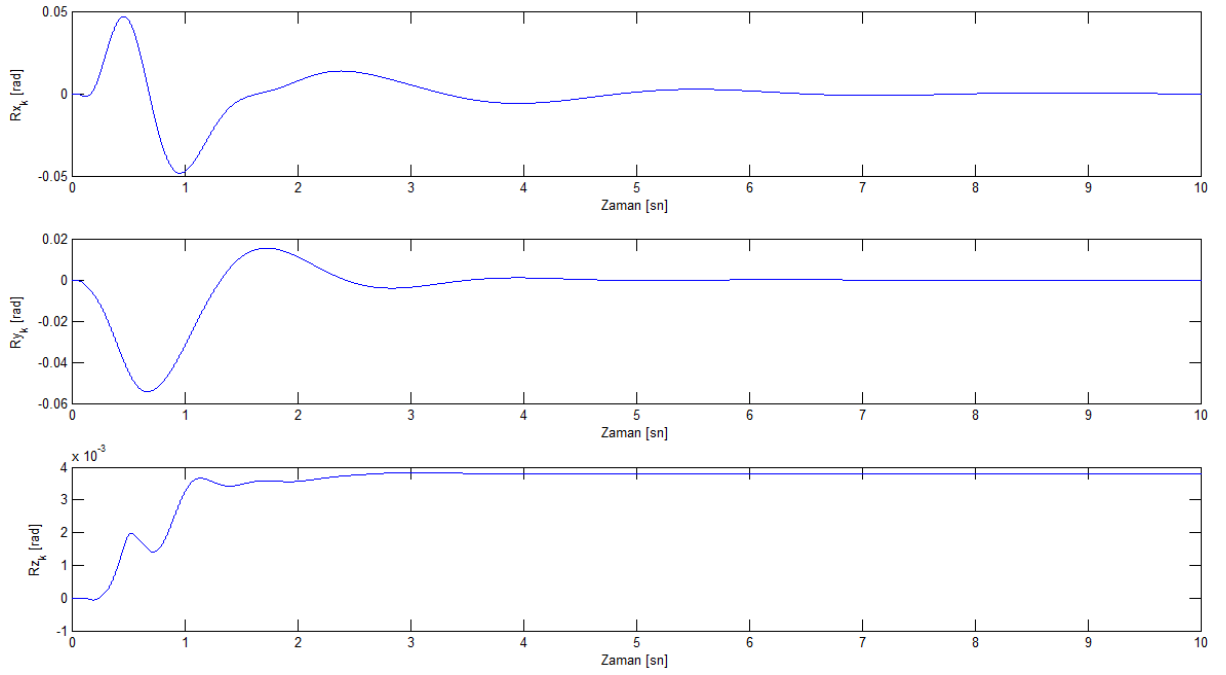
Şekil 4.19 Düşey birim basamak girişe karşılık kabinin doğrusal cevabı



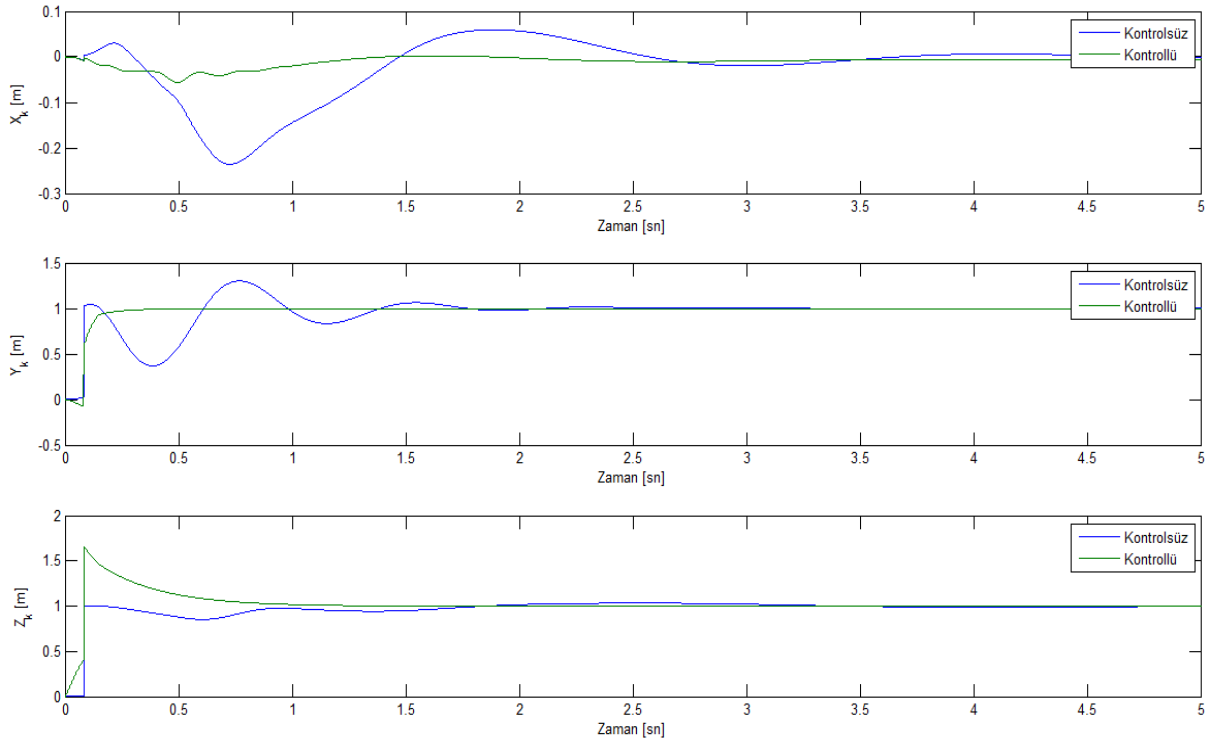
Şekil 4.20 Düşey birim basamak girişe karşılık kabinin açısal cevabı



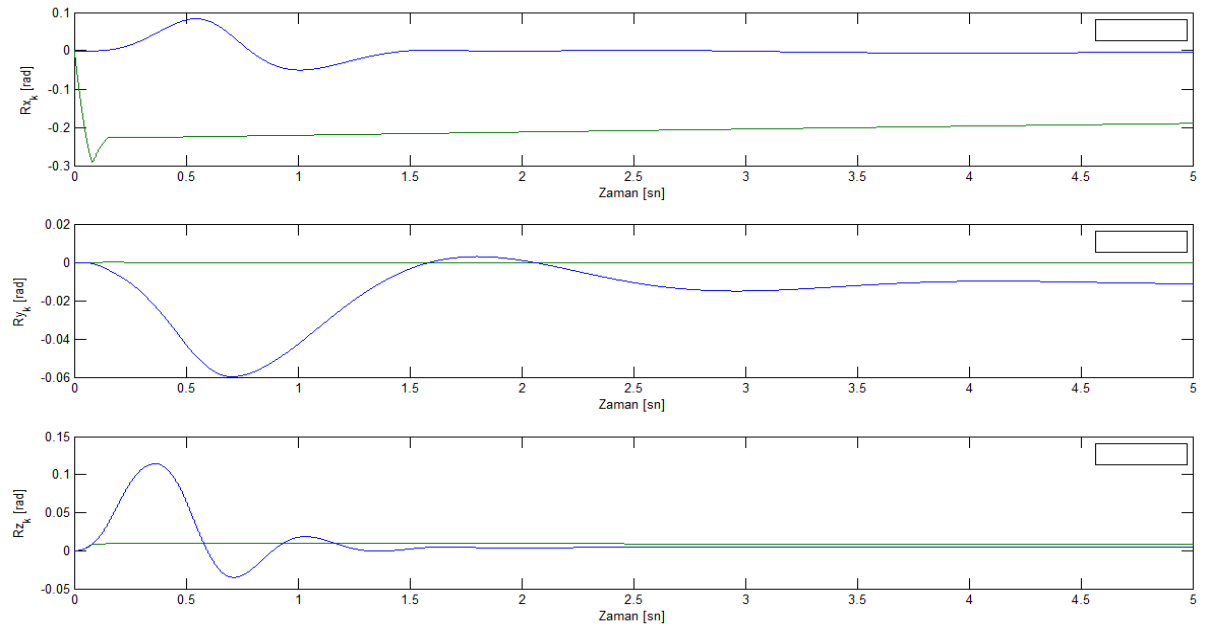
Şekil 4.21 Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin doğrusal cevabı



Şekil 4.22 Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin açısıl cevabı



Şekil 4.23 Düşey ve Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin kontrollü ve kontrolsüz doğrusal cevapları



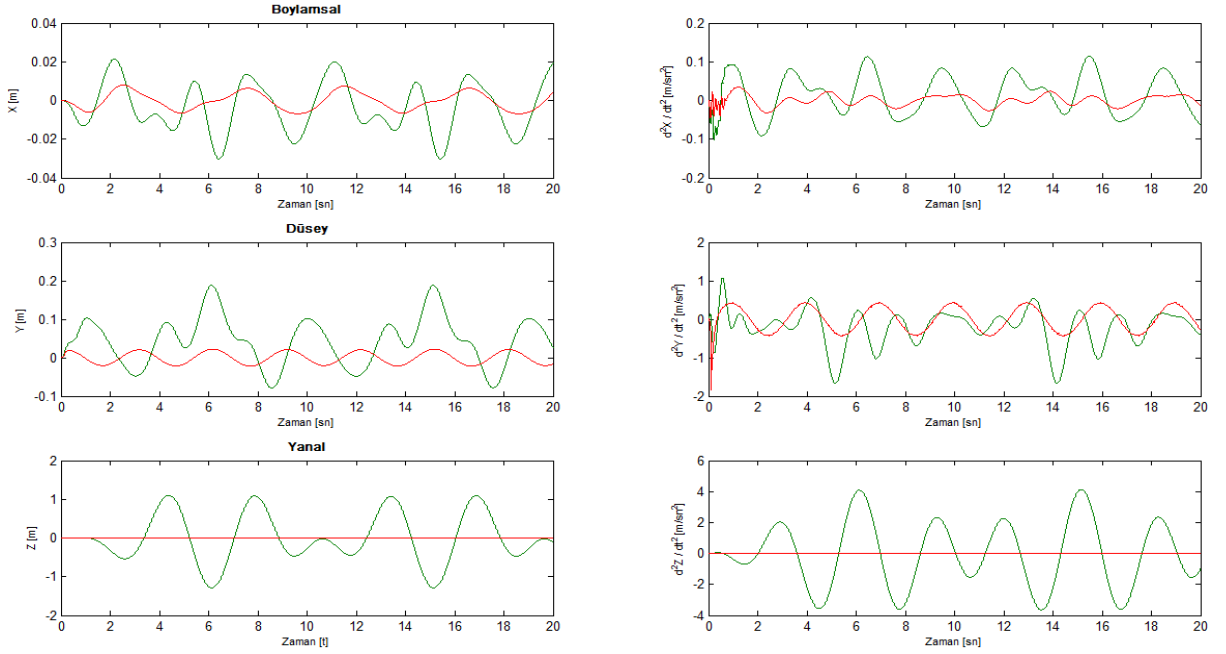
Şekil 4.24 Düşey ve Yanal birim basamak girişe karşılık kabinin kontrollü ve kontrolsüz açısal cevapları

4.5 Kabin Titreşimlerinin Aktif Kontrolü

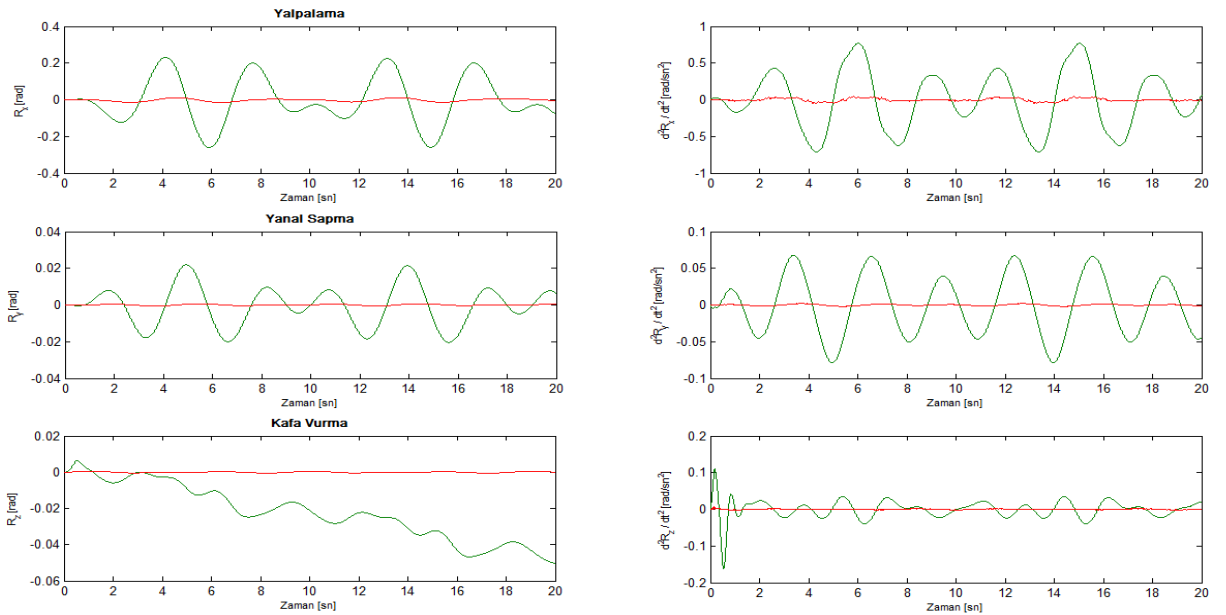
Bu bölümde I. Ve II. senaryoda oluşan kabin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmeleri tasarlanan aktif titreşim kontrolcüsü ile minimize edilmeye çalışılmıştır. Kabinin zaman alanlarında kontrollü ve kontrolsüz cevap grafikleri çizdirilmiştir. Gerekli olan kontrolcü

kuvvetleri de ayrıca grafiklerde verilmiştir.

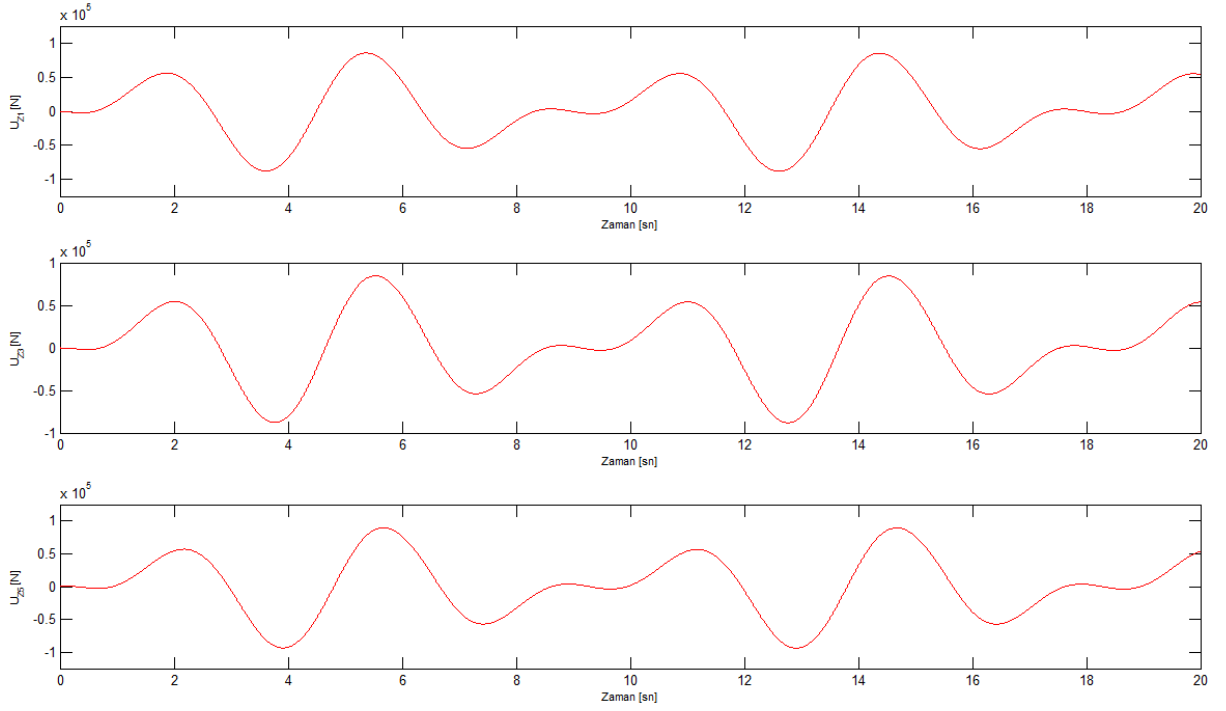
4.5.1 I. Senaryoda Aktif Titreşim Kontrolü



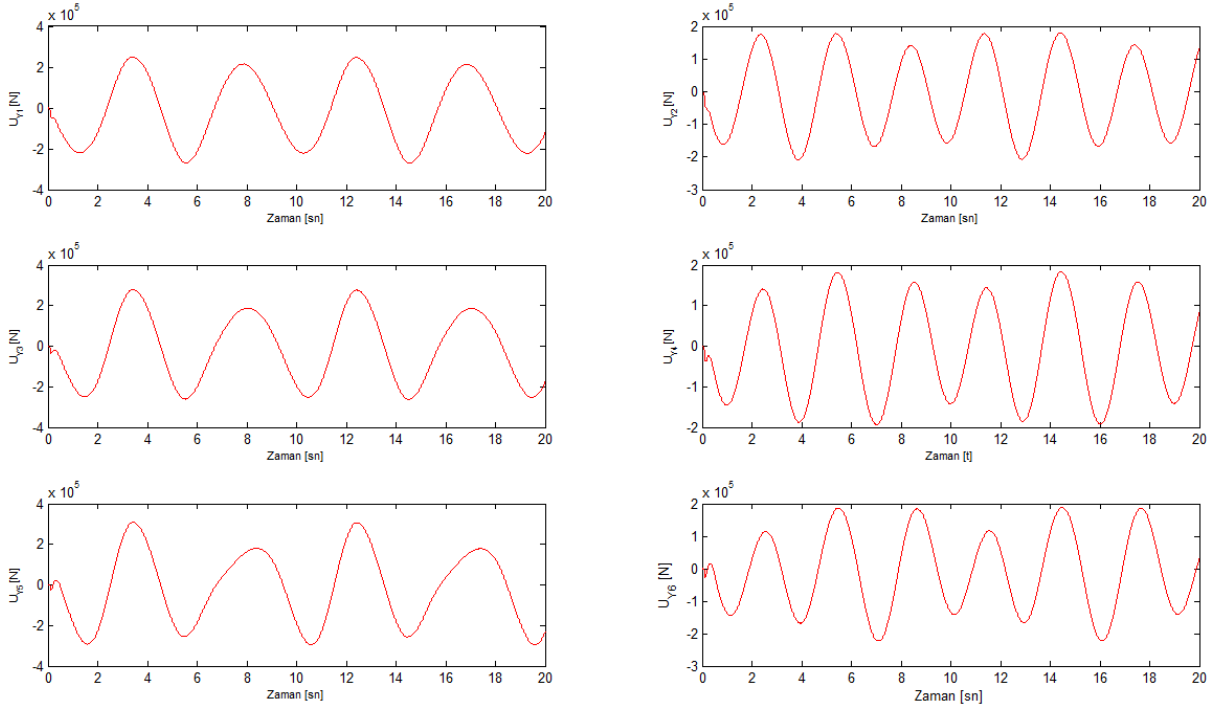
Şekil 4.25 I.Senaryoda kabinin doğrusal titreşimlerin için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar



Şekil 4.26 I.Senaryoda kabinin açısıl titreşimlerin için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar

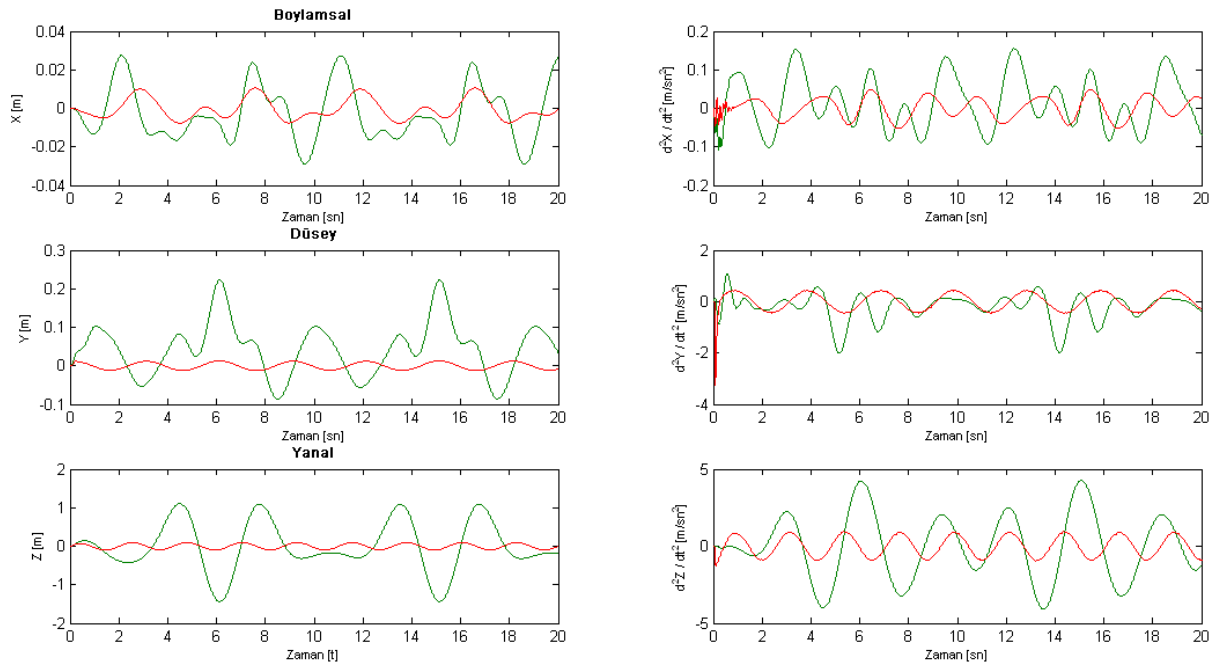


Şekil 4.27 I.Senaryoda aktif kontrolcünün yanıl aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri

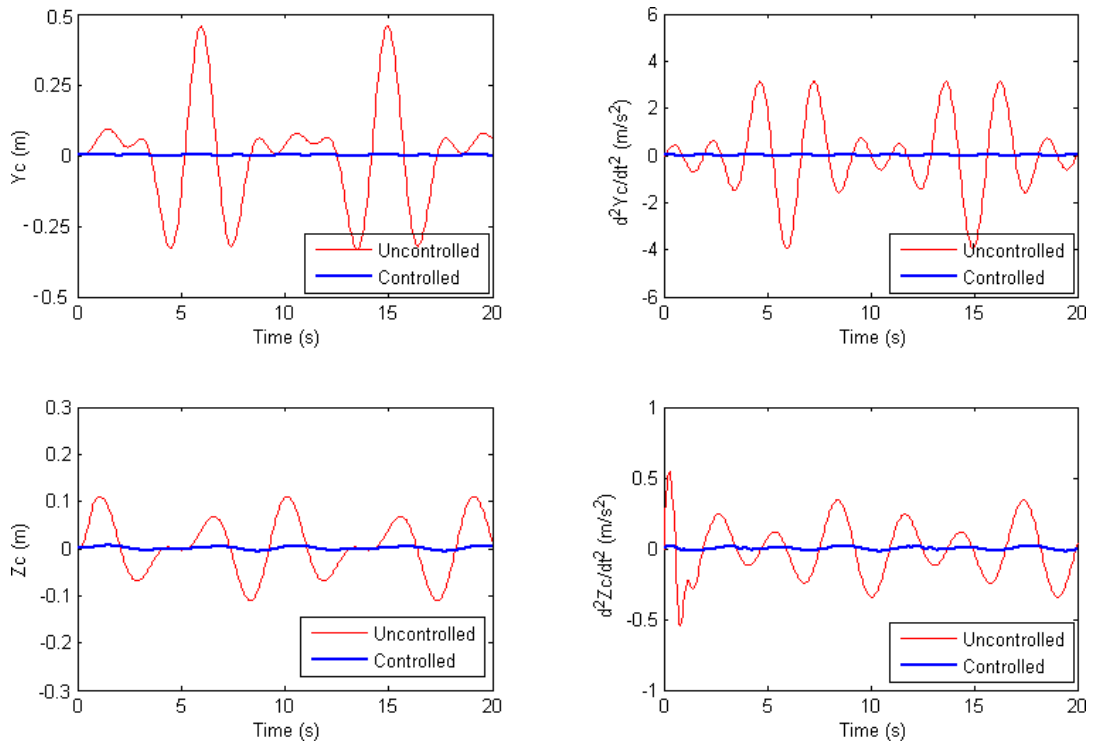


Şekil 4.28 I.Senaryoda aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri

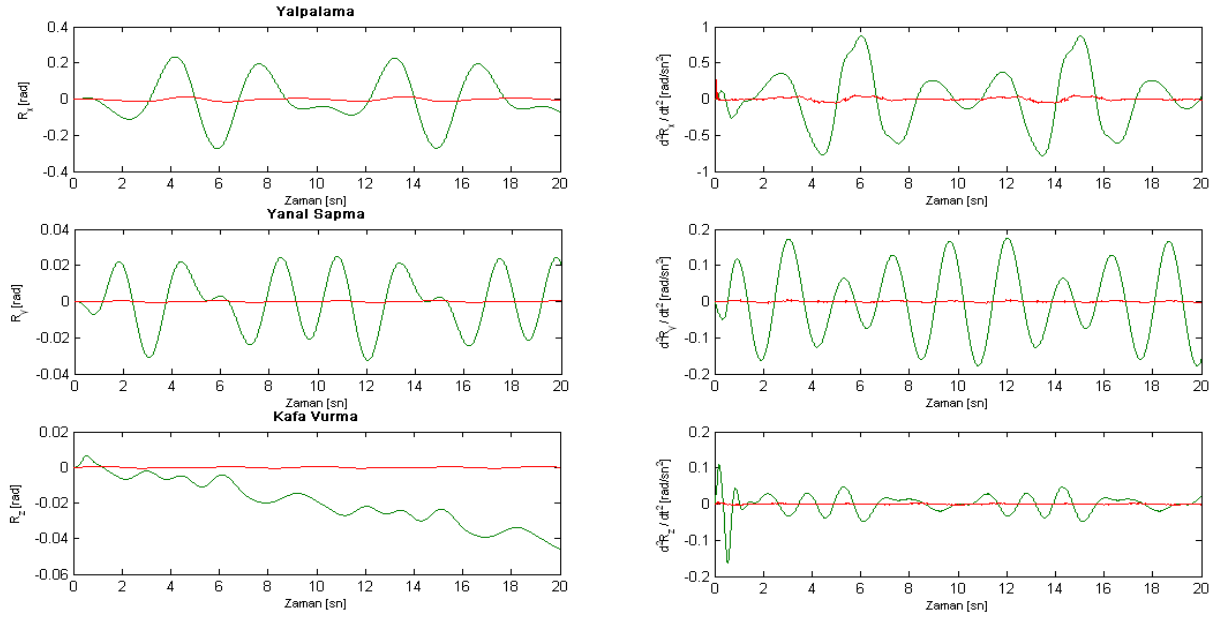
4.5.2 II. Senaryoda Aktif Titreşim Kontrolü



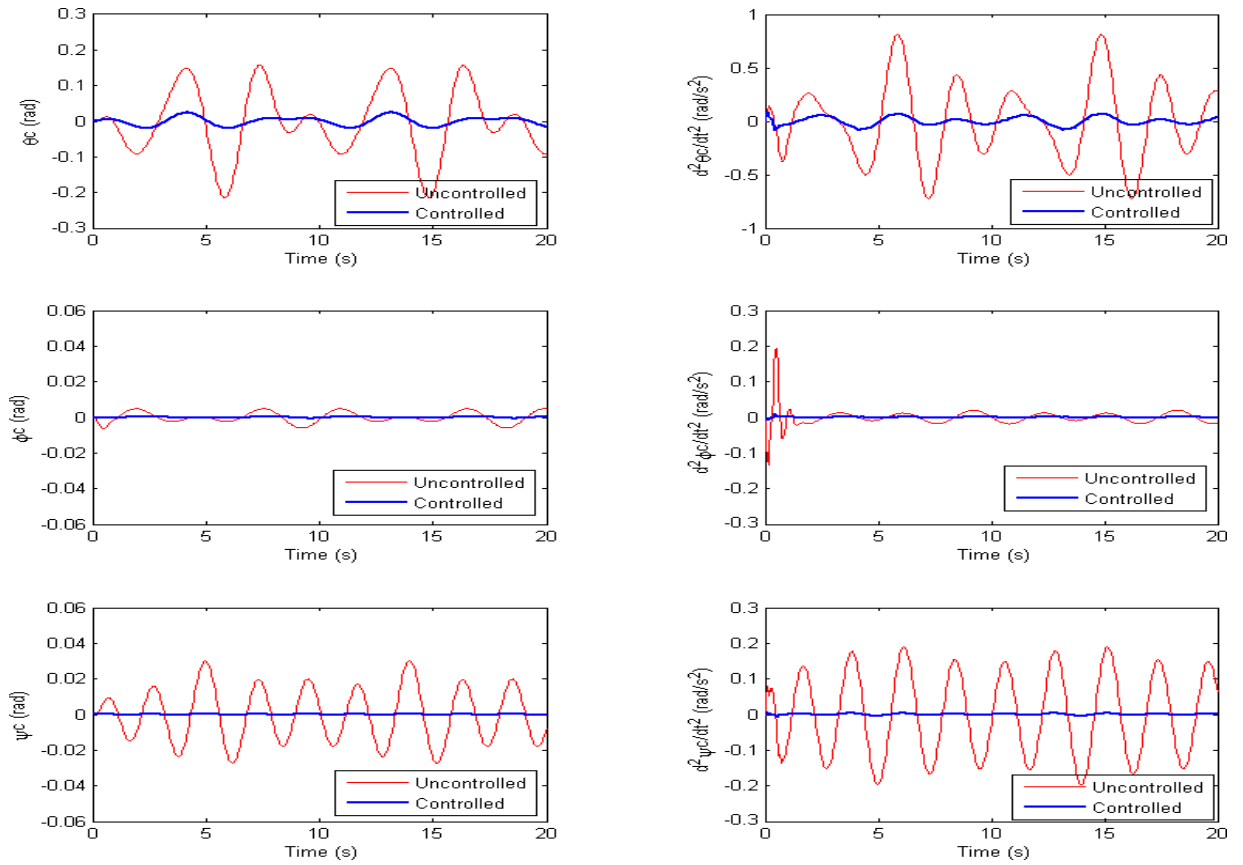
Şekil 4.29 II.Senaryoda kabinin doğrusal titreşimleri için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar



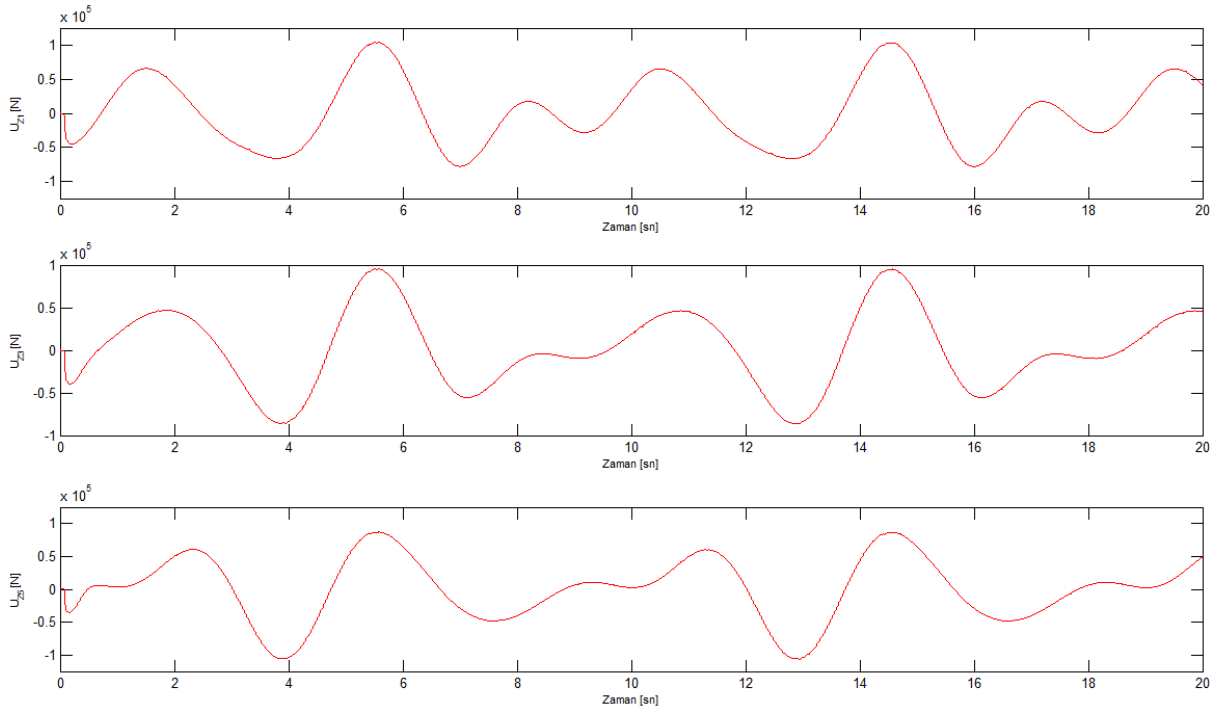
Şekil 4.30 Sezer ve Atalay (2011)' in kabinin doğrusal titreşimleri için bulunduğu kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar (Z:Düsey doğrultu, Y: Yanal doğrultu)



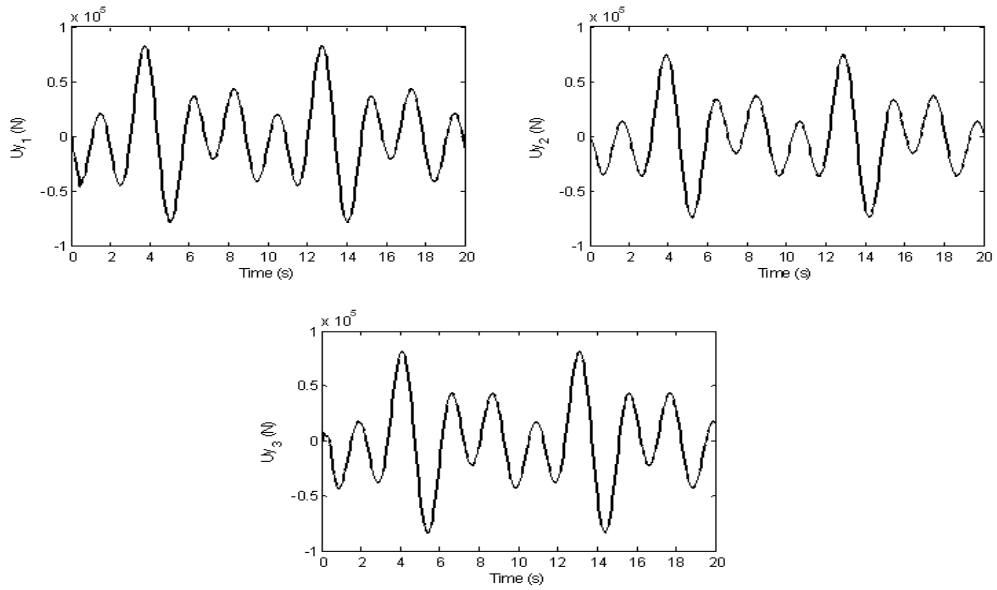
Şekil 4.31 II.Senaryoda kabinin açisal titreşimleri için bulunan kontrolsüz ve kontrollü sonuçlar



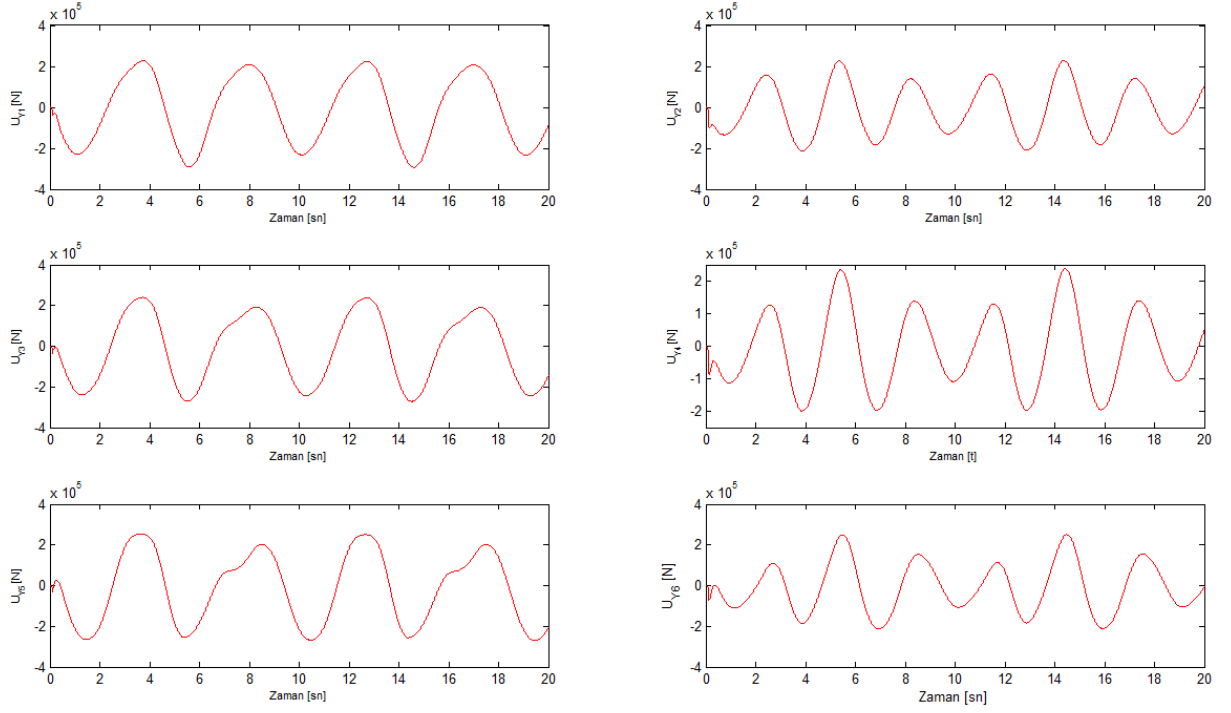
Şekil 4.32 Sezer ve Atalay (2011)' in kabinin açisal titreşimleri için bulduğu kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar ($\theta_c = R_x$, $\phi_c = R_z$, $\psi_c = R_y$)



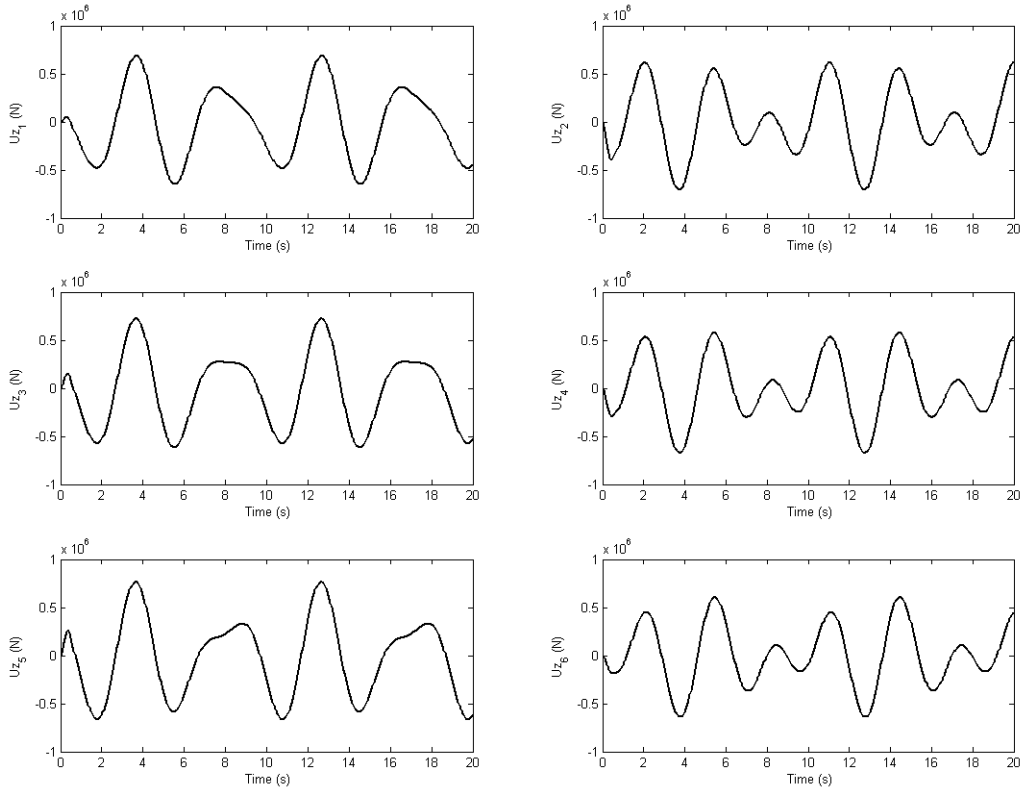
Şekil 4.33 II.Senaryoda aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri



Şekil 4.34 Sezer ve Atalay (2011)' in aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinden uyguladığı kontrol kuvvetleri



Şekil 4.35 II.Senaryoda aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uygulanan kontrol kuvvetleri



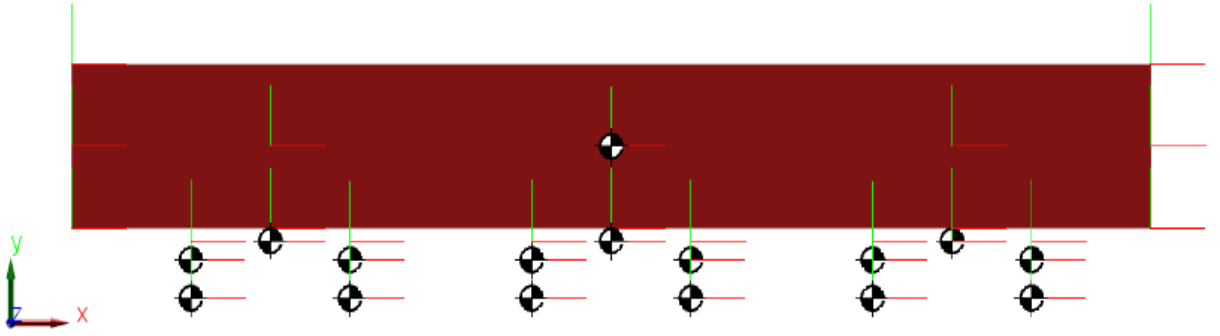
Şekil 4.36 Sezer ve Atalay (2011)' in aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinden uyguladığı kontrol kuvvetleri

4.6 SimMechanics Modelinin Görselleştirilmesi

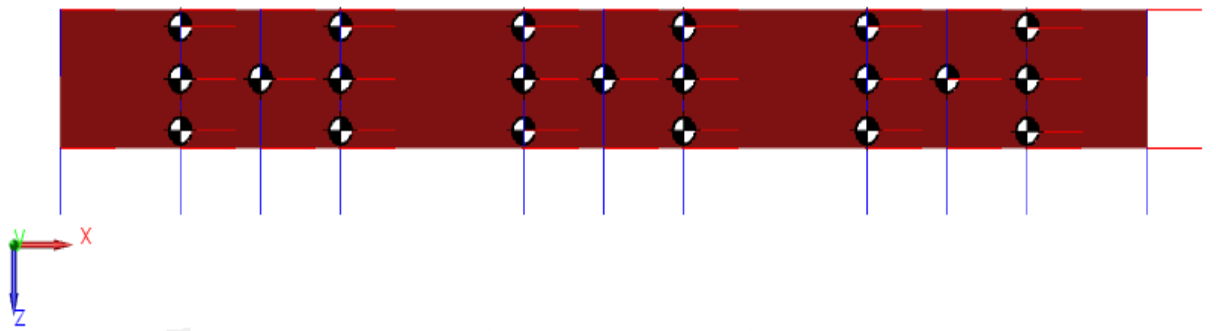
SimMechanics Visualization araçları kullanılarak modelimize üç boyutlu görsellik kazandırılmıştır. Böylelikle kurduğumuz modelde, rijit gövde parçalarının model uzayındaki konumları gözlenmiş ve olası hatalar düzeltilebilmiştir.

SimMechanics' in bu özelliği sayesinde, sistemin hareketleri görsel olarak da izlenebilmekte ve gerçek zamanlı video dosyaları olarak kaydedilebilmektedir.

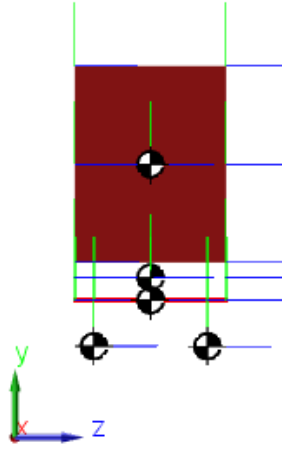
Matlab-Simulink altında visualization özelliğini aktif hale getirmek için menü çubundan, Simulation » Configuration Parameters... yolu izlenerek Configuration Parameters penceresi açılır. Simscape başlığı altında Visualization sekmesinden “ Show animation during simulation “ seçeneği aktif hale getirilir.



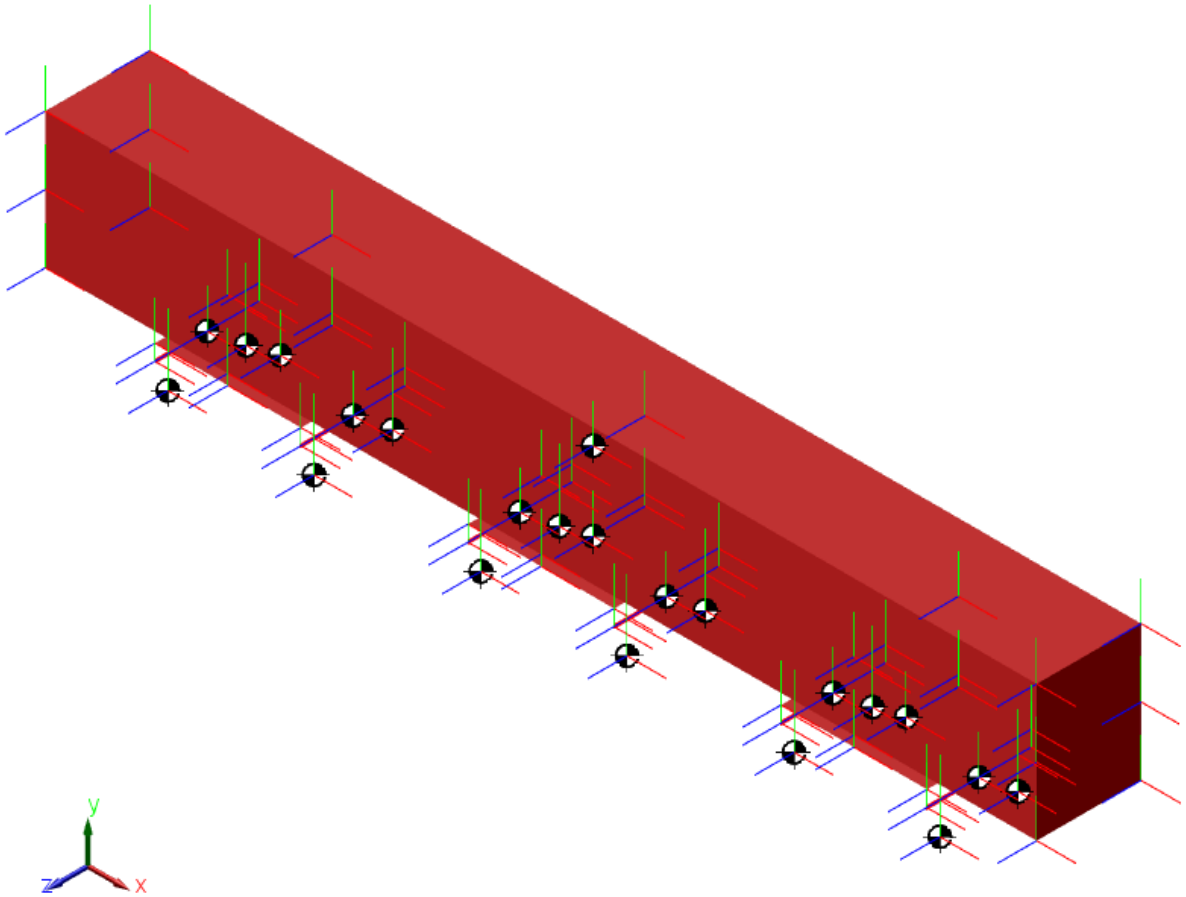
Şekil 4.37 SimMechanics modelinin sağdan görünüşü



Şekil 4.38 SimMechanics modelinin üstten görünüşü



Şekil 4.39 SimMechanics modelinin önden görünüşü



Şekil 4.40 SimMechanics modelinin izometrik görünüşü

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikle, bir lokomotifin 54 serbestlik dereceli fiziksel modeli verilmiş ve Iwnick (2006) tarafından incelen boylamsal hareket dinamiği üzerinden sisteme etkileyen zorlayıcı kuvvet açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, Matlab-Simulink yazılımının SimMechanics araçları hakkında bilgi verilmiş ve 54 serbestlik dereceli lokomotif modelinin SimMechanics modeli kurulmuştur. Ayrıca düşey ve yanal doğrultularda bulanık kontrolcü tasarımı yapılarak aktif titreşim kontrolü eklenmiştir.

Dördüncü bölümde, lokomotifin düz bir hat boyunca, sabit 120 km/h lik bir hızla ilerlediği kabulü ile düşey ve yanal doğrultularda ray düzgünsüzlükleri etki ettirilerek bilgisayar simülasyonu yapılmıştır. Bunun için iki senaryo kurulmuştur. Birinci senaryoda sağ ve sol raylarda farklı genlik ve frekansa sahip düşey ray düzgünsüzlükleri uygulanmış ve sistemin tüm serbestlik derecelerinde kontrollü ve kontrolsüz sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İkinci senaryoda, birinci senaryoya ilave olarak bir de yanal ray düzgünsüzlüğü eklenmiştir. Ayrıca sistemin birim basamak ve frekans cevapları da verilmiştir.

Sonuç olarak, sisteme düşey ya da yanal doğrultulardan herhangi birinde ray düzgünsüzlüğü etki ettirildiğinde, sistemin tüm serbestlik derecelerinin tetiklendiği gözlenmiştir. Bulunan sonuçlar, aynı tren modeli üzerinde çalışan Atalay (2009)' un sonuçları ile karşılaştırıldığında farklılıklar görülmüştür. Yapılan inceleme sonucunda, açısız serbestlik dereceleri dolayısıyla ağırlık kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin de ortaya çıkması gerektiği fark edilmiş ve bulunan sonuçların gerçeğe daha yakın olduğuna karar verilmiştir.

Bulanık mantık kontrolcüler ile aktif titreşim kontrollü, %90 başarı ile gerçekleştirilmiştir. Birinci ve ikinci senaryo için kontrollü ve kontrolsüz çıkışlar karşılaştırılmış ve kontrolcü kuvvetleri her bir aktüatör için ayrı ayrı verilmiştir.

Kontrolcülerin etkinliği birim basamak ve frekans cevapları ile de incelenmiştir. Birim basamak cevaplarında yanal kontrolcü %50 aşma yapmasına karşılık, sinüsoidal ray düzgünsüzlüğünde daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

KAYNAKLAR

- Atalay, A. E., (2009), "E43000 Lokomotifinin Modelinin Oluşturulması ve Titreşim Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.
- Chudzikiewicz, A., (2000), "Simulation of Rail Vehicle Dynamics in Matlab", *Vehicle System Dynamics*, 33:107-119.
- Eksin, İ. ve Yeşil, E., (2006), *Bulanık Mantık Modelleme ve Kontrol Ders Notları*, İTÜ, İstanbul.
- Evren, G., (2002), *Demiryolu*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Garg, V.K. ve Dukkipati, R.V., (1984), *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Pres Inc., Orlando-Florida.
- Gillespie, T.D., (1992), *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers Inc., Pennsylvania.
- Güçlü, R., (2004), "The Fuzzy-Logic Control of Active Suspension without Suspension-Gap Degeneration", *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 50(10), 462-468.
- Güçlü, R., (2005), "Fuzzy Logic Control of Seat Vibrations of a Non-Linear Full Vehicle Model", *Nonlinear Dynamics*, 40(1), 21-34.
- Iwnicki, S. (2006), *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Taylor&Francis Group, Florida.
- Karlström, A. ve Boström, A., (2006), "An Analytical Model For Train-Induced Ground Vibrations From Railways", *Journal of Sound and Vibration*, 292:221-241.
- Kırışık, R. ve Yüksel, Ş., (2003), "Demiryolu Ray Yapısının Titreşim Modeli", 11. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Ankara, 301-306.
- Lee, S.-Y. ve Cheng, Y.-C., (2005), "Hunting Stability Analysis of High-Speed Railway Vehicle Trucks on Tangent Tracks", *Journal of Sound and Vibration*, 2828:881-898.
- Lei, X. ve Noda, N.-A., (2002), "Analyses of Dynamic Response of Vehicle And Track Coupling Systems with Random Irregularity of Track Vertical Profile", *Journal of Sound and Vibration*, 258:147-165.
- Mangmang, G., Jiaying, P. ve Yongqiang L., (2004), "Computational Model of Coupling Vibration Analysis for Train-Track-Bridge System and Its Application Prospects", *Computational Mechanics WCCM VI in conjunction with APCOM'04*, 5-10 Sept. 2004, Beijing.
- Metin, M. (2007), "Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.
- Sezer, S. (2007), *Titreşim Analiz Metotları Ders Notları*, YTÜ, İstanbul.
- Sezer, S. ve Atalay, A., (2011), "Dynamic Modeling and Fuzzy Logic Control of Vibrations of a Railway Vehicle for Different Track Irregularities", *Simulation Modeling Practice and*

Theory, in Review.

Shabana, A., Zaazaa, K. ve Siguyama, H., (2008), Railroad Vehicle A Computational Approach, Taylor&Francis Group, Florida.

Shen, G. ve Pratt, I., (2001), “The development of A Railway Dynamics Modelling and Simulation Package to Carter For Current Industrial Trends”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 215,3;ProQuest Science Journals,167.

Şen, Z., (2004), Mühendislikte Bulanık Mantık ve Modelleme Prensipleri, Su Vakfı, İstanbul.

Wickens, A.-H., (1998), “The Dynamics of Railway Vehicles-From Stephenson to Carter”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 212,3;ProQuest Science Journals,209.

Xia, H., Zhang N. ve De Roeck G. (2003), “Dynamic Analysis of High Speed Railway Bridge Under Articulated Trains”, Computers and Structures, 81:2467-2478.

Yılmaz, D., (2004), “Bir Raylı Aracın Dinamik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.

Yılmaz, V. O., (2004), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., İstanbul.

Zadeh, L., (1965), “Fuzzy Sets”, Journal of Information and Control, 8,338-353.

İnternet Kaynakları

[1] <http://www.akademi.itu.edu.tr/hgercek/DosyaGetir/20003/dyolüstyapı2006.pdf>

[2] <http://www.tulomsas.com.tr/upload/dosya/77.pdf>

[3] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/simulink/>

[4] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/>

[5] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/fuzzy/>

[6] <http://www.tcdd.gov.tr/home/detail/?id=267>

EKLER**Ek-1 Parametreler ve bulanık mantık kontrolcüsünün ölçekleme çarpanları**

Devam eden TRENSİM projesi göz önüne alınarak, dinamik analiz modeli oluşturulan lokomotifin kabinine, bojilerine ve tekerlek-setlerine ait kütle, kütsel atalet momenti, çeşitli uzunluklar, yay ve sönüm katsayılarının gibi parametrelerin ekte sunulması uygun görülmemiştir.

Temas elipsi, sünme katsayıları, düşey ve yanal yöndeki hertz yay katsayıları, ray düzgünsüzlük fonksiyonları parametreleri ve diğer parametreler aşağıda verilmiştir.

$$\begin{array}{lll}
 a_e = 5.11 \times 10^{-3} \text{ m} & F_z = 98060 \text{ N} & ref_{\dot{y}_c} = 0 \text{ m} \\
 b_e = 8.12 \times 10^{-3} \text{ m} & g = 9.806 \text{ m/sn}^2 & ref_{\dot{y}_c} = 0 \text{ m/sn} \\
 \Delta y_{ort} = 1.138 \times 10^{-3} \text{ m} & G = 80 \times 10^9 \text{ N/m}^2 & R_1 = 0.61 \text{ m} \\
 \Delta z_{ort} = 2.744 \times 10^{-6} \text{ m} & k_{hy} = 8.6 \times 10^7 \text{ N/m} & R'_2 = 0.3 \text{ m} \\
 E_r = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2 & k_{hz} = 3.5 \times 10^{10} \text{ N/m} & \rho_{\text{çelik}} = 7900 \text{ kg/m}^3 \\
 E_w = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 & \lambda_{Yr1} = 75 \text{ m} & V = 120 \text{ km/h} \\
 f_{11} = 10.3318 \times 10^6 \text{ N} & \lambda_{Zr1} = 150 \text{ m} & Yr_1 = 0.15 \text{ m} \\
 f_{12} = 21831.1094 \text{ Nm}^2 & \lambda_{Zr2} = 100 \text{ m} & Zr_1 = 0.13 \text{ m} \\
 f_{22} = 229.3698 \text{ N} & N = 98060 \text{ N} & Zr_2 = 0.1 \text{ m} \\
 f_{33} = 12.2403 \times 10^6 \text{ N} & v_r = 0.3 & \\
 F_y = 98060 \text{ N} & v_w = 0.3 &
 \end{array}$$

Bulanık Mantık Yanal Kontrolcüsüne ait ölçekleme çarpanları:

$$G_{e_y} = 0.1845 \quad G_{\dot{e}_y} = 0.45 \quad G_{u_y} = 25000$$

Bulanık Mantık Düşey Kontrolcüsüne ait ölçekleme çarpanları:

$$G_{e_z} = 0.1845 \quad G_{u_z} = 50000$$

$$G_{\dot{e}_z} = 0.45$$

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.04.1983	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1998-2001	Tuzla Teknik Lisesi Bilgisayar Donanım
Lisans	2002-2007	Yıldız Üniversitesi Makine Fak. Makine Mühendisliği Bölümü,
Yüksek Lisans	2008-2011	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı