

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**E43000 LOKOMOTİFİNİN DİNAMİK MODELİNİN
OLUŞTURULMASI VE TİTREŞİM KONTROLÜ**

Makine Müh. Ali Erdem ATALAY

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER (Y.T.Ü.)

İSTANBUL, 2009

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

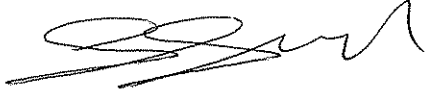
**E43000 LOKOMOTİFİNİN DİNAMİK MODELİNİN
OLUŞTURULMASI VE TİTREŞİM KONTROLÜ**

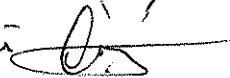
Makine Müh. Ali Erdem ATALAY

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER (Y.T.Ü.)

Y.Doç.Dr. İlker Murat KOÇ  (İTÜ)

Doç.Dr. Rahmi Güçlü 

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| SİMGE LİSTESİ | vi |
| KISALTIMA LİSTESİ | xiii |
| ŞEKİL LİSTESİ | xiv |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xx |
| ÖNSÖZ..... | xxi |
| ÖZET | xxii |
| ABSTRACT | xxiii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. RAYLI TAŞIMACILIK VE LOKOMOTİFLER..... | 7 |
| 2.1 Ulaşımın Tarihçesi..... | 7 |
| 2.2 Raylı Taşımacılığın Özellikleri..... | 8 |
| 2.3 Türkiye’de Raylı Taşımacılığın Tarihçesi | 9 |
| 2.3.1 Cumhuriyet Öncesi (1856-1922) | 9 |
| 2.3.2 Kurtuluş Savaşı Dönemi (1919–1923) | 10 |
| 2.3.3 Cumhuriyet Sonrası Dönem (1923–1950)..... | 11 |
| 2.3.3.1 Atılım Dönemi (1923–1940) | 11 |
| 2.3.3.2 Savaş Yılları ve Duraklama Dönemi (1940–1950) | 12 |
| 2.3.3.3 Karayolu Ağırlıklı Dönem (1950–) | 12 |
| 2.3.3.4 Günümüzde Yürütülen Yeni Projeler | 13 |
| 2.4 Raylı Taşımacılığa Geçiş ve Lokomotifler..... | 15 |
| 2.4.1 Buharlı Lokomotifler | 16 |
| 2.4.2 Dizel Lokomotifler | 17 |
| 2.4.3 Elektrikli Lokomotifler..... | 18 |
| 2.4.4 Gaz Türbin–Elektrikli Lokomotifler..... | 20 |
| 2.4.5 Maglev Lokomotifler..... | 21 |
| 2.4.6 Melez (Hybrid) Lokomotifler | 22 |
| 3. LOKOMOTİFİN DİNAMİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI | 23 |
| 3.1 Lokomotif Gövdesi ve Alt Elemanları | 26 |
| 3.1.1 Kabin..... | 27 |
| 3.1.2 Boji | 28 |
| 3.1.3 Tekerlek–seti..... | 30 |
| 3.2 Lokomotif Dinamiği Analiz Modeli..... | 31 |
| 3.3 Alt Elemanların Kütle ve Kütleesel Atalet Momentlerinin Tanımlanması..... | 36 |
| 3.4 Ray–Tekerlek İlişkileri | 36 |
| 3.4.1 Ray Yapısı ve Görevleri | 36 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.4.2 | Sünme Kuvvet ve Momentleri..... | 37 |
| 3.4.2.1 | Ray–Tekerlek Temas Elipsi..... | 40 |
| 3.4.2.2 | Sünme Kuvveti Katsayıları..... | 43 |
| 3.4.2.3 | Sünme Kuvvetleri ve Momenti Eşitlikleri..... | 44 |
| 3.4.3 | Rayın Düşey Yöndeki Esnekliği..... | 46 |
| 3.4.3.1 | Düşey Yöndeki I. Analiz Noktası..... | 49 |
| 3.4.3.2 | Düşey Yöndeki II. Analiz Noktası..... | 50 |
| 3.4.3.3 | Düşey Yöndeki III. Analiz Noktası..... | 51 |
| 3.4.3.4 | Düşey Yöndeki IV. Analiz Noktası..... | 52 |
| 3.4.3.5 | Düşey Yöndeki V. Analiz Noktası..... | 53 |
| 3.4.3.6 | Düşey Yöndeki Ortalama Yay Katsayısı Değerinin Hesaplanması..... | 54 |
| 3.4.4 | Rayın Yanal Yöndeki Esnekliği..... | 55 |
| 3.4.4.1 | Yanal Yöndeki I. Analiz Noktası..... | 55 |
| 3.4.4.2 | Yanal Yöndeki II. Analiz Noktası..... | 56 |
| 3.4.4.3 | Yanal Yöndeki III. Analiz Noktası..... | 57 |
| 3.4.4.4 | Yanal Yöndeki IV. Analiz Noktası..... | 58 |
| 3.4.4.5 | Yanal Yöndeki V. Analiz Noktası..... | 59 |
| 3.4.4.6 | Yanal Yöndeki Ortalama Yay Katsayısı Değerinin Hesaplanması..... | 60 |
| 3.5 | Hareketlerin Diferansiyel Denklemlerinin Oluşturulması..... | 60 |
| 3.5.1 | Lokomotifin Seyir Hızının Elde Edilmesi..... | 61 |
| 3.5.1.1 | Boylamsal Hareket için Lokomotif Dinamiği Modeli..... | 63 |
| 3.5.1.2 | Çekiş veya Dinamik Frenleme Kuvveti..... | 64 |
| 3.5.1.3 | Rampa Direnç Kuvveti..... | 65 |
| 3.5.1.4 | Yuvarlanma ve Aerodinamik Direnç Kuvvetleri Toplamı..... | 66 |
| 3.5.1.5 | Kurp Direnç Kuvveti..... | 67 |
| 3.5.1.6 | Pnömatik Frenleme Kuvveti..... | 68 |
| 3.5.1.7 | Kuvvet Dengesinden Lokomotif Hızına Geçiş..... | 68 |
| 3.5.2 | Lagrange Denklemi..... | 69 |
| 3.6 | Sistemin Toplam Enerji İfadelerinin Oluşturulması..... | 71 |
| 3.6.1 | Kinetik Enerji İfadesinin Oluşturulması..... | 71 |
| 3.6.2 | Potansiyel Enerji İfadesinin Oluşturulması..... | 71 |
| 3.6.3 | Sönüm Enerjisi İfadesinin Oluşturulması..... | 73 |
| 3.6.4 | Kabinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 76 |
| 3.6.4.1 | Kabinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 76 |
| 3.6.4.2 | Kabinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 76 |
| 3.6.4.3 | Kabinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 76 |
| 3.6.4.4 | Kabinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 77 |
| 3.6.4.5 | Kabinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 77 |
| 3.6.4.6 | Kabinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 78 |
| 3.6.5 | I.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 78 |
| 3.6.5.1 | I.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 78 |
| 3.6.5.2 | I.Bojinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 79 |
| 3.6.5.3 | I.Bojinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 79 |
| 3.6.5.4 | I.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 79 |
| 3.6.5.5 | I.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 80 |
| 3.6.5.6 | I.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 80 |
| 3.6.6 | II.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 81 |
| 3.6.6.1 | II.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 81 |
| 3.6.6.2 | II.Bojinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 81 |
| 3.6.6.3 | II.Bojinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 82 |
| 3.6.6.4 | II.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 82 |
| 3.6.6.5 | II.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması..... | 83 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 3.6.6.6 | II.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 83 |
| 3.6.7 | III.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 84 |
| 3.6.7.1 | III.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 84 |
| 3.6.7.2 | III.Bojinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 84 |
| 3.6.7.3 | III.Bojinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 84 |
| 3.6.7.4 | III.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 85 |
| 3.6.7.5 | III.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 86 |
| 3.6.7.6 | III.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 86 |
| 3.6.8 | I.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 86 |
| 3.6.8.1 | I.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 86 |
| 3.6.8.2 | I.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 87 |
| 3.6.8.3 | I.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 87 |
| 3.6.8.4 | I.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 88 |
| 3.6.8.5 | I.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 88 |
| 3.6.9 | II.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 89 |
| 3.6.9.1 | II.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 89 |
| 3.6.9.2 | II.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 89 |
| 3.6.9.3 | II.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 90 |
| 3.6.9.4 | II.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 90 |
| 3.6.9.5 | II.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 91 |
| 3.6.10 | III.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 91 |
| 3.6.10.1 | III.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 91 |
| 3.6.10.2 | III.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 92 |
| 3.6.10.3 | III.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 92 |
| 3.6.10.4 | III.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 92 |
| 3.6.10.5 | III.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 93 |
| 3.6.11 | IV.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 93 |
| 3.6.11.1 | IV.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 93 |
| 3.6.11.2 | IV.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 94 |
| 3.6.11.3 | IV.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 94 |
| 3.6.11.4 | IV.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 95 |
| 3.6.11.5 | IV.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 95 |
| 3.6.12 | V.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 96 |
| 3.6.12.1 | V.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 96 |
| 3.6.12.2 | V.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 96 |
| 3.6.12.3 | V.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 97 |
| 3.6.12.4 | V.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 97 |
| 3.6.12.5 | V.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 98 |
| 3.6.13 | VI.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması..... | 98 |
| 3.6.13.1 | VI.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 98 |
| 3.6.13.2 | VI.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 99 |
| 3.6.13.3 | VI.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 99 |
| 3.6.13.4 | VI.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 99 |
| 3.6.13.5 | VI.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması..... | 100 |
| 4. | AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ..... | 101 |
| 4.1 | Hareket Denklemine Kontrolcü Terimlerinin İlavesi..... | 101 |
| 4.2 | Bulanık Mantık Kontrol..... | 104 |
| 4.2.1 | Bulanık Sistemler..... | 104 |
| 4.2.2 | Bulanık Sistemlerin İç Yapıları ve Genel İşleyiş..... | 106 |
| 4.3 | Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı..... | 111 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3.1 | Yanal Kontrolcü Tasarımı | 111 |
| 4.3.2 | Düşey Kontrolcü Tasarımı..... | 118 |
| 5. | SİMÜLASYON UYGULAMALARI | 120 |
| 5.1 | I.Senaryo (Yanal Doğrultuda Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)..... | 120 |
| 5.2 | II.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Aynı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi) | 125 |
| 5.3 | III.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi) | 132 |
| 5.4 | IV.Senaryo (Yanal Doğrultuda ve Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)..... | 139 |
| 5.5 | Sünme Faktörünün IV. Senaryo Üzerindeki Etkileri..... | 146 |
| 5.6 | Kabin Titreşimlerinin Frekans Alanında Gözlemlenmesi | 150 |
| 5.7 | Kabin Titreşimlerinin Aktif Kontrolü..... | 151 |
| 5.7.1 | I.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü | 152 |
| 5.7.2 | II.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü | 155 |
| 5.7.3 | III.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü | 158 |
| 5.7.4 | IV.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü | 160 |
| 6. | SONUÇLAR..... | 162 |
| | KAYNAKLAR..... | 165 |
| | EKLER | 167 |
| | Ek 1. Lokomotif dinamik analiz modelinde kullanılan parametreler ve bulanık mantık kontrolcüsünün ölçekleme çarpanları | 168 |
| | Ek 2. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan UIC-60 rayının detay resmi | 169 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 170 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|-------------|---|
| a | İki ray arası genişliğin yarısı |
| a_e | Ray–tekerlek arasında oluşan Hertz temas elipsinin y eksenindeki yarı uzaklığı |
| $a_{1,2,3}$ | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotifin,I. ve II.vagonun ivmesi |
| a_{loc} | Lokomotifin ivmesi |
| α | Rampanın eğim açısı |
| α_y | Yanal sünme ifadesi, ray ile tekerlek temas düzlemi arasındaki açı |
| A | Taşıtın rüzgar yönüne dik duran projeksiyon alanı |
| A_i | Öncül kısımdaki giriş değişkenini niteleyen dilsel değişken |
| b_e | Ray–tekerlek arasında oluşan Hertz temas elipsinin x eksenindeki yarı uzaklığı |
| b_w | Ray–tekerlek temas noktasının düşey eksene olan y yönündeki mesafesi |
| b_1 | Tekerlek–seti eksenini ile z eksenini doğrultusunda çalışan I.süspansiyonun eksenini arası y yönündeki mesafe |
| b_2 | Boji eksenini ile z eksenini doğrultusunda çalışan II.süspansiyonun eksenini arası y yönündeki mesafe |
| B_i | Soncul kısımdaki çıkış değişkenini niteleyen dilsel değişken |
| B_b | Pnömatik frenleme oranı |
| c | Kayıpsız yuvarlanmalı teorik ileri yöndeki lokomotif hızı |
| c_1 | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotif ile I.vagon arasındaki bağlantının sönüm katsayısı |
| c_{1x} | Tekerlek–seti ile boji arasındaki, x eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun sönüm katsayısı |
| c_{1y} | Tekerlek–seti ile boji arasındaki, y eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun sönüm katsayısı |
| c_{1z} | Tekerlek–seti ile boji arasındaki, z eksenini 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 eksenini doğrultusunda çalışan, II.süspansiyonun sönüm katsayısı |
| c_{2z} | Boji ile kabin arasındaki, z eksenini 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 |
| $C_{11,22,23,33}$ | Kalker’in sünme denklemlerindeki katsayılar |
| d | Uzayın süreksiz olmaya başladığı nokta |
| d_p | Tekerlek–seti eksenini ile x eksenini doğrultusunda çalışan I.süspansiyonun eksenini arası y yönündeki mesafe |
| d_s | Boji eksenini ile x eksenini doğrultusunda çalışan II.süspansiyonun eksenini 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 |
| $\Delta y_{2,3,4}$ | Ray elemanı üzerindeki II., III., IV.analiz noktalarındaki yanal yer değiştirme değerleri |
| Δy_{ort} | Ray elemanı üzerindeki yanal ortalama yer değiştirme değeri |
| $\Delta z_{2,3,4}$ | Ray elemanı üzerindeki II., III., IV.analiz noktalarındaki düşey yer değiştirme değerleri |
| Δz_{ort} | Ray elemanı üzerindeki düşey ortalama yer değiştirme değeri |
| $e_{y1,y2,y3}$ | I., II., III.yanal kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hata değeri |
| $e_{Y1,Y2,Y3}$ | I., II., III.yanal kontrolcü için birincil girişler |
| $\dot{e}_{y1,y2,y3}$ | I., II., III.yanal kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hatanın türevi |
| $\dot{e}_{z1,\dots,z6}$ | I., ..., VI.düşey kontrolcü için ikincil girişler |
| $e_{z1,\dots,z6}$ | I., ..., VI.düşey kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hata değeri |
| $e_{Z1,\dots,Z6}$ | I., ...,VI.düşey kontrolcü için birincil girişler |
| $\dot{e}_{z1,\dots,z6}$ | I., ...,VI.düşey kontrolcünün lokomotif kabinine bağlandığı noktanın hatanın türevi |
| $\dot{e}_{Y1,Y2,Y3}$ | I., II., III.yanal kontrolcü için ikincil girişler |
| E_d | Sönüm enerjisi |
| E_k | Kinetik enerji |
| E_p | Potansiyel enerji |
| E_r | Ray malzemesinin elastiklik modülü |
| E_w | Tekerlek malzemesinin elastiklik modülü |
| f_{11} | Yanal doğrultudaki sünme katsayısı |
| f_{12} | Yanal / yanal sapma doğrultularındaki sünme katsayısı |

| | |
|--------------------|--|
| f_{22} | Yanal sapma doğrultusundaki sünme katsayısı |
| f_{33} | Boylamsal doğrultudaki sünme katsayısı |
| F | Uzaydaki bulanık küme |
| $F(t)$ | Zamanın fonksiyonu olarak değişen zorlayıcı dış kuvvet |
| $F_{Yr1}(t)$ | Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonu |
| $F_{Zr1}(t)$ | Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonu |
| $F_{Zr2}(t)$ | Zamanın fonksiyonu olarak değişen ve I.tekerlek–setine düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük 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 |
| $F_{g1,g2,g3}$ | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotifin, I.vagona, II.vagona etki eden rampa direnç kuvveti |
| φ_c | Lokomotifin kafa vurma (y ekseninde dönme) yönündeki serbestlik derecesi |
| $\varphi_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yalpalama yönündeki serbestlik derecesi |
| F_{Lxw1} | Sol tekerlek için boylamsal sünme teriminin en genel ifadesi |
| F_{Lyw1} | 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 |
| $F_{r1,r2,r3}$ | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotifin, I.vagona, II.vagona etki eden yavaşlatıcı kuvvet |
| F_{fdb} | Lokomotifin çekiş ve dinamik fren kuvveti |
| F_{xw1} | Tekerlek–seti için boylamsal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali |
| F_y | Ray elemanına uygulanan yanal statik kuvvet |
| F_{yw1} | Tekerlek–seti için yanal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali |
| F_z | Ray elemanına uygulanan düşey statik kuvvet |
| g | Yerçekimi ivmesi |
| G | Tekerlek–ray ortak kayma modülü |
| G_{e_y} | Yanal hatalar için giriş ölçekleme çarpanı |

| | |
|-------------------|--|
| $G_{\dot{e}_y}$ | Yanal hataların türevleri için giriş ölçekleme çarpanı |
| G_r | Ray malzemesinin kayma modülü |
| G_{u_y} | Yanal kontrol kuvvetleri için çıkış ölçekleme çarpanı |
| G_w | Tekerlek malzemesinin kayma modülü |
| γ | Tekerleğin konikliği |
| h_1 | Tekerlek–seti eksenini 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_{xc} | Kabinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| $J_{xt1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| $J_{xw1,\dots,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin yalpalama hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| J_{yc} | Kabinin kafa vurma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| $J_{yt1,2,3}$ | I., II., III.bojinin kafa vurma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| J_{zc} | Kabinin yanal sapma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| $J_{zt1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yanal sapma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| $J_{zw1,\dots,6}$ | I., ...,VI.tekerlek–setinin yanal sapma hareketine karşı koyan ve kütle merkezine göre hesaplanan kütleli atalet momenti |
| k_{hy} | Ray elemanının yanal yöndeki yay katsayısı (Hertz–y) |
| k_{hz} | Ray elemanının düşey yöndeki yay katsayısı (Hertz–z) |
| k_l | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotif ile I.vagon arasındaki bağlantının yay katsayısı |
| k_{lx} | Tekerlek–seti ile boji arasındaki, x eksenini doğrultusunda çalışan, I.süspansiyonun yay katsayısı |
| k_{ly} | 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 | Herhangi bir dinamik sistemin yay katsayısı |
| $K_{1,2,3,4}$ | Ray–tekerlek temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin hesaplanmasında kullanılan ara işlemlerdeki bazı katsayılar |
| K_i | Bulanık mantık sistemindeki i.kural |
| ξ_x | Boylamsal doğrultudaki sünme oranı |
| ξ_y | Yanal doğrultudaki sünme oranı |
| ξ_{sp} | Yanal sapma doğrultusundaki sünme oranı |
| 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 | Ray–tekerlek temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin hesaplanmasında kullanılan iki Hertz katsayısından ilki |
| $m_{1,2,3}$ | Boylamsal tren dinamik modelinde lokomotifin,I. ve II.vagonun kütlesi |
| M | Herhangi bir dinamik sistemin kütlesi |
| M_c | Kabinin kütlesi |
| M_{loc} | Lokomotifin kütlesi |
| M_{Lzw1} | Sol tekerlek için yanal sapma sünme teriminin en genel ifadesi |
| $M_{t1,2,3}$ | I., II. ve III.bojinin kütlesi |
| $M_{w1,\dots,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin kütlesi |
| M_{zw1} | Tekerlek–seti için yanal sapma sünme teriminin sadeleştirilmiş hali |
| μ_d | Tekerlek–ray arasındaki dinamik sürtünme katsayısı |
| $\mu_F(u)$ | Üyelik fonksiyonu |

| | |
|---------------------|---|
| n | Ray–tekerlek temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin hesaplanmasında kullanılan iki Hertz katsayısından ikincisi |
| N | Ray–tekerlek temasındaki toplam normal kuvvet |
| $N_{t/db}$ | Hız veya dinamik fren kademesi |
| v | İleri yöndeki gerçek lokomotif hızı |
| v_r | Ray malzemesinin poisson oranı |
| v_w | Tekerlek malzemesinin poisson oranı |
| P | Pnömatik fren silindirin çalışma basıncı |
| P_{maks} | Lokomotifin maksimum çekiş gücü |
| ψ | Tekerlek ile ray arasındaki yanal sapma açısı farkı |
| ψ_c | Lokomotifin yanal sapma (z eksenini etrafında dönme) yönündeki serbestlik derecesi |
| $\psi_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yanal sapma yönündeki serbestlik derecesi |
| $\psi_{w1,...,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin yanal sapma yönündeki serbestlik derecesi |
| q_j | Genelleştirilmiş koordinatlar (Serbestlik dereceleri) |
| Q_j | Genelleştirilmiş kuvvetler (Zorlayıcı dinamik kuvvetler, Kontrol kuvvetleri) |
| r | Bulanık kural adedi |
| ref_{Y_c} | Lokomotifin yanal yöndeki yer değiştirme hatası için referans değer |
| $ref_{\dot{Y}_c}$ | 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 |
| $\rho_{çelik}$ | Çeliğin özkütlesi |
| θ | K_3 ve K_4 'e bağlı açı değeri |
| θ_c | Lokomotifin yalpalama (x eksenini etrafında dönme) yönündeki serbestlik derecesi |
| $\theta_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yalpalama yönündeki serbestlik derecesi |
| $\theta_{w1,...,6}$ | 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 |
| $U_{Y1,2,3}$ | 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_{Yr1} | Yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı |
| ω_{Zr1} | Düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı |
| ω_{Zr2} | Düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük fonksiyonunun açısal frekansı |
| \tilde{x} | Öncül kısımdaki giriş değişkenlerince tanımlanan koşul |
| X_c | Lokomotifin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi |
| $X_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi |
| $X_{w1,\dots,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin boylamsal yöndeki serbestlik derecesi |
| \tilde{y} | Soncul kısımdaki çıkış değişkenlerince tanımlanan sonuç |
| Y_c | Lokomotifin yanal yöndeki serbestlik derecesi |
| Y_{r1} | Yanal doğrultuda etki eden ray düzgünlük fonksiyonunun genliği |
| $Y_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin yanal yöndeki serbestlik derecesi |
| $Y_{w1,\dots,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin yanal yöndeki serbestlik derecesi |
| Z_c | Lokomotifin düşey yöndeki serbestlik derecesi |
| Z_{r1} | Düşey doğrultuda etki eden sol ray düzgünlük fonksiyonunun genliği |
| Z_{r2} | Düşey doğrultuda etki eden sağ ray düzgünlük fonksiyonunun genliği |
| $Z_{t1,2,3}$ | I., II., III.bojinin düşey yöndeki serbestlik derecesi |
| $Z_{w1,\dots,6}$ | I., ..., VI.tekerlek–setinin düşey yöndeki serbestlik derecesi |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|--------|--|
| AC | Alternative Current |
| BMK | Bulanık Mantık Kontrol |
| DC | Direct Current |
| GTEL | Gaz Türbin-Elektrikli Lokomotif |
| HP | Horse Power |
| LSM | Linear Synchronous Motor |
| MAGLEV | Magnetic Levitation |
| MAM | Marmara Araştırma Merkezi (Tübitak) |
| TCDD | Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları |
| TGV | Train à Grande Vitesse |
| UPR | Union Pacific Railroads |

ŞEKİL LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Kas gücü ile ulaşım | 7 |
| Şekil 2.2 TCDD Türkiye demiryolları haritası | 13 |
| Şekil 2.3 Ankara–Eskişehir hızlı tren uygulaması | 15 |
| Şekil 2.4 Marmaray projesi | 15 |
| Şekil 2.5 Stephenson’un rocket adlı lokomotifi | 17 |
| Şekil 2.6 EMD GP50 dizel–elektrik’li lokomotifi | 18 |
| Şekil 2.7 TGV elektrikli treni 574.8km/h ile hız rekorunu kırarken | 19 |
| Şekil 2.8 UPR’de hizmet veren bir gaz–türbin elektrikli lokomotifi | 21 |
| Şekil 2.9 JR-Maglev MLX01 treni | 22 |
| Şekil 3.1 Haydarpaşa garında E43000 lokomotifi | 23 |
| Şekil 3.2 E43000 lokomotifinin ana karakteristikleri | 24 |
| Şekil 3.3 E43000 lokomotifinin kesiti | 25 |
| Şekil 3.4 Lokomotifin yandan görünüşü | 25 |
| Şekil 3.5 Modellenen lokomotif gövdesi ve alt elemanları montajı..... | 26 |
| Şekil 3.6 Kabin ve serbestlik dereceleri | 27 |
| Şekil 3.7 Modellenen boji ve tekerlek–seti montajı | 28 |
| Şekil 3.8 I.Boji ve serbestlik dereceleri | 28 |
| Şekil 3.9 Dönüş yapan lokomotifte bojilerin yanal sapma açıları..... | 29 |
| Şekil 3.10 I.Tekerlek–seti ve serbestlik dereceleri | 30 |
| Şekil 3.11 Modellenen tekerlek–setinin boji ile montajını sağlayan ara eleman | 31 |
| Şekil 3.12 Lokomotif dinamiği analiz modeli | 32 |
| Şekil 3.13 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji düşey bağlantı detayları | 33 |
| Şekil 3.14 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji düşey bağlantı detayları..... | 33 |
| Şekil 3.15 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları..... | 34 |
| Şekil 3.16 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları | 34 |
| Şekil 3.17 Dinamik analiz modeline perspektif bakış kesiti | 35 |
| Şekil 3.18 Ray ve üst yapı detayı | 37 |
| Şekil 3.19 İki rijit yapının birbiri üzerinde yuvarlanma durumu | 38 |
| Şekil 3.20 Sünmeler ve sünme kuvvetleri | 39 |
| Şekil 3.21 Ray üzerinde yuvarlanan bir tekerlekteki sünmeler | 40 |
| Şekil 3.22 Tekerlek ve ray için yuvarlanma yarıçapları | 41 |
| Şekil 3.23 Temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin program ile hesaplanması | 42 |
| Şekil 3.24 Johnson ve Vermulen’e göre temas elipsi | 43 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.25 Tekerlek–setinin temas açıları | 44 |
| Şekil 3.26 Demiryolu üst yapısının dinamik modeli | 46 |
| Şekil 3.27 Tekerleğin ray üzerindeki perspektif görünüşü..... | 47 |
| Şekil 3.28 Tekerleğin ray üzerindeki perspektif görünüşü..... | 48 |
| Şekil 3.29 Ray parçasının sonlu elemanlara bölünmüş hali | 48 |
| Şekil 3.30 I.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 49 |
| Şekil 3.31 I.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme..... | 50 |
| Şekil 3.32 II.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri | 50 |
| Şekil 3.33 II.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme..... | 51 |
| Şekil 3.34 III.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 51 |
| Şekil 3.35 III.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme | 52 |
| Şekil 3.36 IV.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 52 |
| Şekil 3.37 IV.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme | 53 |
| Şekil 3.38 V.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri | 53 |
| Şekil 3.39 V.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme | 54 |
| Şekil 3.40 I.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri | 55 |
| Şekil 3.41 I.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme..... | 55 |
| Şekil 3.42 II.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 56 |
| Şekil 3.43 II.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme | 56 |
| Şekil 3.44 III.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 57 |
| Şekil 3.45 III.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme..... | 57 |
| Şekil 3.46 IV.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri | 58 |
| Şekil 3.47 IV.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme..... | 58 |
| Şekil 3.48 V.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri..... | 59 |
| Şekil 3.49 V.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme | 59 |
| Şekil 3.50 Boylamsal tren dinamik modeli | 61 |
| Şekil 3.51 Boylamsal hareket dinamik modeli | 63 |
| Şekil 3.52 E43000 lokomotifinin motor performans eğrileri | 64 |
| Şekil 3.53 E43000 lokomotifinin dinamik frenleme performansı eğrileri | 65 |
| Şekil 3.54 Lokomotife etki eden rampa direnç kuvveti | 65 |
| Şekil 3.55 Fransız ekspres yük taşıma treni için yuvarlanma ve aerodinamik direnç kuvveti toplamının seyir hızına göre değişimi | 67 |
| Şekil 4.1 Keskin, aralık ve bulanık fonksiyonlar | 105 |
| Şekil 4.2 Bir bulanık sistemin içyapısı | 106 |
| Şekil 4.3 Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları | 108 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.4 Ağırlık merkezi yöntemi ile durulaştırma | 110 |
| Şekil 4.5 Lokomotif ile bojiler arasındaki yanal kontrolcülerdeki hata durumları | 111 |
| Şekil 4.6 BMK algoritmasında geri besleme ve boji bağlantılarındaki yer değiştirme hatalarını hesaplayan simulink modeli..... | 113 |
| Şekil 4.7 BMK algoritmasında geri besleme ve boji bağlantılarındaki hız hatalarını hesaplayan simulink modeli..... | 113 |
| Şekil 4.8 BMK algoritmasının simulink modeli..... | 114 |
| Şekil 4.9 Bulanık mantık kontrolcüsünün simulink modeli | 114 |
| Şekil 4.10 Yanal yer değiştirme girişleri için üyelik fonksiyonları..... | 116 |
| Şekil 4.11 Yanal hız girişleri için üyelik fonksiyonları..... | 116 |
| Şekil 4.12 Yanal kontrolcü çıkışlarının üyelik fonksiyonları..... | 117 |
| Şekil 4.13 Yanal yer değiştirme, hız girişleri ve kontrolcü çıkışının üyelik fonksiyonlarının yüzey gösterimi..... | 117 |
| Şekil 4.14 Lokomotif ile bojiler arasındaki dişey kontrolcülerdeki hata durumları..... | 118 |
| Şekil 5.1 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu..... | 120 |
| Şekil 5.2 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 121 |
| Şekil 5.3 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısız titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri..... | 121 |
| Şekil 5.4 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri..... | 122 |
| Şekil 5.5 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısız titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri..... | 122 |
| Şekil 5.6 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 123 |
| Şekil 5.7 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısız titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri..... | 123 |
| Şekil 5.8 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal titreşimlerin yer değiştirmeleri..... | 124 |
| Şekil 5.9 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısız titreşimlerinin yer değiştirmeleri..... | 124 |
| Şekil 5.10 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal sapma açısız titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 125 |
| Şekil 5.11 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu | 126 |
| Şekil 5.12 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal | |

| | |
|---|-----|
| titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 127 |
| Şekil 5.13 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 127 |
| Şekil 5.14 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 128 |
| Şekil 5.15 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 128 |
| Şekil 5.16 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 129 |
| Şekil 5.17 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 130 |
| Şekil 5.18 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri | 131 |
| Şekil 5.19 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısıl titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 131 |
| Şekil 5.20 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan kafa vurma açısıl titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 132 |
| Şekil 5.21 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu | 133 |
| Şekil 5.22 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 134 |
| Şekil 5.23 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 134 |
| Şekil 5.24 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 135 |
| Şekil 5.25 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 135 |
| Şekil 5.26 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 136 |
| Şekil 5.27 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 137 |
| Şekil 5.28 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri | 138 |
| Şekil 5.29 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısıl titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 138 |
| Şekil 5.30 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve | |

| | |
|---|-----|
| kabinde oluşan kafa vurma açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 139 |
| Şekil 5.31 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 140 |
| Şekil 5.32 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısai titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 140 |
| Şekil 5.33 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 141 |
| Şekil 5.34 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısai titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 141 |
| Şekil 5.35 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri..... | 142 |
| Şekil 5.36 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısai titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri | 143 |
| Şekil 5.37 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanai titreşimlerin yer değiştirmeleri | 144 |
| Şekil 5.38 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri | 144 |
| Şekil 5.39 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 145 |
| Şekil 5.40 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan kafa vurma açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 145 |
| Şekil 5.41 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanai sapma açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri | 146 |
| Şekil 5.42 Sünme faktörünün kabinin doğrusal titreşimlerine etkileri | 147 |
| Şekil 5.43 Sünme faktörünün kabinin açısai titreşimlerine etkileri..... | 147 |
| Şekil 5.44 Sünme faktörünün I.bojinin doğrusal titreşimlerine etkileri | 148 |
| Şekil 5.45 Sünme faktörünün I.bojinin açısai titreşimlerine etkileri | 148 |
| Şekil 5.46 Sünme faktörünün I.tekerlek–setinin doğrusal titreşimlerine etkileri | 149 |
| Şekil 5.47 Sünme faktörünün I.tekerlek–setinin açısai titreşimlerine etkileri..... | 149 |
| Şekil 5.48 Yanai ray düzgünsüzlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları | 150 |
| Şekil 5.49 Düşey ray düzgünsüzlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları | 151 |
| Şekil 5.50 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 152 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 5.51 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açılal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 152 |
| Şekil 5.52 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 153 |
| Şekil 5.53 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 153 |
| Şekil 5.54 Yanal ray düzgünlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları | 154 |
| Şekil 5.55 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 155 |
| Şekil 5.56 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açılal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 155 |
| Şekil 5.57 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 156 |
| Şekil 5.58 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 156 |
| Şekil 5.59 Düşey ray düzgünlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları | 157 |
| Şekil 5.60 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 158 |
| Şekil 5.61 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açılal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 158 |
| Şekil 5.62 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 159 |
| Şekil 5.63 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 159 |
| Şekil 5.64 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 160 |
| Şekil 5.65 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açılal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri..... | 160 |
| Şekil 5.66 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri..... | 161 |
| Şekil 5.67 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri | 161 |
| Şekil Ek 2.1 UIC-60 demiryolu rayı detay resmi | 169 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | |
|---|-----|
| Çizelge 3.1 Hertz'in m ve n katsayıları | 42 |
| Çizelge 3.2 Kalker'in sünme denklemlerindeki C_{ij} katsayıları | 44 |
| Çizelge 4.1 Bulanık kontrolcünün gelişmesinde pay sahibi olan önemli çalışmalar | 104 |
| Çizelge 4.2 Sistemlerdeki belirgin ve bulanık bilgiler | 106 |
| Çizelge 4.3 BMK kural tablosu | 115 |

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.

Bu tezin hazırlanmasında maddi ve manevi yardımları ile en kötü anlarda bile çalışma azmimin devamını sağlayan değerli insanlara;

Yrd. Doç. Dr. Semih Sezer: Bilgisi ile teze yön verdiği, bilimsel açılarından bakabilme yetisini benimle paylaştığı, her zaman en iyiye ulaşma fikri ile verdiği destekleri ve ayrıca mesai saatleri dışında da bana karşı gösterdiği sonsuz özveri, anlayış ve sabrı için,

Prof. Dr. Abdülkerim Kar: Tren dinamiği konusundaki engin tecrübe ve bilgilerini paylaştığı, çalışmalarına verdiği destek ve ayırdığı değerli zamanları için,

Arş. Gör. Hakan Yazıcı, Arş. Gör. Muzaffer Metin, Arş. Gör. Şaban Çetin, Arş. Gör. Mert Eğilmez: Çalışmalarım süresince umutsuzluğa kapıldığım konularda verdikleri teorik destek, gösterdikleri sabır ve ayırdıkları değerli zamanları için,

OMCO İstanbul Kalıp San. ve Tic. A.Ş. Teknik Müdürü Dr. Hakan Küçük: Mesleğe adım attığım günden buyana yüksek lisans tezimin sonlanmasına dek çalışmalarım için gerekli her türlü manevi yardımları, paylaştığı mesleki bilgi ve tecrübeleri için,

Tübitak MAM Yönetimi, Bilişim Teknolojileri Enstitüsü Yönetimi ve de özellikle Prof. Dr. Ercan Öztemel, Dr. Veysi Öztürk, Arş. Müh. Ferhat Şükrü Rende, Arş. Müh. Ömer Arar: Yürüttükleri proje ve tez çalışmam süresince karşılıklı olarak gerekli bilgilerin paylaşılmasında gösterdikleri cömertlik ve proje toplantılardaki misafirperverlikleri için,

Yük. Müh. Serdar Ateş: Problemlere farklı açılarından bakarak çalışmalarına verdiği destekler ve ayırdığı değerli zamanları için,

Yük. Müh. Ufuk Erkan: Beraber ilerlediğimiz lisans ve yüksek lisans öğrenimimiz boyunca en kötü anlarda verdiği destek, mesleki ve manevi her türlü kazanım ve büyük dostluğumuz için,

Çalışma arkadaşlarım: İş hayatı ile yüksek lisans öğreniminin gereklerini yerine getirirken bana gösterdikleri anlayış ve her türlü manevi yardımları için,

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

ÖZET

Raylı taşımacılık, güvenli, konforlu ve hızlı bir seyahat sunmasından ötürü günümüzde en çok rağbet edilen bir ulaşım seçeneği olmuştur. Yeni teknolojilerin uygulanması ile erişilebilen seyir hızları artmıştır. Yüksek seyir hızları, ray düzgünlüklerinden kaynaklanan ve etkilerini en çok kabinde hissettiren titreşim problemini ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden yolcu ve malın konforlu ve güvenli bir şekilde taşınabilmesi önemli bir mühendislik problemi haline gelmiştir.

Tübitak-MAM'da yürütülen TRENSİM projesi kapsamında yurdumuzda birçok şehirler arası hatta hizmet veren ve bir elektrikli ana hat lokomotifini olan Toshiba-E43000 lokomotifinin simülatörü tasarlanıp imal edilecektir. Projenin amacı, makinistleri her türlü kötü senaryo ile önceden yüzleştirerek çeşitli eğitimler verilmesidir. Böylece hiçbir kaza riski olmayan bilgisayar ortamında makinist, bilgisini arttıracak ve sürüş becerilerini geliştirebilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında, TRENSİM projesinde sözü geçen Toshiba-E43000 lokomotifinin titreşim analizinin yapılması amacı ile dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. 54 serbestlik dereceli lokomotif modelinin oluşturulmasında her serbestlik derecesi için diferansiyel denklemler ayrı ayrı çıkartılmıştır. Ayrıca, seyir hızına etki eden faktörler detaylı olarak anlatılmış ve bu amaçla boylamsal dinamik modeli de oluşturulmuştur. Ray-tekerlek temas problemine; sünme faktörlerine detaylı olarak değinilmiş ve rayların elastiklikleri konusunda çeşitli sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Dinamik analiz modeli ve titreşim analizleri Matlab-Simulink yazılımında gerçekleştirilmiştir. Çeşitli ray düzgünlük fonksiyonları bozucu etki olarak sisteme girilmiştir. Yanal ve düşey ray düzgünlüklerinden kaynaklanan titreşim hareketleri simüle edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda kabinin yanal ve düşey titreşimlerini kontrol eden aktif titreşim kontrolcüsü tasarlanmıştır. Aktif titreşim kontrolü için Bulanık Mantık Kontrol algoritması kullanılmıştır. Kontrolcü tasarımında, Matlab-Simulink yazılımının bir modülü olan Fuzzy-Logic Toolbox kullanılmıştır. Titreşim analizleri zaman ve frekans bazında yapılmış ve aktif titreşim kontrolcüsünün performansı kontrolcüsüz durum ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Raylı taşıtlar, raylı taşıt dinamiği, ray-tekerlek temas problemi, sünme faktörleri, aktif titreşim kontrolü, bulanık mantık kontrol.

ABSTRACT

Rail transportation has been the most demanded transport option offering safety, speed and comfort. In parallel with implementation of new technologies, the cruising speed has also increased. High cruising speed has revealed the effects of vibrations, caused by rail disturbances, on vehicle cabins and passengers. Hence, safe and comfortable transportation of passengers and goods, has become an important engineering problem needs to be solved.

Within the national train–simulator project TRENSİM, carried out at TÜBİTAK–MAM, Toshiba–E43000, electrical locomotive serving as a commonly used locomotive in Turkey’s domestic lines, is selected to be the design reference. The aim of the project is to face machinists with worst–case cyber scenarios. With the help of these cyber scenarios the machinist can improve his knowledge and driving skills without any risk of a fatal accident.

In the context of this thesis, dynamical model of Toshiba–E43000 locomotive was established to perform vibration analyses and observing displacements, accelerations. Locomotive model consists of 54 degree of freedom which are briefly defined by differential equations. In addition, the factors affecting cruising speed described in detail and the longitudinal dynamic model was created for this purpose. Rail–wheel contact problem, creepage factors, elasticity of rails were also described in detail supported with various finite element analyses. Establishing dynamic analysis model and vibration analyses were carried out in Matlab–Simulink software domain. Various rail disruptive functions were assigned as input of the system.

Vibrations caused by lateral and vertical rail disruptive functions were simulated and controlled. Fuzzy Logic Control algorithm was used for developing the active control of vibration. Fuzzy–Logic Toolbox, a module of Matlab–Simulink software, was used in the design of active controllers. Vibration analyses were held in time and frequency domains and the performance of the designed controller was compared with uncontrolled status.

Keywords: Rail vehicles, rail vehicle dynamics, wheel–rail contact problem, creepage factors, active control of vibrations, fuzzy logic control.

1. GİRİŞ

Raylı taşıtlarla ulaşım, ilk lokomotifin icat edildiği yıllarda çok güvenli ve konforlu olmasa da günümüzde en güvenli ve konforlu ulaşım seçeneklerinden birisidir. Raylı taşımacılık, 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. Sağladığı birçok üstünlüğüyle demiryolu taşımacılığı, dünyada en çok tercih edilen taşımacılık seçeneğidir ve demiryolu taşımacılığının ülkemiz açısından da önemi büyüktür. Son yıllarda yapılan ve yapılması planlanan yeni projelerle demiryolu hatlarımızın daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Bu sayede ülkemiz insanların daha güvenli, konforlu ve ucuz seyahat etmeleri sağlanacaktır.

Günümüz raylı taşıtlarının seyir hızlarını ilk raylı taşıtlarla kıyaslırsak neredeyse on kat daha hızlı olduğunu görebiliriz. Bu gelişimin büyük bölümünün son elli yılda, özellikle elektronik ve bilgisayar bilimlerindeki teknolojik gelişmeler neticesinde olduğunu söyleyebiliriz. Bugün gelişmiş ülkelerde, bu gelişmeler sayesinde demiryolu taşıtları hava taşıtları ile yarışır duruma gelmiştir. Yüksek seyir hızlarının elde edilmesi, taşıtlardaki teknolojik gelişmeler kadar ray sistemlerinin de gelişmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu açıdan raylı sistemler, raylı taşıt ve ray sistemi bütünü olarak düşünülmelidir. Günümüz demiryolu araçlarının büyük kütleli ve yüksek seyir hızlı oldukları düşünüldüğünde ortaya çözülmesi gereken önemli bir problem çıkmaktadır. Raylı taşıt ve ray sisteminin etkileşiminden ortaya çıkan titreşim problemi, çoklu girişli zor bir mühendislik problemidir. Bu zor problemin çözülmesi ile, hem taşıt dinamiği üzerindeki olumsuz etkiler, yolcu ve/veya taşınan malların güvenliği ve konforu üzerindeki olumsuz etkiler hem de çevreye olan olumsuz etkiler azaltılacaktır.

Raylı taşıt ve ray sistemi etkileşiminden ortaya çıkan titreşim probleminin anlaşılması, ancak sonuçların hassas olarak elde edilmesi ile olabilir. Sistem girişlerinin olabildiğince fazla olması kadar sistem çıkışlarının da bir o kadar fazla olması ile hassas sonuçlar elde edilebilir. Bu bakış açısı ile ortaya konan tez çalışmasında, ülkemiz şehirlerarası ana hatlarında hizmet veren Toshiba–E43000 elektrikli lokomotifin dinamik analiz modeli oluşturulmuştur. Tübitak MAM–Bilişim Teknolojileri Enstitüsü tarafından yürütülen Sanal Ortamda Tren Sürüş Eğitimleri için Milli Benzetim Teknolojilerinin Geliştirilmesi (TRENSİM) projesi kapsamında ele alınan E43000 lokomotifi bu yüzden baz alınmıştır.

Bu çalışmada, E43000 lokomotifinin dinamik modeli oluşturulmuştur. Lokomotifin dinamik modeli oluşturulurken; kabin, 3 adet boji ve her bojide 2 adet tekerlek seti olmak üzere toplam

6 adet tekerlek–seti ile çoklu gövde tasarımı yapılmıştır. Her alt elemanın kartezyen koordinatlarda ötelenmesi ve bu koordinat eksenleri etrafında dönebilmesi olasılığı düşünülerek (tekerlek–setlerinin yanal eksen etrafında dönebilmesi ihmal edilerek) toplam 54 serbestlik derecesi elde edilmiştir. Oluşturulan modelde ray tekerlek temas probleminin etkisi de göz önüne alınarak sünme faktörleri ve rayın yanal ve düşey doğrultulardaki elastikiyetleri de hesaba katılmıştır. Sistem girişi olarak yanal ve düşey ray düzgünsüzlük fonksiyonları seçilmiştir. Simülasyonlar Matlab–Simulink yazılımı ortamında yapılmıştır. Dört adet değişik simülasyon senaryosu oluşturularak kabin titreşimleri gözlemlenmiştir. Kabin titreşimlerini minimize etme amacı ile de yanal ve düşey doğrultularda çalışan aktif titreşim kontrolcileri tasarlanmıştır. Aktif titreşim kontrolü algoritması olarak “Bulanık Mantık Kontrol” algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar zaman ve frekans bazında incelenerek kontrolcünün performansı kontrolsüz sonuçlara göre kıyaslanmıştır. Zaman bazında bastırılabilen yer değiştirme ve ivme değerleri frekans bazında da başarı ile bastırılabilmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde, raylı taşımacılık ve lokomotiflerden bahsedilmiştir. Türkiye’de raylı taşımacılığın gelişim sürecine değinilerek günümüzde yürütülen projelerden bahsedilmiştir. Ayrıca lokomotifler tiplerine göre sıralanmış ve genel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

3. Bölümde ise lokomotifin dinamik modeli oluşturulmuştur. Dinamik modeli oluşturulan E43000 lokomotifinin teknik özelliklerinden bahsedilmiştir. Lokomotifi oluşturan kabin, boji ve tekerlek–setlerinin fonksiyonları ve serbestlik dereceleri tanımlanmıştır. Daha sonra ray–tekerlek ilişkileri başlığı altında rayların genel özellikleri, ray–tekerlek teması, sünme faktörleri detaylı olarak anlatılarak rayların elastikiyetleri konusunda sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Ayrıca lokomotifin seyir hızına etki eden faktörler sıralanarak detaylı olarak açıklamalar yapılmış ve boylamsal dinamik modeli kurulmuştur. Dinamik analiz modeli “Lagrange Denklemi” kullanılarak ve gövdenin denge konumu etrafında ufak salınımlar yaptığı varsayılarak oluşturulmuş ve her serbestlik derecesi için diferansiyel denklemler çıkartılmıştır.

Tezin 4. bölümünde, aktif titreşim kontrolünde kullanılan “Bulanık Mantık Kontrol” algoritması hakkında genel bilgiler verilmiş ve sistemin kontrol edilmesinin gerekliliği üzerinde durulmuştur. Daha sonra kabinin yanal ve düşey titreşim hareketlerini kontrol etmek amacı ile her boji ile kabin arasındaki süspansiyonların (ikincil süspansiyon) kontrol edilebilir olduğu düşünülmüştür. Bulanık mantık kontrolcileri tasarlanarak ilgili diferansiyel denklemlerdeki değişim yapılmıştır.

Simülasyon uygulamaları 5. bölümde ele alınmıştır. I.Senaryo'da sadece yanal doğrultuda ray düzgünlük fonksiyonu, II.Senaryo'da sadece düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan aynı düzgünlük fonksiyonu, III.Senaryo'da sadece düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan farklı düzgünlük fonksiyonu ve IV.Senaryo'da (en genel hal) ise hem yanal doğrultuda hem de düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan farklı ray düzgünlük fonksiyonu sisteme giriş olarak alınmıştır. Yapılan simülasyonlar neticesinde kabin, boji ve tekerlek–setlerinin titreşim hareketlerinin yer değiştirme ve ivmeleri zaman bazında gözlemlenmiştir. Ayrıca sünme faktörlerinin etkilerini anlamak için simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyonda, IV.Senaryo'da kabul edilen ray düzgünlük fonksiyonları sistem girişi olarak kabul edilmiş ve sünme etkisini gözlemek için sünmeli durum sünmesiz durum ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca tasarlanan aktif kontrolcülerin zaman ve frekans bazındaki sonuçları nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir ve zaman ve frekans bazında başarılı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Raylı taşıt dinamiği veya raylı sistem titreşimleri üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların geneli ray sistemlerinin dinamik modelleri üzerinedir. Ray–travers–balast modelleri, köprü–ray–taşıt etkileşimleri gibi konularda çalışmalar yapılarak raylı taşıtın çevreye olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmalardan bazılarının da raylı taşıt dinamiği üzerine yapılarak ray düzgünlükleri neticesinde taşıtın dinamik karakteristiği üzerinde oluşan etkiler gözlemlenmiştir.

Garg ve Dukkipati (1984), raylı taşıt dinamiği üzerine yaptığı çalışmalarla bir kitap hazırlamıştır. Dinamik sistem titreşim analizi konusu ile genel olarak makine dinamiği bilgisi vererek başladığı kitabına raylı taşıtlar ve ray geometrisini anlatarak devam etmiştir. Daha sonra tekerlek-ray temas teorilerine genişçe değinmiştir. Kitabında işlenen raylı taşıt modelleri genelde yanal stabiliteyi kapsayacak şekildedir.

Wickens (1998), buharlı lokomotifin mucidi Stephenson'dan bu yana tekerlek–seti gelişimi konusunda yapılan çalışmaları kronolojik olarak anlatmıştır. Yanal osilasyon hareketinin konik tekerleklerle sağlanıldığının, stabilite çalışmalarının ve kurplarda yönlendirilmiş tekerleklerin gerekliliğinin ortaya koyulması gibi birçok çalışmanın Carter tarafından yapıldığından bahsetmiştir. Ayrıca Carter'in 1916 yılında hareket denklemlerini çıkaran ve çözen ilk mühendis olduğundan söz etmiştir.

Chudzikiewicz (2000) ise, raylı taşıtların dinamik davranışının anlaşılması amacı ile Matlab yazılımı kullanarak bir simülasyon yazılımı ortaya çıkarmıştır. Yazılımda ray modeli, ray–tekerlek temas modeli ve taşıt modeli birbirleri ile etkileşimli olacak şekilde tasarlanmıştır.

Taşıt modeline 2 adet boji ve her bojide 2 adet tekerlek–seti olacak şekilde toplam 7 adet kütle yerleştirmiş ve 27 serbestlik derecesi elde etmiştir.

Shen ve Pratt (2001), raylı taşıtların dinamik davranışını modelleyerek taşıtların tasarım sürecinde test aşamalarında harcanan zamanları kısaltmak amacı ile yine Matlab–Simulink yazılımı ortamında bir modelleme yapmıştır. İlk önce basit bir model ile çalışmalarına başlayıp daha sonra sisteme yanal süspansiyonları, ray–tekerlek doğrusal–olmayan (non–linear) temas faktörünü de ekleyerek daha karmaşık yapıda bir model ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçlarını test verileri ile karşılaştırmıştır.

Lei ve Noda (2002), yaptıkları çalışmada taşıt ve ray sisteminin etkileşimini sağlayan ve sonlu elemanlar modellemesi temeline dayanan bir model geliştirmişlerdir. Taşıt ve ray sistemi olarak iki kısma ayrılan modelde taşıt, yay ve sönüm elemanları ile oluşturularak ray üzerinde yuvarlanması ve düşey doğrultuda serbestlik derecesi kazanması sağlanılmıştır. Ray sistemi ise sonlu elemanlarla bölünmüş kirişlerden oluşturulmuştur. Seyir hızı, değişken ray durumu ve düşey ray profili düzensizliği durumlarının taşıtta oluşan titreşimlerin genlikleri, hızları ve ivmeleri nümerik olarak analiz edilmiştir. (Metin, 2007)

Xia, Zhang ve De Roeck (2003), eklemlili yüksek hız treni ile köprü etkileşimini gerçekleştirerek köprünün dinamik davranışını simüle etmişlerdir. Köprü modeli için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayarda benzetim çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, Paris–Brüksel demiryolu hattındaki Antoining Köprüsü’nden ölçülen test verileri ile karşılaştırılmıştır.

Kırıksık ve Yüksel (2003) ise demiryolu yapısının dinamik modeli üzerinde çalışma yapmışlardır. Ray yapısı; travers, balast ve zemin olmak üzere yay ve sönüm elemanlarından oluşan ayrık bir sistem olarak modellenmiştir. Ray, Bernoulli–Euler kirişi olarak düşünülmüş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yol modeline katılmıştır. Tren ise sabit hızla hareket eden bir kuvvet olarak kabul edilerek yol titreşimleri için örnek sayısal sonuçlar sunulmuştur.

Yılmaz V. (2004) ise bir çalışmasında demiryolu üstyapısını bütün tipleriyle tanıtmış, genel olarak titreşim analizinden bahsetmiştir. Taşıt–ray etkileşim modelleri ele alınmış, çözüm teknikleri hakkında bilgiler verilmiştir. (Metin, 2007)

Yılmaz D. (2004), yüksek lisans tezinde İstanbul Ulaşım A.Ş.’de imal edilen araçları modellemek ve dinamik davranışlarını analiz etmek için ADAMS/Rail yazılımını kullanmıştır. Araçların dinamik analizinde, gerçek konfigürasyona sahip boji modeli ve ray düzgünsüzlüğü kullanmıştır. Yolcuların konfor indeksini analiz edebilmek için, araç

gövdesinde ölçülen ivmelenmeleri kullanmıştır. (Yılmaz D., 2004)

Mangmang, Jiaying ve Yongqiang (2004), tren, ray düzeni ve köprü etkileşimini kapsayan etkin bir dinamik model kurmuştur. Lineer yay ve sönüm elemanları kullanılarak modellenen raylı taşıtta 2 adet boji ve her bojide 2 adet tekerlek–seti bulunan bu modelde ray sisteminin esnek yapısından da söz edilmiştir. Rayın, traverslerin ve balastın da esnek olduğunu kabul eden sonlu eleman modeli ortaya çıkarılmıştır. Kurulan dinamik model neticesinde TYCXQ adlı bilgisayar programı yazılarak bu programdan elde edilen sonuçlar test verileri ile karşılaştırılmıştır.

Lee ve Cheng (2005), raya teğet olarak hareket eden bir bojinin hareketlerinin diferansiyel denklemlerinin çıkartılması ve denklemlerde lineer sünme faktörlerinin de dahil edilmesi ile 10 serbestlik dereceli bir model ortaya çıkarmışlardır. Tekerlek–setinin serbestlik dereceleri; yanal ve düşey yer değiştirmeleri, yalpalama ve yanal sapma açısız yer değiştirmeleri olarak alınırken bojinin serbestlik dereceleri; yanal yer değiştirme ve yanal sapma açısız yer değiştirmesi olarak alınmıştır. Kritik avlanma hızlarını gözlemleyerek 10 serbestlik dereceli modelden alınan sonuçların 6 serbestlik dereceli modelden alınan sonuçlara göre çok daha hassas olduğunu ortaya koymuşlardır.

Karlström ve Boström (2006), raylı taşıt titreşimlerinin yer üzerindeki etkilerini araştırmak için analitik yaklaşım metodu kullanarak bir çalışma ortaya koymuşlardır. Yerin modellenmesinde lineer visko–elastik katmanlı yarı uzay tabakaları kullanmışlardır. Yerin üst katmanına ise dikdörtgen toprak seti yerleştirerek ray ve traverslerin desteklenmesi sağlanmıştır. Raylar Euler–Bernoulli kirişleri ve traversler ise Kirchhoff plakaları olarak modellenerek tekerlek yüklerinin raylar üzerinden yere dağılması sağlanmıştır. İsveç Ledsgard’da hizmet veren X2 treni için nümerik örnekler verilerek belirli seyir hızları için simülasyon yapılmış ve yer değiştirmeler ölçüm değerleri ile örtüştürülmüştür.

Iwnicki (2006), raylı taşıt dinamiği üzerine çalışmaları bir kitapta toplamıştır. Kitabına, raylı taşıt dinamiğinin tarihçesini anlatmakla başlamıştır. Diğer bölümde raylı taşıtlardaki yuvarlanan parçaları anlatmaktadır. Daha sonra ray–tekerlek temas konusuna değinmiştir. Boylamsal tren dinamiğine ve raylı taşıtların gürültü ve titreşim konularını ele almıştır. Son olarak da aktif süspansiyon sistemlerini ve simülasyonları anlatmaktadır.

Metin (2007), İstanbul sınırları içerisinde, şehir içi ulaşımda kullanımda olan bir hafif raylı sistem aracı model olarak ele alınmış ve titreşim analizi açısından fiziksel modeli ve diferansiyel denklemleri çıkartılmıştır. Taşıtın ön, orta ve arka kısımlarında konumlandırılmış

6 adet yolcu koltuğu, birbirinin peşi sıra konumlandırılan 2 adet gövde bloğu, gövdeler ve tekerlek arasında 3 adet boji ve 6 adet tekerlek setinden oluşması modeli özel kılmaktadır. Bu haliyle taşıt, 4 serbestlik dereceli temel, 6 serbestlik dereceli çeyrek ve 22 serbestlik dereceli yarım taşıt modeli olarak Matlab–Simulink yazılımı ortamında modellenmiştir. Zamana ve frekansa bağlı olarak yapılan simülasyonların sonucu elde edilen titreşimlerin yer değişim ve ivmelerinin, minimuma indirilmesi için Bulanık Mantıklı Kontrolör tasarımı ile aktif kontrolü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. (Metin, 2007)

Raylı taşıt titreşimlerinin aktif kontrolü, temel olarak çok farklı bir konu gibi gözükse de matematik modellerinin benzer olması yönünden bir karayolu taşıtının titreşim kontrolü ile aynı prensiptedir. Bu yaklaşımla taşıt titreşimlerinin kontrolü konusu üzerine Yıldız Teknik Üniversitesi'nde yapılmış bazı çalışmalar örnek olarak verilebilir.

Güçlü (2004), çalışmasında 4 serbestlik dereceli bir taşıtta, süspansiyon limitlerinde herhangi bir dejenerasyon olmaksızın, bulanık mantıkla kontrol edilen aktif süspansiyonların dizaynı ve performansının kontrolünü göz önüne almıştır. Burada, süspansiyon açıklığı dejenerasyonlarını göz önüne alan yeni bir bulanık kontrol algoritması kullanılmıştır. Taşıt gövdesinin ve kafa vurma hareketlerinin zaman ve frekans cevapları verilerek, aktif ve pasif süspansiyonların simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Güçlü (2005), çalışmasında 8 serbestlik dereceli non–lineer yarım taşıt modelini oluşturmuştur. Süspansiyonlardaki kuru sürtünmeden dolayı oluşan non–lineer etkinin de göz önüne alındığı çalışmada süspansiyonlara ve gövde ile sürücü koltuğu altına yerleştirdiği bulanık mantık kontrolcülerle aktif kontrol gerçekleştirilmiştir. Sadece süspansiyon kontrolcülü, sadece koltuk kontrolcülü ve her iki kontrolcülü durum için sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. RAYLI TAŞIMACILIK VE LOKOMOTİFLER

2.1 Ulaşımın Tarihi

İlk insanlardan günümüze değişmeden kalan olgu insanların birbirleri ile etkileşimleridir. Kültürel etkileşimler ile başlayan beşeri ilişkiler daha sonra ticaret amaçlı etkileşimlerin yoğunlaşması ile insanların bir yerden başka bir gitme gereksinimini doğurmuştur. Bu noktada ulaşım gereksinimi ortaya çıkmıştır.

Ulaşım, birbirleri ile etkileşen toplumların yer değiştirme ihtiyacından kaynaklanan ve yolcu ve/veya taşınması gereken yüklerin bir yerden başka bir yere taşınmasını kapsayan bir süreçtir.

İlk insandan bu yana teknolojinin gelişmesi ile ulaşım teknolojileri de gelişmiştir. Eski çağlarda öncelikle kas ve doğa gücüne dayalı ulaşım araçları tasarlanmış ve kullanılmıştır. Kas gücünün ulaşımda kullanılmasının ilk akla gelen örnek; eski Mısır medeniyetinde piramitlerin yapımında kullanılan büyük kaya parçalarının taşınmasıdır. Binlerce insan büyük kütleleri yokuş yukarı zar zor taşıyabilmekteydi. Bu hem tehlikeli hem de verimsiz bir yöntemdi.



Şekil 2.1 Kas gücü ile ulaşım [5]

Doğa'nın sahip olduğu enerjiyi dönüştürerek ulaşımda kullanan ilk araç olarak ise yelkenli gemilerden söz edebiliriz. M.Ö. 1000'li yıllarda yine Mısır'luların Akdeniz'de ticaret yapmak için inşa ettikleri ağaç gemiler, yelkenleri ile rüzgarın yönünü değiştirerek ilerlemekteydiler.

Bu yöntem yüzyıllar boyunca kullanılmış ve bu sayede yeni ticaret yolları ve yeni kıtalar keşfedilmiştir.

Daha sonra ise 17. ve 18. Yüzyılda Avrupa'daki aydınlanma hareketlerinin neticesinde Sanayi Devrimi gerçekleşti ve insanoğlu artık makineleşme ile tanıştı. İnsanlık tarihi için yeni bir çağ başladı ve bu aydınlanma ile artık kas gücü yerini makine gücüne bıraktı. Buhar makineleri icat edildi ve kas gücüne göre çok daha verimli ve kesintisiz bir güç kaynağı ortaya çıkmış oldu. Raylı taşımacılığın temelleri de buhar makinelerinin bulunması ile atıldı.

2.2 Raylı Taşımacılığın Özellikleri

Raylı taşımacılık, teknolojik ilerleme ve araştırma geliştirme faaliyetlerinin yürütülmesinde öncülük eden birçok Avrupa ülkesi (İngiltere,Fransa,Almanya,vb...) ve Japonya'da en üst teknolojilerle uygulanmaktadır. Daha az gelişmiş ülkelerde ise raylı taşımacılığa bu denli önem verilmemekte , karayolu taşımacılığı daha çok desteklenmektedir.

Raylı taşımacılığın gelişmiş ülkelerde neden bu kadar önemsendiğinin anlaşılabilmesi için raylı taşımacılığın üstün ve sakıncalı yanlarının sıralanması faydalı olacaktır.

Raylı taşımacılığın üstün yanları;

- Demiryollarının belirgin niteliğinin arabaların iki ray dizisi üzerinde kılavuzlanmış olarak yuvarlanması ve bu nedenle de metal-metal üzerinde yuvarlanmasıyla harekete karşı koyan direncin küçük olması.
- Enerji tüketimi azdır.
- Hız yüksektir. (2007 yılında Fransa'da yapılan bir denemede TGV treni 574.8km/h ile hız rekoru kırmıştır.)
- İstatistikler, demiryolu ulaşımının en güvenilir ulaşım sistemi olduğunu göstermektedir.
- Gerek yolcu gerekse yük taşıma yönlerinden demiryolları kitle taşıması için en elverişli ulaşım sistemidir. Harekete karşı direncin çok küçük olması ağır yüklerin küçük çekim kuvvetleri ve az personelle taşınabilmesini olanaklı kılar.
- Arazinin iyi kullanımına, yani çok az bir yer kaplamasına karşılık büyük yükler taşınmasına olanak sağlar.

- Arabaların raylarının kılavuzlanmasından ötürü otomotizasyona elverişlidir.
- Çekim sistemleri bakımından teknik gelişmelere ayak uydurabilme olanağına sahiptir. Bu güne kadar buharlı, dizelli ve elektrikli çekim kullanılmış olup. Şimdi de helikopter motorlarından esinlenerek gaz türbin motorları başarı ile uygulama alanına girmiş bulunmaktadır.
- Özellikle yerleşim birimlerinin yoğun olduğu bölgelerde elektrikli çekim sayesinde havanın kirlenmesi önlenmektedir.
- Kötü hava koşullarından en az etkilenen ulaşım sistemidir.
- Ekonomik yönden ise demiryolları artan verimle çalışan kuruluşlardır. Yani trafiğin artması halinde doğacak giderler elde edilecek gelir yanında küçük kalır.

Raylı taşımacılığın sakıncalı yanları;

- İnşa yatırımının yüksektir.
- Demiryollarında hareketin rayların kılavuzluğunda belirli bir eğri üzerinde olması zorunluluğu, yararları yanında ayrıca sakıncalarını da getirmektedir. Hem yatırım hem de işletme maliyetleri bu yüzden yüksektir.

Raylı taşımacılığın üstün ve sakıncalı yanlarını göz önüne aldığımızda çok açık olarak görebiliriz ki demiryolu taşımacılığı karayolu üzerinde uygulanabilecek en iyi ulaşım sistemidir.

2.3 Türkiye’de Raylı Taşımacılığın Tarihçesi

2.3.1 Cumhuriyet Öncesi (1856-1922)

Dünyada ilk kez 1800’lü yıllarda İngiltere’de başlayan ve kısa süre içinde tüm Avrupa’ya yayılan demiryolu ulaşımının, toprakları 3 kıtaya yayılan Osmanlı İmparatorluğu’na girişi diğer birçok teknolojik yeniliğe göre çok erken olur, ne var ki, 1866 yılında Osmanlı’nın geniş toprakları üzerindeki demiryolu hattının uzunluğu sadece 519 km’dir. Üstelik bu hattın sadece 1/3’lük yani 130 km’lik bölümü Anadolu toprakları üzerinde, geri kalan 389 km’lik bölümü Köstence–Tuna ile Varna–Rusçuk arasında yer alır.

Anadolu topraklarındaki demiryolu tarihi 23 Eylül 1856 yılında ilk demiryolu hattı olan 130 km’lik İzmir–Aydın hattının imtiyaz verilmiş bir İngiliz girişimci Wilkin ve dört arkadaşının

firmasının ilk kazmayı vurmasıyla başlar. Böylece Anadolu topraklarındaki ilk demiryolu hattı olan 130 km'lik bu hat tam 10 yıl süren bir çalışmayla 1866 yılında Abdülaziz zamanında tamamlandı.

1871 yılında saraydan çıkarılan bir irade ile Haydarpaşa–İzmit hattının devlet tarafından yapımına başlanır ve 91 km'lik hat 1873 yılında bitirilir. Ancak maddi olanaksızlıklar nedeniyle Anadolu Demiryolları ile Bağdat ve Cenup demiryollarının yapımları Alman sermayesi ile gerçekleştirilir.

İmtiyaz verilen başka bir İngiliz şirketi de İzmir–Turgutlu–Afyon hattı ile Manisa-Bandırma hattının 98 km'lik kısmını 1865 yılında tamamlar.

1896 yılında yapım imtiyazı Baron Hirsch'e verilmiş olan 2000 km'lik şark demiryollarının milli sınırlar içerisinde kalan 336 km'lik İstanbul-Edirne ve Kırklareli–Alpullu kesiminin 1888'de bitirilerek işletmeye açılmasıyla da İstanbul, Avrupa demiryollarına bağlanmış olur.

Bu dönemde işletmeye açılan hatlar:

- Rumeli Demiryolları 2383 km normal hat
- Anadolu–Bağdat Demiryolları 2424 km normal hat
- İzmir–Kasaba ve uzantısı 695 km normal hat
- İzmir–Aydın ve şubeleri 610 km normal hat
- Sam–Hama ve uzantısı 498 km dar ve normal hat
- Yafa–Kudüs 86 km normal hat
- Bursa–Mudanya 42 km dar hat
- Ankara–Yahşihan 80 km dar hat

Sonuç olarak, Cumhuriyet öncesi çeşitli yabancı şirketler tarafından inşa edilen demiryolu hattının 4000 km'lik bölümü, 1923 yılında Cumhuriyetin ilanı ile belirlenen milli sınırlar içinde kalmıştır. Osmanlı İmparatorluğu'ndan yeni Cumhuriyete, yabancı şirketlere ait 2.282 km'lik normal genişlikte hat ve 70 km uzunluğunda dar hat ile devletin yönetiminde olan 1.378 km'lik normal genişlikte hat kalmıştır.

2.3.2 Kurtuluş Savaşı Dönemi (1919–1923)

Bu döneme damgasını vuran kişi Behiç Erkin'dir. Behiç Erkin Kurtuluş Savaşı'nın kazanılmasında demiryollarını kusursuz işletmesi ile en önemli rollerden birini oynar. Bu

başarısı hem TBMM takdirnamesi, hem de İstiklal Madalyası ile onurlandırılmıştır. Kurtuluş Savaşı'nda cepheye asker, silah ve erzak taşımada, cephelerden de geriye gazilerin taşınmasında, yani savaşın lojistiğinde sağladığı başarılarla, demiryollarının önemi ortaya çıkmıştır. Demiryollarının kurucu genel müdür'ü Behiç Erkin 1920 senesinde üstlendiği ve 1926 senesinin sonuna kadar götürdüğü genel müdürlük görevi ile kalmamış, aynı zamanda demiryollarının millileştirilmesinde baş rolü oynamıştır. 1926–1928 senelerinde de demiryollarını bayındırlık bakanı olarak idare etmeye devam etmiştir.

2.3.3 Cumhuriyet Sonrası Dönem (1923–1950)

2.3.3.1 Atılım Dönemi (1923–1940)

Demiryolları 1923–1940 yılları arasında bir anlamda atılım çağı yaşar. Bu dönemde 1923 yılı itibarı ile 4559 km olan demiryolu 1940 yılına kadar gerçekleştirilen çalışmalarla 8637 km'ye ulaşır. Cumhuriyet sonrası dönemde ulusal çıkarlar doğrultusunda yapılandırılmış, kendine yeterli "milli ekonomi"nin yaratılması amaçlanarak, demiryollarının ülke kaynaklarını harekete geçirmesi hedeflenmiştir. Bu dönemin belirgin özelliği, 1932 ve 1936 yıllarında hazırlanan 1. ve 2. Beş Yıllık Sanayileşme Planlarında, demir–çelik, kömür ve makine gibi temel sanayilere öncelik verilmiş olmasıdır. Bu tür kitlesel yüklerin en ucuz ve güvenli biçimde taşınabilmesi açısından demiryolu yatırımlarına ağırlık verilmiştir. Bu nedenle, demiryolu hatları milli kaynaklara yönlendirilmiş, sanayinin yurt geneline yayılma sürecinde yer seçiminin belirlenmesinde yönlendirici olmuştur.

Bu dönemde demiryollarında gerçekleştirilmeye çalışılan hedefler şunlardır:

- Potansiyel üretim merkezlerine, doğal kaynaklara ulaşması amaçlanmıştır. Örneğin; Ergani'ye ulaşan demiryolu bakır, Ereğli kömür havzasına ulaşan demir, Adana ve Çetinkaya hatları pamuk ve demir hatları olarak adlandırılmaktadır.
- Üretim ve tüketim merkezleri ile özellikle limanlar ile hinterlandlar arası ilişkileri kurması amaçlanmıştır. Kalın–Samsun, Irmak ve Zonguldak hatları ile demiryolu ulaşan limanlar 6 'dan 8'e yükseltilmiştir. Samsun ve Zonguldak hatları ile İç ve Doğu Anadolu'nun deniz bağlantısı pekiştirilmiştir.
- Ekonomik gelişmenin ülke düzeyinde yayılmasını sağlamak amacı ile özellikle az gelişmiş bölgelere ulaşması amaçlanmıştır. Cumhuriyetin kurulmasıyla birlikte politik merkez Batı'dan Orta Anadolu'ya kayarken, ulaşılabilirlik de Batı'dan Orta

Anadolu'ya, Doğu ve Güney Doğu Anadolu'ya yaygınlaştırılmıştır. Bu politikaya göre; 1927'de Kayseri, 1930'da Sivas, 1931'de Malatya, 1933'de Niğde, 1934 Elazığ, 1935 Diyarbakır, 1939'da Erzurum demiryolu ağına bağlanmıştır.

- Milli güvenlik ve bütünlüğün sağlanması amacıyla dönük olarak ülkeyi sarması hedeflenmiştir.

2.3.3.2 Savaş Yılları ve Duraklama Dönemi (1940–1950)

1940–1950 yılları ise "Durgunluk Dönemi"dir. Gerçekten de onca kıtlığa, imkansızlıklara rağmen, demiryolu yapımı II. Dünya Savaşı'na kadar büyük bir hızla sürdürüldü. Savaş nedeniyle 1940'dan sonra yavaşladı. 1923-1950 yılları arasında yapılan 3.578 km'lik demiryolunun 3.208 km'si, 1940 yılına kadar tamamlandı.

2.3.3.3 Karayolu Ağırlıklı Dönem (1950–)

Kurtuluş Savaşı'ndan sonra tüm olanaksızlıklar içinde yılda ortalama 240 km uzunluğunda demiryolu yapılırken, 1950 yılından sonra gelişen teknoloji ve maddi olanaklara rağmen yılda sadece 39 km'lik demiryolu yapılabildi.

Karayolu, 1950 yılına kadar uygulanan ulaşım politikalarında demiryolunu besleyecek, bütünleyecek bir sistem olarak görülmüştür. Ancak karayollarının demiryollarını bütünleyecek, destekleyecek biçimde geliştirilmesi gereken bir dönemde, Marshall yardımıyla demiryolları adeta yok sayılarak karayolu yapımına başlanmıştır. ABD'nin Marshall yardımı ile Türk ekonomisi üzerinde etkin olduğu bu dönemde, özellikle tarım ve tüketim mallarına dayalı bir sanayileşme süreci iktisadi yapıya egemen olmuştur.

1960 sonrası planlı kalkınma dönemlerinde, demiryolları için öngörülen hedeflere hiçbir zaman ulaşamamıştır. Bu planlarda, ulaştırma alt sistemleri arasında koordinasyon sağlanması hedeflense de, plan öncesi dönemin özellikleri devam ettirilerek bu koordinasyon sağlanamamış ve karayollarına yapılan yatırımlar bütün plan dönemlerinde ağırlığını korumuştur. Bütün planlarda, sanayinin artan taşıma taleplerinin yerinde ve zamanında karşılanabilmesi için demiryollarında yatırımlara, yeniden düzenlemelere ve modernizasyon çalışmalarına ağırlık verilmesi öngörülmüş olmasına rağmen hayata geçirilememiştir ve olması gereken aksine demiryolu yapımına değil de karayolu yapımına ağırlık verilmiştir. Bu politikaların sonucu olarak, 1950–1980 yılları arasında yılda sadece ortalama 30 km yeni hat yapılabildi.

1950'li yıllardan sonra uygulanan karayolu ağırlıklı ulaşım politikaları sonucunda, 1950–1997 yılları arasında karayolu uzunluğu % 80 artarken, demiryolu uzunluğu sadece % 11 artmıştır. Ulaştırma sektörleri içindeki yatırım payları ise; 1960'lı yıllarda karayolu % 50, demiryolu % 30 pay alırken, 1985'den bu yana demiryolunun payı % 10'un altında kalmıştır. Türkiye'deki yolcu taşıma paylarına bakıldığında, karayolu yolcu taşıma payı % 96, demiryolu yolcu taşıma payı ise yalnızca % 2'dir. Türkiye ulaşım sistemi içerisinde karayolu-demiryolu yük taşıma paylarına bakıldığında, karayolu yük taşıma oranı %94, demiryolu yük taşıma payı ise %4'dür. Demiryollarının yük taşımacılığındaki payı son 50 yılda %60 oranında gerilemiştir.

TCDD'nin şu anda aktif olarak kullanılan demiryolu uzunluğu 10.984 km'dir. Şebekenin % 95'inde tek hat işletmeciliği yapılmaktadır. (Şekil 2.2)



Şekil 2.2 TCDD Türkiye demiryolları haritası [8]

2.3.3.4 Günümüzde Yürütülen Yeni Projeler

TCDD hem varolan hatların yenilenmesi hem de yeni hatlar eklenmesi için sürekli devam eden bir çalışma içindedir. Özellikle varolan eski ray teknolojisini yenileyip yeni ve daha güncel bir sistem olan hızlı tren sistemine geçiş hazırlıkları yapılmaktadır. Yüksek Hızlı Trenle bu ulaşım sağlanacaktır. Bu amaçla başlatılmış üç öncü proje bulunmaktadır.

- İstanbul–Ankara Hızlı Tren Projesi : Ulaştırma Bakanlığı tarafından yürütülen en büyük projelerden biri olan Ankara–İstanbul Hızlı Tren Projesi ile Türkiye'nin en büyük iki kenti Ankara–İstanbul arasındaki yolculuk süresini azaltmak, hızlı, konforlu, güvenli bir ulaşım olanağı yaratmak ve ulaşımda demiryolu payını artırmak amaçlanmaktadır. Ankara–İstanbul hızlı tren projesinin ilk etabı olan Ankara–Eskişehir hattının denenmesi için bu proje kapsamında Ankara–Eskişehir arasındaki hızlı trene uygun yapılmış raylardan oluşan hat bitmiş ve Ankara–Eskişehir arasında hızlı tren seferleri başlatılmıştır. Deneme için İtalya'dan kiralanan 2 lokomotif ve 3 vagon dan oluşan deneme treni, bu amaçla 23 Nisan 2007 tarihinde saat 09.55'te yabancı makinistlerin kontrolünde TCDD Behiç bey tesislerinden Eskişehir yönüne doğru hareket etmiş ve deneme seferlerine başlanmıştır. (Şekil 2.3)
- Ankara–Konya Hızlı Tren Projesi : Konya'nın Türkiye'nin en büyük üç kentine (İstanbul, Ankara, İzmir) daha kısa sürede ulaşımını sağlamak ve hızlı demiryolu ile bağlantısını gerçekleştirmek amacı ile Ankara–Konya Hızlı Tren Projesi yapılması planlanmış, bu proje ile; Polatlı'dan başlayarak Güneye doğru inen çift hatlı, elektrikli, sinyalli yeni demiryolu inşa edilecektir.
- Ankara–Sivas Hızlı Tren Projesi : Sivas'ın Türkiye'nin büyük kentlerine (İstanbul, Ankara, İzmir) daha kısa sürede ulaşımını sağlamak ve hızlı demiryolu ile bağlantısını gerçekleştirmek amacı ile Ankara–Sivas Hızlı Tren Projesi yapılması planlanmış, bu proje ile; Ankara–Kırıkkale–Yozgat–Sivas arasında çift hatlı, elektrikli, sinyalli yeni demiryolu inşa edilecektir.

İstanbul'un şehir içi ulaşım sorununa toplu taşımacılıkla köklü bir çözüm getirmeyi amaçlayan Marmaray projesi ile Avrupa yakasındaki Halkalı'dan Anadolu yakasındaki Gebze'ye kesintisiz, hızlı ve diğer ulaşım sistemleriyle entegrasyonlu 76.3km'lik metro inşaatı halen devam etmektedir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.3 Ankara–Eskişehir hızlı tren uygulaması [12]



Şekil 2.4 Marmaray projesi [9]

2.4 Raylı Taşımacılığa Geçiş ve Lokomotifler

Raylı taşımacılık, kara taşımacılığında yüzyıllardan beri vazgeçilemeyen bir ulaşım seçeneği olmuştur. Yolcu ve/veya taşınması gereken yüklerin demiryolu üzerinde ilerlemesi için özel olarak tasarlanan makinelerle çekilerek bir yerden başka bir yere ulaşım gerçekleştirilir.

Ulaşım alanında, demirden yapılmış lamalar ilk kez İngiltere’de 18.yüzyılda maden ocaklarında bir kriz nedeniyle kullanıldı. Demir sanayicisi Reynold 1767 yılında elindeki demirleri ucuz satmaktansa, bunları arabaların çekildiği kalaslar üzerine geçici bir süre için kaplayarak hem kalasların aşınmasını önlemeyi hem de demir fiyatları yükseldiğinde bunları söküp satmayı düşündü. Böylece tamamen farklı amaçla kullanılan demir levhalarla farkında olmaksızın ilk demiryolu uygulamasına geçildi, çünkü demir levhalar üzerinde arabalar kolaylıkla hareket edebiliyordu. Bu nedenle de demirlerin sökülmesinden vazgeçildi.

Raylı taşımacılığa yönelik bakımından iki nokta önemli rol oynamıştır;

- Tekerleklerin az pürüzlü madeni yüzeyler üzerinde daha kolay yuvarlanabilmesi
- Buharla işleyen arabaların yapılması ve geliştirilmesi

Demir sanayicisi Reynold’un rastlantı sonucundaki deneyi ilk noktanın ortaya çıkmasını sağladı.

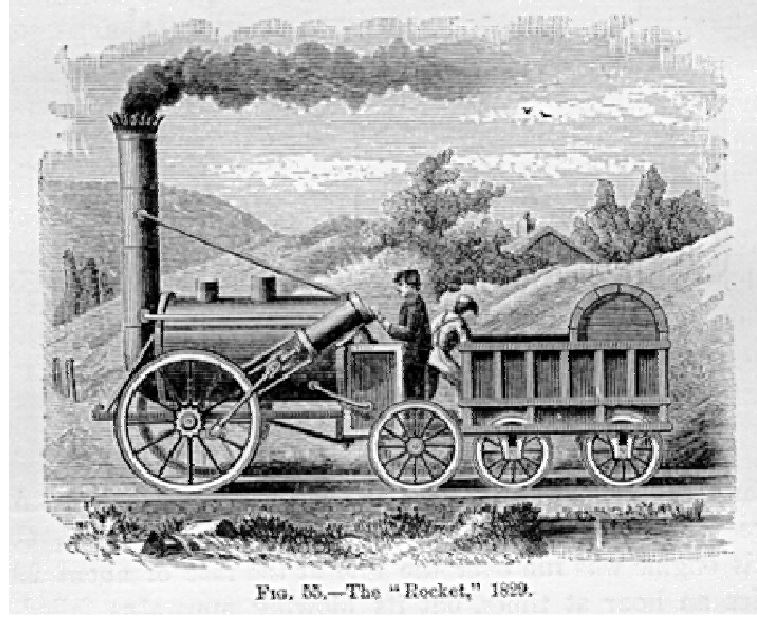
2.4.1 Buharlı Lokomotifler

1687 yılında Denis Papin buharın elastik gücünü buldu. Bundan yararlanan James Watt da buhar makinesini buldu.

Raylardan meydana getirilmiş bir yolda, buharla işleyen bir arabayı ilk kez yürüten İngiliz mühendis Richard Trevithick’tir. Ancak 1803 yılında kullanılan bu araba bugünkü lokomotif esasından çok uzaktır. Richard Trevithick’in bu ilk lokomotifi Galler eyaletindeki bir maden ocağında birkaç vagonu civardaki kanala kadar çekiyordu.

1814 yılında George Stephenson isimli İngiliz mühendisi iki silindirli bir lokomotif yaptı. Yaptığı lokomotifi borusuz sistem kazanla çalıştırdığından gereği kadar buhar elde edilemediği için 4-5 HP’den fazla güç elde edilemiyor ve devamlı çalıştırılamıyordu.

Lokomotiflerdeki büyük gelişme 1825 yılında Marc Seguin tarafından borulu kazan icat edildikten sonra olmuştur. Bundan yararlanan George Stephenson lokomotifine yatay borulu bir kazan koymak, pistonu doğrudan doğruya tekerleğe bağlamak ve silindirden çıkan kullanılmış buharı bacadan geçirerek dışarı vermek suretiyle 1829 yılında Liverpool–Manchester şirketince inşa edilmekte olan hat için açılan yarışmada birinci olmuştur. “Rocket” adlı verilen bu lokomotif 4.25 ton ağırlığında idi ve 13.2 tonluk yükü 22km/h hız ile çekmişti. (Evren, 2002)



Şekil 2.5 Stephenson'un rocket adlı lokomotifi [4]

2.4.2 Dizel Lokomotifler

1940'lı yılların başlarında Amerika'da buhar tahrikli lokomotiflerin yerini dizel tahrikli lokomotifler almaya başlamıştı. II.Dünya Savaşı'nın sonlarına doğru dizel lokomotiflere geçiş diğer ülkelerde de yaygınlaşmaya başlamıştı. Bu geçiş öyle hızlı olmaktadır ki 1960'lı yıllara gelindiğinde buharlı lokomotif kullanan çok az ülke kalmıştı.

Dizel lokomotiflere bu kadar rağbet edilmesinin altında yatan nedenleri;

- Buharlı lokomotiflere göre çok daha az arıza çıkartması ve daha seyrek bakım gerektirmesi.
- İçten yanmalı motor teknolojisinin uygulanmasıyla daha yüksek çekiş güçlerine olanak sağlaması

olarak sıralayabilir. Dizel lokomotiflerde hareketi, motordan tahrik tekerleklerine iletme problemi buharlı lokomotiflere kıyasla çözülmesi çok daha zor bir problemdi fakat krank-biyel mekanizması ve bir sıra redüktör grubu ile bu sorunun da üstesinden gelindi.

Elektrik motorunun ve tahrik mekanizmalarının basitliğini fark eden mühendisler daha sonra ise dizel ile elektrik motorunun birleşimi olan "Dizel-elektrik Lokomotif"i icat ettiler.

Dizel motoru lokomotifte bulunan bir jeneratörü çalıştırıyor ve elde edilen elektrik enerjisi ile lokomotifin ilerlemesi sağlanıyordu. Ayrıca elektrik motorunun kullanılması ile frenleme ve

çekiş kuvvetlerinde de gelişim gerçekleşti. Dinamik frenleme sistemi, lokomotifteki diğer frenleme sistemlerine yardımcı bir sistem olarak ortaya çıkartıldı.



Şekil 2.6 EMD GP50 dizel–elektrik’li lokomotifi [3]

2.4.3 Elektrikli Lokomotifler

1894 yılında Macar mühendis Kalman Kando, yüksek voltajlı, 3–fazlı AC motor ve jeneratörü geliştirerek ilk elektrikli lokomotif denemesini gerçekleştirdi. Bu başarısıyla bilim tarihine “Elektrikli Lokomotifin Babası” olarak geçti.

Demiryollarının elektrifikasyonu üzerindeki çalışmalarını Budapeşte’de, Ganz elektrik işletmesinde gerçekleştirdi ve ilk kurulumu İtalya’da, Valtellina hattına 1902 yılında yaptı. Kando, elektrikli demiryollarının ancak şehir şebekesi gerilimi ile desteklenirse başarılı olabileceğinin farkına varan ilk kişiydi ve bu sayede lokomotif kullanımına yönelik döner faz dönüştürücüsünü icat etti.

İlk başlarda lokomotiflerin çalışma elektriği üçüncü bir ray hattından sağlanıyordu. Üçüncü hattın çekilmesi ve elektriklenmesi zor ve pahalı bir yöntem olmasına rağmen elektrikli lokomotiflerden yüksek performans alınabilmesi ve buharlı yada dizel–elektrikli lokomotiflerden çok daha düşük işletme maliyetinin olması doğru yolda ilerlediğinin kanıtı olmuştur.

Elektrikli lokomotiflerin dizel lokomotiflere göre üstün yanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Elektrikli lokomotiflerin tahrik aksamalarının dizel–elektrikli lokomotiflerden çok daha az karmaşık olması da daha az arıza ve sonuç olarak daha az bakım maliyeti demektir. Bu sayede elektrikli lokomotiflerin ömürleri de öyle artıyordu ki çok az bakımla bile

yarım yüzyıl ve hatta yüzyıl çalışabilmiş birçok elektrikli lokomotif bulunmakta idi.

- Dizel lokomotiflerde pistonlu motorunun ve ayrıca alternatörün gerekliliği lokomotif kütlesini ve dolayısıyla lokomotifin atalet direncini fazlasıyla artırmakta idi. Buna kıyasla elektrikli lokomotiflerin daha düşük atalet dirençleri ve buna rağmen sağladıkları yüksek performans karakteristikleri daha ekonomik işletme maliyeti sağlamaktadır.
- Ayrıca elektrikli lokomotiflerin dizel lokomotiflere göre daha az gürültü ve titreşime neden olması daha konforlu yolculuklara imkan sağlamaktadır.

Elektrikli lokomotiflerin icadı yeni bir çağ açmış ve yüksek çekiş güçlerinin elde edilmesine olanak sağlamıştır ve bu sayede yüksek hızlar elde edilmeye başlanmıştır.

Fransız Alstom firmasının ürettiği TGV treni tekerlekli trenler kategorisinde hız rekorunu elinde tutmaktadır. 3 Nisan 2007 tarihinde ulaştığı rekor hız 574.8 km/h'dir. (Şekil 2.7)



Şekil 2.7 TGV elektrikli treni 574.8km/h ile hız rekorunu kırarken [13]

Bazı elektrikli lokomotifler, elektrifikasyondan yoksun yerlerde batarya gücü kullanarak çok uzun olmayan seyirler yapabilmektedir. Bataryalı lokomotifler daha çok dizel–elektrikli lokomotiflerin atık gazlarının veya elektrikli lokomotifler hatlarında görülen ark atlamalarının insan hayatı açısından çok tehlikeli olduğu maden ocaklarında ve bunun gibi diğer yer altı hatlarında kullanılmaktadır. Bataryalı lokomotifler ayrıca birçok yer altı metro hatlarında bakım amaçlı kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bataryaların fazla yer işgal etmeleri, kullanım sürelerinin kısa olması ve yüksek fiyatları nedeni ile dış hatlarda kullanılması olanaksızdır.

2.4.4 Gaz Türbin–Elektrikli Lokomotifler

Gaz türbin–elektrikli lokomotifi (GTEL) elektrik jeneratörünü yada alternatörü sürmek için gaz türbini kullanan bir lokomotif türüdür. Sistem tasarımı, helikopter motorunun çalışma prensibi baz alınarak uygulanmıştır. Gaz türbini (türbo-şaft motoruna benzer), çıkış milini döndürmekte ve aradaki redüktör üzerinden dönel hareket jeneratöre aktarılmaktadır. Jeneratörden elde edilen elektrik de lokomotifin çekiş motorlarını beslemekte ve böylece hareket sağlanmaktadır. Bu tip lokomotif ilk defa 1920’li yıllarda denenmiş olmasına rağmen 1950-1960’lı yıllarda popüler olabilmıştır.

Sürücü motor olarak gaz–türbininin kullanılması pistonlu motorlara göre bazı üstün yanlar sağlamaktadır:

- Gaz–türbinli motorlarda hareketli parçaların sayısı pistonlu motorlara oranla çok daha az olması atalet direncinin düşük olmasını ve sonuç olarak birim yakıtı daha verimli ve ekonomik kullanmasını sağlamaktadır.
- Güç/ağırlık oranının yüksek olması küçük hacimli lokomotiflerden çok yüksek çekiş gücü elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Pistonlu motorlara oranla yüksek güç elde edebilen gaz–türbinli lokomotiflerin aşağıda sıralanan iki önemli kusurundan ötürü şuan çok tercih edilen bir lokomotif seçeneği değildir.

- Hareketli parça sayısının azlığı birim hacimden çok daha yüksek güç elde etmesine imkan verirken beraberinde çok fazla istenmeyen bir kötü özellik getiriyordu. Bu da tahrik sisteminde meydana gelen ufak bir kesintinin bir anda çekiş gücünün düşmesine neden olması idi.
- Türbin sisteminin işletilmesi çok fazla titreşim ve gürültü ortaya çıkarmasına yol açıyor, bu da yolcu ulaşımını konforsuz hale getiriyordu.

Bütün bu üstün ve kusurlu yanlarını göz önüne alarak dünyada gaz–türbinli lokomotifi kullanan tek şirket ABD’li UPR kurumu olmuştur ve yük taşımacılığı amaçlı büyük lokomotifler kullanmıştır.

Illinois demiryolu müzesi’nde bulunan ve daha önceleri UPR’nin hizmetinde çalışmış bir gaz–türbin elektrikli lokomotif Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8 UPR’de hizmet veren bir gaz–türbin elektrikli lokomotifi [7]

2.4.5 Maglev Lokomotifler

Maglev, bir çeşit elektrikli lokomotifdir fakat klasik elektrikli lokomotiflerden belirgin özelliklerle farklıdır.

- Alışlagelmiş ray düzenlerinden farklı olarak özel altyapı ile desteklenmiş yeni bir ray sistemine ihtiyaç duyarlar.
- Elektrikli lokomotiflerde tahrik AC veya DC akım kullanan kapalı bir elektrik motoru ile sağlanırken maglev lokomotiflerde gövde üzerinde kapalı bir elektrik motorundan söz etmek mümkün değildir. Ray sistemine ve araç gövdesine entegre edilmiş manyetik bobinlerin etkileşimli çalışması ile bir çeşit LSM elde edilmekte ve hareket sağlanmaktadır.
- Maglev lokomotifin hareketi esnasında, alışlagelmiş ray düzenlerinden farklı yapıda ray düzenleri üzerinde hiçbir metal–metal sürtünmesi veya yuvarlanması olmaması ve aracın belirli limitler dahilinde havaya kaldırılarak ilerletilmesi sürtünme dirençlerinin en aza indirilmesine olanak sağlamaktadır.

İlk ticari maglev treni uygulaması 1980’li yıllarda İngiltere, Birmingham’da havaalanı ile tren garı arasında düşük hızlı personel taşımacılığı servisinde kullanılmıştır. Hizmetten

faidalananlarda ilgi ve heyecan yaratmasına rağmen maglev uygulaması, yedek parça sıkıntısının baş göstermesi ile birlikte birkaç sene sonra tekerlekli araçlara geri dönülmesi ile sonuçlanmıştır.

2003 yılında Japonya’da deneysel amaçla üretilen JR-Maglev MLX01 prototipi dünya hız rekorunu 581km/h ile kırmış fakat klasik demiryolu üzerinde ilerlememesi nedeni ile TGV’nin hız rekorunu aşamamıştır. (Şekil 2.9)



Şekil 2.9 JR-Maglev MLX01 treni [14]

2.4.6 Melez (Hybrid) Lokomotifler

Melez lokomotif, gövdesi üzerine entegre edilmiş yeniden şarj edilebilen enerji biriktirme sistemine ve ayrıca itici güç sağlanması için de yakıtla çalışan güç kaynağına sahip bir tür lokomotifdir.

Melez trenlerde itici güç genellikle yakıt hücresi teknolojisi ile veya dizel-elektrik melezlenmesi ile sağlanmaktadır. Bu trenlerde Toyota–Prius melez arabasında olduğu gibi frenleme esnasında ortaya çıkan ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek biriktirilmekte ve böylece yakıt tüketimi ve karbon salınımı minimize edilmektedir. Ayrıca tren, istasyonlarda durduğunda veya rölanti devrinde beklediğinde ise sistem otomatik olarak hidro–karbon motorunu durdurarak daha verimli ve ekonomik bir teknoloji sunmaktadır.

3. LOKOMOTİFİN DİNAMİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Dinamik modeli oluşturmak için gerçek bir lokomotiften yola çıkmak gerekmektedir. Lokomotifin,bojinin veya tekerlek–setinin boyu, eni, yüksekliği gibi fiziksel boyutları bilinmeden ağırlık merkezleri, kütleler ve kütleli atalet momentleri gibi hareketlerin diferansiyel denklemlerindeki doğrudan etkileyen fiziksel parametreler hesaplanamayacaktır. Lokomotifin belirli serbestlik derecelerinde hareketini tanımlayan ivme, hız, yer değiştirme gibi dinamik cevaplarını gerçekte yaptığı dinamik hareketlere çok yakınsayan bir simülasyon yapılmak isteniyorsa yapılması gereken, gerçek bir lokomotiften yola çıkarak ana parçaların 3D modellerini oluşturmak ve fiziksel parametreleri hesaplamak olacaktır.

Bu yaklaşım tarzı ile yola çıkarak dinamik modeli oluşturulacak lokomotif için şu anda TCDD’nde şehirlerarası yük ve yolcu taşımacılığında önemli bir yere sahip olan Japonya menşeli Toshiba marka E43000 elektrikli ana hat lokomotifi referans alınmıştır. Modellenen lokomotifin tüm fiziksel parametrelerinin E43000 lokomotifi ile birebir örtüşebilmesi ancak üretici firmanın desteğini alarak mümkün olabilirdi bu yüzden E43000 lokomotifinin parametrelerine ancak belirli toleranslarda kalarak yakınsandığı söylenebilir.



Şekil 3.1 Haydarpaşa garında E43000 lokomotifi [2]

Şekil 3.1’de Haydarpaşa garında depoya girmek üzere peronu terk eden bir E43000 lokomotifi görülmektedir.



E 43000 (TOSHIBA) TYPE ELECTRICAL MAINLINE LOCOMOTIVE
E 43000 TİPİ ELEKTRİKLİ ANAHAT LOKOMOTİFİ



MAIN CHARACTERISTICS

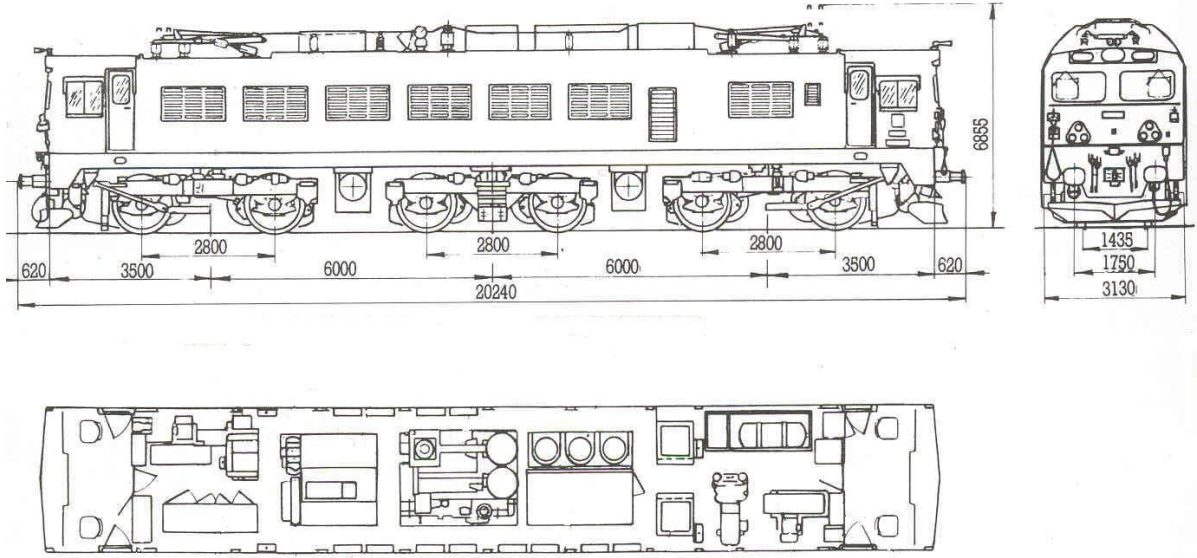
| | |
|----------------------------------|-----------------|
| Weight of Locomotive | 120 t |
| Axle Arrangement | Bo-Bo-Bo |
| Axle Load | 20 t |
| Speed | 90-120 km/h |
| Gauge | 1435 mm |
| Length | 20240 mm |
| Type of Traction Motor | SE 222 - DC |
| Traction Motor Power and Current | 530 kw 635 A |
| Traction Motor Speed | 1050 rpm |
| Low Voltage Cabin Type | CG 179 - A |
| High Voltage Cabin Type | CG 178 - A |
| Main Converter Type | RFE 003 A |

ANA KARAKTERİSTİKLER

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Lokomotif Ağırlığı | 120 t |
| Dingil Tertibatı | Bo - Bo - Bo |
| Dingil Yüktü | 20 t |
| Hız | 90-120 km/h |
| Ray Açıklığı | 1435 mm |
| Tamponlar Arası | 20240 mm |
| Çer Motor Tipi | SE 222 - DC |
| Çer Motor Gücü ve akımı | 530 kw 635 A |
| Çer Motor Devri | 1050 d/dak |
| Alçak Voltaj Kabin Tipi | CG 179 - A |
| Yüksek Voltaj Kabin Tipi | CG 178 - A |
| Ana Konvertör Tipi | RFE 003 A |

Şekil 3.2 E43000 lokomotifinin ana karakteristikleri [11]

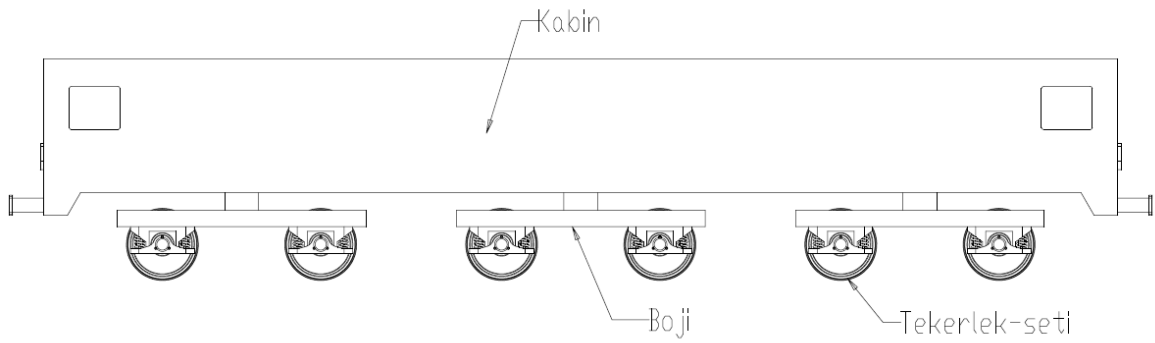
Şekil 3.2’de E43000 lokomotifinin ağırlığı, dingil yükü, azami hızı, ray açıklığı, tamponlar arası uzunluğu ve çekiş motoru ile ilgili çeşitli fiziksel bilgileri ve ana karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 3.3 E43000 lokomotifinin kesiti [2]

Şekil 3.3’de ise E43000 lokomotifinin kesiti görülmektedir. Gövdenin, bojilerin ve tekerlek-setlerinin en, boy, yükseklik gibi boyutları görülmektedir.

Kabin, boji ve tekerlek-setlerinin 3D olarak modellenmesinde Pro/Engineer CAD programı kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Lokomotifin yandan görünüşü

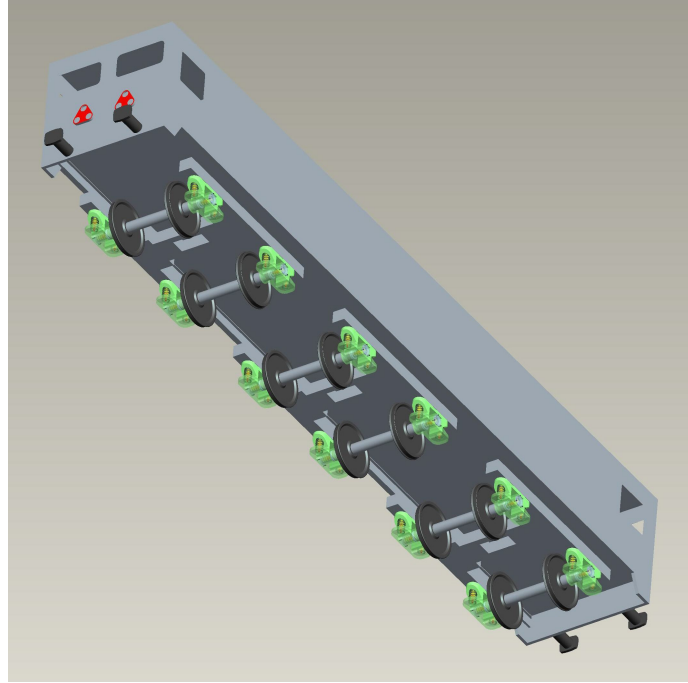
Lokomotifin dinamik modelinin oluşturulmasında Şekil 3.4’de sol görünüşü görülen sistem incelenecektir. Öncelikle sistemi oluşturan alt elemanlar tanıtılacaktır.

3.1 Lokomotif Gövdesi ve Alt Elemanları

Lokomotif gövdesi Şekil 3.4’de de görüldüğü üzere 3 alt eleman grubundan oluşmaktadır;

- Kabin
- Boji
- Tekerlek–seti

Bu nedenle lokomotif dinamiğini incelerken, çoklu gövde dinamiği (multibody dynamics) yaklaşımı ile sistemin kurulması sonuçların daha anlaşılır, mantıklı ve yorumlanabilir olmasını sağlayacaktır.

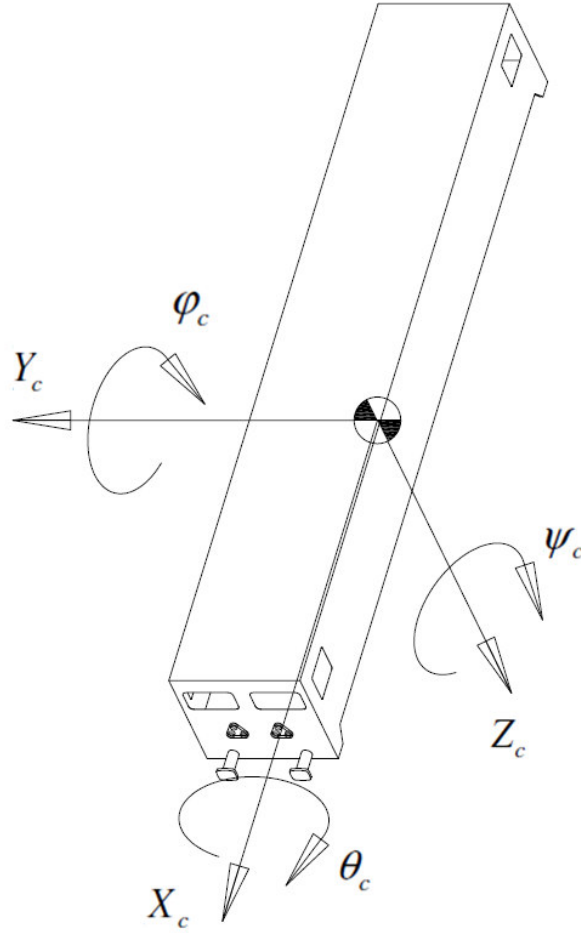


Şekil 3.5 Modellenen lokomotif gövdesi ve alt elemanları montajı

Şekil 3.5’de ise modellenen lokomotif gövdesinin, boji ve tekerlek-setleri ile montajı görülmektedir.

Lokomotifin dinamik modeli, 54 serbestlik dereceli bir dinamik sistem olarak kurulmuştur. Her bir alt elemana ait serbestlik dereceleri kabin, boji ve tekerlek–seti için sırası ile Şekil 3.6, Şekil 3.9 ve Şekil 3.11’de verilmiştir. Çoklu gövde dinamiği kullanılması ile dinamik sistem, tekerlek-setlerine olası her yönden gelebilecek yol düzensizliği girişlerine karşı hassas tepkiler verebilecek duruma getirilmiştir.

3.1.1 Kabin



Şekil 3.6 Kabin ve serbestlik dereceleri

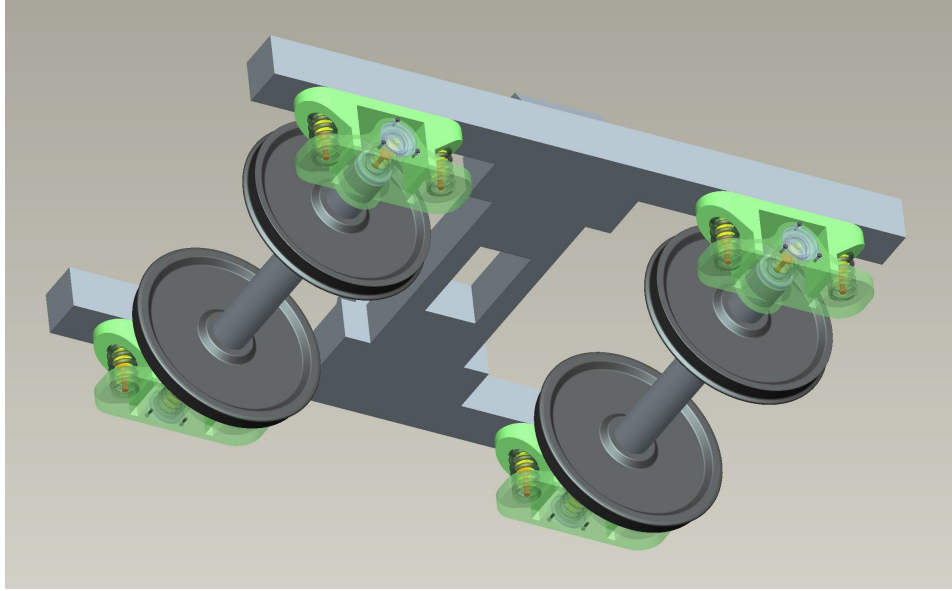
Şekil 3.6’da bojilerin bağlandığı lokomotif gövdesi ve serbestlik dereceleri görülmektedir. Kabinin, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_c , Y_c , Z_c ve x ekseninde dönme (yalpalama) θ_c , y ekseninde dönme (kafa vurma) φ_c , z ekseninde dönme (yanal sapma) ψ_c serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Lokomotif gövdesini “Kabin” olarak da adlandırabiliriz. Tüm çekiş kontrol sistemleri, elektrik motoru besleyicileri ve ekipmanları, fren sistemleri besleyicileri ve ekipmanları ayrıca bulunan kontrol sistemlerini barındırır.

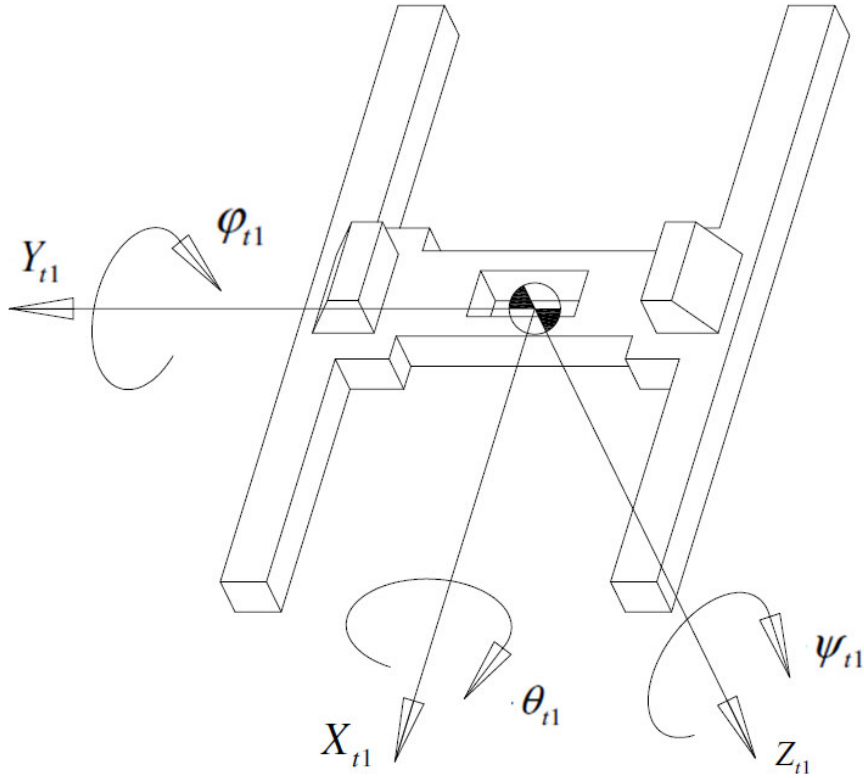
Titreşim analizi yapılacak ana eleman kabindir, çünkü kütlesi ve kütleli atalet momentlerinin diğer alt elemanlara oranla çok büyük olması kabini, dinamik kuvvetlerden en fazla etkilenen yapı haline getirmiştir.

3.1.2 Boji

Şekil 3.7’de lokomotif gövdesinden ayrılan bojinin ve bojiye monte edilen tekerlek-setlerinin montaj hali detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Modellenen boji ve tekerlek–seti montajı



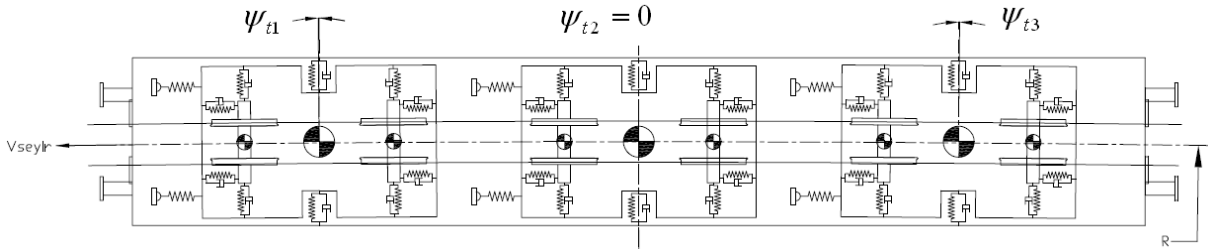
Şekil 3.8 I.Boji ve serbestlik dereceleri

Şekil 3.8’de lokomotif gövdesi ile tekerlek-setleri arasındaki bağlantıyı sağlayan I.boji ve serbestlik dereceleri görülmektedir.

I.Bojinin, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_{t1} , Y_{t1} , Z_{t1} ve x ekseninde dönme (yalpalama) θ_{t1} , y ekseninde dönme (kafa vurma) φ_{t1} , z ekseninde dönme (yanal sapma) ψ_{t1} serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Boji, ara eleman olup lokomotifte 3 adet bulunmaktadır. Bojiler, tekerlek-setlerini ve çekiş sistemlerini taşır. Elektrik motorlarının ve fren sistemlerinin sabit bağlantı yerleri boji üzerindedir ve böylece lokomotifi + veya – ivmelendiren yada sabit hızla ilerleten çekiş kuvvetini tekerlek-setlerinden, bağlantı çubukları vasıtasıyla, gövdeye iletmek gibi çok önemli görev üstlenmiştir.

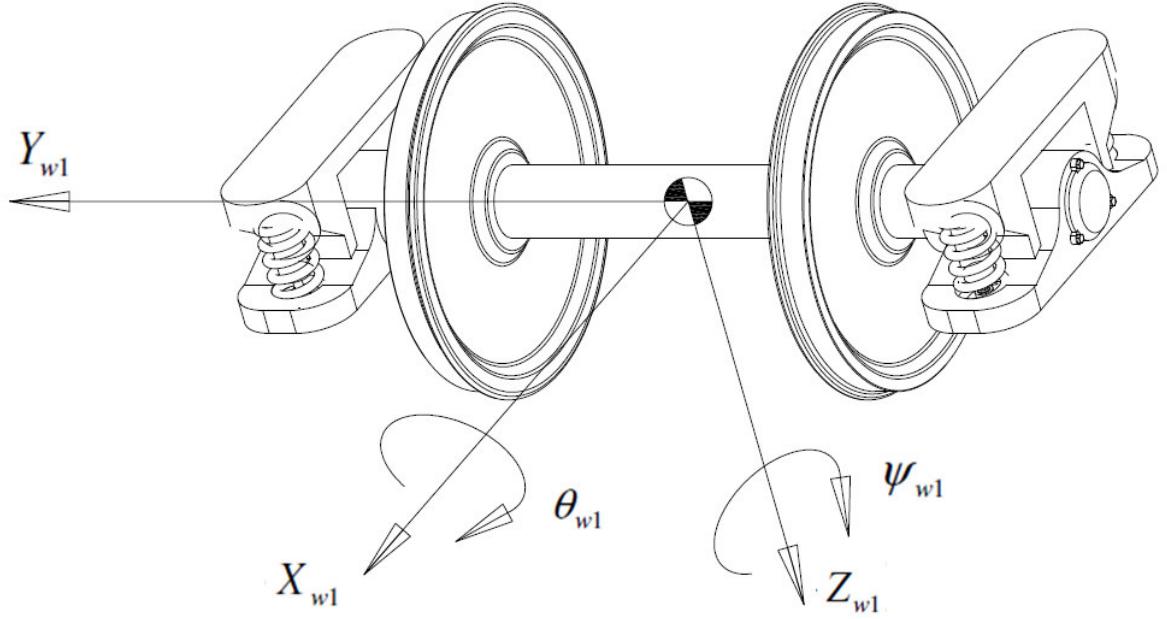
Bojilerin, viraj(kurp) dönüş kabiliyetine önemli katkıları bulunmaktadır. Aynı seyir hızıyla ilerlemekte olan 2 lokomotif, aynı dönme yarıçapına sahip kurba girdiğini düşünürsek 3 bojili bir lokomotif, 2 bojili bir lokomotive göre çok daha kolay, daha az atalet kuvvetine maruz kalarak kısacası daha sorunsuz dönüş yapabilmektedir. Bu sonuç geometrik zorunluluktan doğmaktadır. Dönüş yapmakta olan bir lokomotifte bojilerin yanal sapma açıları ve dönüş yaparken sağladığı esneklik Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9 Dönüş yapan lokomotifte bojilerin yanal sapma açıları

Taşıt dinamiği açısından en önemli görevi yol düzensizliklerinden kaynaklanan dinamik yol kuvvetlerini doğrudan gövdeye iletmeyip arada fazladan serbestlik derecesi sağlayarak dinamik damper görevi görerek titreşimleri sönmüleyerek iletmektedir.

3.1.3 Tekerlek–seti

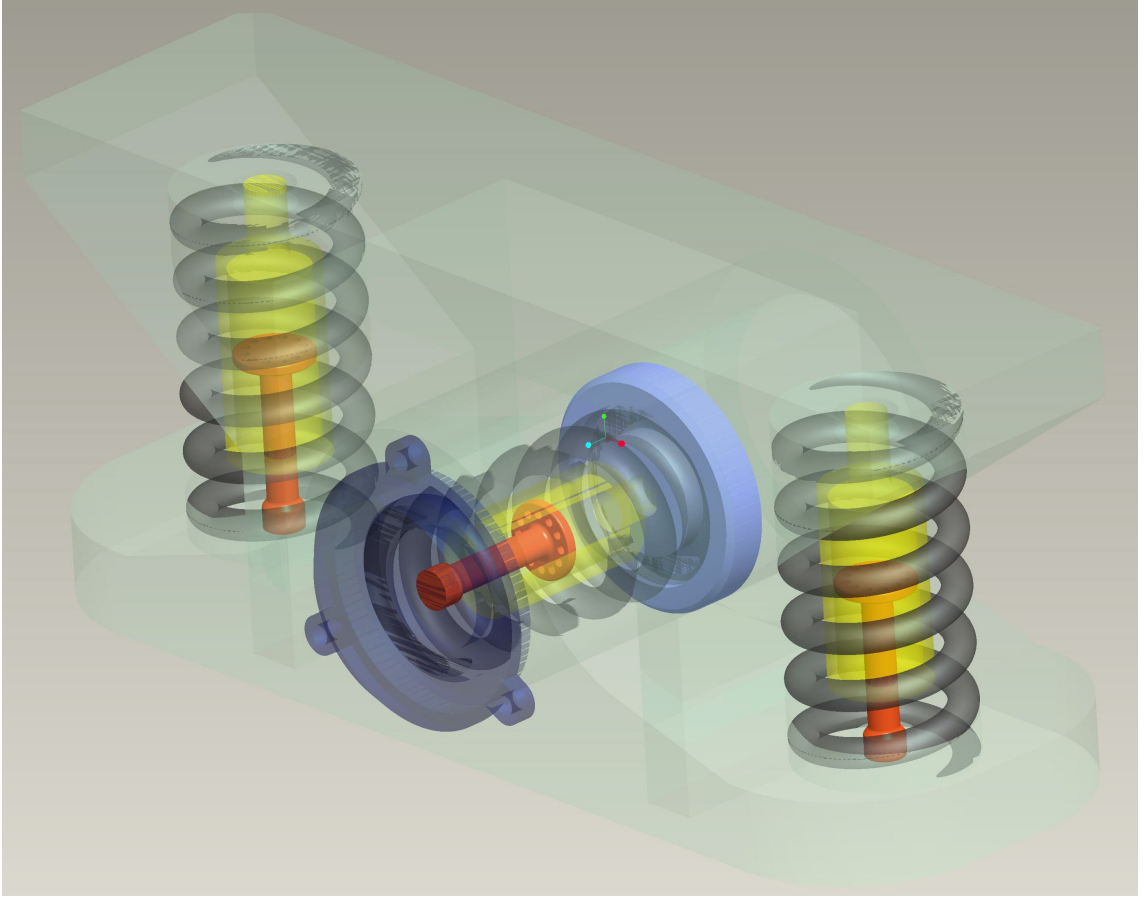


Şekil 3.10 I.Tekerlek–seti ve serbestlik dereceleri

Şekil 3.10’da lokomotifin yol ile temasını sağlayan I.tekerlek–seti ve serbestlik dereceleri görülmektedir.

I.Tekerlek–setinin de yine I.boji gibi, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_{w1} , Y_{w1} , Z_{w1} ve x eksenini etrafında dönme (yalpalama) θ_{w1} , z eksenini etrafında dönme (yanal sapma) ψ_{w1} serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 5 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Tekerlek–seti, en alt gövde elemanı olup her bojide 2 adet ve toplamda 6 adet bulunmaktadır. Tüm gövdenin statik ağırlığının ve yol düzgünlüklerinden kaynaklanan dinamik yol kuvvetlerinin etkisinde kalmasına rağmen mukavemetini koruyarak tekerlek ile ray temasını sağlamayı sürdürmesi gereken bir yapıdır.



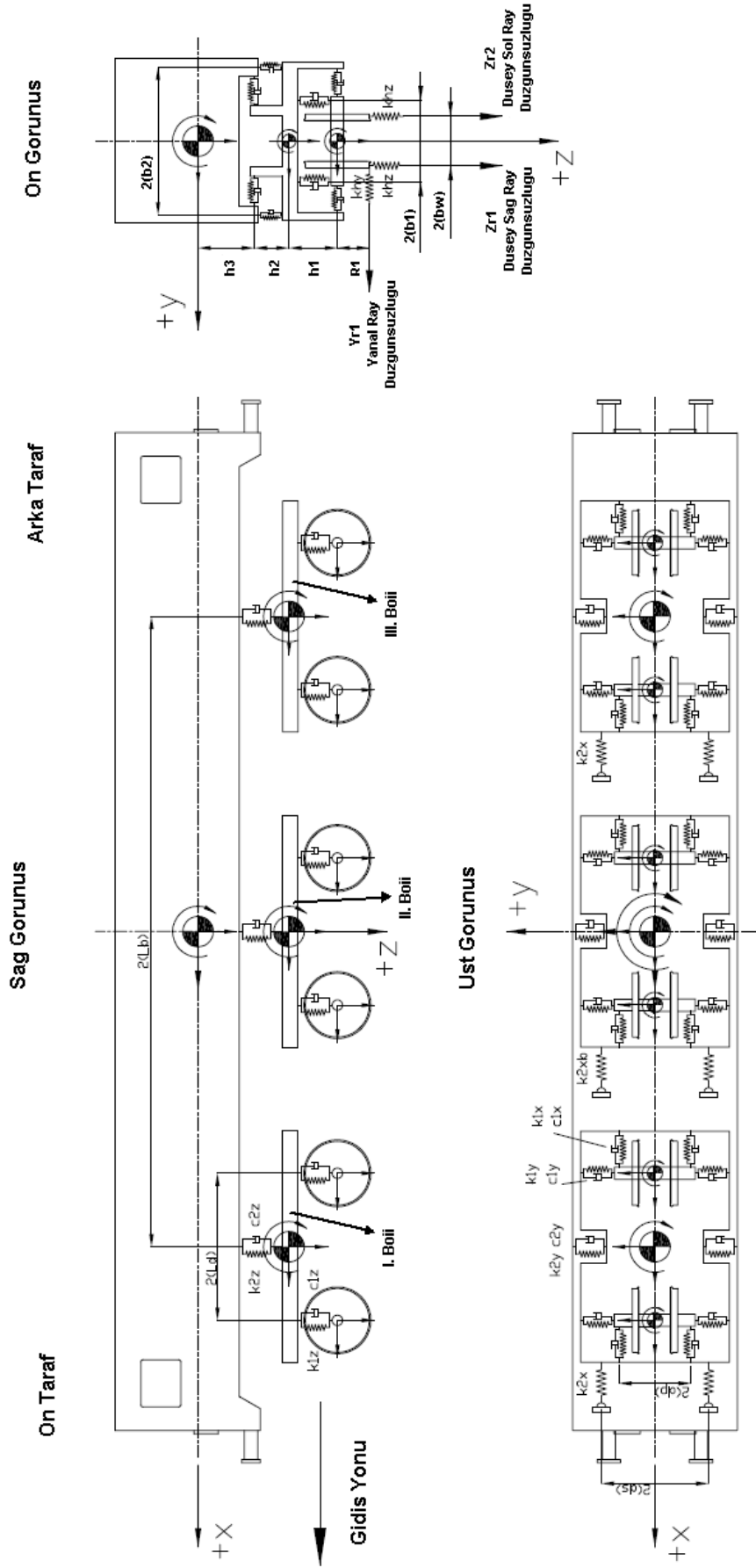
Şekil 3.11 Modellenen tekerlek–setinin boji ile montajını sağlayan ara eleman

Şekil 3.11’de ise modellenen tekerlek–setinin boji ile montajının sağlayan ara eleman görülmektedir. Ayrıca dikey ve yatay yaylar ve süspansiyonlar da görülmektedir. Süspansiyonlar sönüm elemanı olarak görev yapmaktadır.

3.2 Lokomotif Dinamiği Analiz Modeli

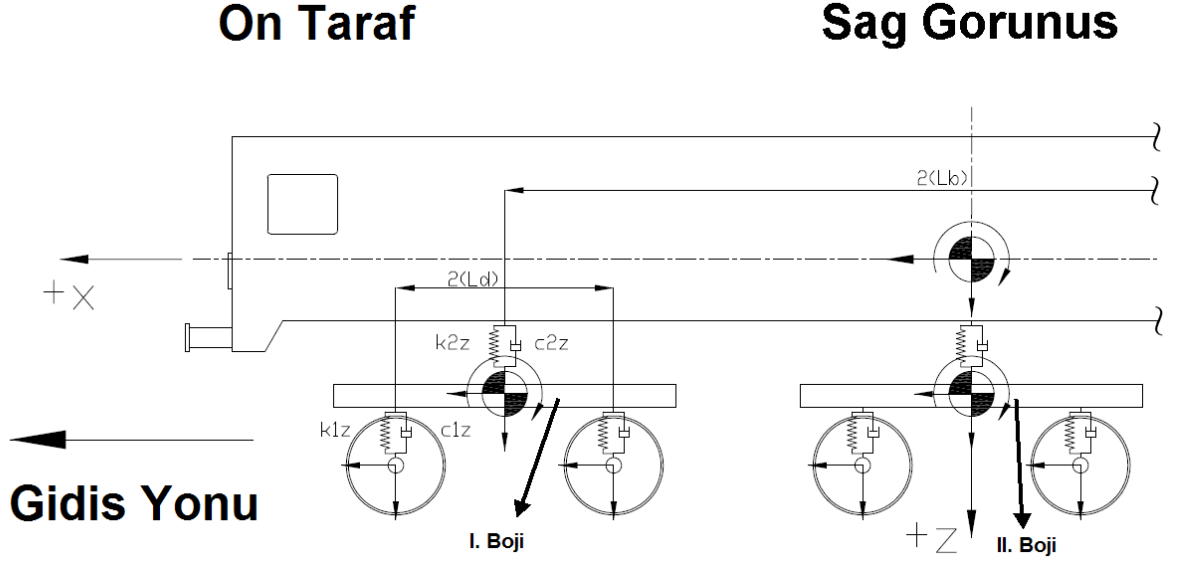
Lokomotif dinamiğini incelerken Şekil 3.12’de görülen model kullanılmıştır. Bu modeli oluştururken, Mangmang vd. (2004) tarafından incelenen model esas alınmış ve x yönündeki yaylar ve süspansiyonlar eklenerek gerçeğe daha yakın bir model oluşturulmuştur.

Dinamik modelde her yöndeki esnekliği gerçekleştirebilmek için x, y ve z yönlerine paralel yay ve sönüm elemanları yerleştirilmiştir.

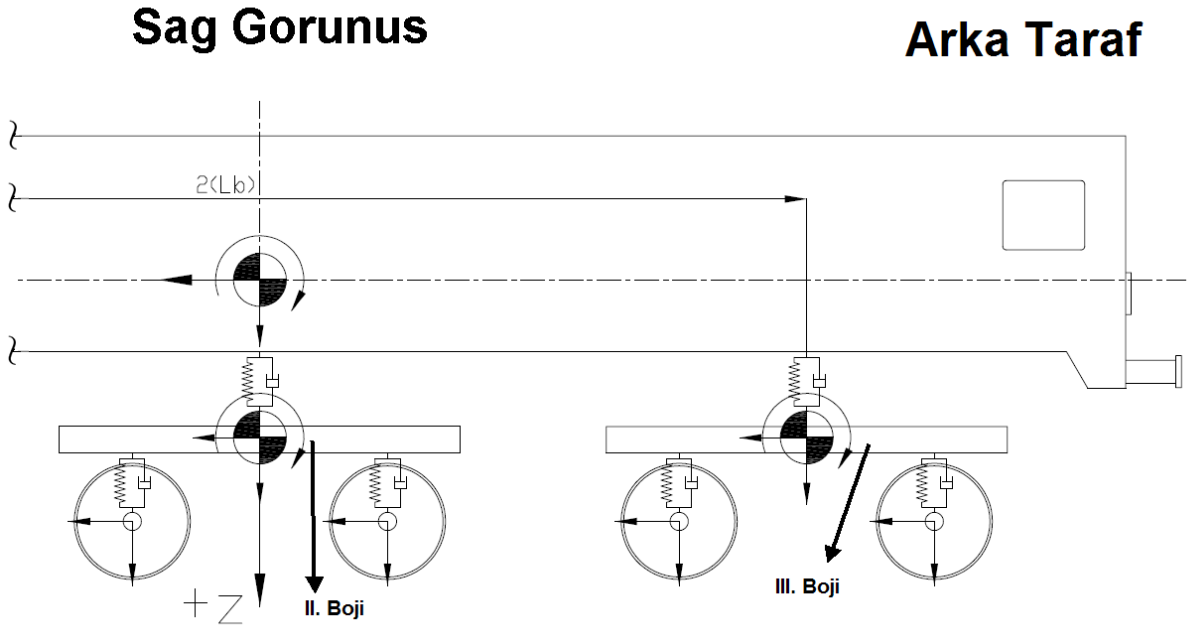


Şekil 3.12 Lokomotif dinamiği analiz modeli

Şekil 3.13 ve 3.14'da kullanılan dinamik analiz modelindeki sırası ile I. , II. ve III.bojilerin sağ bakış detay resimleri görülmektedir. Kabin, boji ve tekerlek–setleri ile düşey yöndeki bağlantılarda yer alan yay ve sönüm elemanları ve serbestlik dereceleri de ayrıca görülmektedir.



Şekil 3.13 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji düşey bağlantı detayları

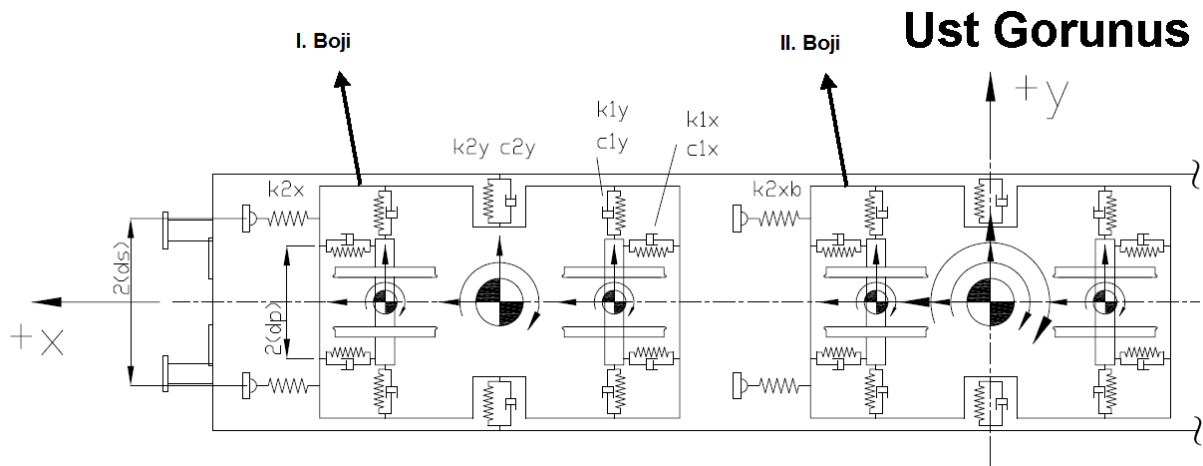


Şekil 3.14 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji düşey bağlantı detayları

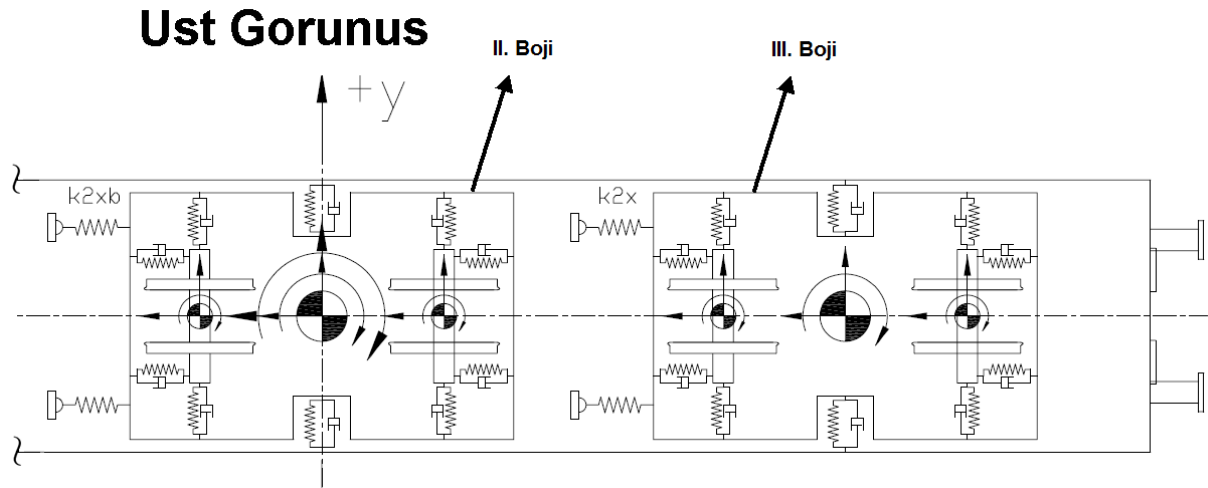
E43000 lokomotifinde x yönünde herhangi bir yay yada süspansiyon(sönüm elemanı)

bulunmamaktadır. X yönüne yay ve sönüm elemanı ekleyerek kabinin, bojilerin ve tekerlek–setlerinin esneme paylarını göz önünde bulundurmuş olarak gerçeğe daha yakın bir simülasyon modeli oluşturulmuştur.

Şekil 3.15 ve 3.16’da kullanılan dinamik analiz modelindeki sırası ile I. , II. ve III.bojilerin üst bakış detay resimleri görülmektedir. Kabin, boji ve tekerlek–setleri ile boylamsal ve yatay yöndeki bağlantılarda yer alan yay ve sönüm elemanları ve serbestlik dereceleri de ayrıca görülmektedir.

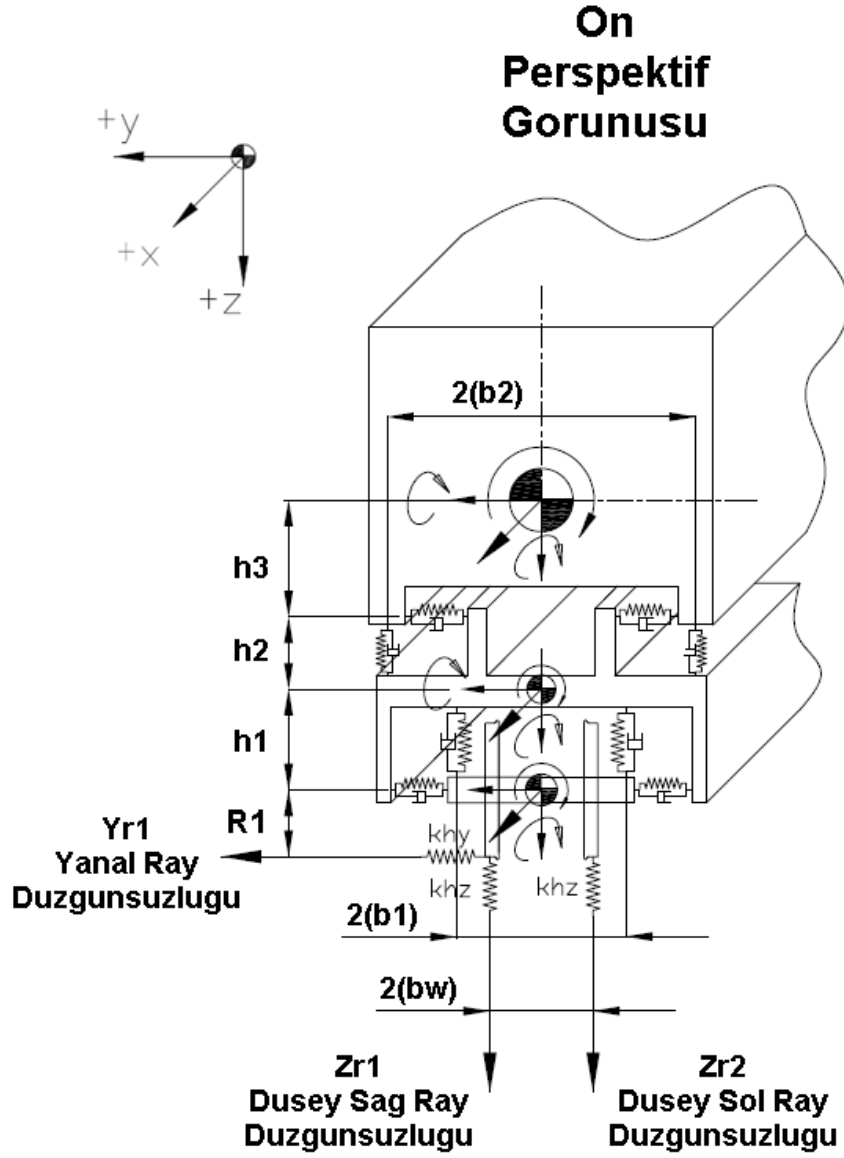


Şekil 3.15 Dinamik analiz modelinde I. ve II.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları



Şekil 3.16 Dinamik analiz modelinde II. ve III.boji boylamsal ve yatay bağlantı detayları

Şekil 3.17’de kullanılan dinamik analiz modelindeki bojinin ön bakış kesit resmi görülmektedir. Kabin, boji ve tekerlek–setlerinin yatay ve dikey yöndeki bağlantılarda yer alan yay ve sönüm elemanları ve serbestlik dereceleri de ayrıca görülmektedir.



Şekil 3.17 Dinamik analiz modeline perspektif bakış kesiti

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.

3.3 Alt Elemanların Kütle ve Kütlesel Atalet Momentlerinin Tanımlanması

Kabin, bojiler ve tekerlek–setlerinin kütle ve kütlesel atalet momentlerinin hesaplanmasında da Pro/Engineer CAD yazılımı kullanılmıştır. 3D olarak modellenmiş elemanların çelik malzemeden imal edildiği yaklaşımı ile kütle ve kütlesel atalet momentleri hesaplanmıştır.

3.4 Ray–Tekerlek İlişkileri

Tren, tekerlekleri ile raya temas ederek ilerlemektedir ve bu gereklilikten ötürü de ray–tekerlek ilişkileri tren dinamiğine etki eden önemli faktörler arasındadır.

Tekerlek ile ray arasındaki ilişkiler yumağı neticesinde tekerlekler ile ray arasında adezyon kuvvetleri doğmakta ve bu kuvvetler sürtünme kuvvetleri ile birlikte tekerlekleri adeta raya yapıştırarak çekiş kuvvetinin doğmasına izin vermektedir. Bazı durumlarda bu yapışmanın (sürtünme katsayısının çok düşük olduğu durumlar, buzlu yüzeyler vb...) oluşmadığı durumlar baş gösterebilmektedir. Bu durumlarda makinist, ray üzerine kum dökerek daha iyi tutunma yüzeyi sağlamaya çalışmaktadır.

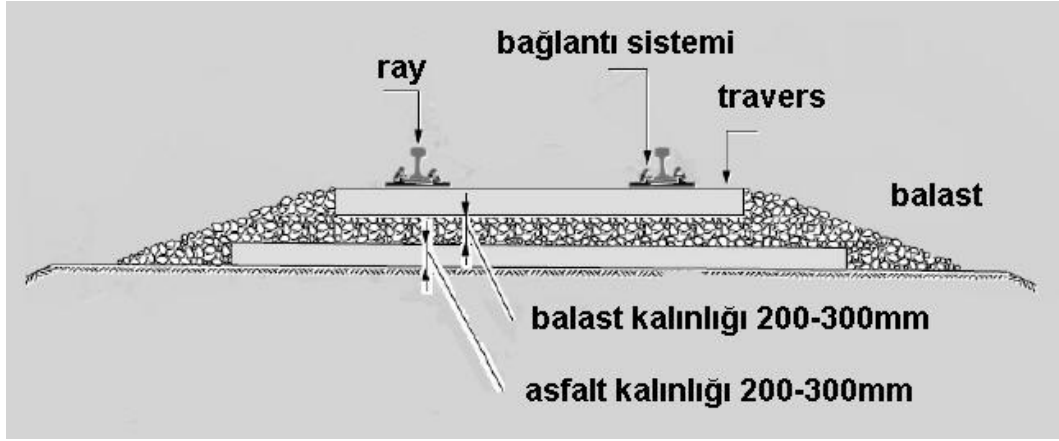
Ray–tekerlek ilişkileri ayrıca tren dinamiği ve titreşim analizleri açısından da çok önem arz etmektedir. Rayın çelik yapısı yüksek lineer elastikiyeti beraberinde getirmektedir. Mühendislik yaklaşımı dahilinde lineer davranış gösteren bir yapının da matematik modelinin oluşturulması daha kolay bir hale gelebilmektedir.

Ray–tekerlek ilişkisini temas yüzeyini ele alarak incelemeye çalıştığımızda ise birçok güçlükler karşımıza çıkmaktadır. Tekerleğin ray üzerindeki “Sünme” davranışları, temas yüzeyinin değişken olması ve daha birçok nedenden ötürü ilişkiler non–lineer yapıda modellemeyi gerektirmektedir.

3.4.1 Ray Yapısı ve Görevleri

Raylar St–52 yapı çeliği malzemesinden sıcak haddeleme yöntemi ile imal edilmektedir. Haddeleme yöntemi, ray malzemenin iç yapısında süreksizliğe neden olmamakta ve lifleri sıkıştırarak iç yapıyı daha mukavemetli hale getirmektedir.

Ray, bağlantı elemanları ile travers adı verilen kılavuzlama elemanlarına monte edilirler. Traversler de balast adı verilen mıcır katmanı içine gömülürler. Mıcır katmanının en altına da yapının rijitliğini artırmak için asfalt dökülmesi bazı uygulamalarda karşımıza çıkabilmektedir. (Şekil 3.18)



Şekil 3.18 Ray ve üst yapı detayı [1]

Rayların görevleri: [1]

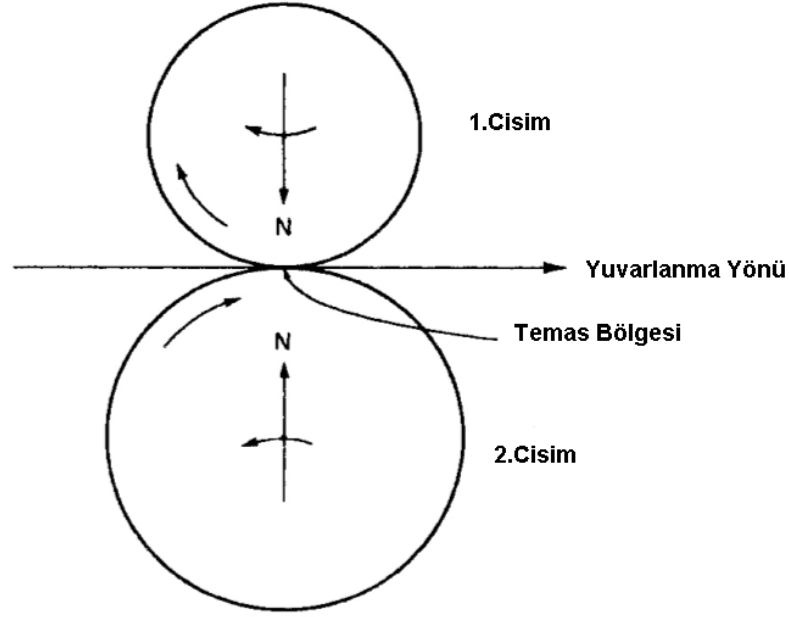
- Tekerlekleri kılavuzlamak ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmak.
- Tekerleklerden gelen yükleri traverslere iletmek.
- Hızlanma ve frenleme kuvvetlerini adezyon ile yaymak.
- Elektrikli hatlarda elektriği iletmek.
- Sinyalizasyon akımlarını iletmek.

3.4.2 Sünme Kuvvet ve Momentleri

Bir raylı taşıtın dinamik davranışını büyük ölçüde ray-tekerlek etkileşim kuvvetleri belirlemektedir. Bu kuvvetler, adezyon ve sünme kuvvetlerine ve ayrıca aşınma karakteristikleri ile doğrudan ilişkilidir. Ray ve tekerlek profillerinin geometrileri adezyon, sünme kuvvetleri ve aşınma karakteristiklerini etkilemekte ve dolayısıyla raylı taşıt dinamiğini de etkilemektedir, çünkü sünme kuvvetleri büyük ölçüde ray-tekerlek arasındaki temas alanından ve arada oluşan temas gerilimi ile doğrudan ilişkilidir.

Rayın yüzey pürüzlülüğü, ray üzerinde su, yağ, kir veya kar birikimi de sünme kuvvetleri üzerinde önemli değişimler yaratmaktadır. Ayrıca ray ve tekerlek malzemeleri de bu kuvvetleri doğrudan etkilemektedir.

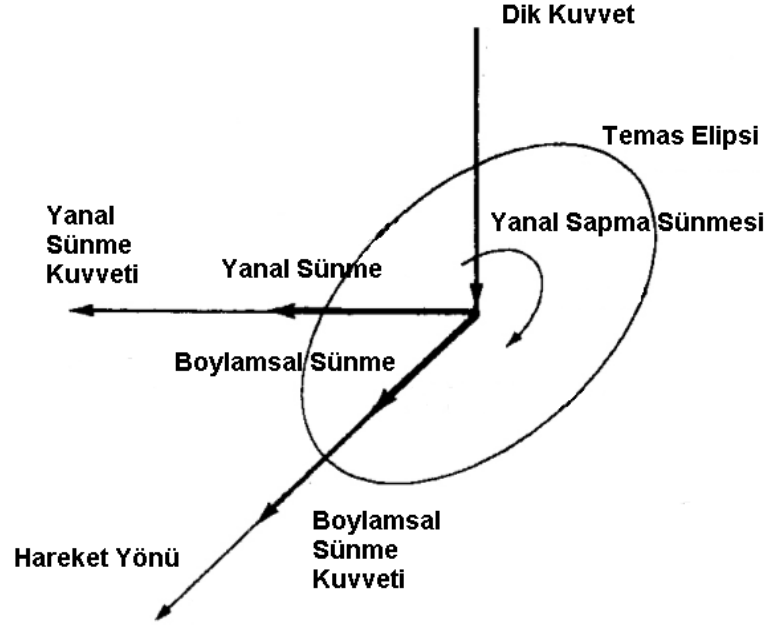
Sünme olayı, iki rijit yapının birbirine kuvvet uygulama sureti ile bastırılıp birbiri üzerinde yuvarlanması durumu söz konusu olunca ortaya çıkmaktadır. (Garg ve Dukkpati, 1984)



Şekil 3.19 İki rijit yapının birbirini üzerinde yuvarlanma durumu (Garg ve Dukkipati, 1984)

Hertz'in statik teorisine göre; temas bölgesinde bir elips geometrisi oluşmaktadır ve bu elipsin yarı eksen uzaklıkları, yuvarlanan yapıların eğrilik yarıçapları ve yapıların birbirine uyguladıkları normal kuvvet yardımları ile hesaplanabilmektedir. Birbiri üzerinde yuvarlanan cisimlerin her ikisi de küre geometrisine sahip veya biri küre ve diğeri de düz geometrili olsalardı temas bölgesinde elips yerine daire geometrisi oluşacaktı.

Teorik olarak birbirini üzerinde yuvarlanan cisimlerin çevresel hızlarının eşit olması gerekirken uygulamada durum biraz daha farklıdır. Sünme teorisi, iki yapının birbirini üzerinde tam yuvarlanma (kayıpsız) hareketinden sapmaları ifade etmekte kullanılır ve bu teori sonucunda oluşturulan sünme ifadeleri birimsizdirler. (Şekil 3.20)



Şekil 3.20 Sünmeler ve sünme kuvvetleri (Garg ve Dukkipati, 1984)

Carter, tren dinamiği çalışmalarında sünme olayını ilk tarif eden kişidir. Boylamsal, yanal ve yanal sapma doğrultularında oluşan sünmeleri ifade etmiştir.

(3.1)'de boylamsal doğrultuda oluşan sünme terimi ifade edilmektedir. Boylamsal sünme, ileri yöndeki gerçek hızın, kayıpsız yuvarlanmadaki teorik ileri yöndeki hızdan farkının yuvarlanma neticesinde oluşan ileri yöndeki hıza oranı olarak tanımlanabilir. ($v = |v|$) (Şekil 3.21-a)

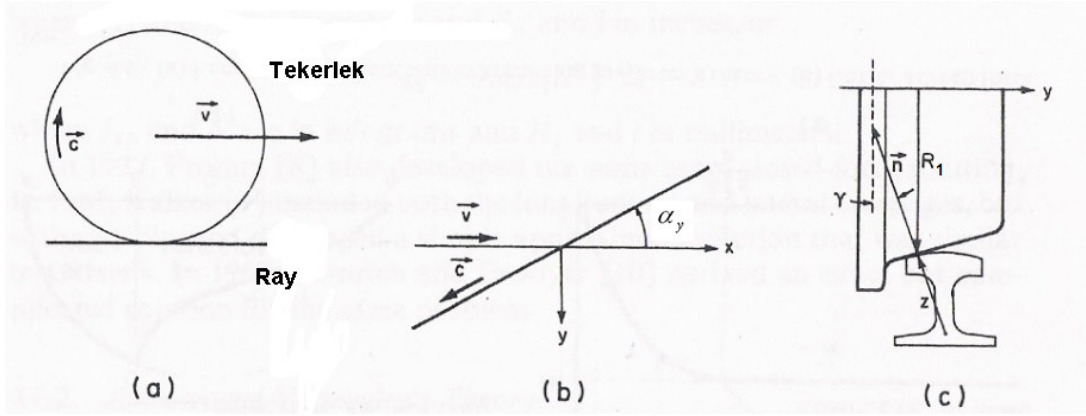
$$\xi_x = \frac{(|v| - |c|)}{v} \quad (3.1)$$

(3.2)'da yanal doğrultuda oluşan sünme terimi ifade edilmektedir. Yanal sünme, $y=0$ iken ray ile tekerlek temas düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanabilir. (Şekil 3.21-b)

$$\xi_y = \alpha_y \quad (3.2)$$

(3.3)'de yanal sapma doğrultusunda oluşan sünme terimi ifade edilmektedir. Yanal sapma doğrultusundaki sünme ise de yuvarlanma yarıçapına ve tekerlek konikliğine bağlı olarak tanımlanabilir. (Şekil 3.21-c)

$$\xi_{sp} \cong (R_1 \sin \gamma) / v\gamma \quad (3.3)$$



Şekil 3.21 Ray üzerinde yuvarlanan bir tekerlekteki sünmeler (Garg ve Dukkipati, 1984)

3.4.2.1 Ray–Tekerlek Temas Elipsi

Rijit iki yapının birbirine bastırılması sonucunda birbirlerine dokunduğu bölge noktasal olmaktan çıkarak bir temas bölgesi oluşturur. Oluşan temas bölgesinin şekli ve büyüklüğü Hertz tarafından statik temas yaklaşımı ile tanımlanmıştır.

Eğer ray ve tekerlek malzemeleri farklı olursa oluşan temas geometrisi elips geometrisinde olmaktadır. Bu temas elipsinin boylamsal yöndeki yarı eksen uzaklığı (a_e) ile yanal yöndeki yarı eksen uzaklığı (b_e) aşağıdaki ampirik yöntem ile hesaplanabilmektedir. (Garg ve Dukkipati, 1984)

Denklemlerde geçen bazı parametreler aşağıda tanımlanmıştır; (Şekil 3.22)

N : Toplam normal kuvvet

R_1 : Tekerleğin nominal yuvarlanma yarıçapı

R'_1 : Tekerleğin yanal yuvarlanma yarıçapı

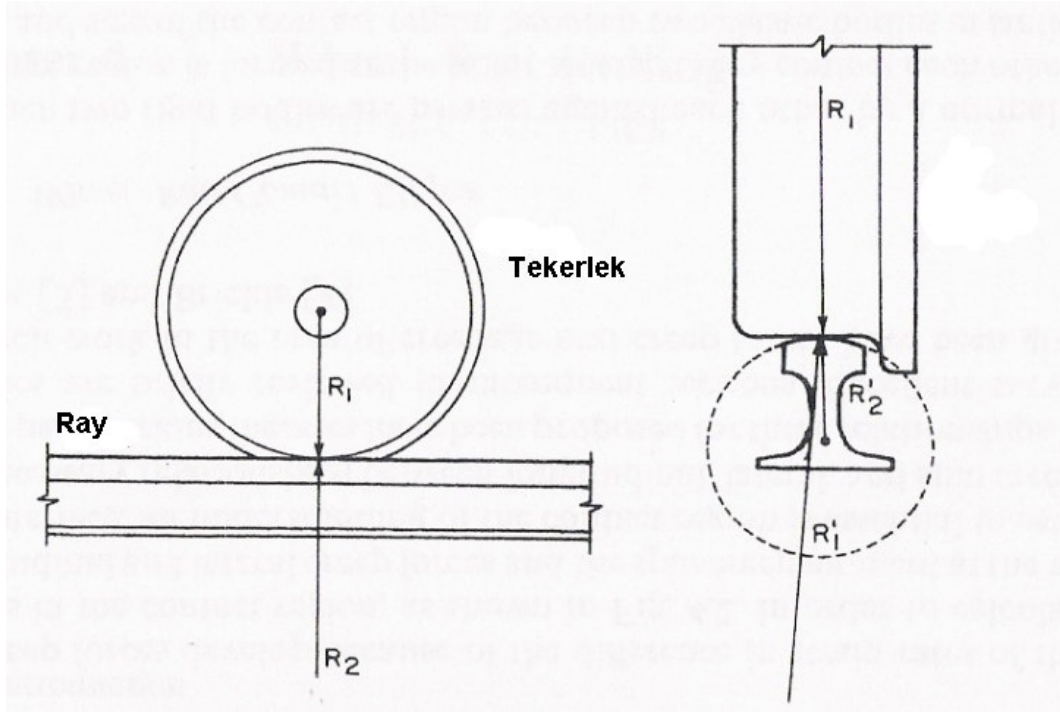
R_2 : Rayın yuvarlanma yarıçapı ($\approx \infty$)

R'_2 : Rayın yanal yuvarlanma yarıçapı

ψ : Tekerlek–setinin ray eksenine göre yanal sapma açısı farkı ($1/R_1$ ve $1/R_2$ eğrilerine dik çizilen düzlemler arasında kalan açı)

ν_w, ν_r : Tekerlek ve ray malzemelerinin poisson oranları

E_w, E_r : Tekerlek ve ray malzemelerinin elastiklik modülleri



Şekil 3.22 Tekerlek ve ray için yuvarlanma yarıçapları (Garg ve Dukkipati, 1984)

Bu denklemlerdeki diğer terimler ise (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8) eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir.

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi E_w} \quad (3.4)$$

$$K_2 = \frac{1 - \nu_r^2}{\pi E_r} \quad (3.5)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right] \quad (3.6)$$

$$K_4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} \right) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \cos(2\psi) \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

$$\theta = \cos^{-1}(K_4/K_3) \quad (3.8)$$

(3.8) eşitliğinin yardımı ile bulunan açı değerine göre de Çizelge 3.1'den m ve n katsayıları bulunarak elipsin yarı eksen mesafeleri (3.9) ve (3.10) eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir.

Çizelge 3.1 Hertz'in m ve n katsayıları (Shabana vd, 2008)

| θ (°) | m | n | θ (°) | m | n | θ (°) | m | n |
|-----------------|-------|--------|-----------------|-------|--------|-----------------|-------|-------|
| 0.5 | 61.40 | 0.1018 | 10 | 6.604 | 0.3112 | 60 | 1.486 | 0.717 |
| 1 | 36.89 | 0.1314 | 20 | 3.813 | 0.4125 | 65 | 1.378 | 0.759 |
| 1.5 | 27.48 | 0.1522 | 30 | 2.731 | 0.4930 | 70 | 1.284 | 0.802 |
| 2 | 22.26 | 0.1691 | 35 | 2.397 | 0.5300 | 75 | 1.202 | 0.846 |
| 3 | 16.50 | 0.1964 | 40 | 2.136 | 0.5670 | 80 | 1.128 | 0.893 |
| 4 | 13.31 | 0.2188 | 45 | 1.926 | 0.6040 | 85 | 1.061 | 0.944 |
| 6 | 9.79 | 0.2552 | 50 | 1.754 | 0.6410 | 90 | 1.000 | 1.000 |
| 8 | 7.86 | 0.2850 | 55 | 1.611 | 0.6780 | | | |

$$a_e = m[3\pi N(K_1 + K_2)/4K_3]^{1/3} \quad (3.9)$$

$$b_e = n[3\pi N(K_1 + K_2)/4K_3]^{1/3} \quad (3.10)$$

Tez çalışmasında, temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin ampirik yöntem kullanılarak el ile doğru hesaplanmasının güç olacağı düşünülerek hazırlanmış program kullanılmıştır. Kullanılan paket program, daha önce triboloji üzerine birçok hesaplama programı yapmış Hollanda ve Belçikalı araştırmacıların bir araya gelerek oluşturduğu grubun bir ürünüdür. [10]

Hertzian elliptic contact

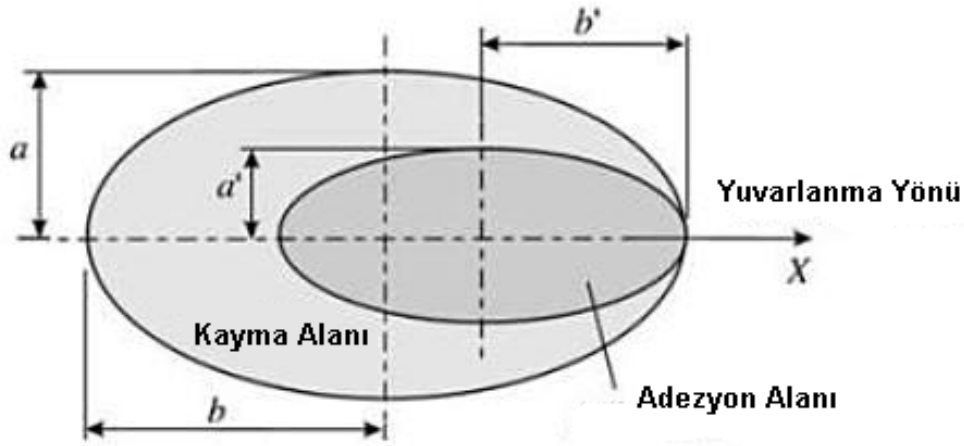
Default value:
Body 1, ring diameter 30 mm, 100Cr6
Body 2, shaft diameter 20 mm, 100Cr6

| | Body 1 | | Body 2 | |
|---|--------|-------------|--------|-------------|
| Young's modulus E | 210 | GPa | 210 | GPa |
| Poisson's ratio | 0.3 | | 0.3 | |
| Radius r_x (enter R=0! for a plain surface) | 610 | 10^{-3} m | 0 | 10^{-3} m |
| Radius r_y (enter R=0! for a plain surface) | 0 | 10^{-3} m | 300 | 10^{-3} m |
| Load F prescribed | | | 98060 | N |
| Effective Young's modulus E' | | | 230.8 | GPa |
| Effective contact radius R' | | | 201.1 | 10^{-3} m |
| Semi contact width a | | | 5.11 | 10^{-3} m |
| Semi contact width b | | | 8.12 | 10^{-3} m |
| Mean contact pressure p_m | | | 0.75 | GPa |
| Maximum contact pressure p_{max} | | | 1.13 | GPa |

Solve Reset Print

Şekil 3.23 Temas elipsinin yarı eksen mesafelerinin program ile hesaplanması [10]

Şekil 3.23’de programa girilen parametrelere karşılık oluşan temas elipsinin parametreleri görülmektedir.



Şekil 3.24 Johnson ve Vermulen’e göre temas elipsi (Shabana vd, 2008)

3.4.2.2 Sünme Kuvveti Katsayıları

Kalker’in yaklaşımına göre temas elipsinin geometrisi ile sünme kuvvetleri arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki de sünme kuvveti katsayıları ile sağlanmaktadır. Aşağıda sünme katsayıları ifade edilmiştir:

f_{11} : Yanal doğrultudaki sünme katsayısı

f_{12} : Yanal / yanal sapma doğrultularındaki sünme katsayısı

f_{22} : Yanal sapma doğrultusundaki sünme katsayısı

f_{33} : Boylamsal doğrultudaki sünme katsayısı

Sünme katsayıları, temas elipsinin yarı eksen mesafeleri, ray – tekerlek malzemelerinin ortak kayma modülü ve Çizelge 3.2’deki katsayılar ile (3.12), (3.13) (3.14) ve (3.15) eşitlikleri ile hesaplanabilir.

G_w, G_r : Tekerlek ve ray malzemeleri için kayma modülü olmak üzere, ortak kayma modülü G , (3.11) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$G = (2G_w G_r) / (G_w + G_r) \quad (3.11)$$

Çizelge 3.2 Kalker'in süne denklemlerindeki C_{ij} katsayıları (Shabana vd, 2008)

| g | C_{11} | | | C_{22} | | | $C_{23} = -C_{32}$ | | | C_{33} | | |
|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | $\nu = 0$ | 0.25 | 0.5 | $\nu = 0$ | 0.25 | 0.5 | $\nu = 0$ | 0.25 | 0.5 | $\nu = 0$ | 0.25 | 0.5 |
| (a/b) | | | | | | | | | | | | |
| 0.1 | 2.51 | 3.31 | 4.85 | 2.51 | 2.52 | 2.53 | 0.334 | 0.473 | 0.731 | 6.42 | 8.28 | 11.70 |
| 0.2 | 2.59 | 3.37 | 4.81 | 2.59 | 2.63 | 2.66 | 0.483 | 0.603 | 0.809 | 3.46 | 4.27 | 5.66 |
| 0.3 | 2.68 | 3.44 | 4.80 | 2.68 | 2.75 | 2.81 | 0.607 | 0.715 | 0.889 | 2.49 | 2.96 | 3.72 |
| 0.4 | 2.78 | 3.53 | 4.82 | 2.78 | 2.88 | 2.98 | 0.720 | 0.823 | 0.977 | 2.02 | 2.32 | 2.77 |
| 0.5 | 2.88 | 3.62 | 4.83 | 2.88 | 3.01 | 3.14 | 0.827 | 0.929 | 1.07 | 1.74 | 1.93 | 2.22 |
| 0.6 | 2.98 | 3.72 | 4.91 | 2.98 | 3.14 | 3.31 | 0.930 | 1.03 | 1.18 | 1.56 | 1.68 | 1.86 |
| 0.7 | 3.09 | 3.81 | 4.97 | 3.09 | 3.28 | 3.48 | 1.03 | 1.14 | 1.29 | 1.43 | 1.50 | 1.60 |
| 0.8 | 3.19 | 3.91 | 5.05 | 3.19 | 3.41 | 3.65 | 1.13 | 1.25 | 1.40 | 1.34 | 1.37 | 1.42 |
| 0.9 | 3.29 | 4.01 | 5.12 | 3.29 | 3.54 | 3.82 | 1.23 | 1.36 | 1.51 | 1.27 | 1.27 | 1.27 |
| (b/a) | | | | | | | | | | | | |
| 1.0 | 3.40 | 4.12 | 5.20 | 3.40 | 3.67 | 3.98 | 1.33 | 1.47 | 1.63 | 1.21 | 1.19 | 1.16 |
| 0.9 | 3.51 | 4.22 | 5.30 | 3.51 | 3.81 | 4.16 | 1.44 | 1.57 | 1.77 | 1.16 | 1.11 | 1.06 |
| 0.8 | 3.65 | 4.36 | 5.42 | 3.65 | 3.99 | 4.39 | 1.58 | 1.75 | 1.94 | 1.10 | 1.04 | 0.954 |
| 0.7 | 3.82 | 4.54 | 5.58 | 3.82 | 4.21 | 4.67 | 1.76 | 1.95 | 2.18 | 1.05 | 0.965 | 0.852 |
| 0.6 | 4.06 | 4.78 | 5.80 | 4.06 | 4.50 | 5.04 | 2.01 | 2.23 | 2.50 | 1.01 | 0.892 | 0.751 |
| 0.5 | 4.37 | 5.10 | 6.11 | 4.37 | 4.90 | 5.56 | 2.35 | 2.62 | 2.96 | 0.958 | 0.819 | 0.650 |
| 0.4 | 4.84 | 5.57 | 6.57 | 4.84 | 5.48 | 6.31 | 2.88 | 3.24 | 3.70 | 0.912 | 0.747 | 0.549 |
| 0.3 | 5.57 | 6.34 | 7.34 | 5.57 | 6.40 | 7.51 | 3.79 | 4.32 | 5.01 | 0.868 | 0.674 | 0.446 |
| 0.2 | 6.96 | 7.78 | 8.82 | 6.96 | 8.14 | 9.79 | 5.72 | 6.63 | 7.89 | 0.828 | 0.601 | 0.341 |
| 0.1 | 10.70 | 11.70 | 12.90 | 10.70 | 12.80 | 16.00 | 12.20 | 14.60 | 18.00 | 0.795 | 0.526 | 0.228 |

$$f_{11} = (a_e b_e) GC_{22} \quad (3.12)$$

$$f_{12} = (a_e b_e)^{3/2} GC_{23} \quad (3.13)$$

$$f_{22} = (a_e b_e)^2 GC_{33} \quad (3.14)$$

$$f_{33} = (a_e b_e) GC_{11} \quad (3.15)$$

3.4.2.3 Süne Kuvvetleri ve Momenti Eşitlikleri



Şekil 3.25 Tekerlek–setinin temas açıları (Lee ve Cheng, 2005)

Şekil 3.25’de en bir tekerlek–setinin temas açıları, nominal yuvarlanma yarıçapı ve ray üzerinde gezinirken yanal hareket miktarları görülmektedir.

a : İki ray arası genişliğin yarısı

F_{Lxw1} : Sol tekerlek için boylamsal sünme teriminin en genel ifadesi

F_{xw1} : Tekerlek–seti için boylamsal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali

F_{Lyw1} : Sol tekerlek için yanal sünme teriminin en genel ifadesi

F_{yw1} : Tekerlek–seti için yanal sünme teriminin sadeleştirilmiş hali

M_{Lzw1} : Sol tekerlek için yanal sapma sünme teriminin en genel ifadesi

M_{zw1} : Tekerlek–seti için yanal sapma sünme teriminin sadeleştirilmiş hali

R_1 : Tekerleğin nominal yuvarlanma yarıçapı

r_L : Sol tekerlek için yuvarlanma yarıçapı

r_R : Sağ tekerlek için yuvarlanma yarıçapı

δ_L : Sol tekerlek için temas açısı

δ_R : Sağ tekerlek için temas açısı

Kalker’in lineer teorisi referans alınarak ve I. sol tekerlek düşünülerek çıkartılmış sünme denklemleri aşağıdaki gibidir. Sağ tekerlek için yazılmak isteniyorsa “L” indisli terimleri “R” indisli terimler ile değiştirmek gerekecektir.

$$F_{Lxw1} = -\frac{f_{33}}{V} \left[V \left(1 - \frac{r_L}{R_1} \right) - a \dot{\psi}_{w1} \right] \quad (3.16)$$

$$F_{Lyw1} = -\frac{f_{11}}{V} \left[\dot{Y}_{w1} + r_L \dot{\phi}_{w1} - V \psi_{w1} \right] - \frac{f_{12}}{V} \left[\dot{\psi}_{w1} - \frac{V}{R_1} \delta_L \right] \quad (3.17)$$

$$M_{Lzw1} = \frac{f_{12}}{V} \left[\dot{Y}_{w1} + r_L \dot{\phi}_{w1} - V \psi_{w1} \right] - \frac{f_{22}}{V} \left[\dot{\psi}_{w1} - \frac{V}{R_1} \delta_L \right] \quad (3.18)$$

Tez çalışmasında matematik modeli kurulmuş lokomotifin düz uzanmış raylar üzerinde

ilerlemekte olduğunu kabul edilmiştir. Lokomotifin herhangi bir kurba girmeyişi yuvarlanma yarıçaplarının birbirinin aynı olmasına ayrıca temas açılarının da sifıra eşit olmasına neden olmaktadır. Böylece sünme denklemlerindeki r_L , r_R , δ_L ve δ_R terimlerinin bir hükmü kalmamaktadır. Ayrıca sağ ve sol tekerlek için aynı sünme denklemleri elde edildiğinden bu denklemler de bir araya getirilmiştir.

Sadeleştirilmiş sünme denklemlerinin Simulink modelinde uygulanmış hali aşağıdaki boylamsal, yanal ve yanal sapma doğrultuları olmak üzere sırası ile (3.19), (3.20) ve (3.21) denklemlerinde verilmiştir.

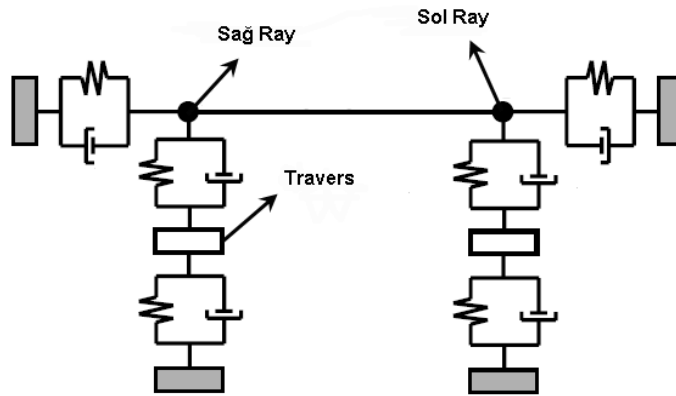
$$F_{xw1} = 2 \left[f_{33} \left(-\frac{a\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$F_{yw1} = 2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w1}}{V} - \psi_{w1} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$M_{zw1} = 2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w1}}{V} + \psi_{w1} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] \quad (3.21)$$

3.4.3 Rayın Düşey Yöndeki Esnekliği

Şekil 3.26'da demiryolu üst yapısının dinamik modeli görülmektedir. Bu modelde ray elemanının hem düşey hem de yanal yönlerde hareket serbestliğinin olduğu ve ayrıca rayın üzerine oturduğu alt yapı elemanlarının da düşey yönde elastik yapıda olduğu düşünülerek matematik modelleme yapılmıştır. Tren dinamiğinin çevredeki yapılar üzerindeki etkisinin araştırılmasında şüphesiz böyle bir matematik model kurulmalıdır.



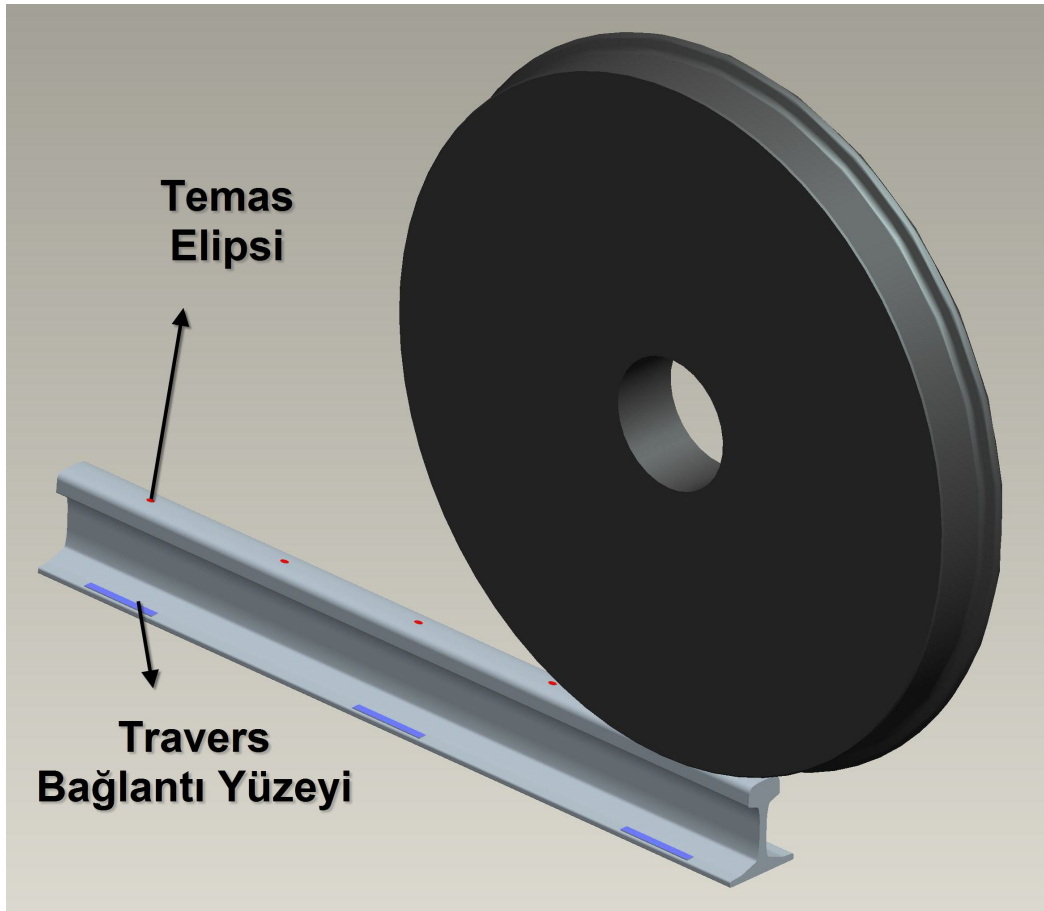
Şekil 3.26 Demiryolu üst yapısının dinamik modeli (Lei ve Noda, 2002)

Fakat tez çalışmasında lokomotif dinamiği incelendiğinden sadece ray elemanının düşey ve yanal yönlerde elastik olduğunu ve rayın alt yapısının da ayrıca elastikiyetinin olmadığını kabul ederek modelleme yapılmıştır. (Literatürde rayın esnekliğini ifade eden yay katsayısı “Hertz Yayı” olarak adlandırılmaktadır.)

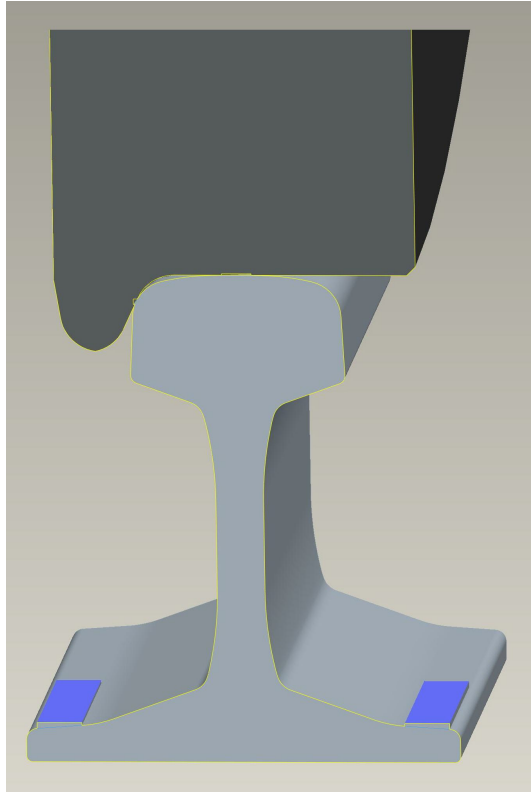
Ray elemanının elastiki hassasiyetini, bir başka deyişle yay katsayısını bulabilmek için UIC-60 rayı ve bu raya uygun tekerlek Pro/Engineer CAD yazılımında 3D olarak modellenmiştir. UIC-60 rayının detay resmi Ek 2’de verilmiştir.

Daha sonra ANSYS-Workbench yazılımında ray üzerinde 5 nokta alınarak bu noktalarda çeşitli statik analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarının ortalaması alınarak düşey ve yanal yönlerdeki yay katsayıları değerlerine ulaşılmıştır.

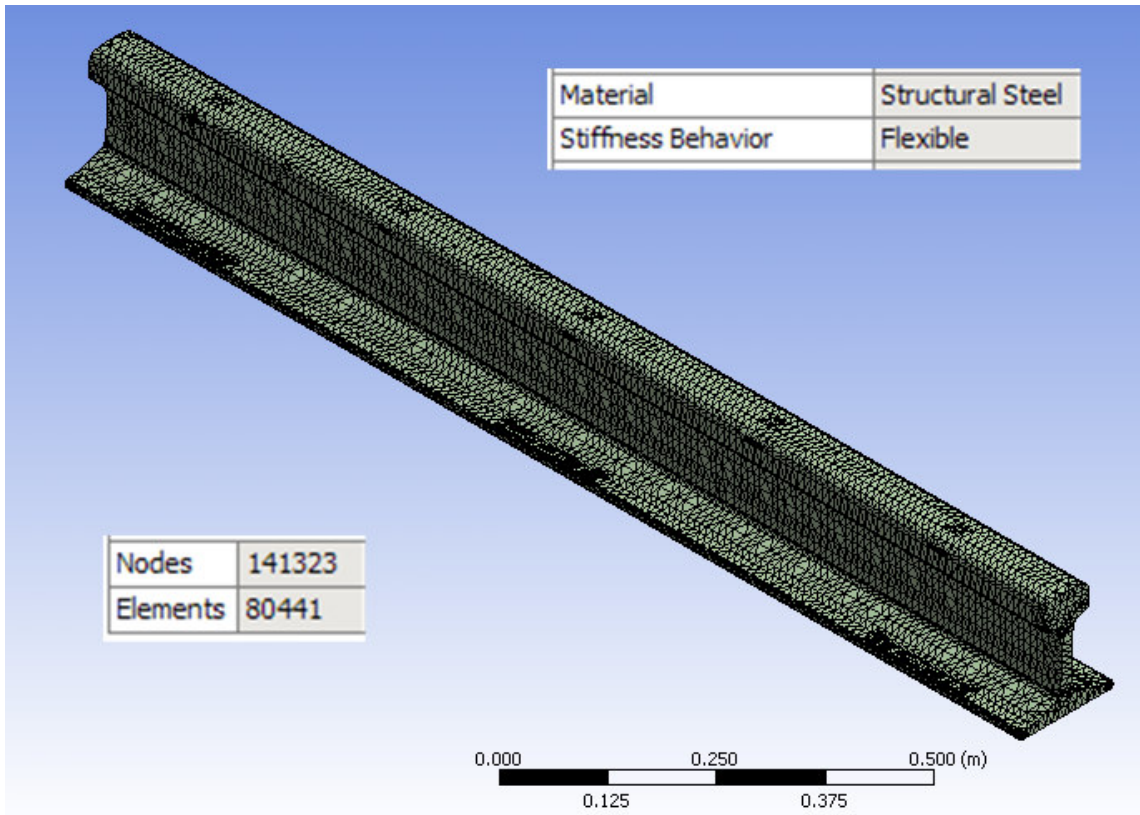
Şekil 3.27’de tekerleğin ray üzerinde bulunduğu durum görülmektedir. Ray ile tekerleğin geometrik olarak montajı yapılmıştır. Şekilde teorik temas alanlarını ve rayın tutturulduğu travers bağlantı yüzeyleri gösterilmektedir. (İki travers eksenleri arası 600mm olarak alınmıştır.)



Şekil 3.27 Tekerleğin ray üzerindeki perspektif görünüşü



Şekil 3.28 Tekerleğin ray üzerindeki perspektif görünüşü



Şekil 3.29 Ray parçasının sonlu elemanlara bölünmüş hali

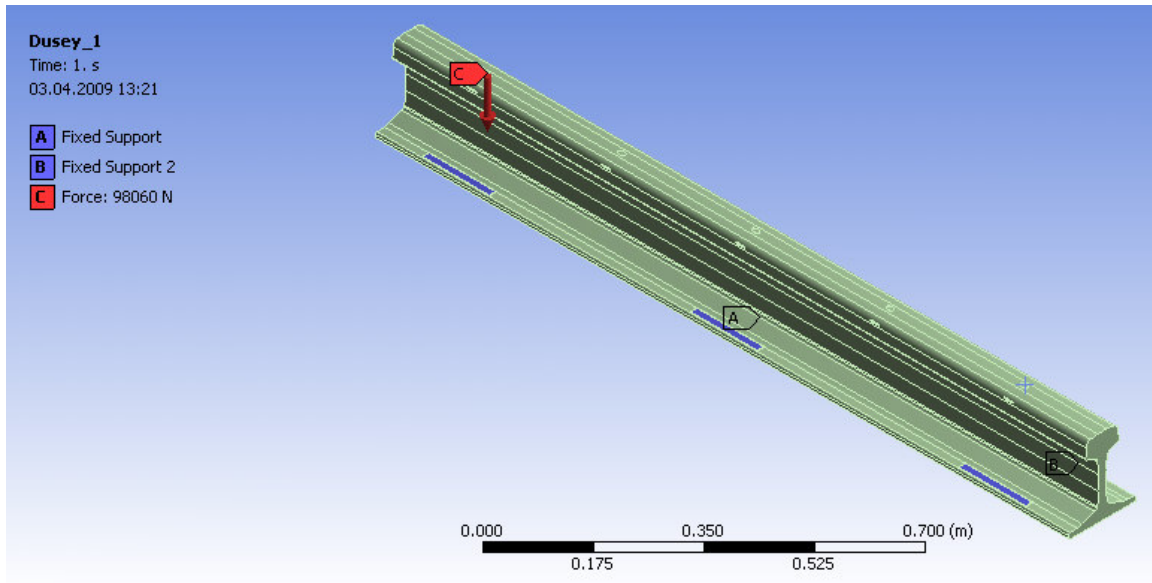
Sonlu elemanlar analizi için modellenen UIC-60 ray profilinin boyu 1500mm olarak seçilmiştir. Model, 3D olarak ANSYS-Workbench yazılımı ortamına katı olarak aktarılmıştır. Daha sonra ise sonlu elemanlara bölme işlemi (meshing) gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlara bölüldükten sonra parça üzerinde Şekil 3.29’da da görüldüğü gibi 80441 adet sonlu eleman ve 141323 adet düğüm noktası (node) meydana gelmiştir.

Eğer sonlu eleman sayısı çok artırırsa bir başka deyişle çok daha küçük eleman boyutuna doğru gidilirse sonuçlar bir o kadar hassaslaşacak ve gerçeğe yakınsayacak fakat analiz zamanı çok uzayacaktır. Bu hususlar göz önüne alınarak ray parçası üzerinde gerçekleştirilecek statik yükleme analizleri sonuçlarının hassasiyeti açısından sonlu eleman büyüklükleri yeteri kadar küçük seçilmiştir.

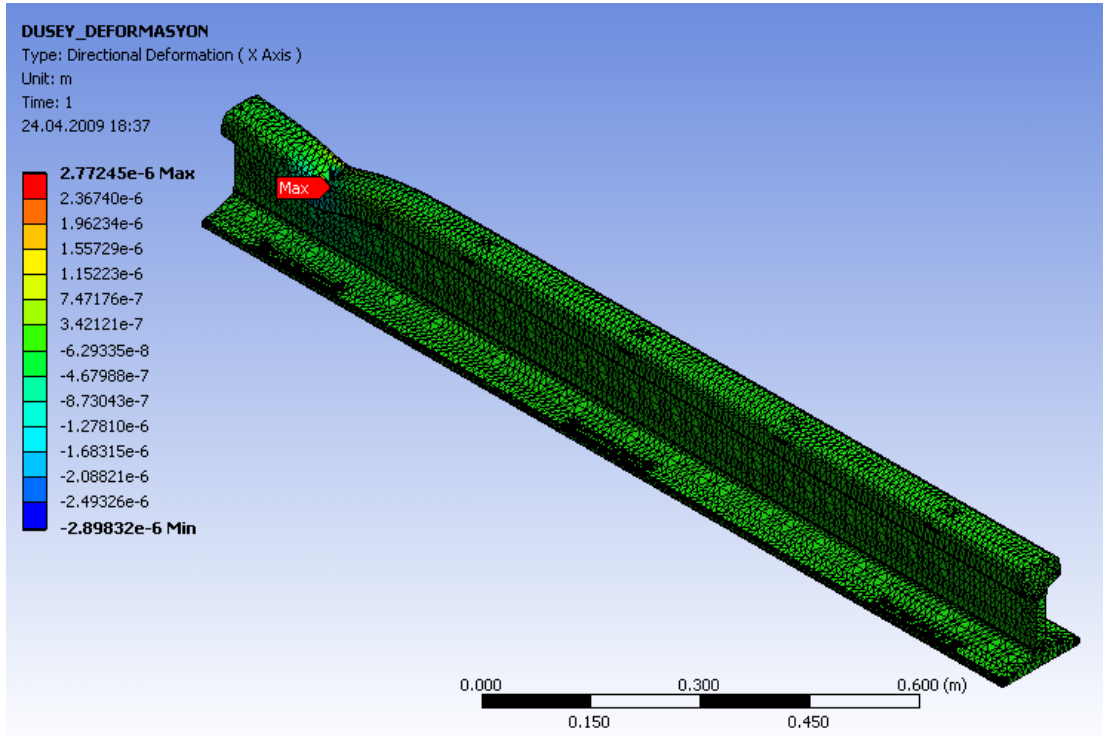
Ray elemanının malzemesi olarak da ANSYS-Workbench yazılımının malzeme kütüphanesinde bulunan yapı çeliği seçilmiştir.

3.4.3.1 Düşey Yöndeki I. Analiz Noktası

Şekil 3.30’da düşey yöndeki analizlerde kullanılan birinci nokta görülmektedir. Bu noktaya düşey doğrultuda, F_z büyüklüğünde bir kuvvet uygulanmıştır. Mavi ile görülen yüzeylerin de traversler yardımı ile alt yapıya bağlandığı ve hareket etmediği düşünülmüştür.



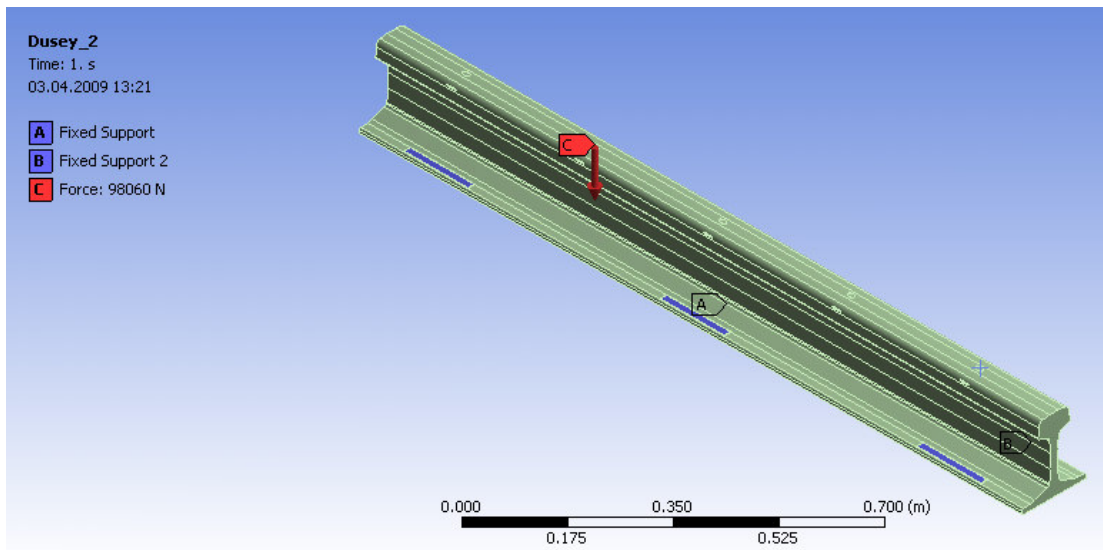
Şekil 3.30 I.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



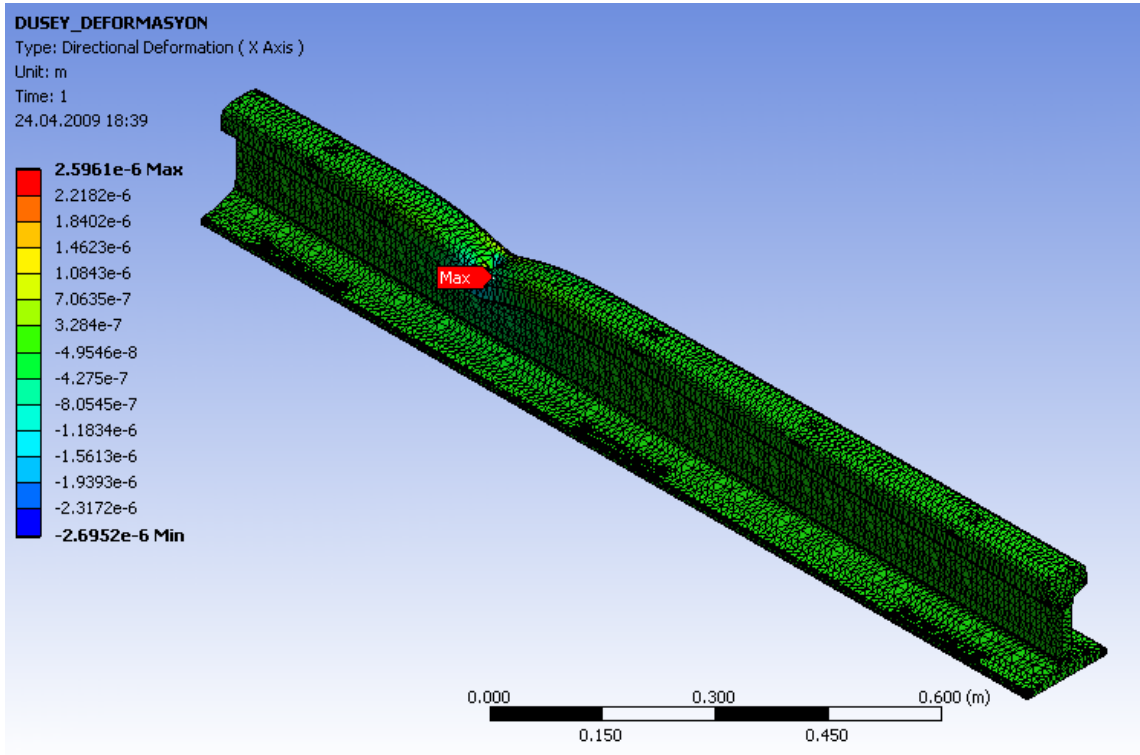
Şekil 3.31 I.analiz noktasındaki düşey şekil değışirme

3.4.3.2 Düşey Yöndeki II. Analiz Noktası

Şekil 3.32’de düşey yöndeki analizlerde kullanılan ikinci nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 300mm kaydırılmıştır.



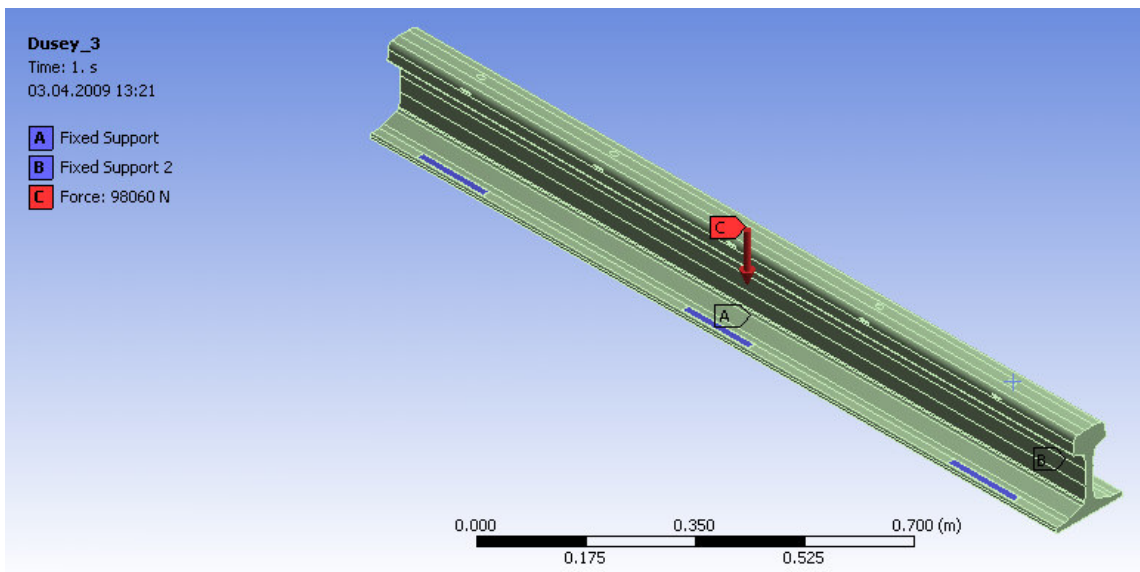
Şekil 3.32 II.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



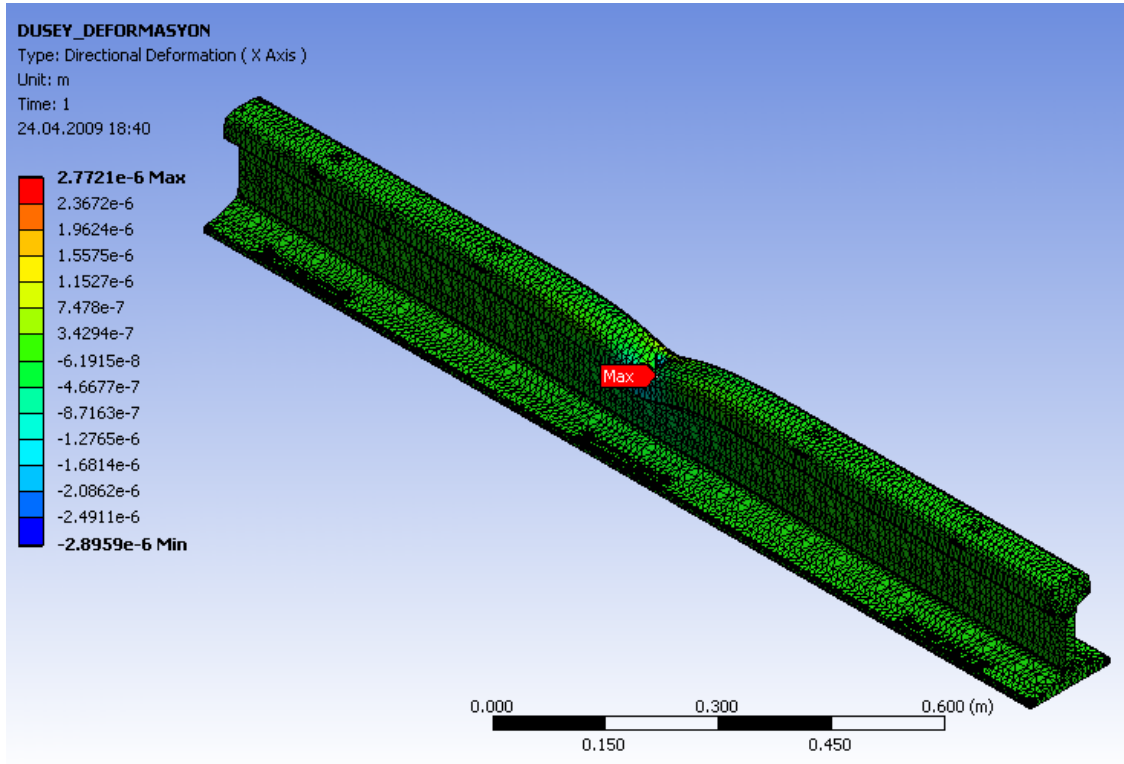
Şekil 3.33 II.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme

3.4.3.3 Düşey Yöndeki III. Analiz Noktası

Şekil 3.34’de düşey yöndeki analizlerde kullanılan üçüncü nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 600mm kaydırılmıştır.



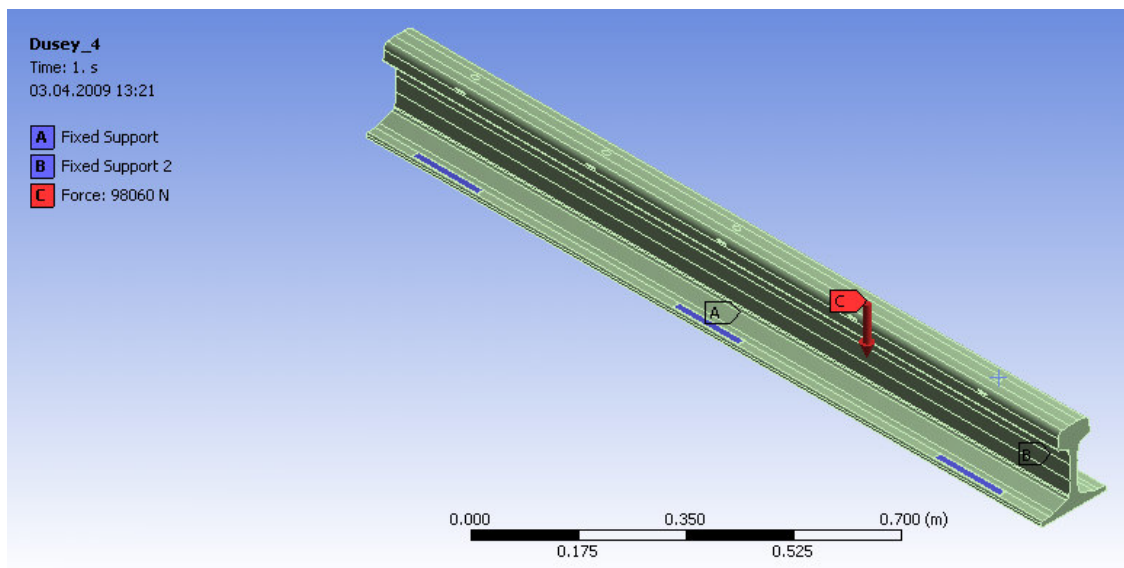
Şekil 3.34 III.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



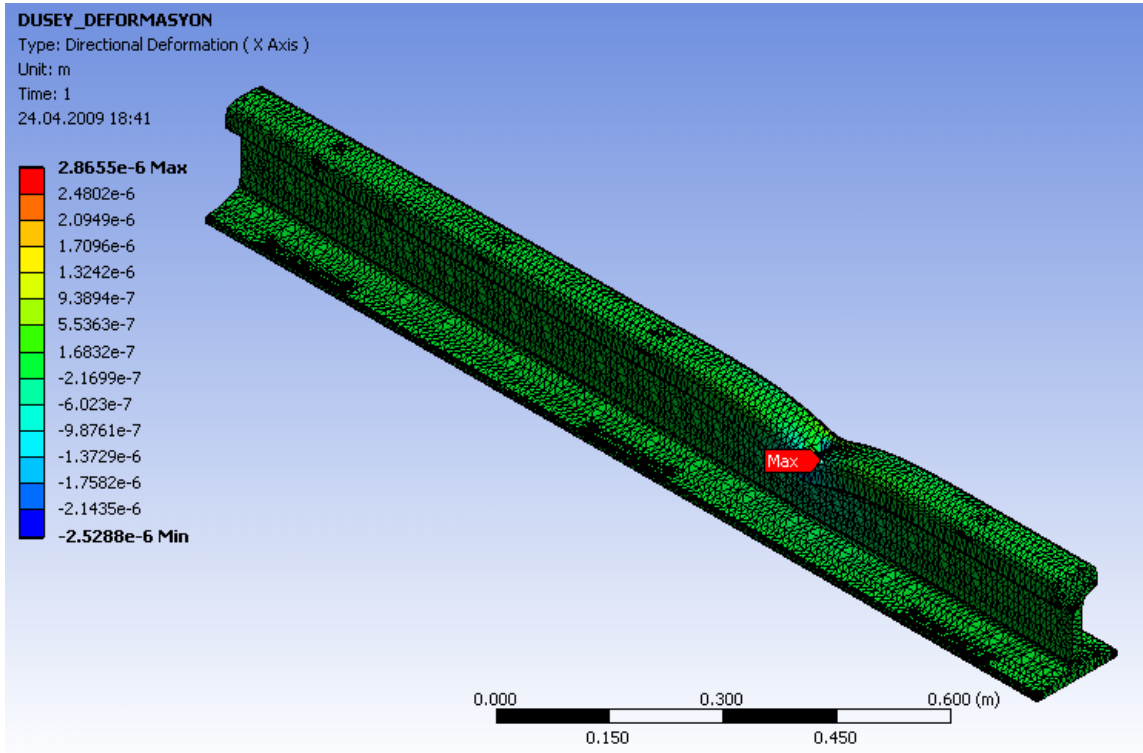
Şekil 3.35 III.analiz noktasındaki düşey şekil değişirme

3.4.3.4 Düşey Yöndeki IV. Analiz Noktası

Şekil 3.36’da düşey yöndeki analizlerde kullanılan dördüncü nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 900mm kaydırılmıştır.



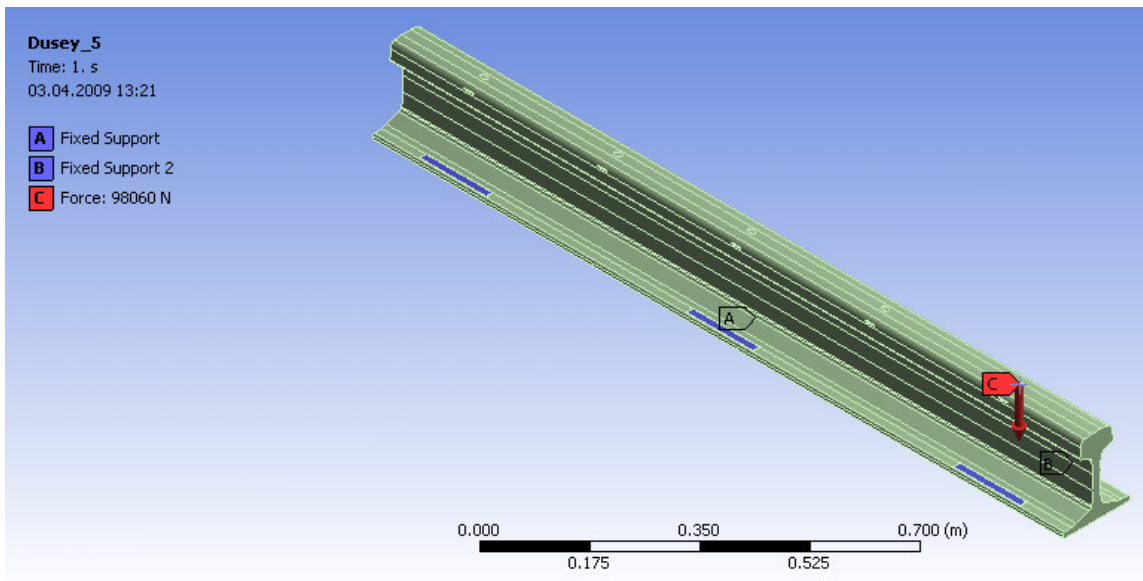
Şekil 3.36 IV.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



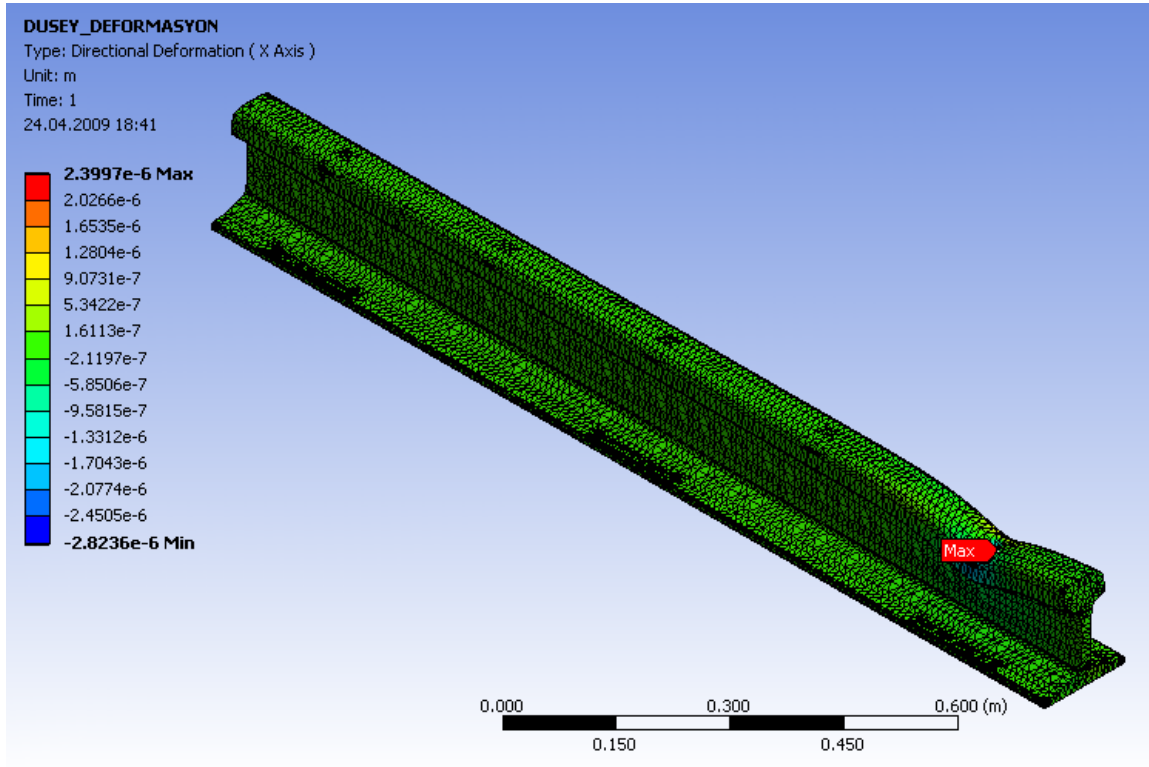
Şekil 3.37 IV.analiz noktasındaki düşey şekil değiştirme

3.4.3.5 Düşey Yöndeki V. Analiz Noktası

Şekil 3.38’de düşey yöndeki analizlerde kullanılan beşinci nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 1200mm kaydırılmıştır.



Şekil 3.38 V.analiz noktasına düşey yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



Şekil 3.39 V.analiz noktasındaki düşey şekil değıştirme

3.4.3.6 Düşey Yöndeki Ortalama Yay Katsayısı Değeri Hesaplanması

I. ve V. noktaların, sonlu eleman yapısında geometrik süreksizlik bölgelerine yakın olmaları bir başka deyişle mesnet bölgelerine uzak olmaları sonuçları etkileyebilir.

Bu açıdan daha sağlıklı bir analiz için II.(Şekil 3.33), III.(Şekil 3.35) ve IV.(Şekil 3.37) noktadaki maksimum düşey şekil değıştirmelerin ortalaması alınması daha doğrudur.

$$\Delta z_{ort} = \frac{\Delta z_2 + \Delta z_3 + \Delta z_4}{3} \quad (3.22)$$

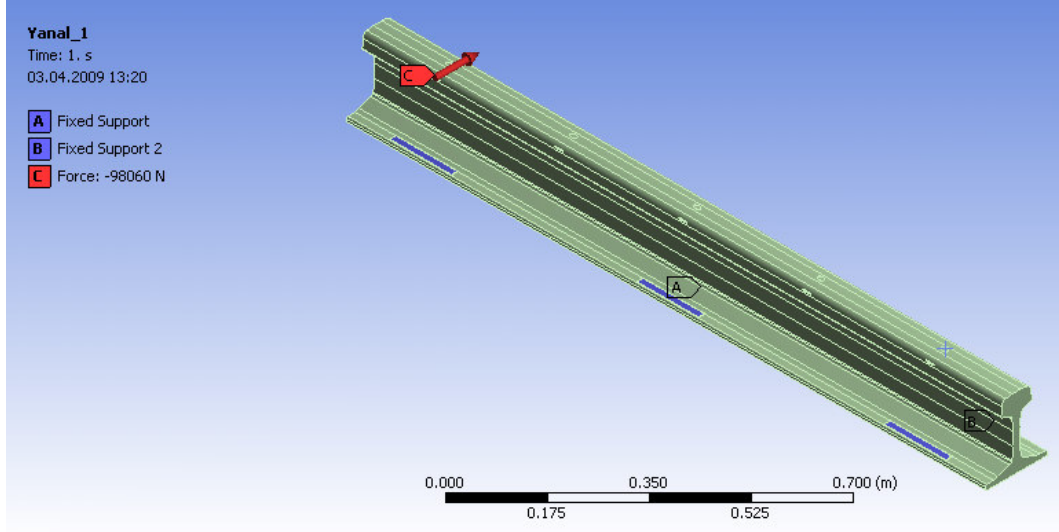
(3.22) eşitliğı yardımı ile hesaplanan ortalama düşey şekil değıştirme miktarından yola çıkarak düşey yöndeki ortalama yay katsayısını (3.23) eşitliğı ile hesaplayabiliriz. Hesaplanan değeri Ek 1’de verilmiştir.

$$k_{hz} = \frac{F_z}{\Delta z_{ort}} \quad (3.23)$$

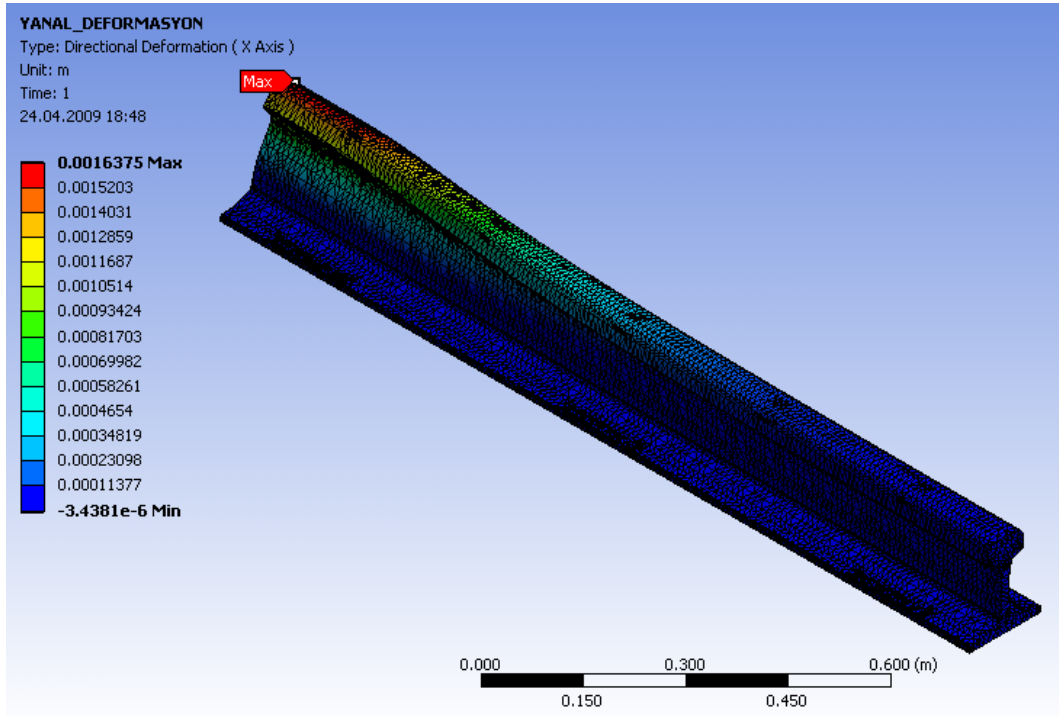
3.4.4 Rayın Yanal Yöndeki Esnekliği

3.4.4.1 Yanal Yöndeki I. Analiz Noktası

Şekil 3.40'da yanal yöndeki analizlerde kullanılan birinci nokta görülmektedir. Bu noktaya yanal doğrultuda F_y büyüklüğünde bir kuvvet uygulanmıştır. Mavi ile görülen yüzeylerin de traversler yardımı ile alt yapıya bağlandığı ve hareket etmediği düşünülmüştür.



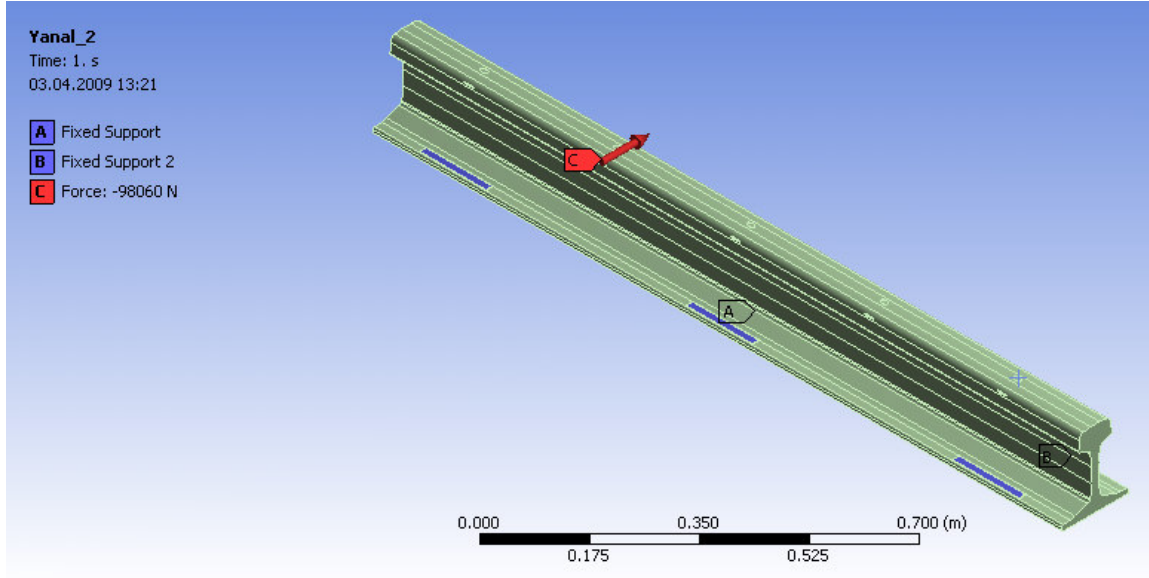
Şekil 3.40 I.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



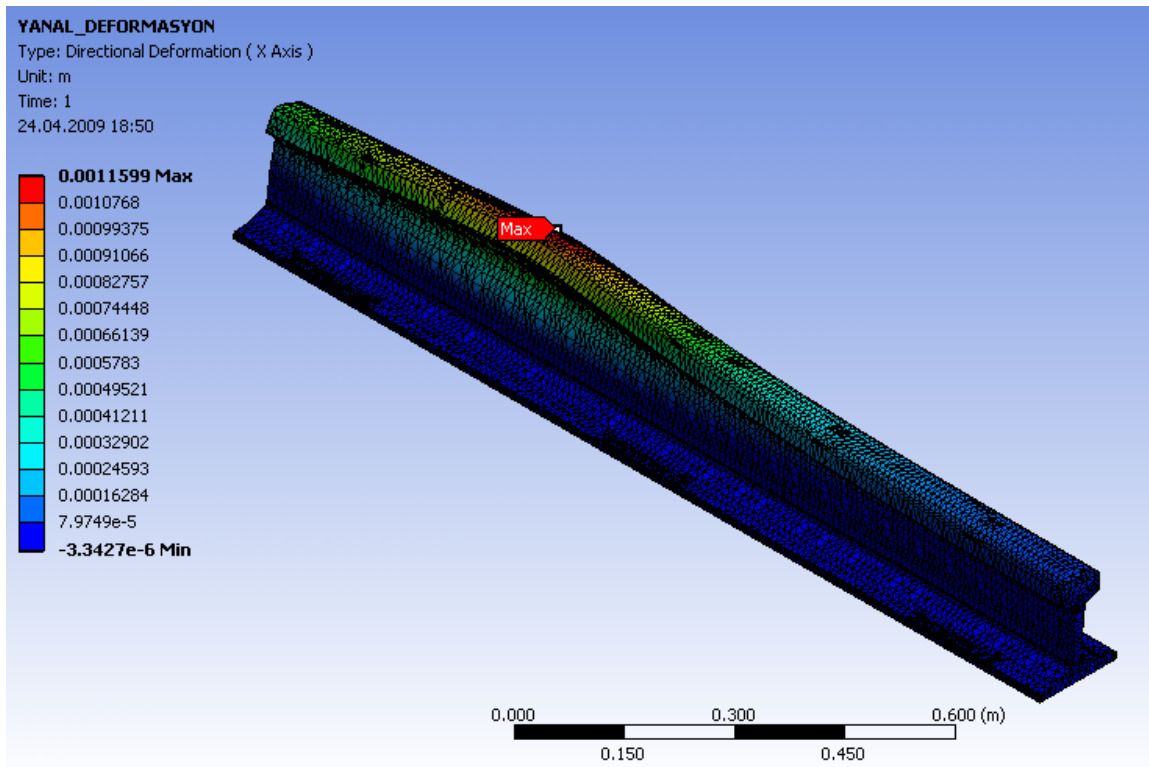
Şekil 3.41 I.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme

3.4.4.2 Yanal Yöndeki II. Analiz Noktası

Şekil 3.42’de yanall yöndeki analizlerde kullanılan ikinci nokta görölmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 300mm kaydırılmıştır.



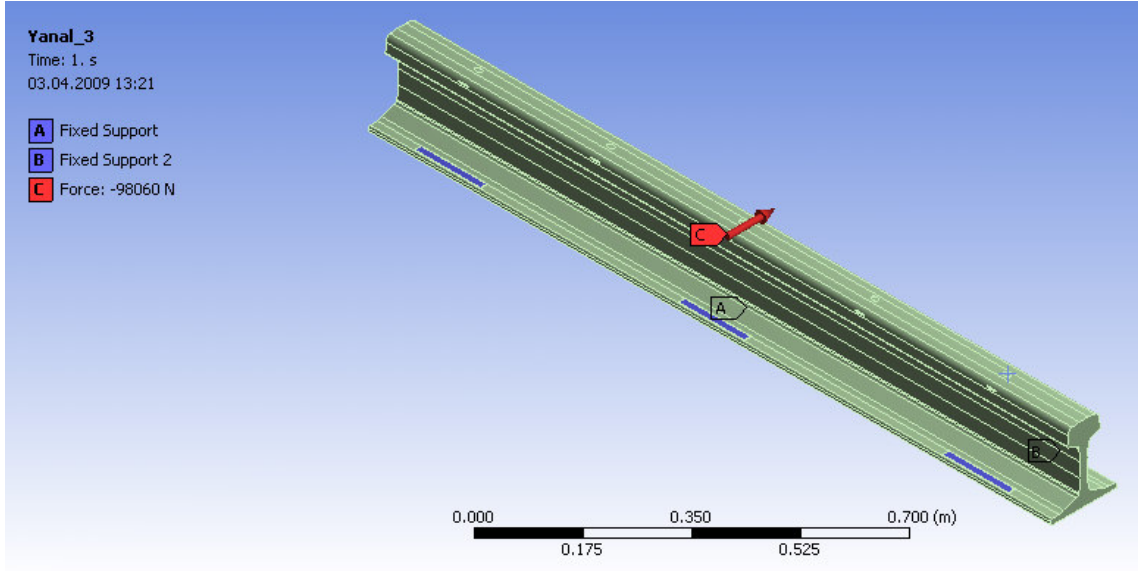
Şekil 3.42 II.analiz noktasına yanall yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



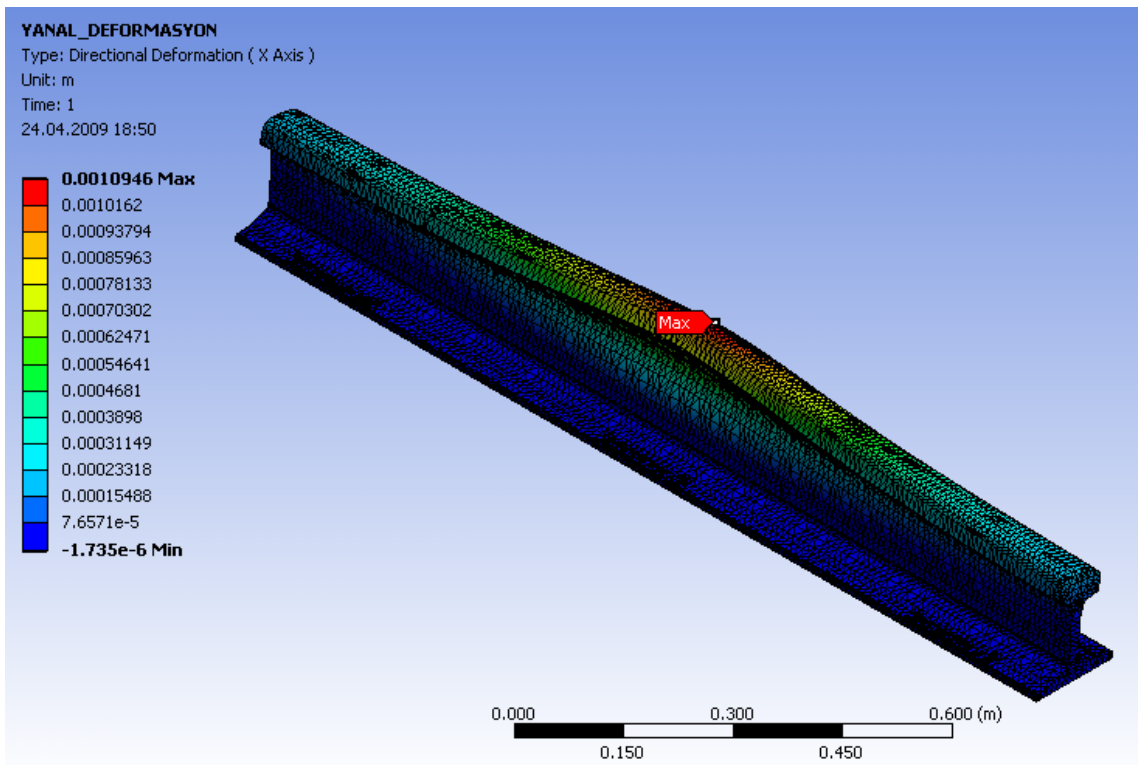
Şekil 3.43 II.analiz noktasındaki yanall şekil değıştirme

3.4.4.3 Yanal Yöndeki III. Analiz Noktası

Şekil 3.44’de yanall yöndeki analizlerde kullanılan üçüncü nokta görölmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 600mm kaydırılmıştır.



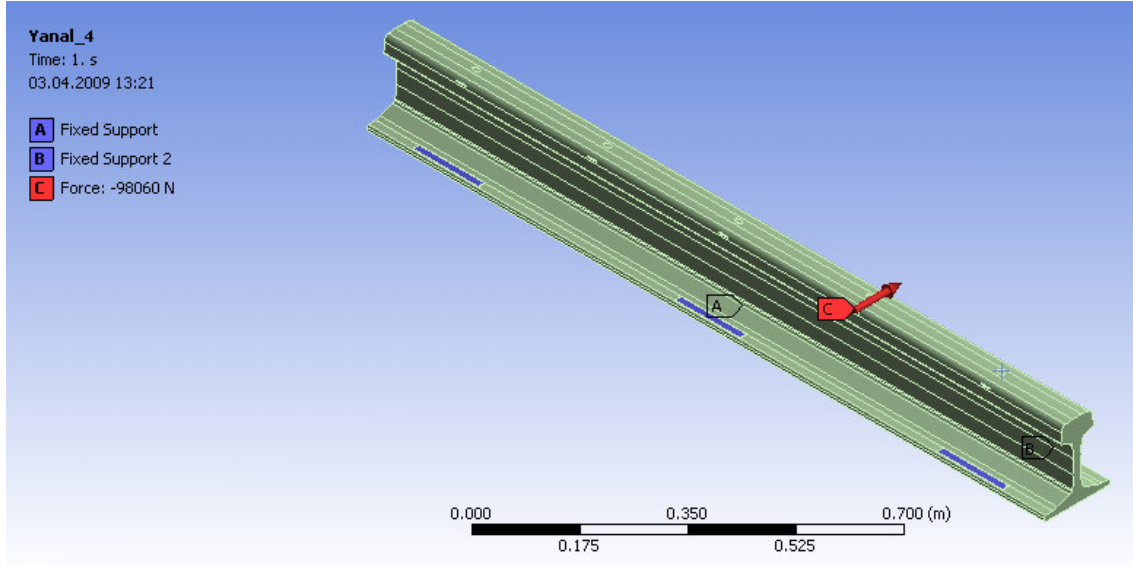
Şekil 3.44 III.analiz noktasına yanall yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



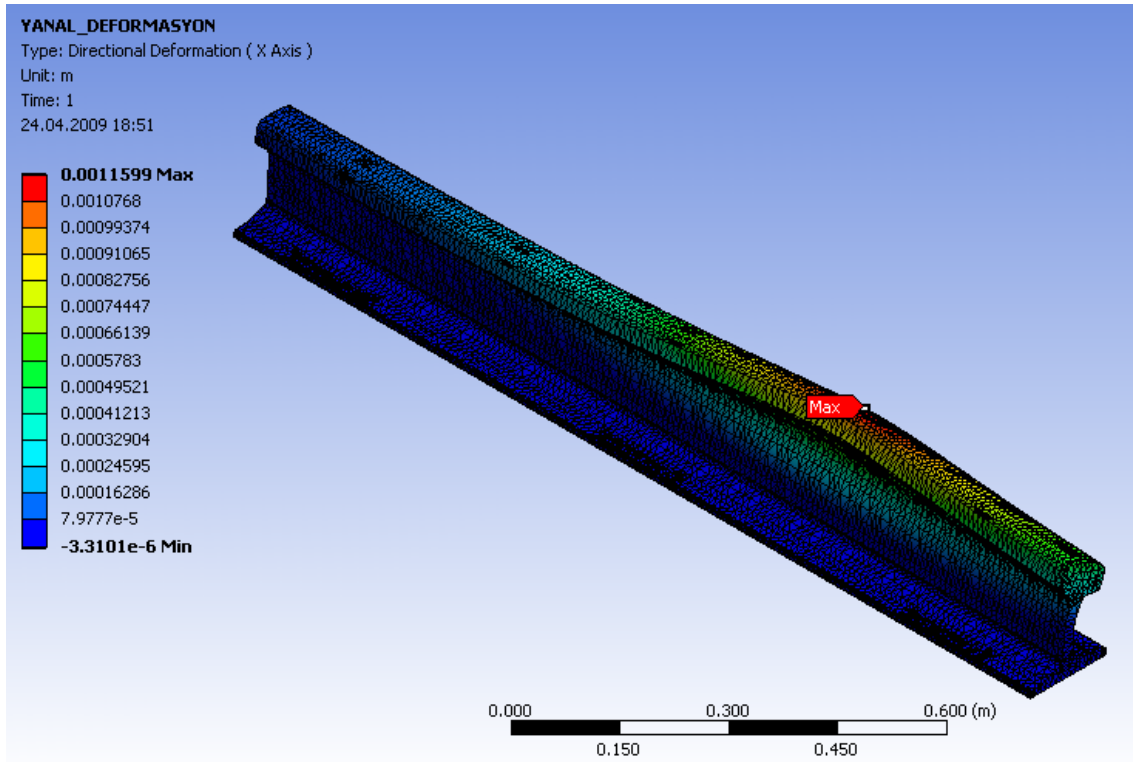
Şekil 3.45 III.analiz noktasındaki yanall şekil değıştirme

3.4.4.4 Yanal Yöndeki IV. Analiz Noktası

Şekil 3.46'da yanall yöndeki analizlerde kullanılan dördüncü nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 900mm kaydırılmıştır.



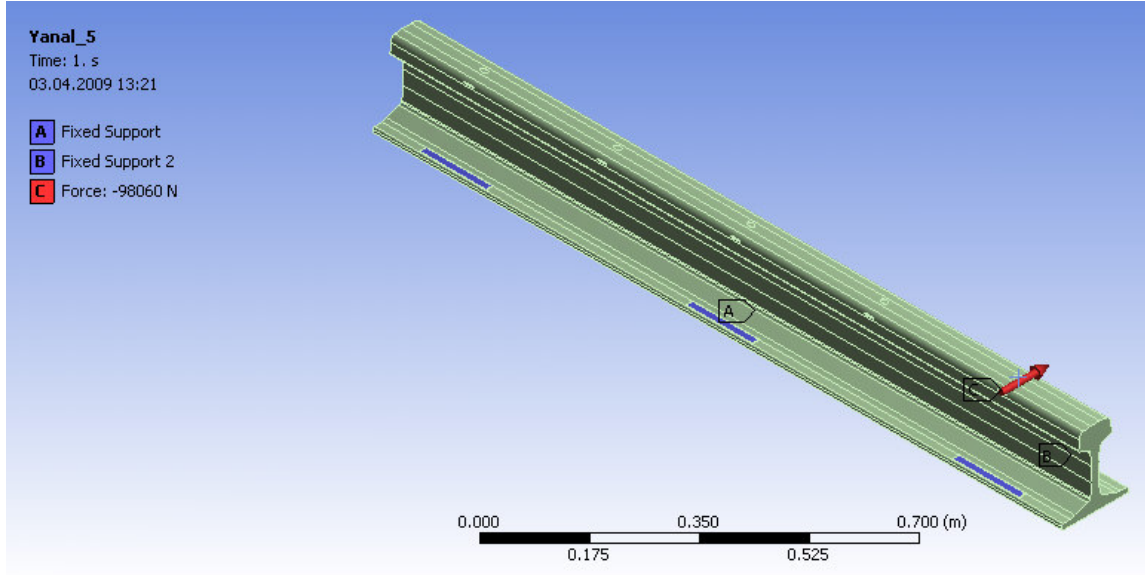
Şekil 3.46 IV.analiz noktasına yanall yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



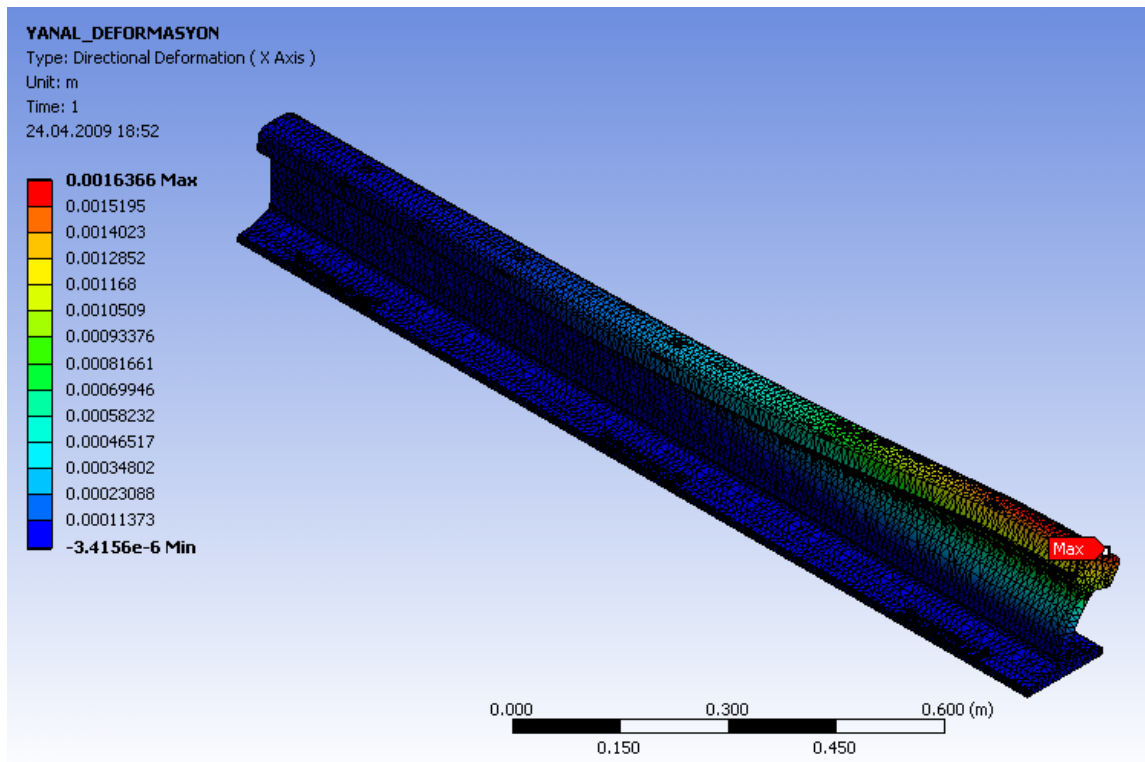
Şekil 3.47 IV.analiz noktasındaki yanall şekil değıştirme

3.4.4.5 Yanal Yöndeki V. Analiz Noktası

Şekil 3.48’de yanal yöndeki analizlerde kullanılan beşinci nokta görülmektedir. I.noktaya uygulanan zorlayıcı kuvvet ve mesnet sınır şartları aynen uygulanmıştır. Sadece kuvvetin tatbik noktası I.noktaya göre 1200mm kaydırılmıştır.



Şekil 3.48 V.analiz noktasına yanal yönde etkiyen kuvvet ve travers mesnetleri



Şekil 3.49 V.analiz noktasındaki yanal şekil değiştirme

3.4.4.6 Yanal Yöndeki Ortalama Yay Katsayısı Değerinin Hesaplanması

I. ve V. Noktalardaki maksimum yanıl şekil değıştirme değeri dūşey şekil değıştirme değeriinde olduğu gibi yine aynı nedenlerden ötürü II., III. ve IV. noktalardaki maksimum yanıl şekil değıştirme değeriinden daha fazladır.

Aynı yöntem uygulanacak ve daha doğru bir analiz için II.(Şekil 3.43), III.(Şekil 3.45) ve IV.(Şekil 3.47) noktalardaki maksimum yanıl şekil değıştirmelerin ortalaması alınacaktır.

$$\Delta y_{ort} = \frac{\Delta y_2 + \Delta y_3 + \Delta y_4}{3} \quad (3.24)$$

(3.24) eşitliği yardımı ile hesaplanan ortalama dūşey şekil değıştirme miktarından yola çıkarak dūşey yöndeki ortalama yay katsayısını (3.25) eşitliği ile hesaplayabiliriz. Hesaplanan değeri Ek 1’de verilmiştir.

$$k_{hy} = \frac{F_y}{\Delta y_{ort}} \quad (3.25)$$

3.5 Hareketlerin Diferansiyel Denklemlerinin Oluşturulması

Herhangi bir mekanik sistemin dinamik analizinin incelenmesi konusu karmaşıktır ve hassas yaklaşımlar gerektirir. Titreşen sistem bir ankastre çubuk ucuna asılı bir kütlede ibaret basit bir yapı olabileceği gibi daha da karmaşıklılaşarak bir makine, köprü, bir bina yada bir otomobil veya lokomotif modeli olabilir.

Hareket denklemlerinin fiziksel parametreleri; kütle, kütlelel atalet momentleri, yay ve sönüm katsayıları denklemlerini birincil önemle değıştirdiğinden bu parametrelerin doğru hesaplanması gerekmektedir. Cevapları etkileyen ikincil öneme sahip diğer unsur ise dinamik zorlayıcı kuvvetlerdir ve bu kuvvetlerin de doğru tespit edilmesi gerekmektedir.

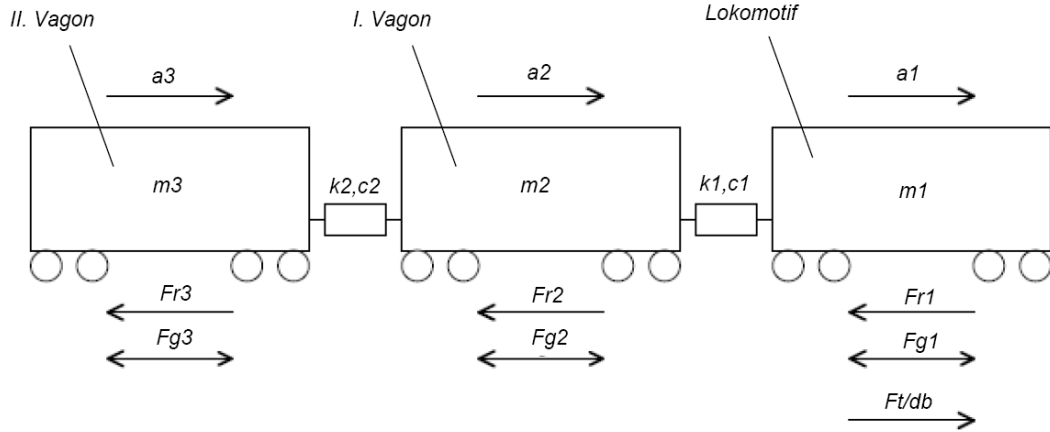
Eğer dinamik sistemler doğru modellenmezse ve olası zorlayıcı kuvvetler doğru düşünülmezse sistemin doğal frekansı zorlayıcı kuvvetin frekansı ile çakışarak genliklerin sonsuza gitmesi durumu (rezonans) ortaya çıkarak yapının parçalanması sonucunda can ve mal kaybı ile sonuçlanabilecek kazaların meydana gelebilmesi muhtemeldir. Tasarım aşamasında yapının yay katsayısı ve kütle dağılımlarında değışiklikler yaparak rezonans frekansından uzaklaşabilmek mümkün olabileceği gibi aktif titreşim kontrolü uygulaması da en verimli başarılı yöntemlerden biridir.

Titreşim analizi ve rezonans durumunun önemi göz önünde bulundurulduğunda lokomotifin hareket denklemlerini oluşturmak için etkili bir yöntem olan “Lagrange Denklemi” kullanılacaktır. Bu metot, diğer metotlara göre çok daha basittir ve çoklu gövdeden oluşan karmaşık sistemlere uygulanması daha kolaydır.

3.5.1 Lokomotifin Seyir Hızının Elde Edilmesi

Lokomotif dinamiğini incelerken öncelikle seyir hızının elde edilmesi gerekmektedir. Belirli yol ve yük şartları altında trenin ulaşabileceği maksimum hız veya emniyetli sürüşten ayrılmayacağı optimum hız limitlerini öğrenebilmek için seyir hızını hesaplayan dinamik modellerin kurulması hem lokomotifin tasarım aşamasında ar-ge çalışmalarında hem de yapılan simülasyon düzeneklerinin matematik modellerinin kurulmasında önemli bir yere sahiptir.

Raylardan tekerlek-setleri üzerine ve tekerlek-setlerinden de bojiler vasıtası ile kabine iletilen ray düzensizlikleri genellikle kendisini belirli periyotlarla tekrar eden (harmonik hareketi tanımlayan) fonksiyonlar olup dinamik ray düzensizlik kuvvetlerini oluştururlar. Bu noktada lokomotifin yada trenin seyir hızı, dinamik ray kuvvetlerinin periyodunu veya bir başka deyişle frekansını etkileyerek tüm dinamik sistemin kararlılığı üzerinde doğrudan etkin sistem girişidir.



Şekil 3.50 Boylamsal tren dinamik modeli (Iwnicki, 2006)

Şekil 3.50’de boylamsal yönde ilerlemekte olan bir lokomotif ve iki vagonun oluştuğu bir tren görülmektedir. Boylamsal tren dinamik modeli olarak da adlandırabileceğimiz bu model seyir hızı hesaplamalarında kullanılan ana modeldir. (Iwnicki, 2006)

Modelde adı geçen semboller aşağıda tanımlanmıştır:

m_1, m_2, m_3 : Sırası ile lokomotif , I. ve II.vagonların kütleleri $[kg]$

a_1, a_2, a_3 : Lokomotif , I. ve II.vagonların ivmeleri $[m/sn^2]$

k_1, k_2 : Lokomotif–I.vagon ve I.vagon–II.vagon arasındaki bağlantıların yay katsayıları (N/m)

c_1, c_2 : Lokomotif–I. vagon ve I. vagon–II.vagon arasındaki bağlantıların sönüm katsayıları $[Nsn/m]$

F_{r1}, F_{r2}, F_{r3} : Lokomotife, I. ve II.vagonlara etki eden yavaşlatıcı kuvvetler $[N]$

F_{g1}, F_{g2}, F_{g3} : Lokomotife, I. ve II.vagonlara etki eden rampa direnç kuvvetleri $[N]$

$F_{t/db}$: Lokomotifin çekiş veya dinamik frenleme kuvveti $[N]$

Lokomotife yada bir vagona etki eden yavaşlatıcı kuvvet (3.26) eşitliğinde tanımlanmıştır.

$$F_r = F_{pr} + F_{cr} + F_b \quad (3.26)$$

(3.26) denkleminde eşitliğin sağ tarafındaki kuvvetler aşağıda tanımlanmıştır:

F_{pr} : Yuvarlanma ve aerodinamik direnç kuvvetlerinin toplamı $[N]$

F_{cr} : Kurp direnç kuvveti $[N]$

F_b : Pnömatik fren kuvveti $[N]$

Şekil 3.50'deki model 3 serbestlik dereceli bir boylamsal modeldir. Lokomotif, I.ve II.vagon için boylamsal hareketlerin diferansiyel denklemleri sırası ile aşağıda verilmiştir.

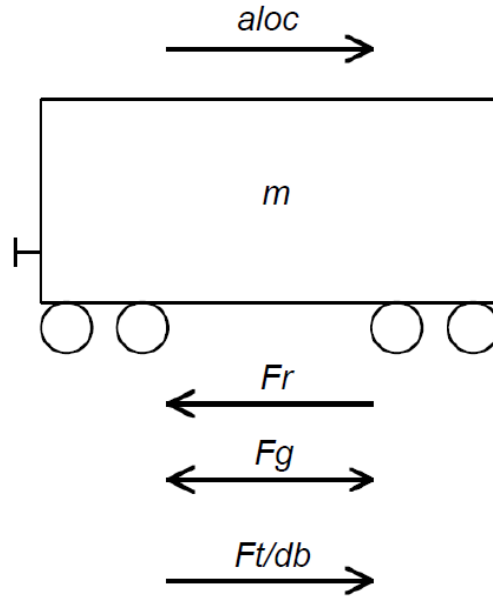
$$m_1 a_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = F_{t/db} - F_{r1} - F_{g1} \quad (3.27)$$

$$m_2 a_2 + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_1(x_2 - x_1) + k_2(x_2 - x_3) = -F_{r2} - F_{g2} \quad (3.28)$$

$$m_3 a_3 + c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_2(x_3 - x_2) = -F_{r3} - F_{g3} \quad (3.29)$$

Lokomotif ve 2 adet vagon dan oluşan trenin boylamsal hızına ulaşılacak isteniyorsa (3.27), (3.28), (3.29) eşitlikleri yeterli olacaktır. Daha fazla vagon için hareket denklemlerine, aynı prensiple ulaşmak mümkündür.

3.5.1.1 Boylamsal Hareket için Lokomotif Dinamiği Modeli



Şekil 3.51 Boylamsal hareket dinamik modeli (Iwnicki, 2006)

Tez çalışmasında sadece lokomotif dinamiği incelendiğinden Şekil 3.51’de görülen lokomotif modeli boylamsal hareket dinamiğini incelemek için yeterli olacaktır.

Newton’un I. Kanunu esas alınarak kuvvet dengesi yazılacak ve buradan da lokomotifin ivmesine ve son hızı olan seyir hızına ulaşılabacaktır.

Kullanılan simgeler aşağıda belirtilmiştir:

a_{loc} : Lokomotifin ivmesi $[m/sn^2]$

M_{loc} : Lokomotifin kütlesi $[kg]$

F_r : Yavaşlatıcı kuvvetlerin toplamı $[N]$

F_g : Rampa direnci kuvveti $[N]$

$F_{t/db}$: Çekiş veya dinamik fren kuvveti $[N]$

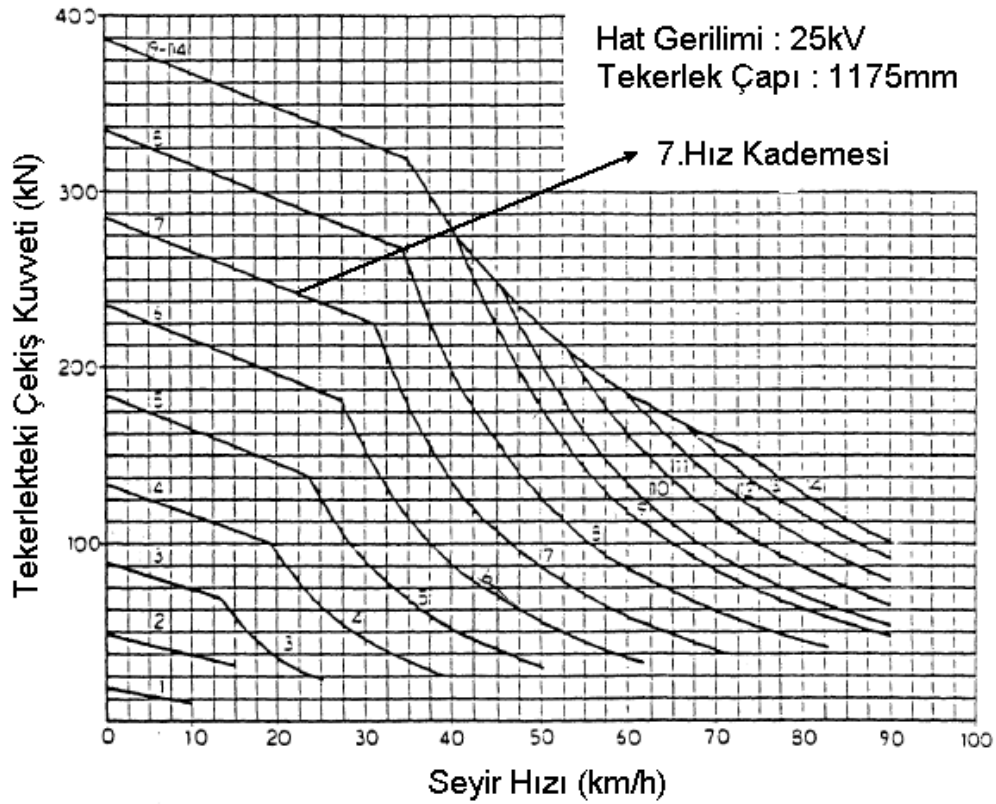
Yavaşlatıcı kuvvetlerin toplamı olan F_r aşağıdaki (3.30) eşitliğinde daha açık tanımlanmaktadır.

$$F_r = F_{pr} + F_{cr} + F_b \quad (3.30)$$

3.5.1.2 Çekiş veya Dinamik Frenleme Kuvveti

Şekil 3.50 , Şekil 3.51 ve (3.27) eşitliğinde $F_{t/db}$ olarak adı geçen kuvvet tren yada lokomotifi kendi ağırlığı veya kendi ağırlığı ile birlikte yük ağırlıklarını çeşitli iklim ve yol koşullarında (+) ivmelendiren, sabit hızda ilerleten yada (-) ivmelendirerek frenlemesine neden olan “Çekiş veya Dinamik Frenleme Kuvveti”dir.

Bu kuvvet her bojiye 2 adet ve toplamda 6 adet DC elektrik motorları vasıtası ile oluşturulmaktadır. Elektrik motoru karakteristiği gereği çekiş kuvveti seyir hızı ile logaritmik olarak ters orantılıdır. Şekil 3.52’de bu oran görülmektedir.



Şekil 3.52 E43000 lokomotifinin motor performans eğrileri [11]

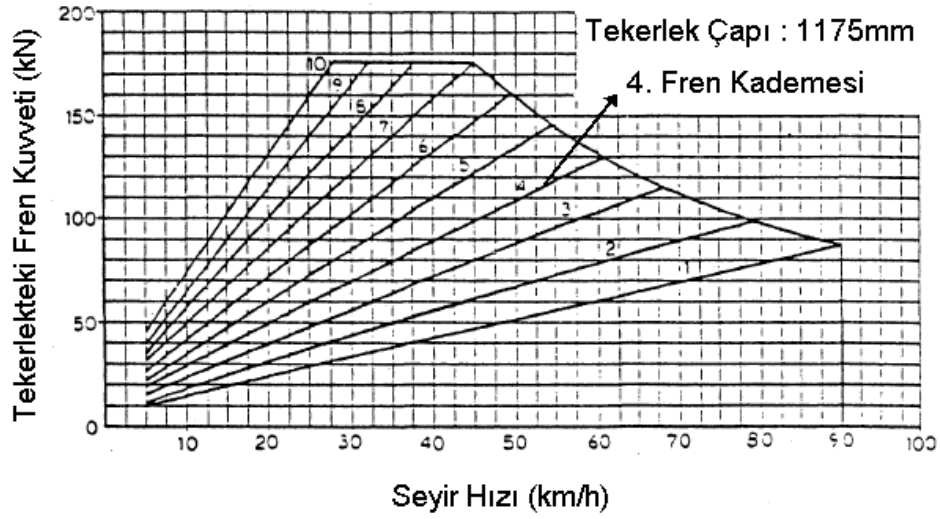
8 kademeli bir motorun çekiş kuvveti (3.31) eşitliği yardımı ile bulunabilir. Denklemdaki simgeler aşağıda verilmiştir:

$N_{t/db}$: hız yada dinamik fren kademesi [boyutsuz]

P_{maks} : lokomotifin maksimum çekiş gücü [W]

V_1 : lokomotifin I.seyir hızı [km/h]

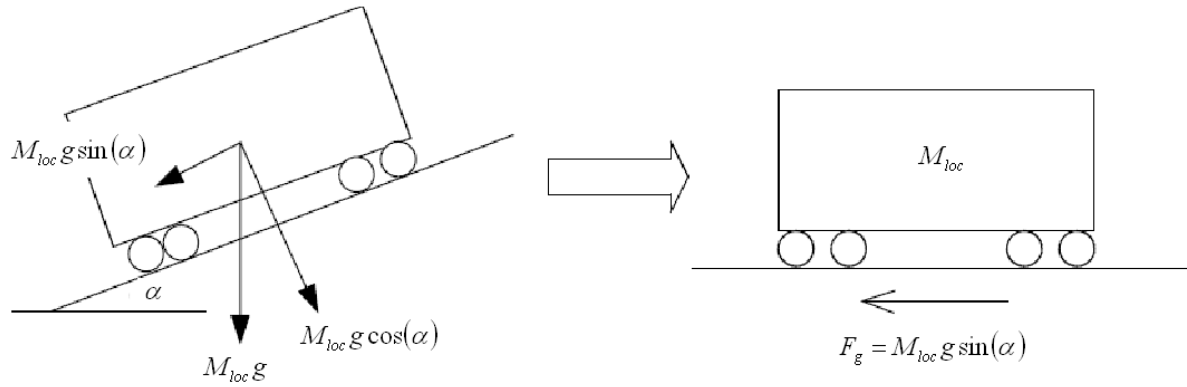
$$F_{t/db} = \frac{\left(\frac{N_{t/db}^2}{64} \right) P_{maks}}{V_1} \quad (3.31)$$



Şekil 3.53 E43000 lokomotifinin dinamik frenleme performansı eğrileri [2]

Şekil 3.52 ve 3.53'deki karakteristiklerde hareket eden lokomotifi makinist, kendi tecrübesine göre istediği hızlandırma yada dinamik fren kademesini seçerek uygun hızlarda hareket ettirmektedir.

3.5.1.3 Rampa Direnç Kuvveti



Şekil 3.54 Lokomoteve etki eden rampa direnç kuvveti (Iwnicki, 2006)

Lokomotifin ağırlık kuvveti vektörünü yere paralel ve yere dik olmak üzere kuvvet vektörü bileşenlerinin toplamı olarak ifade edersek $mg \sin(\alpha)$ ve $mg \cos(\alpha)$ bileşenlerini elde ederiz.

Yere paralel bileşenin lokomotifin boylamsal dinamiğine etkisi seyir hızının değişimi olarak yansımaktadır. Yere paralel bileşen lokomotive, rampa yukarı tırmanırken ($\alpha > 0$) bir direnç kuvveti oluşturur. Bu direnç kuvveti “Rampa Direnç Kuvveti” olarak adlandırılır ve Şekil 3.54’de açıklanmaktadır. Lokomotif rampa aşağı inerken ise ($\alpha < 0$) bir kuvvet ile ivmelenir ki bu kuvveti “Rampa Aşağı İvmelendirici Kuvvet” olarak tanımlayabiliriz. (3.32) eşitliğinde rampa direnç ve rampa aşağı ivmelendirici kuvvet durumu açıklanmıştır.

Yere dik bileşen ise lokomotifin raya uyguladığı ağırlık kuvvetini α açısına bağlı olarak azaltmaktadır. Bu azalma da lokomotifin F_{pr} direnç kuvvetinin de azalmasına yol açmaktadır fakat bu etki göz ardı edilebilir.

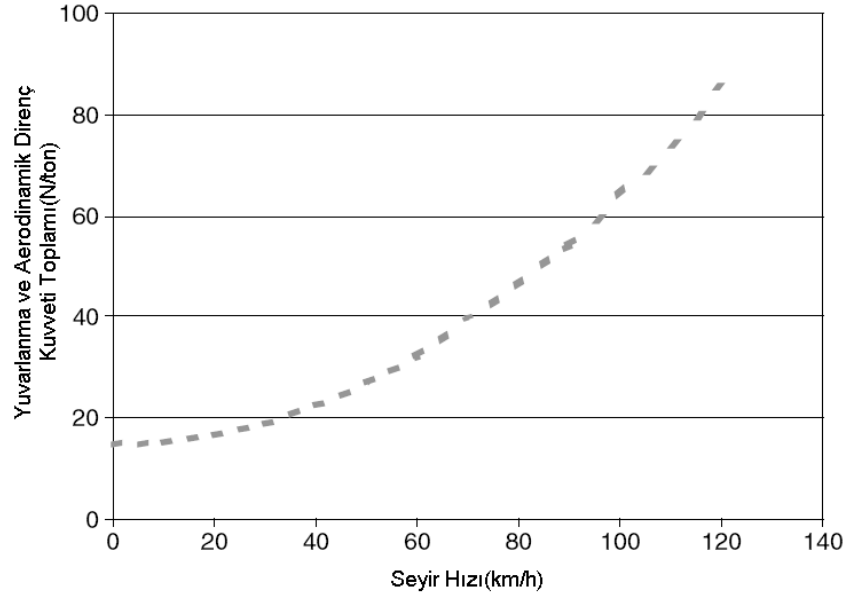
$$F_g = \pm M_{loc} g \sin(\alpha) \quad (3.32)$$

3.5.1.4 Yuvarlanma ve Aerodinamik Direnç Kuvvetleri Toplamı

Lokomotifin boylamsal hareketini sağlayan tekerlek-setlerinin yuvarlanmaya karşı göstereceği direncin hızlanma üzerinde negatif etkisi olmaktadır. Bu direnç kuvveti “Yuvarlanma Direnç Kuvveti” olarak adlandırılabilir ve tekerlek-setlerinin kendi eksenleri etrafındaki yuvarlanma kütleli atalet momentleri ile doğru orantılıdır.

Ayrıca lokomotifi durdurmaya çalışan “Aerodinamik Direnç Kuvveti”nden de söz edebiliriz ki bu kuvvet karada, denizde yada havada rüzgara karşı ilerlemekte olan tüm cisimler ve taşıtlar için geçerlidir. (Hava molekülleri kendisine çarpan cismin hızını yavaşlatma eğilimindedir.) Seyir hızının karesinin etkinliğindedir ki belirli bir hız limitinden sonra etkisini fazlasıyla göstermeye başlayan aerodinamik direnç kuvveti havanın yoğunluğu, lokomotifin seyir hızı, taşıtın aerodinamiklik katsayısı ve rüzgara karşı duran kesit alanı ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki aerodinamik direnç kuvvetini ifade eden (3.33) eşitliğinde tanımlanmıştır. (Gillespie, 1992)

$$F_{Ad} = \frac{1}{2} V^2 \rho (C_d A) \quad (3.33)$$



Şekil 3.55 Fransız ekspres yük taşıma treni için yuvarlanma ve aerodinamik direnç kuvveti toplamının seyir hızına göre değişimi (Iwnicki, 2006)

E43000 lokomotifi için üretici firma tarafından yollanan bilgi sayfaları yardımı ile aşağıdaki (3.34) eşitliği kullanılarak yuvarlanma ve aerodinamik direnç kuvvetleri toplamı ifadesi oluşturulmuştur.

$$F_{pr} = \frac{M_{loc} g [1.5 + 0.05(V_1)]}{1000} \quad (3.34)$$

3.5.1.5 Kurp Direnç Kuvveti

“Yuvarlanma ve Aerodinamik Direnç Kuvveti Toplamı” gibi “Kurp Direnç Kuvveti”nin hesaplanmasında ampirik formüller kullanılmıştır. Ray profili, rayın yağlanması ve kurp yarıçapı bu direnç kuvvetini etkileyen ana parametrelerdir. Ray profili, rayın yağlanması değişiklik göstereceğinden direnç kuvvetini, kurp yarıçapının fonksiyonu olarak göstermek daha doğru bir yaklaşım olacaktır.(3.35)

$$F_{cr} = \frac{M_{loc} (6116/R)}{1000} \quad (3.35)$$

R : Kurp yarıçapı $[m]$

(3.35) eşitliğinde ifade edilen kurp direnç kuvveti, lokomotifin belirli bir hızda gittiğini varsayarak yazılmıştır. Eğer hızın sıfır olduğu durumlar söz konusu ise bu durumda direnç kuvveti iki katına çıkar. (Iwnicki, 2006)

3.5.1.6 Pnömatik Frenleme Kuvveti

Her tekerlek–setinde 2 adet ve lokomotifte toplam 12 adet pnömatik fren mekanizması bulunmaktadır. Pnömatik frenleme sisteminin gerçeğe çok yakın modellenebilmesi için dinamik modelin paralelinde çalışacak bir akışkanlar dinamiği modelinin kurulması gerekmektedir. Fakat tezde lokomotifin titreşim analizi incelendiği için frenleme kuvvetinin temelini teşkil eden akışkanlar dinamiği modeli kurulmayacaktır.

Lokomotifin pnömatik fren potansiyeli ampirik bir yaklaşımla iki ana parametreye bağlıdır :

- M_{loc} : Lokomotifin kütlesi (kg)
- μ_d : Tekerlek – ray arasındaki dinamik sürtünme katsayısı

Tekerlek ile ray arasındaki dinamik sürtünme katsayısı μ_d (3.36) eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$\mu_d = C_w \frac{V_1 + 100}{5V_1 + 100} \quad (3.36)$$

(3.36) eşitliğindeki C_w : boyutsuz iklim katsayısı olup ray – tekerlek arasındaki sürtünme katsayısını etkiler. Kuru havalar için $C_w \approx 0.27$ olarak alınabilir.

Aşağıdaki (3.37) eşitliğinde pnömatik frenleme kuvveti ifade edilmektedir.

$$F_b = M_{loc} g B_b \mu_d \quad (3.37)$$

(3.36) ve (3.37) eşitlikleri yardımı ile pnömatik frenleme kuvvetini doğrudan veren eşitliğe ulaşılmıştır.

$$F_b = M_{loc} g B_b \left[C_w \frac{V_1 + 100}{5V_1 + 100} \right] \quad (3.38)$$

3.5.1.7 Kuvvet Dengesinden Lokomotif Hızına Geçiş

Yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak açıklanan kuvvetler yardımı ile boylamsal dinamiği etkileyen net kuvvet hesaplanarak lokomotifin ivmesi hesaplanmış ve nihayet lokomotifin son hızına erişilmiştir.

Newton'un I. Kanunu esas alınarak kuvvet dengesi yazılıp bulunan F_{net} , lokomotifin kütlesine (M_{loc}) bölünürse lokomotifin ivmesine (a_{loc}) ulaşılmıştır:

$$a_{loc} = \frac{F_{net}}{M_{loc}} = \frac{[F_{t/db} - (F_{pr} + F_{cr} + F_b) - F_g]}{M_{loc}} \quad (3.39)$$

Bulunacak ivmenin işaretine göre üç hareket olasılığı söz konusu olacaktır:

- $F_{net} > 0 \Rightarrow (+)$ ivme oluşacak ve lokomotif hızlanmaya başlayacaktır.
- $F_{net} = 0 \Rightarrow$ ivme oluşmayacak ve lokomotif eğer (+/-) yönde ilerliyorsa sabit hızla ilerlemeye, ilerlemiyorsa da durmaya devam edecektir.
- $F_{net} < 0 \Rightarrow (-)$ ivme oluşacak ve lokomotif eğer (+) yönde ilerliyorsa yavaşlamaya, ilerlemiyorsa da (-) yönde ilerlemeye başlayacaktır.

(3.39) eşitliği yardımı ile bulunan ivme değeri ve (3.40) eşitliği ile de lokomotifin son hızına ulaşmak mümkündür.

$$V = V_1 + a_{loc} \Delta t \quad (3.40)$$

3.5.2 Lagrange Denklemi

Modellenen lokomotifin dinamik analiz modelinin kurulması ve hareketlerin diferansiyel denklemlerinin oluşturulmasında “Lagrange Denklemi” kullanılacaktır.

Lagrange denklemi aşağıdaki (3.41) eşitliğinde verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \sum E_k}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \sum E_k}{\partial q_j} + \frac{\partial \sum E_p}{\partial q_j} + \frac{\partial \sum E_d}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (3.41)$$

Bu denklemde;

$\sum E_k$: Sistemin toplam kinetik enerjisini

$\sum E_p$: Toplam potansiyel enerjisini

$\sum E_d$: Sönüm enerjisini

q_j : Genelleştirilmiş koordinatları (Serbestlik derecelerini)

Q_j : Genelleştirilmiş kuvvetleri (Zorlayıcı dinamik kuvvetleri, Kontrol kuvvetlerini) ifade etmektedir.

Bir dinamik sisteme “Lagrange Denklemi” uygulandığında hareket denklemi en genel anlamda;

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (3.42)$$

şeklini almaktadır. (3.42) eşitliğindeki sistem parametreleri;

M : Sistemin kütlesi

C : Sönüm katsayısı

K : Yay katsayısı olarak ifade edilmektedir.

“Lagrange Denklemi”, çoklu gövde dinamiği prensibine dayalı çok serbestlik dereceli sistemlere uygulanacak olursa hareket denklemleri matris formunda yazılabilecek forma dönüşür.

$$[M]\{\ddot{q}_j\} + [C]\{\dot{q}_j\} + [K]\{q_j\} = \{F(t)\} \quad (3.43)$$

Zorlayıcı kuvvet $F(t)$ ’nin olmasından dolayı sistem “Zorlanmış Titreşim”li bir sistem haline gelmiştir.

Eğer ki $F(t) = 0$ olup sisteme dışarıdan herhangi bir zorlayıcı kuvvet etki etmiyorsa sistem artık “Serbest Titreşimli” bir sisteme dönüşür.

Lokomotifin dinamik analizinde kullanılacak diferansiyel denklemlerde tekerlek-setleri denklemleri gibi bazı denklemlerde zorlayıcı dinamik ray kuvvetleri ve kontrol kuvvetinin etkidiği kabin ve bojilerin bazı denklemlerinde zorlanmış titreşimli durumlar söz konusu olurken bazı denklemlerde ise herhangi bir zorlayıcı kuvvet etkimeyip serbest titreşimli durumlar da söz konusu olmuştur.

Lokomotif kabini, bojileri ve tekerlek-setlerinin serbestlik dereceleri ile tanımlı hareketlerin diferansiyel denklemleri “Lagrange Denklemi” kullanılarak çıkartılmış ve titreşim analizi için Matlab-Simulink yazılımı kullanılmıştır. (Sezer, 2007)

3.6 Sistemin Toplam Enerji İfadelerinin Oluşturulması

3.6.1 Kinetik Enerji İfadesinin Oluşturulması

Sistemi oluşturan alt elemanların kütleleri ve kütleli atalet momentlerinin serbestlik derecelerine göre toplam kinetik enerji ifadesi kabin, boji ve tekerlek–seti sırasına uyularak yazılmıştır.

$$\sum E_k = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left[M_c (\dot{X}_c^2 + \dot{Y}_c^2 + \dot{Z}_c^2) + J_{xc} \dot{\theta}_c^2 + J_{yc} \dot{\phi}_c^2 + J_{zc} \dot{\psi}_c^2 \right] + \\ & \left[M_{t1} (\dot{X}_{t1}^2 + \dot{Y}_{t1}^2 + \dot{Z}_{t1}^2) + J_{xt1} \dot{\theta}_{t1}^2 + J_{yt1} \dot{\phi}_{t1}^2 + J_{zt1} \dot{\psi}_{t1}^2 \right] + \\ & \left[M_{t2} (\dot{X}_{t2}^2 + \dot{Y}_{t2}^2 + \dot{Z}_{t2}^2) + J_{xt2} \dot{\theta}_{t2}^2 + J_{yt2} \dot{\phi}_{t2}^2 + J_{zt2} \dot{\psi}_{t2}^2 \right] + \\ & \left[M_{t3} (\dot{X}_{t3}^2 + \dot{Y}_{t3}^2 + \dot{Z}_{t3}^2) + J_{xt3} \dot{\theta}_{t3}^2 + J_{yt3} \dot{\phi}_{t3}^2 + J_{zt3} \dot{\psi}_{t3}^2 \right] + \\ & \left[M_{w1} (\dot{X}_{w1}^2 + \dot{Y}_{w1}^2 + \dot{Z}_{w1}^2) + J_{xw1} \dot{\theta}_{w1}^2 + J_{yw1} \dot{\phi}_{w1}^2 + J_{zw1} \dot{\psi}_{w1}^2 \right] + \\ & \left[M_{w2} (\dot{X}_{w2}^2 + \dot{Y}_{w2}^2 + \dot{Z}_{w2}^2) + J_{xw2} \dot{\theta}_{w2}^2 + J_{yw2} \dot{\phi}_{w2}^2 + J_{zw2} \dot{\psi}_{w2}^2 \right] + \\ & \left[M_{w3} (\dot{X}_{w3}^2 + \dot{Y}_{w3}^2 + \dot{Z}_{w3}^2) + J_{xw3} \dot{\theta}_{w3}^2 + J_{yw3} \dot{\phi}_{w3}^2 + J_{zw3} \dot{\psi}_{w3}^2 \right] + \\ & \left[M_{w4} (\dot{X}_{w4}^2 + \dot{Y}_{w4}^2 + \dot{Z}_{w4}^2) + J_{xw4} \dot{\theta}_{w4}^2 + J_{yw4} \dot{\phi}_{w4}^2 + J_{zw4} \dot{\psi}_{w4}^2 \right] + \\ & \left[M_{w5} (\dot{X}_{w5}^2 + \dot{Y}_{w5}^2 + \dot{Z}_{w5}^2) + J_{xw5} \dot{\theta}_{w5}^2 + J_{yw5} \dot{\phi}_{w5}^2 + J_{zw5} \dot{\psi}_{w5}^2 \right] + \\ & \left[M_{w6} (\dot{X}_{w6}^2 + \dot{Y}_{w6}^2 + \dot{Z}_{w6}^2) + J_{xw6} \dot{\theta}_{w6}^2 + J_{yw6} \dot{\phi}_{w6}^2 + J_{zw6} \dot{\psi}_{w6}^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

3.6.2 Potansiyel Enerji İfadesinin Oluşturulması

Kinetik enerji ifadesinin oluşturulmasına benzer şekilde sistemi oluşturan alt elemanların kütleleri ve kütleli atalet momentlerinin serbestlik derecelerine göre toplam kinetik enerji ifadesi kabin, boji ve tekerlek–seti sırasına uyularak yazılmıştır.

Fakat sistemde kartezyen koordinat sisteminin her 3 yönüne (x,y,z) paralel çalışan ve potansiyel enerji depolayan yaylar takılı olduğundan potansiyel enerji ifadesi her yön için ayrı ayrı gruplanarak yazılmıştır. Toplam potansiyel enerji, (3.45) eşitliğinde de görüldüğü gibi bu 3 yönde ayrı ayrı yazılan potansiyel enerjilerin toplamına eşittir.

$$\sum E_p = E_{px} + E_{py} + E_{pz} \quad (3.45)$$

İlk olarak hareket doğrultu yönü olan x ekseninde çalışan boylamsal yaylar için potansiyel enerji ifadesi yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
 E_{px} = & \frac{1}{2} k_{1x} \left\{ \begin{aligned} & [X_{t1} - X_{w1} - d_p(\psi_{t1} - \psi_{w1})]^2 + \\ & [X_{t1} - X_{w1} + d_p(\psi_{t1} - \psi_{w1})]^2 + \\ & [X_{t1} - X_{w2} - d_p(\psi_{t1} - \psi_{w2})]^2 + \\ & [X_{t1} - X_{w2} + d_p(\psi_{t1} - \psi_{w2})]^2 + \\ & [X_{t2} - X_{w3} - d_p(\psi_{t2} - \psi_{w3})]^2 + \\ & [X_{t2} - X_{w3} + d_p(\psi_{t2} - \psi_{w3})]^2 + \\ & [X_{t2} - X_{w4} - d_p(\psi_{t2} - \psi_{w4})]^2 + \\ & [X_{t2} - X_{w4} + d_p(\psi_{t2} - \psi_{w4})]^2 + \\ & [X_{t3} - X_{w5} - d_p(\psi_{t3} - \psi_{w5})]^2 + \\ & [X_{t3} - X_{w5} + d_p(\psi_{t3} - \psi_{w5})]^2 + \\ & [X_{t3} - X_{w6} - d_p(\psi_{t3} - \psi_{w6})]^2 + \\ & [X_{t3} - X_{w6} + d_p(\psi_{t3} - \psi_{w6})]^2 \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2} k_{2x} \left\{ \begin{aligned} & [X_c - X_{t1} - d_s(\psi_c - \psi_{t1})]^2 + \\ & [X_c - X_{t1} + d_s(\psi_c - \psi_{t1})]^2 + \\ & [X_c - X_{t3} - d_s(\psi_c - \psi_{t3})]^2 + \\ & [X_c - X_{t3} + d_s(\psi_c - \psi_{t3})]^2 \end{aligned} \right\} \\
 & + \frac{1}{2} k_{2xb} \left\{ \begin{aligned} & [X_c - X_{t2} - d_s(\psi_c - \psi_{t2})]^2 + \\ & [X_c - X_{t2} + d_s(\psi_c - \psi_{t2})]^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.46)
 \end{aligned}$$

İkinci olarak y eksenine paralel çalışan yaylar için potansiyel enerji ifadesi yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
 E_{py} = & k_{1y} \left\{ \begin{aligned} & [Y_{t1} - Y_{w1} + h_1\theta_{t1} + L_d\psi_{t1}]^2 + \\ & [Y_{t1} - Y_{w2} + h_1\theta_{t1} - L_d\psi_{t1}]^2 + \\ & [Y_{t2} - Y_{w3} + h_1\theta_{t2} + L_d\psi_{t2}]^2 + \\ & [Y_{t2} - Y_{w4} + h_1\theta_{t2} - L_d\psi_{t2}]^2 + \\ & [Y_{t3} - Y_{w5} + h_1\theta_{t3} + L_d\psi_{t3}]^2 + \\ & [Y_{t3} - Y_{w6} + h_1\theta_{t3} - L_d\psi_{t3}]^2 \end{aligned} \right\} + k_{2y} \left\{ \begin{aligned} & [Y_c - Y_{t1} + h_3\theta_c + h_2\theta_{t1} + L_b\psi_c]^2 + \\ & [Y_c - Y_{t2} + h_3\theta_c + h_2\theta_{t2}]^2 + \\ & [Y_c - Y_{t3} + h_3\theta_c + h_2\theta_{t3} - L_b\psi_c]^2 \end{aligned} \right\} \\
 & + \frac{1}{2} k_{hy} \left\{ \begin{aligned} & [Y_{w1} - Y_{r1} + R_1\theta_{w1}]^2 + \\ & [Y_{w2} - Y_{r2} + R_1\theta_{w2}]^2 + \\ & [Y_{w3} - Y_{r3} + R_1\theta_{w3}]^2 + \\ & [Y_{w4} - Y_{r4} + R_1\theta_{w4}]^2 + \\ & [Y_{w5} - Y_{r5} + R_1\theta_{w5}]^2 + \\ & [Y_{w6} - Y_{r6} + R_1\theta_{w6}]^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.47)
 \end{aligned}$$

Son olarak da z eksenine paralel çalışan dikey yaylar için potansiyel enerji ifadesi yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
 E_{pz} = & \frac{1}{2} k_{1z} \left\{ \begin{aligned} & [Z_{t1} - Z_{w1} + b_1(-\theta_{t1} + \theta_{w1}) - L_d \varphi_{t1}]^2 + \\ & [Z_{t1} - Z_{w1} + b_1(\theta_{t1} - \theta_{w1}) - L_d \varphi_{t1}]^2 + \\ & [Z_{t1} - Z_{w2} + b_1(-\theta_{t1} + \theta_{w2}) + L_d \varphi_{t1}]^2 + \\ & [Z_{t1} - Z_{w2} + b_1(\theta_{t1} - \theta_{w2}) + L_d \varphi_{t1}]^2 + \\ & [Z_{t2} - Z_{w3} + b_1(-\theta_{t2} + \theta_{w3}) - L_d \varphi_{t2}]^2 + \\ & [Z_{t2} - Z_{w3} + b_1(\theta_{t2} - \theta_{w3}) - L_d \varphi_{t2}]^2 + \\ & [Z_{t2} - Z_{w4} + b_1(-\theta_{t2} + \theta_{w4}) + L_d \varphi_{t2}]^2 + \\ & [Z_{t2} - Z_{w4} + b_1(\theta_{t2} - \theta_{w4}) + L_d \varphi_{t2}]^2 + \\ & [Z_{t3} - Z_{w5} + b_1(-\theta_{t3} + \theta_{w5}) - L_d \varphi_{t3}]^2 + \\ & [Z_{t3} - Z_{w5} + b_1(\theta_{t3} - \theta_{w5}) - L_d \varphi_{t3}]^2 + \\ & [Z_{t3} - Z_{w6} + b_1(-\theta_{t3} + \theta_{w6}) + L_d \varphi_{t3}]^2 + \\ & [Z_{t3} - Z_{w6} + b_1(\theta_{t3} - \theta_{w6}) + L_d \varphi_{t3}]^2 \end{aligned} \right\} + \\
 & \frac{1}{2} k_{2z} \left\{ \begin{aligned} & [Z_c - Z_{t1} + b_2(-\theta_c + \theta_{t1}) - L_b \varphi_c]^2 + \\ & [Z_c - Z_{t1} + b_2(\theta_c - \theta_{t1}) - L_b \varphi_c]^2 + \\ & [Z_c - Z_{t2} + b_2(-\theta_c + \theta_{t2})]^2 + \\ & [Z_c - Z_{t2} + b_2(\theta_c - \theta_{t2})]^2 + \\ & [Z_c - Z_{t3} + b_2(-\theta_c + \theta_{t3}) + L_b \varphi_c]^2 + \\ & [Z_c - Z_{t3} + b_2(\theta_c - \theta_{t3}) + L_b \varphi_c]^2 \end{aligned} \right\} + \frac{1}{2} k_{hz} \left\{ \begin{aligned} & [Z_{w1} - b_w \theta_{w1} - Z_{r1}]^2 + \\ & [Z_{w1} + b_w \theta_{w1} - Z_{r2}]^2 + \\ & [Z_{w2} - b_w \theta_{w2} - Z_{r3}]^2 + \\ & [Z_{w2} + b_w \theta_{w2} - Z_{r4}]^2 + \\ & [Z_{w3} - b_w \theta_{w3} - Z_{r5}]^2 + \\ & [Z_{w3} + b_w \theta_{w3} - Z_{r6}]^2 + \\ & [Z_{w4} - b_w \theta_{w4} - Z_{r7}]^2 + \\ & [Z_{w4} + b_w \theta_{w4} - Z_{r8}]^2 + \\ & [Z_{w5} - b_w \theta_{w5} - Z_{r9}]^2 + \\ & [Z_{w5} + b_w \theta_{w5} - Z_{r10}]^2 + \\ & [Z_{w6} - b_w \theta_{w6} - Z_{r11}]^2 + \\ & [Z_{w6} + b_w \theta_{w6} - Z_{r12}]^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.48)
 \end{aligned}$$

3.6.3 Sönüm Enerjisi İfadesinin Oluşturulması

Potansiyel enerji ifadesinin oluşturulmasına benzer şekilde sistemi oluşturan alt elemanların kütleleri ve kütleli atalet momentlerinin serbestlik derecelerine göre toplam sönüm enerjisi ifadesi kabin, boji ve tekerlek–seti sırasına uyularak yazılmıştır.

Fakat sistemde kartezyen koordinat sisteminin her 3 yönüne (x,y,z) paralel çalışan ve sönüm enerjisi depolayan süspansiyonlar takılı olduğundan sönüm enerjisi ifadesi her yön için ayrı-

ayrı gruplanarak yazılmıştır. Toplam potansiyel enerji, (3.49) eşitliğinde de görüldüğü gibi bu 3 yönde ayrı-ayrı yazılan sönüm enerjilerinin toplamına eşittir.

$$\sum E_d = E_{dx} + E_{dy} + E_{dz} \quad (3.49)$$

İlk olarak hareket doğrultu yönü olan x ekseninde çalışan boylamsal süspansiyonlar için sönüm enerjisi ifadesi yazılmıştır.

$$E_{dx} = c_{1,x} \left\{ \begin{array}{l} \left[\dot{X}_{t1} - \dot{X}_{w1} - d_p (\dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w1}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t1} - \dot{X}_{w1} + d_p (\dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w1}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t1} - \dot{X}_{w2} - d_p (\dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w2}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t1} - \dot{X}_{w2} + d_p (\dot{\psi}_{t1} - \dot{\psi}_{w2}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t2} - \dot{X}_{w3} - d_p (\dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w3}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t2} - \dot{X}_{w3} + d_p (\dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w3}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t2} - \dot{X}_{w4} - d_p (\dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w4}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t2} - \dot{X}_{w4} + d_p (\dot{\psi}_{t2} - \dot{\psi}_{w4}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t3} - \dot{X}_{w5} - d_p (\dot{\psi}_{t3} - \dot{\psi}_{w5}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t3} - \dot{X}_{w5} + d_p (\dot{\psi}_{t3} - \dot{\psi}_{w5}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t3} - \dot{X}_{w6} - d_p (\dot{\psi}_{t3} - \dot{\psi}_{w6}) \right]^2 + \\ \left[\dot{X}_{t3} - \dot{X}_{w6} + d_p (\dot{\psi}_{t3} - \dot{\psi}_{w6}) \right]^2 \end{array} \right. \quad (3.50)$$

(3.50) eşitliğinde tanımlanan x yönündeki sönüm enerjisi, (3.46) eşitliğinde tanımlanan potansiyel enerji ifadesine benzemektedir fakat lokomotif kabini ile bojiler arasındaki bağlantı çubuğunun sadece yay katsayısının olduğu ve sönüm yapma kabiliyetinin olmadığı düşünülmüştür. Bu yüzden (3.50) eşitliğinde ikincil süspansiyonun sönüm katsayısı $c_{2,x}$ bulunmamaktadır.

İkinci olarak y eksenine paralel çalışan süspansiyonlar için sönüm enerjisi ifadesi yazılmıştır.

$$E_{dy} = c_{1y} \left\{ \begin{array}{l} \left[\dot{Y}_{t1} - \dot{Y}_{w1} + h_1 \dot{\theta}_{t1} + L_d \dot{\psi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_{t1} - \dot{Y}_{w2} + h_1 \dot{\theta}_{t1} - L_d \dot{\psi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_{t2} - \dot{Y}_{w3} + h_1 \dot{\theta}_{t2} + L_d \dot{\psi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_{t2} - \dot{Y}_{w4} + h_1 \dot{\theta}_{t2} - L_d \dot{\psi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_{t3} - \dot{Y}_{w5} + h_1 \dot{\theta}_{t3} + L_d \dot{\psi}_{t3} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_{t3} - \dot{Y}_{w6} + h_1 \dot{\theta}_{t3} - L_d \dot{\psi}_{t3} \right]^2 \end{array} \right\} + c_{2y} \left\{ \begin{array}{l} \left[\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t1} + h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t1} + L_b \dot{\psi}_c \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t2} + h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t3} + h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3} - L_b \dot{\psi}_c \right]^2 \end{array} \right\} \quad (3.51)$$

Son olarak da z eksenine paralel çalışan dikey süspansiyonlar için sönüm enerjisi ifadesi yazılmıştır.

$$E_{dz} = \frac{1}{2} c_{1z} \left\{ \begin{array}{l} \left[\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{w1} + b_1 (-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w1}) - L_d \dot{\phi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{w1} + b_1 (\dot{\theta}_{t1} - \dot{\theta}_{w1}) - L_d \dot{\phi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{w2} + b_1 (-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w2}) + L_d \dot{\phi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{w2} + b_1 (\dot{\theta}_{t1} - \dot{\theta}_{w2}) + L_d \dot{\phi}_{t1} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t2} - \dot{Z}_{w3} + b_1 (-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w3}) - L_d \dot{\phi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t2} - \dot{Z}_{w3} + b_1 (\dot{\theta}_{t2} - \dot{\theta}_{w3}) - L_d \dot{\phi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t2} - \dot{Z}_{w4} + b_1 (-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w4}) + L_d \dot{\phi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t2} - \dot{Z}_{w4} + b_1 (\dot{\theta}_{t2} - \dot{\theta}_{w4}) + L_d \dot{\phi}_{t2} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t3} - \dot{Z}_{w5} + b_1 (-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w5}) - L_d \dot{\phi}_{t3} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t3} - \dot{Z}_{w5} + b_1 (\dot{\theta}_{t3} - \dot{\theta}_{w5}) - L_d \dot{\phi}_{t3} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t3} - \dot{Z}_{w6} + b_1 (-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w6}) + L_d \dot{\phi}_{t3} \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_{t3} - \dot{Z}_{w6} + b_1 (\dot{\theta}_{t3} - \dot{\theta}_{w6}) + L_d \dot{\phi}_{t3} \right]^2 \end{array} \right\} +$$

$$\frac{1}{2} c_{2z} \left\{ \begin{array}{l} \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t1} + b_2 (-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t1}) - L_b \dot{\phi}_c \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t1} + b_2 (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t1}) - L_b \dot{\phi}_c \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t2} + b_2 (-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t2}) \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t2} + b_2 (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t2}) \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t3} + b_2 (-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t3}) + L_b \dot{\phi}_c \right]^2 + \\ \left[\dot{Z}_c - \dot{Z}_{t3} + b_2 (\dot{\theta}_c - \dot{\theta}_{t3}) + L_b \dot{\phi}_c \right]^2 \end{array} \right\} \quad (3.52)$$

3.6.4 Kabinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.4.1 Kabinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_c} \right) = M_c \ddot{X}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_c} \right) = 2[k_{2x}(2X_c - (X_{t1} + X_{t3})) + k_{2xb}(X_c - X_{t2})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_c \ddot{X}_c + 2[k_{2x}(2X_c - (X_{t1} + X_{t3})) + k_{2xb}(X_c - X_{t2})] = 0 \quad (3.53)$$

3.6.4.2 Kabinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_c} \right) = M_c \ddot{Y}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Y_c} \right) = 2k_{2y}[3(Y_c + h_3\theta_c) - (Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3}) + h_2(\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_c} \right) = 2c_{2y}[3(\dot{Y}_c + h_3\dot{\theta}_c) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3}) + h_2(\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_c \ddot{Y}_c + 2c_{2y}[3(\dot{Y}_c + h_3\dot{\theta}_c) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3}) + h_2(\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})] + 2k_{2y}[3(Y_c + h_3\theta_c) - (Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3}) + h_2(\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})] = 0 \quad (3.54)$$

3.6.4.3 Kabinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_c} \right) = M_c \ddot{Z}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Z_c} \right) = 2k_{2z}[3Z_c - (Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_c} \right) = 2c_{2z} [3\dot{Z}_c - (\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{t3})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_c \ddot{Z}_c + 2c_{2z} [3\dot{Z}_c - (\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{t3})] + 2k_{2z} [3Z_c - (Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t3})] = 0 \quad (3.55)$$

3.6.4.4 Kabinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_c} \right) = J_{xc} \ddot{\theta}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\theta}_c} \right) = 2h_3 k_{2y} [3(h_3 \dot{\theta}_c + \dot{Y}_c) + h_2 (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3}) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3})] +$$

$$2b_2^2 k_{2z} [3\theta_c - (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_c} \right) = 2h_3 c_{2y} [3(h_3 \dot{\theta}_c + \dot{Y}_c) + h_2 (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3}) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3})] +$$

$$2b_2^2 c_{2z} [3\dot{\theta}_c - (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{xc} \ddot{\theta}_c + 2h_3 c_{2y} [3(h_3 \dot{\theta}_c + \dot{Y}_c) + h_2 (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3}) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3})] + 2b_2^2 c_{2z} [3\dot{\theta}_c - (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})] +$$

$$2h_3 k_{2y} [3(h_3 \theta_c + Y_c) + h_2 (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3}) - (Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3})] +$$

$$2b_2^2 k_{2z} [3\theta_c - (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})] = 0 \quad (3.56)$$

3.6.4.5 Kabinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\phi}_c} \right) = J_{yc} \ddot{\phi}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\phi}_c} \right) = 2L_b k_{2z} [2L_b \dot{\phi}_c + (\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{t3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\phi}_c} \right) = 2L_b c_{2z} [2L_b \dot{\phi}_c + (\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{t3})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{yc}\ddot{\phi}_c + 2L_b c_{2y} [2L_b \dot{\phi}_c + (\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{t3})] + 2L_b k_{2y} [2L_b \phi_c + (Z_{t1} - Z_{t3})] = 0 \quad (3.57)$$

3.6.4.6 Kabinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_c} \right) = J_{zc} \ddot{\psi}_c$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\psi}_c} \right) = 2d_s^2 [k_{2x} (2\psi_c - (\psi_{t1} + \psi_{t3})) + k_{2xb} (\psi_c - \psi_{t2})]$$

$$2L_b k_{2y} [2L_b \psi_c + (-Y_{t1} + Y_{t3}) - h_2 (-\theta_{t1} + \theta_{t3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_c} \right) = 2L_b c_{2y} [2L_b \dot{\psi}_c + (-\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t3}) - h_2 (-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t3})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{zc} \ddot{\psi}_c + 2L_b c_{2y} [2L_b \dot{\psi}_c + (-\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t3}) - h_2 (-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t3})] \\ + 2d_s^2 [k_{2x} (2\psi_c - (\psi_{t1} + \psi_{t3})) + k_{2xb} (\psi_c - \psi_{t2})] \\ + 2L_b k_{2y} [2L_b \psi_c + (-Y_{t1} + Y_{t3}) - h_2 (-\theta_{t1} + \theta_{t3})] = 0 \end{aligned} \quad (3.58)$$

3.6.5 I.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.5.1 I.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklem Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{t1}} \right) = M_{t1} \ddot{X}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_{t1}} \right) = 2k_{1x} [(2X_{t1} - (X_{w1} + X_{w2}))] + 2k_{2x} [-X_c + X_{t1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{t1}} \right) = 2c_{1x} [(2\dot{X}_{t1} - (\dot{X}_{w1} + \dot{X}_{w2}))]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{t1}\ddot{X}_{t1} + 2c_{1x}[(2\dot{X}_{t1} - (\dot{X}_{w1} + \dot{X}_{w2}))] + 2k_{1x}[(2X_{t1} - (X_{w1} + X_{w2}))] + 2k_{2x}[-X_c + X_{t1}] = 0 \quad (3.59)$$

3.6.5.2 I.Bojinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{t1}} \right) = M_{t1}\ddot{Y}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Y}_{t1}} \right) = 2k_{1y}[2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}) + 2h_1\theta_{t1}] + 2k_{2y}[(-Y_c + Y_{t1}) - (h_3\theta_c + h_2\theta_{t1}) - L_b\psi_c]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{t1}} \right) = 2c_{1y}[2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}) + 2h_1\dot{\theta}_{t1}] + 2c_{2y}[(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t1}) - (h_3\dot{\theta}_c + h_2\dot{\theta}_{t1}) - L_b\dot{\psi}_c]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{t1}\ddot{Y}_{t1} + 2c_{1y}[2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}) + 2h_1\dot{\theta}_{t1}] + 2c_{2y}[(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t1}) - (h_3\dot{\theta}_c + h_2\dot{\theta}_{t1}) - L_b\dot{\psi}_c] + 2k_{1y}[2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}) + 2h_1\theta_{t1}] + 2k_{2y}[(-Y_c + Y_{t1}) - (h_3\theta_c + h_2\theta_{t1}) - L_b\psi_c] = 0 \quad (3.60)$$

3.6.5.3 I.Bojinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{t1}} \right) = M_{t1}\ddot{Z}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Z}_{t1}} \right) = 2k_{1z}[2Z_{t1} - (Z_{w1} + Z_{w2})] + 2k_{2z}[(-Z_c + Z_{t1}) + L_b\phi_c]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{t1}} \right) = 2c_{1z}[2\dot{Z}_{t1} - (\dot{Z}_{w1} + \dot{Z}_{w2})] + 2c_{2z}[(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t1}) + L_b\dot{\phi}_c]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{t1}\ddot{Z}_{t1} + 2c_{1z}[2\dot{Z}_{t1} - (\dot{Z}_{w1} + \dot{Z}_{w2})] + 2c_{2z}[(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t1}) + L_b\dot{\phi}_c] + 2k_{1z}[2Z_{t1} - (Z_{w1} + Z_{w2})] + 2k_{2z}[(-Z_c + Z_{t1}) + L_b\phi_c] = 0 \quad (3.61)$$

3.6.5.4 I.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{t1}} \right) = J_{xt1}\ddot{\theta}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{t1}} \right) = 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t1} + (2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}))] + 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t1} + (Y_c - Y_{t1}) + L_b \psi_c] +$$

$$2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t1} - (\theta_{w1} + \theta_{w2})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{t1}} \right) = 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t1} + (2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t1} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t1}) + L_b \dot{\psi}_c] +$$

$$2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t1} - (\dot{\theta}_{w1} + \dot{\theta}_{w2})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t1}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{x1} \ddot{\theta}_{t1} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t1} + (2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t1} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t1}) + L_b \dot{\psi}_c] +$$

$$+ 2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t1} - (\dot{\theta}_{w1} + \dot{\theta}_{w2})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t1}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t1} + (2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}))] +$$

$$2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t1} + (Y_c - Y_{t1}) + L_b \psi_c] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t1} - (\theta_{w1} + \theta_{w2})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t1}] = 0 \quad (3.62)$$

3.6.5.5 I.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\varphi}_{t1}} \right) = J_{y1} \ddot{\varphi}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \varphi_{t1}} \right) = 2L_d k_{1z} [2L_d \varphi_{t1} + (Z_{w1} - Z_{w2})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\varphi}_{t1}} \right) = 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\varphi}_{t1} + (\dot{Z}_{w1} - \dot{Z}_{w2})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{y1} \ddot{\varphi}_{t1} + 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\varphi}_{t1} + (\dot{Z}_{w1} - \dot{Z}_{w2})] + 2L_d k_{1z} [2L_d \varphi_{t1} + (Z_{w1} - Z_{w2})] = 0 \quad (3.63)$$

3.6.5.6 I.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{t1}} \right) = J_{z1} \ddot{\psi}_{t1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{t1}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t1} - (\psi_{w1} + \psi_{w2})] + 2d_s^2 k_{2x} [-\psi_c + \psi_{t1}] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t1} - (Y_{w1} - Y_{w2})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{t1}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [2\dot{\psi}_{t1} - (\dot{\psi}_{w1} + \dot{\psi}_{w2})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \dot{\psi}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} - \dot{Y}_{w2})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{z t1} \ddot{\psi}_{t1} + 2d_p^2 c_{1x} [2\ddot{\psi}_{t1} - (\ddot{\psi}_{w1} + \ddot{\psi}_{w2})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \ddot{\psi}_{t1} - (\ddot{Y}_{w1} - \ddot{Y}_{w2})] + 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t1} - (\psi_{w1} + \psi_{w2})] \\ + 2d_s^2 k_{2x} [-\psi_c + \psi_{t1}] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t1} - (Y_{w1} - Y_{w2})] = 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

3.6.6 II.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.6.1 II.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{t2}} \right) = M_{t2} \ddot{X}_{t2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_{t2}} \right) = 2k_{1x} [(2X_{t2} - (X_{w3} + X_{w4}))] + 2k_{2xb} [-X_c + X_{t2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{t2}} \right) = 2c_{1x} [(2\dot{X}_{t2} - (\dot{X}_{w3} + \dot{X}_{w4}))]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{t2} \ddot{X}_{t2} + 2c_{1x} [(2\dot{X}_{t2} - (\dot{X}_{w3} + \dot{X}_{w4}))] + 2k_{1x} [(2X_{t2} - (X_{w3} + X_{w4}))] + \\ 2k_{2xb} [-X_c + X_{t2}] = 0 \end{aligned} \quad (3.65)$$

3.6.6.2 II.Bojinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{t2}} \right) = M_{t2} \ddot{Y}_{t2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Y_{t2}} \right) = 2k_{1y} [2Y_{t2} - (Y_{w3} + Y_{w4}) + 2h_1 \theta_{t2}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t2}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t2})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{t2}} \right) = 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t2}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t2}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t2})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& M_{t_2} \ddot{Y}_{t_2} + 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t_2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t_2}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t_2}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t_2})] + \\
& 2k_{1y} [2Y_{t_2} - (Y_{w3} + Y_{w4}) + 2h_1 \theta_{t_2}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t_2}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t_2})] = 0
\end{aligned} \tag{3.66}$$

3.6.6.3 II.Bojinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{t_2}} \right) = M_{t_2} \ddot{Z}_{t_2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Z}_{t_2}} \right) = 2k_{1z} [2Z_{t_2} - (Z_{w3} + Z_{w4})] + 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t_2})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{t_2}} \right) = 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t_2} - (\dot{Z}_{w3} + \dot{Z}_{w4})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t_2})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& M_{t_2} \ddot{Z}_{t_2} + 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t_2} - (\dot{Z}_{w3} + \dot{Z}_{w4})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t_2})] + 2k_{1z} [2Z_{t_2} - (Z_{w3} + Z_{w4})] + \\
& 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t_2})] = 0
\end{aligned} \tag{3.67}$$

3.6.6.4 II.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{t_2}} \right) = J_{xt2} \ddot{\theta}_{t_2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\theta}_{t_2}} \right) = 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t_2} + (2Y_{t_2} - (Y_{w3} + Y_{w4}))] + 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t_2} + (Y_c - Y_{t_2})] +$$

$$2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t_2} - (\theta_{w3} + \theta_{w4})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t_2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{t_2}} \right) = 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t_2} + (2\dot{Y}_{t_2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t_2} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t_2})] +$$

$$2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t_2} - (\dot{\theta}_{w3} + \dot{\theta}_{w4})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t_2}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{xt2} \ddot{\theta}_{t_2} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t_2} + (2\dot{Y}_{t_2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t_2} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t_2})] +$$

$$\begin{aligned}
& 2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t_2} - (\dot{\theta}_{w_3} + \dot{\theta}_{w_4})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t_2}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t_2} + (2Y_{t_2} - (Y_{w_3} + Y_{w_4}))] + \\
& 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t_2} + (Y_c - Y_{t_2})] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t_2} - (\theta_{w_3} + \theta_{w_4})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t_2}] = 0 \quad (3.68)
\end{aligned}$$

3.6.6.5 II.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\phi}_{t_2}} \right) = J_{y t_2} \ddot{\phi}_{t_2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \phi_{t_2}} \right) = 2L_d k_{1z} [2L_d \phi_{t_2} + (Z_{w_3} - Z_{w_4})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\phi}_{t_2}} \right) = 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\phi}_{t_2} + (\dot{Z}_{w_3} - \dot{Z}_{w_4})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{y t_2} \ddot{\phi}_{t_2} + 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\phi}_{t_2} + (\dot{Z}_{w_3} - \dot{Z}_{w_4})] + 2L_d k_{1z} [2L_d \phi_{t_2} + (Z_{w_3} - Z_{w_4})] = 0 \quad (3.69)$$

3.6.6.6 II.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{t_2}} \right) = J_{z t_2} \ddot{\psi}_{t_2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{t_2}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t_2} - (\psi_{w_3} + \psi_{w_4})] + 2d_s^2 k_{2xb} [\psi_{t_2} - \psi_c] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t_2} - (Y_{w_3} - Y_{w_4})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{t_2}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [2\dot{\psi}_{t_2} - (\dot{\psi}_{w_3} + \dot{\psi}_{w_4})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \dot{\psi}_{t_2} - (\dot{Y}_{w_3} - \dot{Y}_{w_4})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& J_{z t_2} \ddot{\psi}_{t_2} + 2d_p^2 c_{1x} [2\dot{\psi}_{t_2} - (\dot{\psi}_{w_3} + \dot{\psi}_{w_4})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \dot{\psi}_{t_2} - (\dot{Y}_{w_3} - \dot{Y}_{w_4})] + \\
& 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t_2} - (\psi_{w_3} + \psi_{w_4})] + 2d_s^2 k_{2xb} [\psi_{t_2} - \psi_c] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t_2} - (Y_{w_3} - Y_{w_4})] = 0 \quad (3.70)
\end{aligned}$$

3.6.7 III.Bojinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.7.1 III.Bojinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{t3}} \right) = M_{t3} \ddot{X}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{X}_{t3}} \right) = 2k_{1x} [(2X_{t3} - (X_{w5} + X_{w6}))] + 2k_{2x} [-X_c + X_{t3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{t3}} \right) = 2c_{1x} [(2\dot{X}_{t3} - (\dot{X}_{w5} + \dot{X}_{w6}))]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{t3} \ddot{X}_{t3} + 2c_{1x} [(2\dot{X}_{t3} - (\dot{X}_{w5} + \dot{X}_{w6}))] + 2k_{1x} [(2X_{t3} - (X_{w5} + X_{w6}))] + 2k_{2x} [-X_c + X_{t3}] = 0 \quad (3.71)$$

3.6.7.2 III.Bojinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{t3}} \right) = M_{t3} \ddot{Y}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Y}_{t3}} \right) = 2k_{1y} [2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}) + 2h_1 \theta_{t3}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t3}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3}) + L_b \psi_c]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{t3}} \right) = 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t3}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t3}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3}) + L_b \dot{\psi}_c]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{t3} \ddot{Y}_{t3} + 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t3}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t3}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3}) + L_b \dot{\psi}_c] + 2k_{1y} [2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}) + 2h_1 \theta_{t3}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t3}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3}) + L_b \psi_c] = 0 \quad (3.72)$$

3.6.7.3 III.Bojinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{t3}} \right) = M_{t3} \ddot{Z}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Z_{t3}} \right) = 2k_{1z} [2Z_{t3} - (Z_{w5} + Z_{w6})] + 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t3}) - L_b \phi_c]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{t3}} \right) = 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t3} - (\dot{Z}_{w5} + \dot{Z}_{w6})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t3}) - L_b \dot{\phi}_c]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{t1} \ddot{Z}_{t1} + 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t3} - (\dot{Z}_{w5} + \dot{Z}_{w6})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t3}) - L_b \dot{\phi}_c] + 2k_{1z} [2Z_{t3} - (Z_{w5} + Z_{w6})] + \\ 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t3}) - L_b \phi_c] = 0 \end{aligned} \quad (3.73)$$

3.6.7.4 III.Bojinin Yalpa Hareketi için Denklemın Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{t3}} \right) = J_{xt3} \ddot{\theta}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{t3}} \right) = 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t3} + (2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}))] + 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3} + (Y_c - Y_{t3}) - L_b \psi_c] +$$

$$2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t3} - (\theta_{w5} + \theta_{w6})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{t3}} \right) = 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t3} + (2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t3}) - L_b \dot{\psi}_c] +$$

$$2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t3} - (\dot{\theta}_{w5} + \dot{\theta}_{w6})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t3}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{xt3} \ddot{\theta}_{t3} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t3} + (2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t3}) - L_b \dot{\psi}_c] +$$

$$2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t3} - (\dot{\theta}_{w5} + \dot{\theta}_{w6})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t3}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t3} + (2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}))] +$$

$$2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3} + (Y_c - Y_{t3}) - L_b \psi_c] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t3} - (\theta_{w5} + \theta_{w6})] +$$

$$2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t3}] = 0 \quad (3.74)$$

3.6.7.5 III.Bojinin Kafa Vurma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\varphi}_{t3}} \right) = J_{yt3} \ddot{\varphi}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \varphi_{t3}} \right) = 2L_d k_{1z} [2L_d \varphi_{t3} + (Z_{w5} - Z_{w6})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\varphi}_{t3}} \right) = 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\varphi}_{t3} + (\dot{Z}_{w5} - \dot{Z}_{w6})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{yt3} \ddot{\varphi}_{t3} + 2L_d c_{1z} [2L_d \dot{\varphi}_{t3} + (\dot{Z}_{w5} - \dot{Z}_{w6})] + 2L_d k_{1z} [2L_d \varphi_{t3} + (Z_{w5} - Z_{w6})] = 0 \quad (3.75)$$

3.6.7.6 III.Bojinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{t3}} \right) = J_{zt3} \ddot{\psi}_{t3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{t3}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t3} - (\psi_{w5} + \psi_{w6})] + 2d_s^2 k_{2x} [-\psi_c + \psi_{t3}] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t3} - (Y_{w5} - Y_{w6})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{t3}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [2\dot{\psi}_{t3} - (\dot{\psi}_{w5} + \dot{\psi}_{w6})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \dot{\psi}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} - \dot{Y}_{w6})]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{zt3} \ddot{\psi}_{t3} + 2d_p^2 c_{1x} [2\dot{\psi}_{t3} - (\dot{\psi}_{w5} + \dot{\psi}_{w6})] + 2L_d c_{1y} [2L_d \dot{\psi}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} - \dot{Y}_{w6})] + 2d_p^2 k_{1x} [2\psi_{t3} - (\psi_{w5} + \psi_{w6})] + 2d_s^2 k_{2x} [-\psi_c + \psi_{t3}] + 2L_d k_{1y} [2L_d \psi_{t3} - (Y_{w5} - Y_{w6})] = 0 \quad (3.76)$$

3.6.8 I.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.8.1 I.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w1}} \right) = M_{w1} \ddot{X}_{w1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{X}_{w1}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t1} + X_{w1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w1}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t1} + \dot{X}_{w1}]$$

Boylamsal sürünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w1} \ddot{X}_{w1} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t1} + \dot{X}_{w1}] + 2k_{1x} [-X_{t1} + X_{w1}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] = 0 \quad (3.77)$$

3.6.8.2 I.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w1}} \right) = M_{w1} \ddot{Y}_{w1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Y}_{w1}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w1} - Y_{t1}) - h_1 \theta_{t1} - L_d \psi_{t1}] + k_{hy} [Y_{w1} - Y_{r1} + R_1 \theta_{w1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w1}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w1} - \dot{Y}_{t1}) - h_1 \dot{\theta}_{t1} - L_d \dot{\psi}_{t1}]$$

Yanal süenme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w1} \ddot{Y}_{w1} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w1} - \dot{Y}_{t1}) - h_1 \dot{\theta}_{t1} - L_d \dot{\psi}_{t1}] + 2k_{1y} [(Y_{w1} - Y_{t1}) - h_1 \theta_{t1} - L_d \psi_{t1}] + k_{hy} [Y_{w1} - Y_{r1} + R_1 \theta_{w1}] + \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w1}}{V} - \psi_{w1} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] \right] = 0 \quad (3.78)$$

3.6.8.3 I.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w1}} \right) = M_{w1} \ddot{Z}_{w1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Z}_{w1}} \right) = 2k_{1z} [(-Z_{t1} + Z_{w1}) + L_d \phi_{t1}] + k_{hz} [2Z_{w1} - (Z_{r1} + Z_{r2})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w1}} \right) = 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{w1}) + L_d \dot{\phi}_{t1}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w1} \ddot{Z}_{w1} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{w1}) + L_d \dot{\phi}_{t1}] + 2k_{1z} [(-Z_{t1} + Z_{w1}) + L_d \phi_{t1}] \\ + k_{hz} [2Z_{w1} - (Z_{r1} + Z_{r2})] = 0 \end{aligned} \quad (3.79)$$

3.6.8.4 I.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w1}} \right) = J_{xw1} \ddot{\theta}_{w1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{w1}} \right) = 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t1} + \theta_{w1}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w1} + (Z_{r1} - Z_{r2})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w1} + (Y_{w1} - Y_{r1})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w1}} \right) = 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w1}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{xw1} \ddot{\theta}_{w1} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w1}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t1} + \theta_{w1}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w1} + (Z_{r1} - Z_{r2})] \\ + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w1} + (Y_{w1} - Y_{r1})] = 0 \end{aligned} \quad (3.80)$$

3.6.8.5 I.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w1}} \right) = J_{zw1} \ddot{\psi}_{w1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{w1}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w1} - \psi_{t1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w1}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w1} - \dot{\psi}_{t1}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{zw1}\ddot{\psi}_{w1} + 2d_p^2 c_{1x}[\dot{\psi}_{w1} - \dot{\psi}_{t1}] + 2d_p^2 k_{1x}[\psi_{w1} - \psi_{t1}] + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w1}}{V} + \psi_{w1} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w1}}{V} \right) \right] \right] = 0 \quad (3.81)$$

3.6.9 II.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

II.Tekerlek–setinin de yine I.tekerlek–seti gibi, x, y, z, kartezyen koordinatlar doğrultusunda öteleme X_{w2} , Y_{w2} , Z_{w2} ve x ekseninde dönme (yalpalama) θ_{w2} , z ekseninde dönme (yanal sapma) ψ_{w2} serbestlik dereceleri olmak üzere toplam 5 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

3.6.9.1 II.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w2}} \right) = M_{w2} \ddot{X}_{w2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{X}_{w2}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t1} + X_{w2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w2}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t1} + \dot{X}_{w2}]$$

Boylamsal sünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w2} \ddot{X}_{w2} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t1} + \dot{X}_{w2}] + 2k_{1x} [-X_{t1} + X_{w2}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w2}}{V} \right) \right] = 0 \quad (3.82)$$

3.6.9.2 II.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w2}} \right) = M_{w2} \ddot{Y}_{w2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Y}_{w2}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w2} - Y_{t1}) - h_1 \theta_{t1} + L_d \psi_{t1}] + k_{hy} [Y_{w2} - Y_{r2} + R_1 \theta_{w2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w2}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w2} - \dot{Y}_{t1}) - h_1 \dot{\theta}_{t1} + L_d \dot{\psi}_{t1}]$$

Yanal sünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& M_{w_2} \ddot{Y}_{w_2} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w_2} - \dot{Y}_{t1}) - h_1 \dot{\theta}_{t1} + L_d \dot{\psi}_{t1}] + 2k_{1y} [(Y_{w_2} - Y_{t1}) - h_1 \theta_{t1} + L_d \psi_{t1}] + k_{hy} [Y_{w_2} - Y_{r2} + R_1 \theta_{w_2}] \\
& + \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w_2}}{V} - \psi_{w_2} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w_2}}{V} \right) \right] \right] = 0
\end{aligned} \tag{3.83}$$

3.6.9.3 II. Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w_2}} \right) &= M_{w_2} \ddot{Z}_{w_2} \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Z_{w_2}} \right) &= 2k_{1z} [(-Z_{t1} + Z_{w_2}) - L_d \phi_{t1}] + k_{hz} [2Z_{w_2} - (Z_{r3} + Z_{r4})] \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w_2}} \right) &= 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{w_2}) - L_d \dot{\phi}_{t1}]
\end{aligned}$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& M_{w_2} \ddot{Z}_{w_2} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{w_2}) - L_d \dot{\phi}_{t1}] + 2k_{1z} [(-Z_{t1} + Z_{w_2}) - L_d \phi_{t1}] + \\
& k_{hz} [2Z_{w_2} - (Z_{r3} + Z_{r4})] = 0
\end{aligned} \tag{3.84}$$

3.6.9.4 II. Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w_2}} \right) &= J_{xw_2} \ddot{\theta}_{w_2} \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{w_2}} \right) &= 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t1} + \theta_{w_2}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w_2} + (Z_{r3} - Z_{r4})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w_2} + (Y_{w_2} - Y_{r2})] \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w_2}} \right) &= 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w_2}]
\end{aligned}$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& J_{xw_2} \ddot{\theta}_{w_2} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{w_2}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t1} + \theta_{w_2}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w_2} + (Z_{r3} - Z_{r4})] \\
& + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w_2} + (Y_{w_2} - Y_{r2})] = 0
\end{aligned} \tag{3.85}$$

3.6.9.5 II.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w2}} \right) = J_{zw2} \ddot{\psi}_{w2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{w2}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w2} - \psi_{t1}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w2}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w2} - \dot{\psi}_{t1}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} & J_{zw2} \ddot{\psi}_{w2} + 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w2} - \dot{\psi}_{t1}] + 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w2} - \psi_{t1}] \\ & + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w2}}{V} + \psi_{w2} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w2}}{V} \right) \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.86)$$

3.6.10 III.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.10.1 III.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w3}} \right) = M_{w3} \ddot{X}_{w3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_{w3}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t2} + X_{w3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w3}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t2} + \dot{X}_{w3}]$$

Boylamsal sünme kuvvetini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w3} \ddot{X}_{w3} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t2} + \dot{X}_{w3}] + 2k_{1x} [-X_{t2} + X_{w3}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w3}}{V} \right) \right] = 0 \quad (3.87)$$

3.6.10.2 III.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w3}} \right) = M_{w3} \ddot{Y}_{w3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Y_{w3}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w3} - Y_{t2}) - h_1 \theta_{t2} - L_d \psi_{t2}] + k_{hy} [Y_{w3} - Y_{r3} + R_1 \theta_{w3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w3}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w3} - \dot{Y}_{t2}) - h_1 \dot{\theta}_{t2} - L_d \dot{\psi}_{t2}]$$

Yanal süne kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w3} \ddot{Y}_{w3} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w3} - \dot{Y}_{t2}) - h_1 \dot{\theta}_{t2} - L_d \dot{\psi}_{t2}] + 2k_{1y} [(Y_{w3} - Y_{t2}) - h_1 \theta_{t2} - L_d \psi_{t2}] + k_{hy} [Y_{w3} - Y_{r3} + R_1 \theta_{w3}] \\ + \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w3}}{V} - \psi_{w3} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w3}}{V} \right) \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.88)$$

3.6.10.3 III.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w3}} \right) = M_{w3} \ddot{Z}_{w3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Z_{w3}} \right) = 2k_{1z} [(-Z_{t2} + Z_{w3}) + L_d \phi_{t2}] + k_{hz} [2Z_{w3} - (Z_{r5} + Z_{r6})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w3}} \right) = 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{w3}) + L_d \dot{\phi}_{t2}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w3} \ddot{Z}_{w3} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{w3}) + L_d \dot{\phi}_{t2}] + 2k_{1z} [(-Z_{t2} + Z_{w3}) + L_d \phi_{t2}] + \\ k_{hz} [2Z_{w3} - (Z_{r5} + Z_{r6})] = 0 \end{aligned} \quad (3.89)$$

3.6.10.4 III.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w3}} \right) = J_{xw3} \ddot{\theta}_{w3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{w3}} \right) = 2b_1^2 k_{1z} [-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w3}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w3} + (Z_{r5} - Z_{r6})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w3} + (Y_{w3} - Y_{r3})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w3}} \right) = 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w3}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{zw3} \ddot{\theta}_{w3} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w3}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t2} + \theta_{w3}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w3} + (Z_{r5} - Z_{r6})] \\ + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w3} + (Y_{w3} - Y_{r3})] = 0 \end{aligned} \quad (3.90)$$

3.6.10.5 III.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w3}} \right) = J_{zw3} \ddot{\psi}_{w3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{w3}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w3} - \psi_{t2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w3}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w3} - \dot{\psi}_{t2}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{zw3} \ddot{\psi}_{w3} + 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w3} - \dot{\psi}_{t2}] + 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w3} - \psi_{t2}] \\ + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w3}}{V} + \psi_{w3} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w3}}{V} \right) \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.91)$$

3.6.11 IV.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.11.1 IV.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w4}} \right) = M_{w4} \ddot{X}_{w4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{X}_{w4}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t2} + X_{w4}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w4}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t2} + \dot{X}_{w4}]$$

Boylamsal sünme kuvvetini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w4} \ddot{X}_{w4} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t2} + \dot{X}_{w4}] + 2k_{1x} [-X_{t2} + X_{w4}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w4}}{V} \right) \right] = 0 \quad (3.92)$$

3.6.11.2 IV.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemın Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w4}} \right) = M_{w4} \ddot{Y}_{w4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Y}_{w4}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w4} - Y_{t2}) - h_1 \theta_{t2} + L_d \psi_{t2}] + k_{hy} [Y_{w4} - Y_{r4} + R_1 \theta_{w4}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w4}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w4} - \dot{Y}_{t2}) - h_1 \dot{\theta}_{t2} + L_d \dot{\psi}_{t2}]$$

Yanal sünme kuvvetini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w4} \ddot{Y}_{w4} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w4} - \dot{Y}_{t2}) - h_1 \dot{\theta}_{t2} + L_d \dot{\psi}_{t2}] + 2k_{1y} [(Y_{w4} - Y_{t2}) - h_1 \theta_{t2} + L_d \psi_{t2}] + k_{hy} [Y_{w4} - Y_{r4} + R_1 \theta_{w4}] + \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w4}}{V} - \psi_{w4} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w4}}{V} \right) \right] \right] = 0 \quad (3.93)$$

3.6.11.3 IV.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemın Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w4}} \right) = M_{w4} \ddot{Z}_{w4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Z}_{w4}} \right) = 2k_{1z} [(-Z_{t2} + Z_{w4}) - L_d \varphi_{t2}] + k_{hz} [2Z_{w4} - (Z_{r7} + Z_{r8})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w4}} \right) = 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{w4}) - L_d \dot{\phi}_{t2}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w4} \ddot{Z}_{w4} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{w4}) - L_d \dot{\phi}_{t2}] + 2k_{1z} [(-Z_{t2} + Z_{w4}) - L_d \phi_{t2}] + \\ k_{hz} [2Z_{w4} - (Z_{r7} + Z_{r8})] = 0 \end{aligned} \quad (3.94)$$

3.6.11.4 IV.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklem Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w4}} \right) = J_{xw4} \ddot{\theta}_{w4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \theta_{w4}} \right) = 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t2} + \theta_{w4}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w4} + (Z_{r7} - Z_{r8})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w4} + (Y_{w4} - Y_{r4})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w4}} \right) = 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w4}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{xw4} \ddot{\theta}_{w4} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{w4}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t2} + \theta_{w4}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w4} + (Z_{r7} - Z_{r8})] \\ + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w4} + (Y_{w4} - Y_{r4})] = 0 \end{aligned} \quad (3.95)$$

3.6.11.5 IV.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklem Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w4}} \right) = J_{zw4} \ddot{\psi}_{w4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{w4}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w4} - \psi_{t2}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w4}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w4} - \dot{\psi}_{t2}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
& J_{zw4} \ddot{\psi}_{w4} + 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w4} - \dot{\psi}_{t2}] + 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w4} - \psi_{t2}] \\
& + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w4}}{V} + \psi_{w4} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w4}}{V} \right) \right] \right] = 0
\end{aligned} \tag{3.96}$$

3.6.12 V.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.12.1 V.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w5}} \right) = M_{w5} \ddot{X}_{w5}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_{w5}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t3} + X_{w5}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w5}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t3} + \dot{X}_{w5}]$$

Boylamsal sünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemini aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w5} \ddot{X}_{w5} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t3} + \dot{X}_{w5}] + 2k_{1x} [-X_{t3} + X_{w5}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w5}}{V} \right) \right] = 0 \tag{3.97}$$

3.6.12.2 V.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w5}} \right) = M_{w5} \ddot{Y}_{w5}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Y_{w5}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w5} - Y_{t3}) - h_1 \theta_{t3} - L_d \psi_{t3}] + k_{hy} [Y_{w5} - Y_{r5} + R_1 \theta_{w5}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w5}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w5} - \dot{Y}_{t3}) - h_1 \dot{\theta}_{t3} - L_d \dot{\psi}_{t3}]$$

Yanal sünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemini aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w5} \ddot{Y}_{w5} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w5} - \dot{Y}_{t3}) - h_1 \dot{\theta}_{t3} - L_d \dot{\psi}_{t3}] + 2k_{1y} [(Y_{w5} - Y_{t3}) - h_1 \theta_{t3} - L_d \psi_{t3}] + k_{hy} [Y_{w5} - Y_{r5} + R_1 \theta_{w5}]$$

$$+ \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w5}}{V} - \psi_{w5} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w5}}{V} \right) \right] \right] = 0 \quad (3.98)$$

3.6.12.3 V.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w5}} \right) = M_{w5} \ddot{Z}_{w5}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{Z}_{w5}} \right) = 2k_{1z} [(-Z_{t3} + Z_{w5}) + L_d \phi_{t3}] + k_{hz} [2Z_{w5} - (Z_{r9} + Z_{r10})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w5}} \right) = 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t3} + \dot{Z}_{w5}) + L_d \dot{\phi}_{t3}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w5} \ddot{Z}_{w5} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t3} + \dot{Z}_{w5}) + L_d \dot{\phi}_{t3}] + 2k_{1z} [(-Z_{t3} + Z_{w5}) + L_d \phi_{t3}] \\ + k_{hz} [2Z_{w5} - (Z_{r9} + Z_{r10})] = 0 \end{aligned} \quad (3.99)$$

3.6.12.4 V.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w5}} \right) = J_{xw5} \ddot{\theta}_{w5}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\theta}_{w5}} \right) = 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t3} + \theta_{w5}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w5} + (Z_{r9} - Z_{r10})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w5} + (Y_{w5} - Y_{r5})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w5}} \right) = 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w5}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{xw5} \ddot{\theta}_{w5} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w5}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t3} + \theta_{w5}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w5} + (Z_{r9} - Z_{r10})] \\ + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w5} + (Y_{w5} - Y_{r5})] = 0 \end{aligned} \quad (3.100)$$

3.6.12.5 V.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w5}} \right) = J_{zw5} \ddot{\psi}_{w5}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \psi_{w5}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w5} - \psi_{t3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w5}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w5} - \dot{\psi}_{t3}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$J_{zw5} \ddot{\psi}_{w5} + 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w5} - \dot{\psi}_{t3}] + 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w5} - \psi_{t3}] + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w5}}{V} + \psi_{w5} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w5}}{V} \right) \right] \right] = 0 \quad (3.101)$$

3.6.13 VI.Tekerlek–setinin Hareket Denklemlerinin Oluşturulması

3.6.13.1 VI.Tekerlek–setinin Boylamsal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{X}_{w6}} \right) = M_{w6} \ddot{X}_{w6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial X_{w6}} \right) = 2k_{1x} [-X_{t3} + X_{w6}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{X}_{w6}} \right) = 2c_{1x} [-\dot{X}_{t3} + \dot{X}_{w6}]$$

Boylamsal sünme kuvvetini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$M_{w6} \ddot{X}_{w6} + 2c_{1x} [-\dot{X}_{t3} + \dot{X}_{w6}] + 2k_{1x} [-X_{t3} + X_{w6}] + \left[2f_{33} \left(\frac{-a\dot{\psi}_{w6}}{V} \right) \right] = 0 \quad (3.102)$$

3.6.13.2 VI.Tekerlek–setinin Yanal Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Y}_{w6}} \right) = M_{w6} \ddot{Y}_{w6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Y_{w6}} \right) = 2k_{1y} [(Y_{w6} - Y_{t3}) - h_1 \theta_{t3} + L_d \psi_{t3}] + k_{hy} [Y_{w6} - Y_{r6} + R_1 \theta_{w6}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Y}_{w6}} \right) = 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w6} - \dot{Y}_{t3}) - h_1 \dot{\theta}_{t3} + L_d \dot{\psi}_{t3}]$$

Yanal sünme kuvvetini de hesaba katarak, hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w6} \ddot{Y}_{w6} + 2c_{1y} [(\dot{Y}_{w6} - \dot{Y}_{t3}) - h_1 \dot{\theta}_{t3} + L_d \dot{\psi}_{t3}] + 2k_{1y} [(Y_{w6} - Y_{t3}) - h_1 \theta_{t3} + L_d \psi_{t3}] + k_{hy} [Y_{w6} - Y_{r6} + R_1 \theta_{w6}] \\ + \left[2 \left[f_{11} \left(\frac{\dot{Y}_{w6}}{V} - \psi_{w6} \right) + f_{12} \left(\frac{\dot{\psi}_{w6}}{V} \right) \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.103)$$

3.6.13.3 VI.Tekerlek–setinin Düşey Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{Z}_{w6}} \right) = M_{w6} \ddot{Z}_{w6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial Z_{w6}} \right) = 2k_{1z} [(-Z_{t3} + Z_{w6}) - L_d \phi_{t3}] + k_{hz} [2Z_{w6} - (Z_{r11} + Z_{r12})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{Z}_{w6}} \right) = 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t3} + \dot{Z}_{w6}) - L_d \dot{\phi}_{t3}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} M_{w6} \ddot{Z}_{w6} + 2c_{1z} [(-\dot{Z}_{t3} + \dot{Z}_{w6}) - L_d \dot{\phi}_{t3}] + 2k_{1z} [(-Z_{t3} + Z_{w6}) - L_d \phi_{t3}] + \\ k_{hz} [2Z_{w6} - (Z_{r11} + Z_{r12})] = 0 \end{aligned} \quad (3.104)$$

3.6.13.4 VI.Tekerlek–setinin Yalpa Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\theta}_{w6}} \right) = J_{xw6} \ddot{\theta}_{w6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\theta}_{w6}} \right) = 2b_1^2 k_{1z} [-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w6}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w6} + (Z_{r11} - Z_{r12})] + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w6} + (Y_{w6} - Y_{r6})]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\theta}_{w6}} \right) = 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w6}]$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{zw6} \ddot{\theta}_{w6} + 2b_1^2 c_{1z} [-\dot{\theta}_{t3} + \dot{\theta}_{w6}] + 2b_1^2 k_{1z} [-\theta_{t3} + \theta_{w6}] + b_w k_{hz} [2b_w \theta_{w6} + (Z_{r11} - Z_{r12})] \\ + R_1 k_{hy} [R_1 \theta_{w6} + (Y_{w6} - Y_{r6})] = 0 \end{aligned} \quad (3.105)$$

3.6.13.5 VI.Tekerlek–setinin Yanal Sapma Hareketi için Denklemin Oluşturulması

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_k}{\partial \dot{\psi}_{w6}} \right) = J_{zw6} \ddot{\psi}_{w6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_p}{\partial \dot{\psi}_{w6}} \right) = 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w6} - \psi_{t3}]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Sigma E_d}{\partial \dot{\psi}_{w6}} \right) = 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w6} - \dot{\psi}_{t3}]$$

Yanal sapma sünme momentini de hesaba katarak,hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} J_{zw6} \ddot{\psi}_{w6} + 2d_p^2 c_{1x} [\dot{\psi}_{w6} - \dot{\psi}_{t3}] + 2d_p^2 k_{1x} [\psi_{w6} - \psi_{t3}] \\ + \left[2 \left[f_{12} \left(-\frac{\dot{Y}_{w6}}{V} + \psi_{w6} \right) + f_{22} \left(\frac{\dot{\psi}_{w6}}{V} \right) \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.106)$$

4. AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Bu bölümde 54 serbestlik dereceli lokomotif modelinde, girilen ray düzgünlük fonksiyonları ile kabinde oluşan yanal titreşimlerin minimize edilmek amacı ile gövde ile (3 adet) bojiler arasındaki ikincil süspansiyonlar vasıtası ile aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır.(Şekil 4.5 ve 4.14)

Aktif titreşim kontrolünde BMK(Bulanık Mantık Kontrol) yöntemi uygulanmıştır. Kontrolcü algoritmasında kontrolcü girişleri olarak hatanın ve hatanın zamana göre türevi alınmıştır. BMK'nın uygulanma nedenleri; dinamik sistemin karmaşık yapıda olması ve kontrolcü algoritmasının kolay uygulanmasıdır.

Yanal titreşimler lokomotif dinamiğinde çok önemli bir yere sahiptir. Kurp girişlerinde veya çıkışlarında her ne kadar yumuşatılmış geçişler kullanılsa bu durum lokomotif üzerinde kararsızlık meydana getirebilecek potansiyel bir tehlikeye dönüşebilmektedir. Ayrıca rayın yanal yönde çeşitli dış etkilerden dolayı gelişigüzel tahrip olması, eğilmesi, ezilmesi, sıcaklık değişimlerinden dolayı bükülmesi gibi nedenlerle de yanal yönlerde çeşitli ray düzgünlükleri meydana gelebilmektedir.

Düşey yöndeki ray düzgünlükleri yolcular tarafından çok daha fazla hissedilebilir olması, düşey titreşimleri seyir konforunu etkileyen önemli izleme parametresi haline getirmektedir.

Daha önce 3.bölümde elde edilen hareket denklemlerinden bazıları kontrolcünün sisteme dahil edilmesi için değiştirilmiştir. Bu değişimlerde daha önce kabul edilen pozitif yönler aynen kabul edilerek eklenecek kontrol kuvveti terimlerinde hata yapılmamaya özen gösterilmiştir.

4.1 Hareket Denklemlerine Kontrolcü Terimlerinin İlavesi

Kontrolcü aktüatörlerinden çıkan kontrolcü kuvvetleri kabin ve bojilerin hareket denklemleri üzerinde birtakım kuvvetler ve momentler olarak etki etmektedir. Buna göre kontrolcü terimlerinin ilaveleri her denklem için eşitliğinin sağ taraflarına yapılmıştır. Değişen denklemler son halleri ile aşağıda yazılmıştır.

Denklem (3.54)'de tanımlanan kabinin yanal hareket denklemi düzenlenirse;

$$M_c \ddot{Y}_c + 2c_{2y} [3(\dot{Y}_c + h_3 \dot{\theta}_c) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3}) + h_2 (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})] + 2k_{2y} [3(Y_c + h_3 \theta_c) - (Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3}) + h_2 (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})] = [U_{y1} + U_{y2} + U_{y3}] \quad (4.1)$$

Denklem (3.55)'de tanımlanan kabinin düşey hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & M_c \ddot{Z}_c + 2c_{2z} [3\dot{Z}_c - (\dot{Z}_{t1} + \dot{Z}_{t2} + \dot{Z}_{t3})] + 2k_{2z} [3Z_c - (Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t3})] \\ &= [U_{z1} + U_{z2} + U_{z3} + U_{z4} + U_{z5} + U_{z6}] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Denklem (3.56)'da tanımlanan kabinin yalpa hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & J_{xc} \ddot{\theta}_c + 2h_3 c_{2y} [3(h_3 \dot{\theta}_c + \dot{Y}_c) + h_2 (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3}) - (\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t2} + \dot{Y}_{t3})] + 2b_2^2 c_{2z} [3\dot{\theta}_c - (\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t2} + \dot{\theta}_{t3})] + \\ & 2h_3 k_{2y} [3(h_3 \theta_c + Y_c) + h_2 (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3}) - (Y_{t1} + Y_{t2} + Y_{t3})] + 2b_2^2 k_{2z} [3\theta_c - (\theta_{t1} + \theta_{t2} + \theta_{t3})] \\ &= [h_3 (U_{y1} + U_{y2} + U_{y3}) + b_2 ((U_{z2} + U_{z4} + U_{z6}) - (U_{z1} + U_{z3} + U_{z5}))] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Denklem (3.57)'de tanımlanan kabinin kafa vurma hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & J_{yc} \ddot{\phi}_c + 2L_b c_{2y} [2L_b \dot{\phi}_c + (\dot{Z}_{t1} - \dot{Z}_{t3})] + 2L_b k_{2y} [2L_b \phi_c + (Z_{t1} - Z_{t3})] \\ &= [L_b ((U_{z5} + U_{z6}) - (U_{z1} + U_{z2}))] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Denklem (3.58)'de tanımlanan kabinin yanal sapma hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & J_{zc} \ddot{\psi}_c + 2L_b c_{2y} [2L_b \dot{\psi}_c + (-\dot{Y}_{t1} + \dot{Y}_{t3}) - h_2 (-\dot{\theta}_{t1} + \dot{\theta}_{t3})] \\ &+ 2d_s^2 [k_{2x} (2\psi_c - (\psi_{t1} + \psi_{t3})) + k_{2xb} (\psi_c - \psi_{t2})] \\ &+ 2L_b k_{2y} [2L_b \psi_c + (-Y_{t1} + Y_{t3}) - h_2 (-\theta_{t1} + \theta_{t3})] = [L_b (U_{y1} - U_{y3})] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Denklem (3.60)'da tanımlanan I.bojinin yanal hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & M_{t1} \ddot{Y}_{t1} + 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t1}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t1}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t1}) - L_b \dot{\psi}_c] + \\ & 2k_{1y} [2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}) + 2h_1 \theta_{t1}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t1}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t1}) - L_b \psi_c] = [-U_{y1}] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Denklem (3.61)'de tanımlanan I.bojinin düşey hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & M_{t1} \ddot{Z}_{t1} + 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t1} - (\dot{Z}_{w1} + \dot{Z}_{w2})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t1}) + L_b \dot{\phi}_c] + 2k_{1z} [2Z_{t1} - (Z_{w1} + Z_{w2})] + \\ & 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t1}) + L_b \phi_c] = [-(U_{z1} + U_{z2})] \end{aligned} \quad (4.7)$$

Denklem (3.62)'de tanımlanan I.bojinin yalpa hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& J_{x1} \ddot{\theta}_{t1} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t1} + (2\dot{Y}_{t1} - (\dot{Y}_{w1} + \dot{Y}_{w2}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t1} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t1}) + L_b \dot{\psi}_c] \\
& + 2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t1} - (\dot{\theta}_{w1} + \dot{\theta}_{w2})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t1}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t1} + (2Y_{t1} - (Y_{w1} + Y_{w2}))] + \\
& 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t1} + (Y_c - Y_{t1}) + L_b \psi_c] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t1} - (\theta_{w1} + \theta_{w2})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t1}] \\
& = [h_2 U_{y1} - b_2 (U_{z2} - U_{z1})]
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Denklem (3.66)'da tanımlanan II.bojinin yanal hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& M_{t2} \ddot{Y}_{t2} + 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t2}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t2}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t2})] + \\
& 2k_{1y} [2Y_{t2} - (Y_{w3} + Y_{w4}) + 2h_1 \theta_{t2}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t2}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t2})] = [-U_{y2}]
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Denklem (3.67)'de tanımlanan II.bojinin düşey hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& M_{t2} \ddot{Z}_{t2} + 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t2} - (\dot{Z}_{w3} + \dot{Z}_{w4})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t2})] + 2k_{1z} [2Z_{t2} - (Z_{w3} + Z_{w4})] \\
& + 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t2})] = [- (U_{z3} + U_{z4})]
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Denklem (3.68)'de tanımlanan II.bojinin yalpa hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& J_{xt2} \ddot{\theta}_{t2} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t2} + (2\dot{Y}_{t2} - (\dot{Y}_{w3} + \dot{Y}_{w4}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t2} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t2})] + \\
& 2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t2} - (\dot{\theta}_{w3} + \dot{\theta}_{w4})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t2}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t2} + (2Y_{t2} - (Y_{w3} + Y_{w4}))] + \\
& 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t2} + (Y_c - Y_{t2})] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t2} - (\theta_{w3} + \theta_{w4})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t2}] \\
& = [h_2 U_{y2} - b_2 (U_{z4} - U_{z3})]
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Denklem (3.72)'de tanımlanan III.bojinin yanal hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& M_{t3} \ddot{Y}_{t3} + 2c_{1y} [2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}) + 2h_1 \dot{\theta}_{t3}] + 2c_{2y} [(-\dot{Y}_c + \dot{Y}_{t3}) - (h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3}) + L_b \dot{\psi}_c] + \\
& 2k_{1y} [2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}) + 2h_1 \theta_{t3}] + 2k_{2y} [(-Y_c + Y_{t3}) - (h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3}) + L_b \psi_c] = [-U_{y3}]
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Denklem (3.73)'de tanımlanan III.bojinin düşey hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& M_{t1} \ddot{Z}_{t1} + 2c_{1z} [2\dot{Z}_{t3} - (\dot{Z}_{w5} + \dot{Z}_{w6})] + 2c_{2z} [(-\dot{Z}_c + \dot{Z}_{t3}) - L_b \dot{\phi}_c] + 2k_{1z} [2Z_{t3} - (Z_{w5} + Z_{w6})] + \\
& 2k_{2z} [(-Z_c + Z_{t3}) - L_b \phi_c] = [- (U_{z5} + U_{z6})]
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Denklem (3.74)'de tanımlanan III.bojinin yalpa hareket denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
& J_{x3} \ddot{\theta}_{t3} + 2h_1 c_{1y} [2h_1 \dot{\theta}_{t3} + (2\dot{Y}_{t3} - (\dot{Y}_{w5} + \dot{Y}_{w6}))] + 2h_2 c_{2y} [h_3 \dot{\theta}_c + h_2 \dot{\theta}_{t3} + (\dot{Y}_c - \dot{Y}_{t3}) - L_b \dot{\psi}_c] + \\
& 2b_1^2 c_{1z} [2\dot{\theta}_{t3} - (\dot{\theta}_{w5} + \dot{\theta}_{w6})] + 2b_2^2 c_{2z} [-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_{t3}] + 2h_1 k_{1y} [2h_1 \theta_{t3} + (2Y_{t3} - (Y_{w5} + Y_{w6}))] + \\
& 2h_2 k_{2y} [h_3 \theta_c + h_2 \theta_{t3} + (Y_c - Y_{t3}) - L_b \psi_c] + 2b_1^2 k_{1z} [2\theta_{t3} - (\theta_{w5} + \theta_{w6})] + 2b_2^2 k_{2z} [-\theta_c + \theta_{t3}] \\
& = [h_2 U_{y3} - b_2 (U_{z6} - U_{z5})] \tag{4.14}
\end{aligned}$$

4.2 Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık mantık, literatürde ilk olarak Zadeh'in (1965) "Bulanık Kümeler(Fuzzy Sets)" isimli makalesi ile gündeme gelmiştir. BMK ile ilgili ilk çalışmalar ise Mamdani ve arkadaşları tarafından Zadeh'in (1973) "Bulanık kümeler teorisine dayanan dilsel yaklaşım ve sistem analizi" adlı makalesi sonrasında yapılmıştır. Daha sonra bu alandaki çalışmalar günümüze kadar peşi sıra gelmiştir. Bulanık kontrol sistemlerinin gelişmesinde önemli yer tutan bazı çalışmalar, Çizelge 4.1'de sunulmuştur (Metin, 2007).

Çizelge 4.1 Bulanık kontrolcünün gelişmesinde pay sahibi olan önemli çalışmalar (Metin, 2007)

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

4.2.1 Bulanık Sistemler

Bulanık kümeler (veya bulanık mantık) ve bununla ilişkili olan matematiksel yapıyı içeren, statik veya dinamik sistemlere genel olarak "bulanık" sistem denir. Bir sistem içerisinde bulanık kümelerin varlığı birçok şekilde yer alabilir:

- Sistemin tanımlanmasında: Bir sistem, bulanıklık içeren **EĞER-İSE** kuralları ile veya

bulanık bağıntılarla tanımlanabilir. Örneğin; bir odadaki sıcaklık, ısıtma sisteminin gücü ile sıcaklığın değişimi arasındaki bulanık ilişki ile ifade edilebilir.

EĞER ısıtma sisteminin gücü yüksek **İSE** sıcaklık çok hızlı artar.

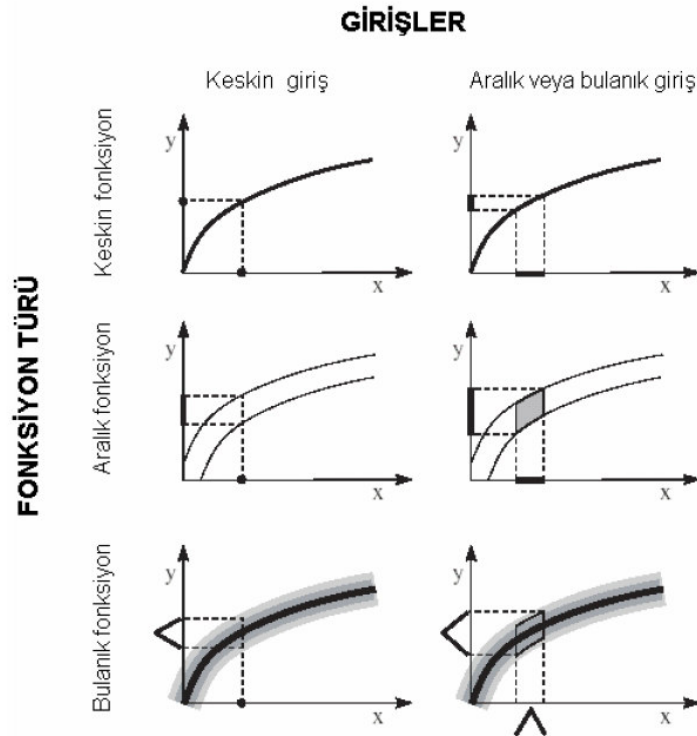
- Sistem parametrelerinin belirtilmesinde: Sistem cebirsel veya diferansiyel denklemlerle ifade edilebilir ve bu denklemlerde parametreler gerçel sayılar yerine bulanık sayılar olabilir.

$$y = \tilde{3}x_1 + \tilde{5}x_2 \quad (4.15)$$

Yukarıdaki (4.15) denkleminde yer alan yaklaşık üç ve yaklaşık 5 birer bulanık sayıdır ve üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Bulanık sayılar, parametre değerlerindeki belirsizliği dile getirirler.

- Giriş, çıkış veya sistem durumlarında: Bulanık girişler güvenilir algılayıcılardan (gürültülü veri) elde ediliyor olabilir. Klasik sistemlerde karşılaşılmayan bu durumlar, bulanık sistemler tarafından işlenebilecek verilerdir.

Bulanık sistemler, yukarıdaki ifade edilen durumların bazılarını aynı anda içerebilir. (Eksin, 2006)



Şekil 4.1 Keskin, aralık ve bulanık fonksiyonlar (Eksin, 2006)

Çizelge 4.2 Sistemlerdeki belirgin ve bulanık bilgiler (Eksin, 2006)

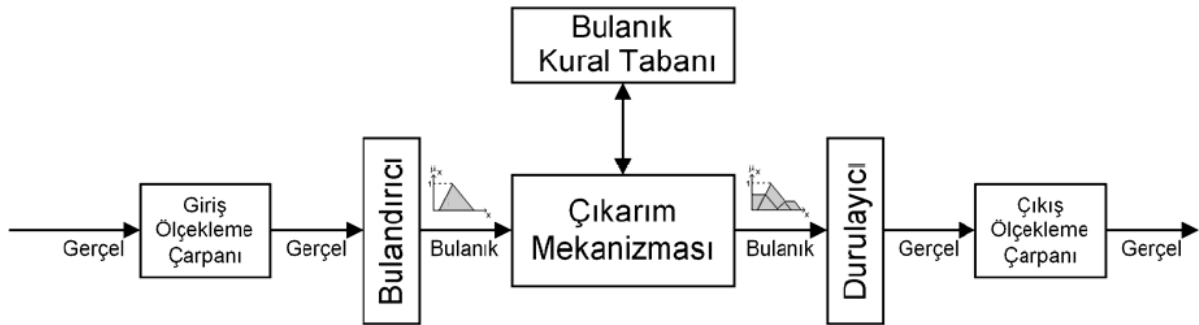
| <i>Sistem İfadesi</i> | <i>Giriş Verisi</i> | <i>Çıkış Verisi</i> | <i>Matematiksel Yapı</i> |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---|
| Keskin | Keskin | Keskin | Fonksiyonel analiz, lineer cebir, vs. |
| Keskin | Bulanık | Bulanık | Genişleme İlkesi |
| Bulanık | Keskin / Bulanık | Bulanık | Bulanık bağıntısal hesap, bulanık çıkarım |

Çizelge 4.2’de bulanık ve belirgin sistem ifadesi ile bulanık ve belirgin değişkenler arasındaki ilişki anlatılmaktadır.

Bulanık sistemler, belirgin sistemlerin geliştirilmiş hali olan, aralık değerli sistemlerin daha genişletilmiş bir hali olarak görülebilir. Bu durum Şekil 4.1’de, bir belirgin fonksiyon ve bu fonksiyonun aralık ve bulanık hali verilerek açıklanmıştır. Ayrıca, fonksiyonun belirgin, aralık ve bulanık verilere ilişkin çıktıları da bu şekilde görülebilir. (Eksin, 2006)

4.2.2 Bulanık Sistemlerin İç Yapıları ve Genel İşleyiş

Bulanık sistemlerin çok büyük kısmı, **EĞER-İSE** kuralları aracılığıyla tanımlanmıştır. Bu tür sistemler, “kural tabanlı bulanık sistemler” olarak adlandırılırlar. Bulanık sistemler, modelleme, veri çözümlemesi, kestirim ve kontrol gibi farklı amaçlar için kullanılabilirler.



Şekil 4.2 Bir bulanık sistemin iç yapısı (Eksin, 2006)

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. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 4.2’de verilmiştir. (Eksin, 2006)

En genel haliyle, bulanık küme tanımı şu şekilde yapılabilir. Bir U uzayındaki F bulanık kümesi $\mu_F(u)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanır ve her u değerine karşı düşen üyelik

fonksiyonu değerine o u elemanın F bulanık kümesine ait üyelik derecesi denir. Üyelik fonksiyonu $[0,1]$ aralığında tanımlanır. Üyelik derecesinin 0 olması, karşılık gelen u elemanın o bulanık kümenin tamamen dışında, 1 olması ise tamamen içinde olduğu anlamına gelir. U uzayında tanımlı bir F bulanık kümesi,

$$F = \{(u, \mu_F(u)) / u \in U\} \quad (4.16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Eğer U sürekli bir uzay ise, bu uzayda tanımlı F bulanık kümesi;

$$F = \int_U \mu_F(u) / u \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. U uzayının ayrık olduğu durumlarda ise;

$$F = \sum_i^d \mu_F(u_i) / u_i \quad (4.18)$$

olur.

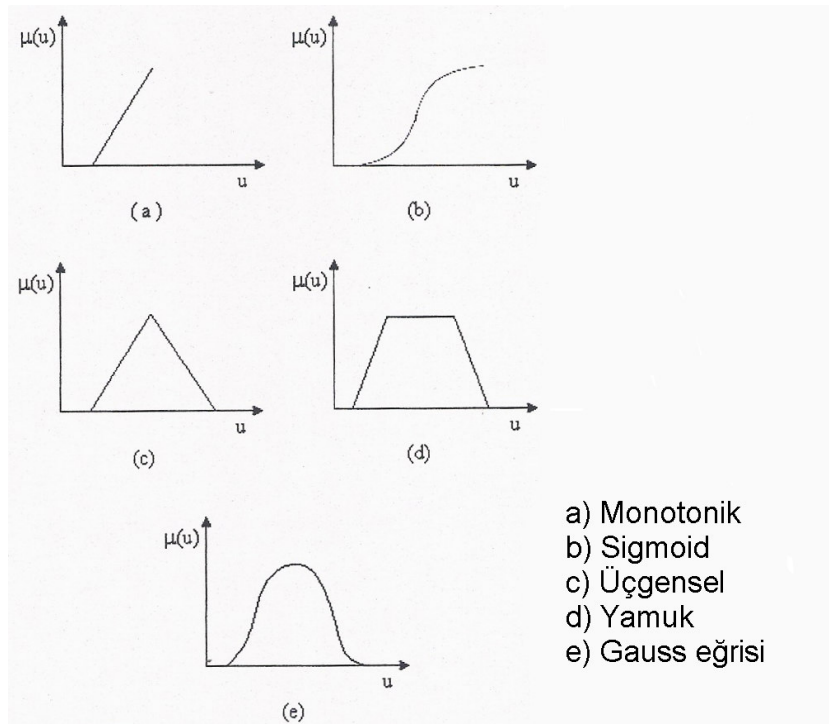
U uzayında tanımlı bir bulanık F kümesinin üyelik değerlerinin sıfırdan farklı olan U uzayının ayrık elemanlarına F kümesinin desteği denir. Bir bulanık kümenin geçiş noktası ise üyelik değeri 0.5 olan U tanım uzayındaki veridir. Bir bulanık kümeye ait üyelik fonksiyonunun aldığı en büyük değer, o kümenin yüksekliği olarak adlandırılır.

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 4.3'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)



Şekil 4.3 Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları (Metin, 2007)

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.

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} A_i **İSE** \tilde{y} 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. Bağntı simetriktir ve ters çevrilebilir. Kesişim için minimum(\wedge) operatörü seçilirse $F_i = A_i \times B_i$ bağıntısına ait üyelik fonksiyonu;

$$\mu_F(x, y) = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)) \quad (4.19)$$

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.

$$F = \bigcup_{i=1}^r K_i \quad (4.20)$$

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

$$\mu_F(x, y) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y)) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)) \quad (4.21)$$

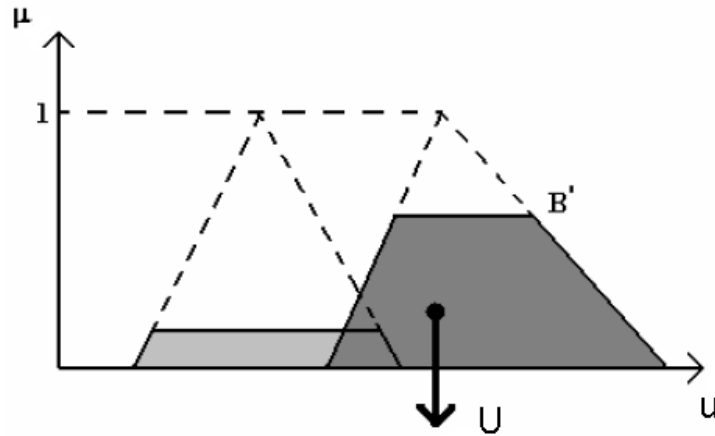
ile hesaplanır. Dilsel modelin çıkışı bağıntısal max-min (\circ) operasyonu;

$$\tilde{y} = \tilde{x} \circ F \quad (4.22)$$

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 4.4 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 4.4)

$$U = \frac{\int \mu_{B'}(u)u dU}{\int \mu_{B'}(u) dU} \quad (4.23)$$

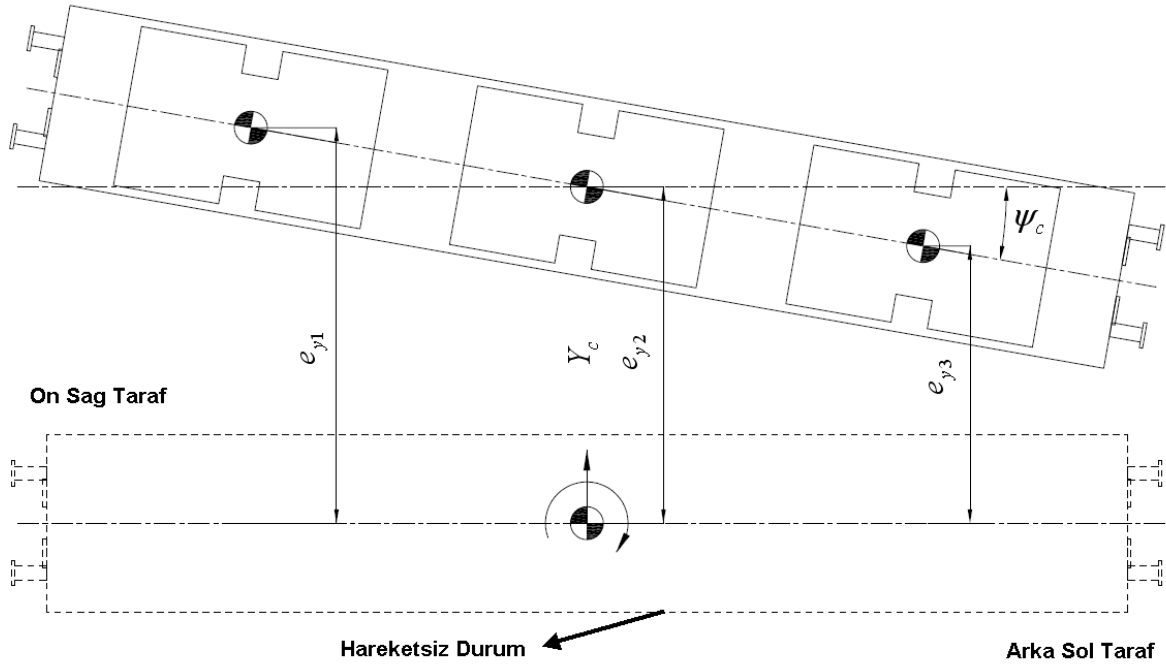
4.3 Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

BMK tasarımı ve simülasyonlar Matlab–Simulink yazılımında, Fuzzy Logic Toolbox modülü kullanılarak yapılmıştır.

Lokomotif gövdesinin yanal hareketini kontrol etmek amacı ile yanal kontrolcü ve ayrıca düşey hareketini kontrol etmek amacı ile de düşey kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

4.3.1 Yanal Kontrolcü Tasarımı

Yanal kontrolcü tasarımı yapılırken yanal bir ray düzgünlüğünün lokomotif gövdesine olan etkisi ele alınmıştır ve bu etki Şekil 4.5’de görülmektedir. Lokomotif, kesikli çizgilerle görüldüğü gibi bir durum alırsa yani hem yanal hem de yanal sapma açısının pozitif yönünde ötelenip ve de dönerse, kontrolcülerin lokomotif kabinine bağlandığı noktaların hata değerleri birbirinden farklı olacaktır. Bu durum geometrik zorunluluktan ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.5’de e_{y1} , e_{y2} ve e_{y3} olarak tanımlanan bu hatalar referans (lokomotifin hareketsiz kaldığı) durum ile farkları ifade etmektedir.



Şekil 4.5 Lokomotif ile bojiler arasındaki yanal kontrolcülerdeki hata durumları

Kontrol algoritması kurulurken e_{y1} , e_{y2} ve e_{y3} olarak tanımlanan bu hataların birbirinden farklı olduğu göz önüne alınarak, 3 farklı aktüatöre de farklı kontrol kuvvetlerinin hesaplanıp uygulanması sağlanmış ve bu sayede bağımsız kontrol sistemi kurulmuştur.

BMK algoritmasında kontrolcüye giriş olarak 3 farklı hata ve 3 farklı hatanın türevi olması gerektiği düşünülmüştür, çıkış olarak da birbirinden bağımsız 3 farklı kontrol kuvveti alınması beklenmiştir. Gövdenin yanal yer değiştirmesi Y_c , yanal hızı \dot{Y}_c ve yanal sapma açısal yer değiştirmesi ψ_c ve yanal sapma açısal hızı $\dot{\psi}_c$ sensörler ile geri beslendiği düşünülerek her boji için lokal yer değiştirme ve hız hataları e_{y1} , e_{y2} , e_{y3} ve \dot{e}_{y1} , \dot{e}_{y2} , \dot{e}_{y3} elde edilmiştir. Kabinin yanal hareketi için referans değeri ref_{Y_c} ve yanal hareketin hızı için referans değeri $ref_{\dot{Y}_c}$ de 0 alınarak kontrol edilen yanal hareketin yer değiştirmesi ve hızının minimize edilmesi sağlanmıştır.

Denklem (4.24), (4.25) ve (4.26)'da sırası ile kabin - I., II., III. boji bağlantı noktalarındaki yer değiştirme hataları verilmiştir.

$$e_{y1} = ref_{Y_c} - (Y_c - L_b \psi_c) \quad (4.24)$$

$$e_{y2} = ref_{Y_c} - (Y_c) \quad (4.25)$$

$$e_{y3} = ref_{Y_c} - (Y_c + L_b \psi_c) \quad (4.26)$$

Şekil 4.5'de tanımlanan yer değiştirme hataları, (4.24), (4.25) ve (4.26) denklemlerinde ifade edilmiştir. Şekil 4.6'da de ayrıca bu hataların hesaplatıldığı Simulink modeli görülmektedir.

Denklem (4.27), (4.28) ve (4.29)'da sırası ile kabin - I., II., III. boji bağlantı noktalarındaki hız hataları ifade edilmiştir.

$$\dot{e}_{y1} = ref_{\dot{Y}_c} - (\dot{Y}_c - L_b \dot{\psi}_c) \quad (4.27)$$

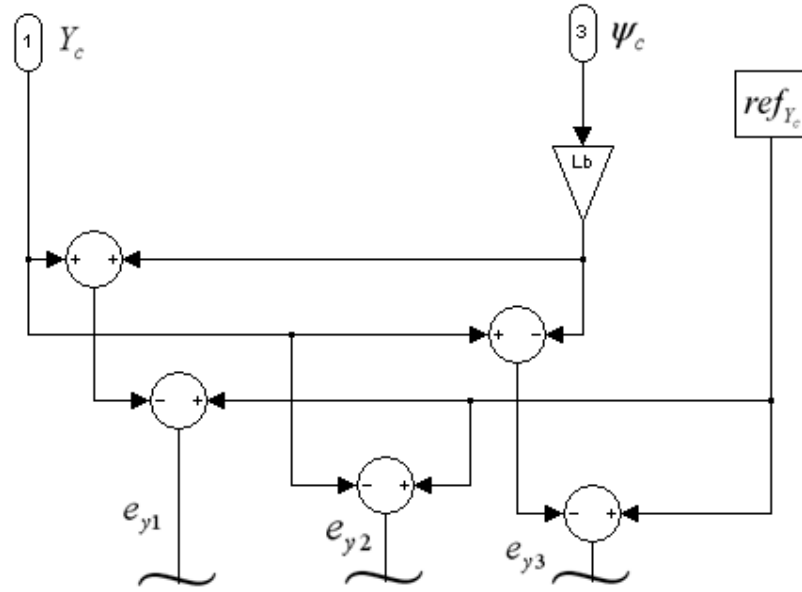
$$\dot{e}_{y2} = ref_{\dot{Y}_c} - (\dot{Y}_c) \quad (4.28)$$

$$\dot{e}_{y3} = ref_{\dot{Y}_c} - (\dot{Y}_c + L_b \dot{\psi}_c) \quad (4.29)$$

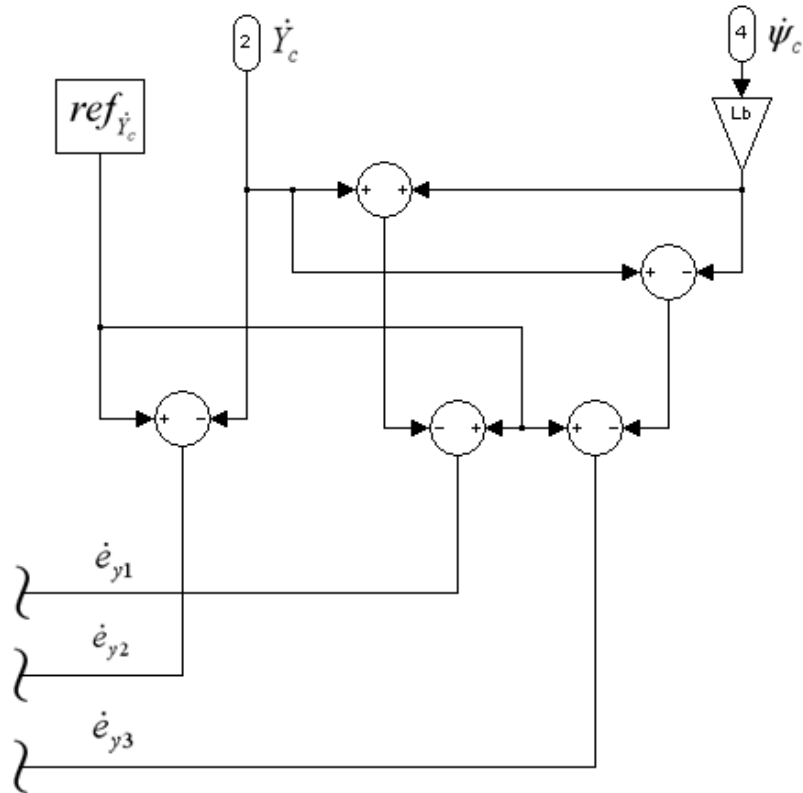
Şekil 4.7'de de ayrıca bu hataların hesaplatıldığı Simulink modeli görülmektedir.

e_{y1} , e_{y2} , e_{y3} ve \dot{e}_{y1} , \dot{e}_{y2} , \dot{e}_{y3} hataları 3 ayrı bulanık mantık kontrolcüsüne girerek her boji için

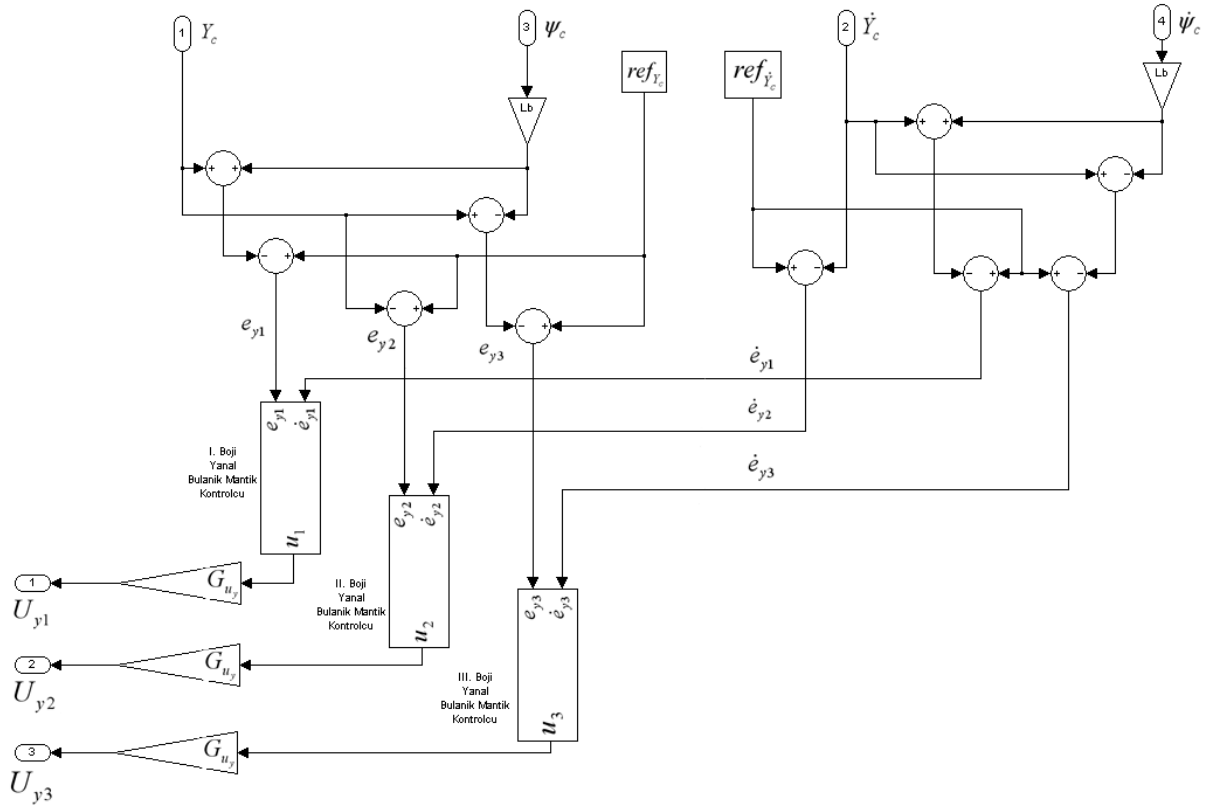
farklı kontrol kuvvetine dönüşmektedir. Şekil 4.8'de BMK algoritmasının Simulink modeli görülmektedir.



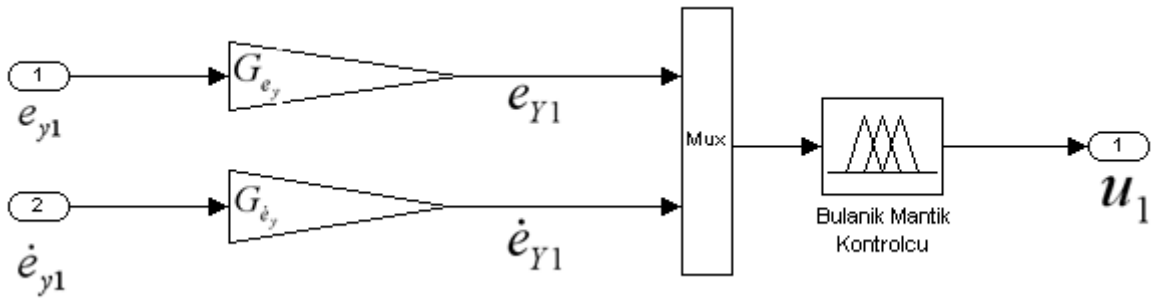
Şekil 4.6 BMK algoritmasında geri besleme ve boji bağlantılarındaki yer değiştirme hatalarını hesaplayan simulink modeli



Şekil 4.7 BMK algoritmasında geri besleme ve boji bağlantılarındaki hız hatalarını hesaplayan simulink modeli



Şekil 4.8 BMK algoritmasının simulink modeli



Şekil 4.9 Bulanik mantik kontrolcüsünün simulink modeli

Şekil 4.9’da bulanik mantik kontrolcüsünün Simulink modeli görülmektedir. e_{y1} hatası bulanik mantik kontrolcüsüne girdikten sonra ise üst hattan giderek G_{e_y} (hata için giriş ölçekleme çarpanı) ile çarpılarak BMK’nın birinci girişini oluşturur. Denklem (4.30), (4.31), (4.32)’de BMK’nın birinci girişleri verilmiştir.

$$e_{y1} = G_{e_y} e_{y1} \quad (4.30)$$

$$e_{Y2} = G_{e_y} e_{y2} \quad (4.31)$$

$$e_{Y3} = G_{e_y} e_{y3} \quad (4.32)$$

\dot{e}_{y1} hatanın türevi ise alt hattan giderek de bu kez $G_{\dot{e}_y}$ (hatanın birinci türevi için giriş ölçekleme çarpanı) ile çarpılarak ve türevi alınarak BMK'nın ikinci girişini oluşturur.

$$\dot{e}_{Y1} = G_{\dot{e}_y} \dot{e}_{y1} \quad (4.33)$$

$$\dot{e}_{Y2} = G_{\dot{e}_y} \dot{e}_{y2} \quad (4.34)$$

$$\dot{e}_{Y3} = G_{\dot{e}_y} \dot{e}_{y3} \quad (4.35)$$

Kontrolcü çıkışları u_1 , u_2 ve u_3 de G_{u_y} (çıkış ölçekleme çarpanı) ile çarpılarak U_{y1} , U_{y2} ve U_{y3} (kontrolcü çıkış kuvvetleri) haline gelirler. Denklem (4.36), (4.37), (4.38)'de kontrolcü çıkış kuvvetleri ifadeleri yer almaktadır.

$$U_{y1} = G_{u_y} u_1 \quad (4.36)$$

$$U_{y2} = G_{u_y} u_2 \quad (4.37)$$

$$U_{y3} = G_{u_y} u_3 \quad (4.38)$$

Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de yer değiştirme, hız girişleri ve kontrolcü çıkışının üyelik fonksiyonları görülmektedir. Hata için 5, hatanın türevi için 3 ve kontrolcü çıkışı için 7 adet üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Giriş için 15'lik kural tablosu uygulanmıştır. Uygulanan kural tablosu Çizelge 4.3'de verilmiştir. (Güçlü, 2005)

Çizelge 4.3 BMK kural tablosu (Güçlü, 2005)

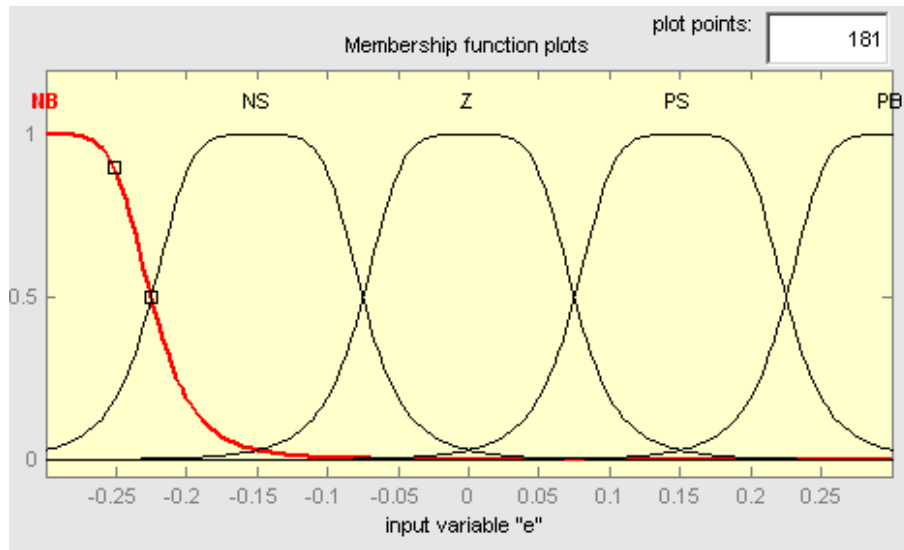
| Hata (e) | Hatanın Türevi (de/dt) | | |
|-----------------|-------------------------------|----------|----------|
| | N | Z | P |
| NB | NB | NM | NS |
| NS | NM | NS | Z |
| Z | NS | Z | PS |
| PS | Z | PS | PM |
| PB | PS | PM | PB |

Kural tablosunda hata için B,M,S,P,Z,N; Büyük (Big), Orta (Medium), Küçük (Small), Pozitif

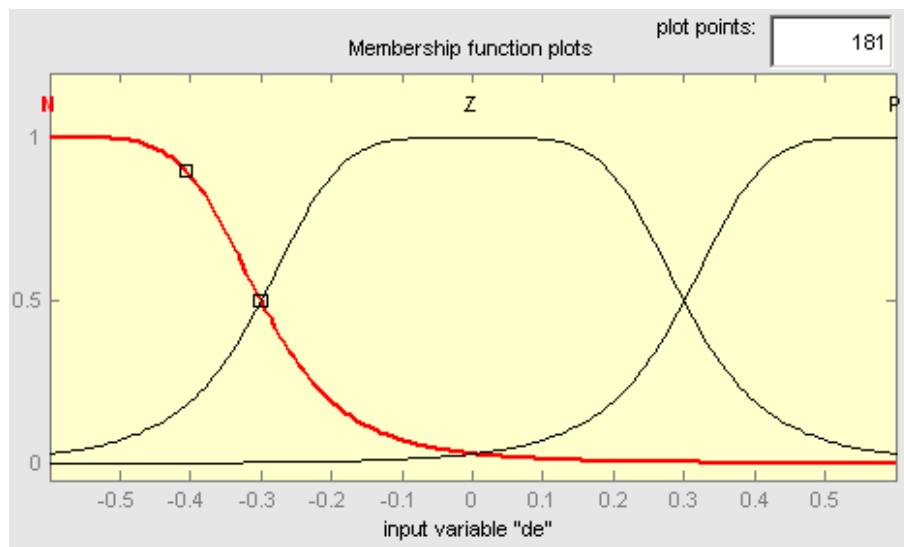
(Positive), Sıfır (Zero), Negatif (Negative) anlamına gelmektedir ve dilsel niteleyicilerdir.

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.

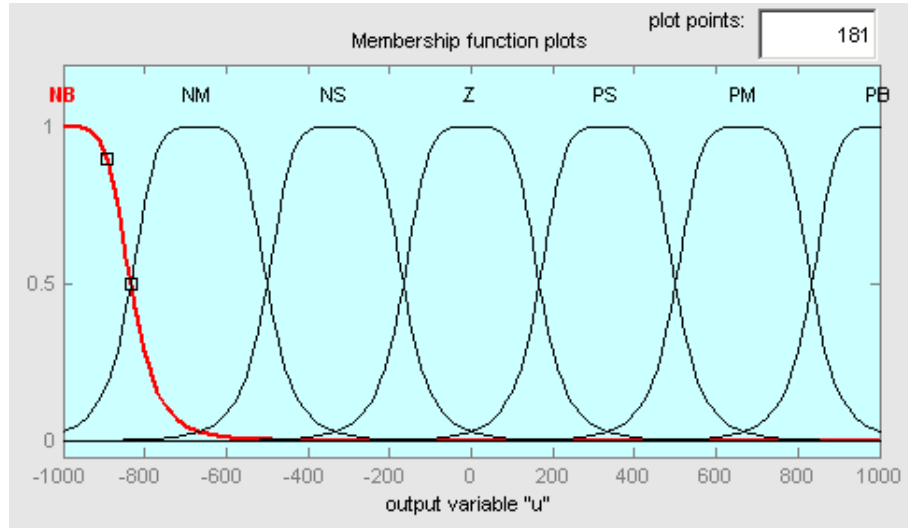
Üyelik fonksiyonu tipi olarak çan eğrisi seçilmesi ile daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca hareketli kütlelerin ve kütleli atalet momentlerinin büyük olduğunu göz önüne aldığımızda çan eğrisi tipli üyelik fonksiyonunun üçgensel tipli üyelik fonksiyonundan çok daha yumuşak kontrol kuvvetleri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



Şekil 4.10 Yanal yer değiştirme girişleri için üyelik fonksiyonları



Şekil 4.11 Yanal hız girişleri için üyelik fonksiyonları

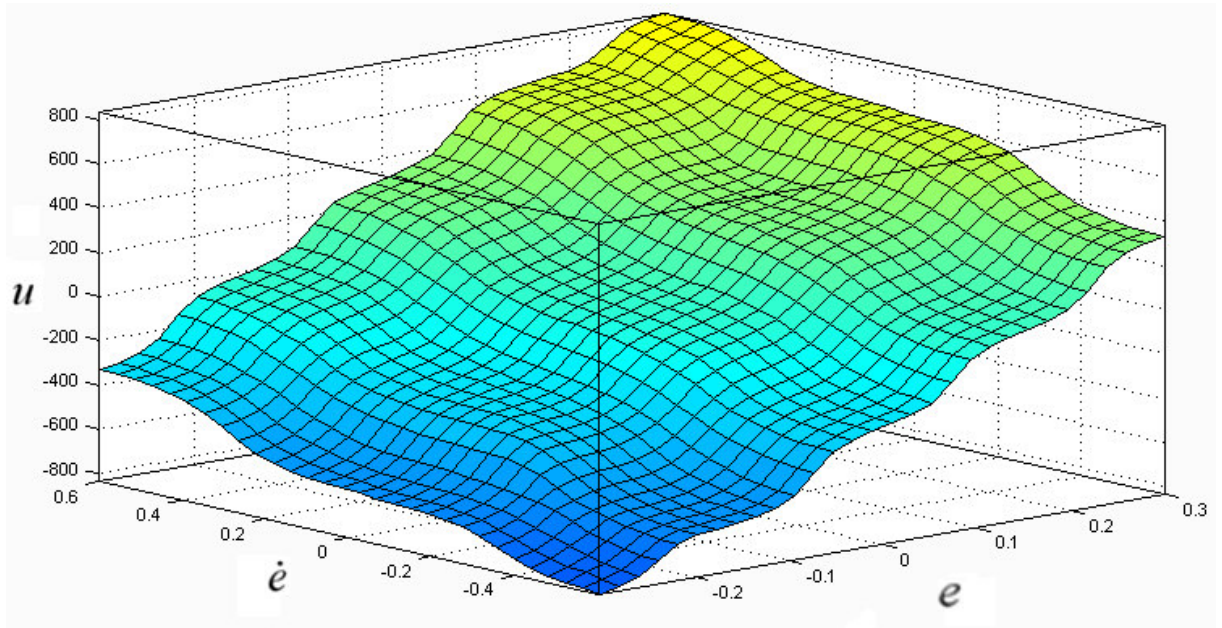


Şekil 4.12 Yanal kontrolcü çıkışlarının üyelik fonksiyonları

Çizelge 4.3’de verilen kural tablosundan ilk ve son kural aşağıdaki gibidir;

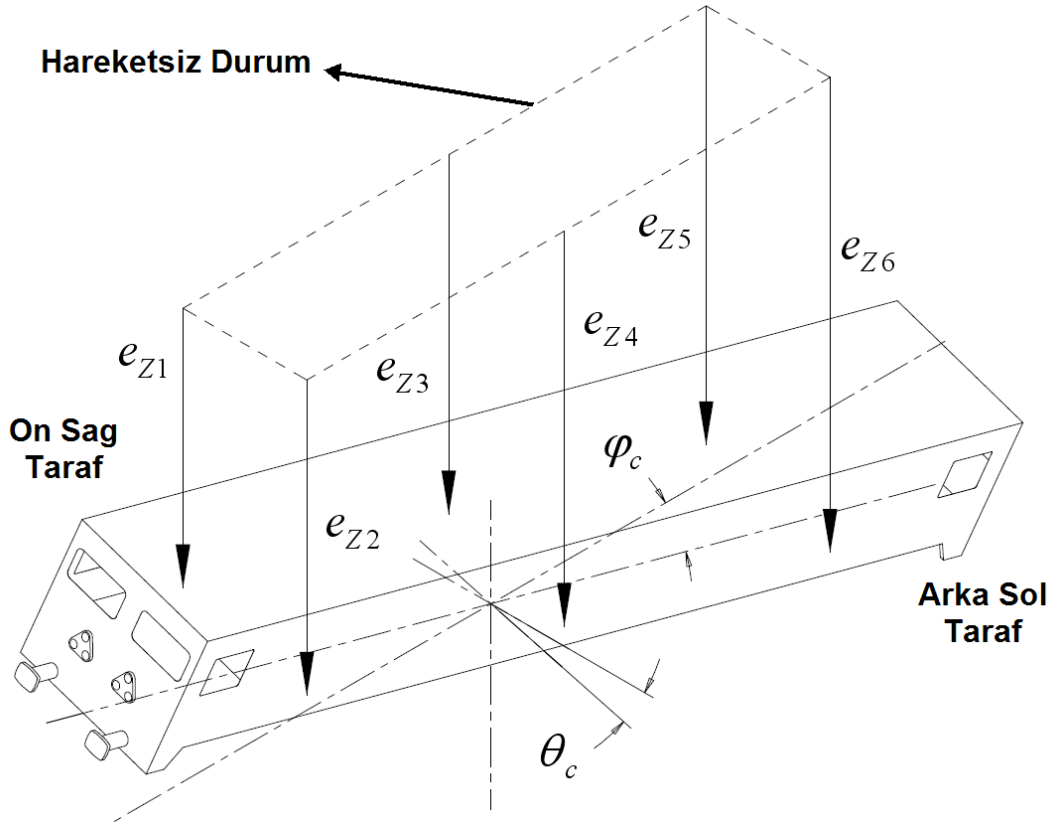
EĞER $e = N$ ve $de/dt = N$ **İSE** $u = NB$

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



Şekil 4.13 Yanal yer değiştirme, hız girişleri ve kontrolcü çıkışının üyelik fonksiyonlarının yüzey gösterimi

4.3.2 Düşey Kontrolcü Tasarımı



Şekil 4.14 Lokomotif ile bojiler arasındaki düşey kontrolcülerdeki hata durumları

Şekil 4.14'de görülen kabinin (+) yönde Z_c , θ_c , φ_c yer değiştirmelerini yaptığını düşünelim. Tanımlanan düşey yer değiştirme hataları kabinin ağırlık merkezinden geçen yatay düzlem üzerindeki boji bağlantı noktalarının, hareketsiz durum ile farkından ortaya çıkmaktadır. Şekilde kesit çizgiler ile gösterilen hareketsiz durum aslında kabinin hareketsiz durumdaki ağırlık merkezinden geçen yatay düzlemi ifade etmektedir. (4.39)–(4.44) denklemlerinde ifade edilmiştir. Düşey yer değiştirme hataları, düşey bulanık mantık kontrolcülerin birincil girişlerini oluştururlar.

$$e_{z1} = ref_{z_c} - (Z_c - b_2\theta_c - L_b\varphi_c) \quad (4.39)$$

$$e_{z2} = ref_{z_c} - (Z_c + b_2\theta_c - L_b\varphi_c) \quad (4.40)$$

$$e_{z3} = ref_{z_c} - (Z_c - b_2\theta_c) \quad (4.41)$$

$$e_{z4} = ref_{z_c} - (Z_c + b_2\theta_c) \quad (4.42)$$

$$e_{z5} = ref_{Z_c} - (Z_c - b_2\theta_c + L_b\phi_c) \quad (4.43)$$

$$e_{z6} = ref_{Z_c} - (Z_c + b_2\theta_c + L_b\phi_c) \quad (4.44)$$

(4.45)–(4.50) denklemlerinde ise düşey hız hataları ifade edilmiştir. Düşey hız hataları ise, düşey bulanık mantık kontrolcülerin ikincil girişlerini oluştururlar.

$$\dot{e}_{z1} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c - b_2\dot{\theta}_c - L_b\dot{\phi}_c) \quad (4.45)$$

$$\dot{e}_{z2} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c + b_2\dot{\theta}_c - L_b\dot{\phi}_c) \quad (4.46)$$

$$\dot{e}_{z3} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c - b_2\dot{\theta}_c) \quad (4.47)$$

$$\dot{e}_{z4} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c + b_2\dot{\theta}_c) \quad (4.48)$$

$$\dot{e}_{z5} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c - b_2\dot{\theta}_c + L_b\dot{\phi}_c) \quad (4.49)$$

$$\dot{e}_{z6} = ref_{\dot{Z}_c} - (\dot{Z}_c + b_2\dot{\theta}_c + L_b\dot{\phi}_c) \quad (4.50)$$

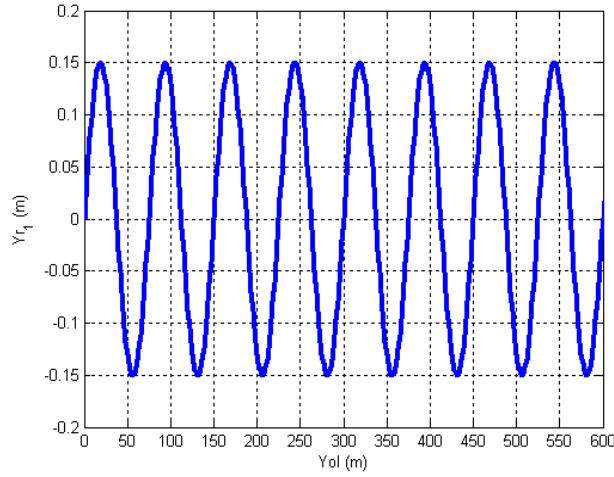
Düşey kontrol algoritması da yanal kontrol algoritmasının aynısıdır. Aynı tip üyelik fonksiyonları ve aynı kural tablosu kullanılmıştır. Düşey kontrolcülerin yanal kontrolcülerden farkı, hata ve hatanın türevi girişlerinin üyelik fonksiyon aralıklarının farklı olmasıdır. Düşey kontrolcülerdeki hatalar 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. Düşey kontrolcü algoritmasındaki yer değiştirme hatası ve hatanın türevi için giriş ölçekleme çarpanları G_{e_z} , $G_{\dot{e}_z}$ ile çıkış ölçekleme çarpanı G_{u_z} Ek 1'de verilmiştir.

5. 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 gerçekleştirilmiştir.

5.1 I.Senaryo (Yanal Doğrultuda Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)

Yanal ray düzgünsüzlük fonksiyonları, düşey ray düzensizliği fonksiyonlarından farklı olarak sol ve sağ raylar arasındaki açıklık eşit kalacak şekilde değişirler. Bu eşitlik, sağ ve sol rayın arasındaki a uzaklığının sabit kalması durumudur. Buradan yola çıkarak sağ ve sol raylardan farklı ray düzgünsüzlük fonksiyonlarının olamayacağı, sadece bir taraf için ray düzgünsüzlük fonksiyonunun olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. (Şekil 5.1)

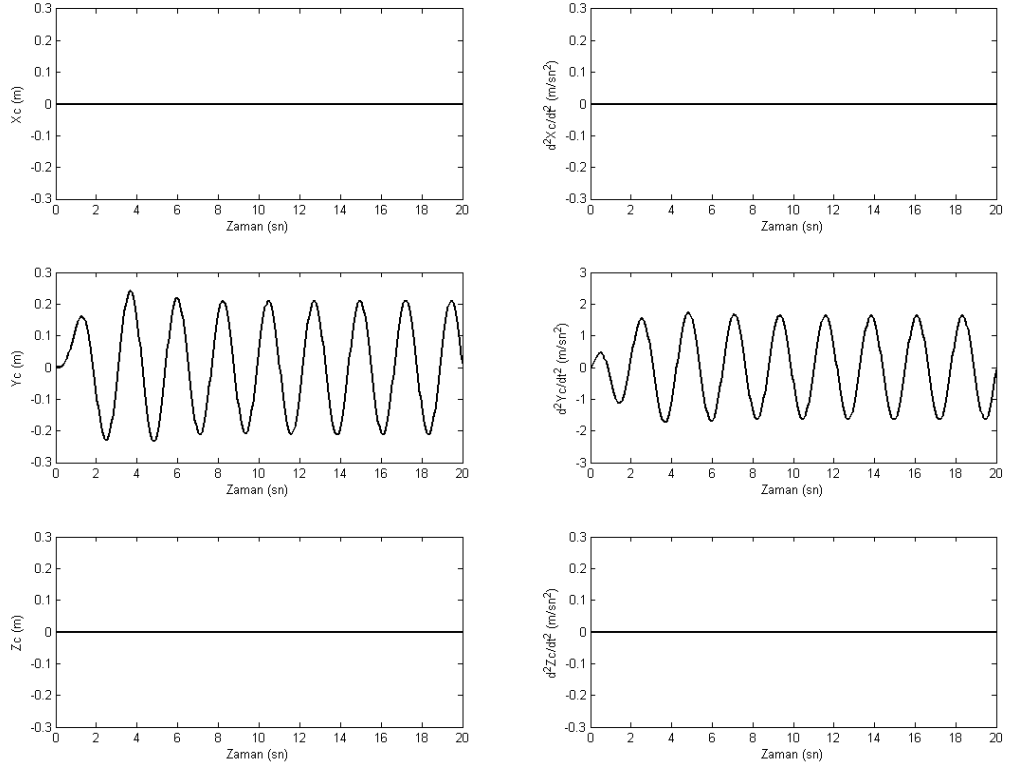


Şekil 5.1 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu

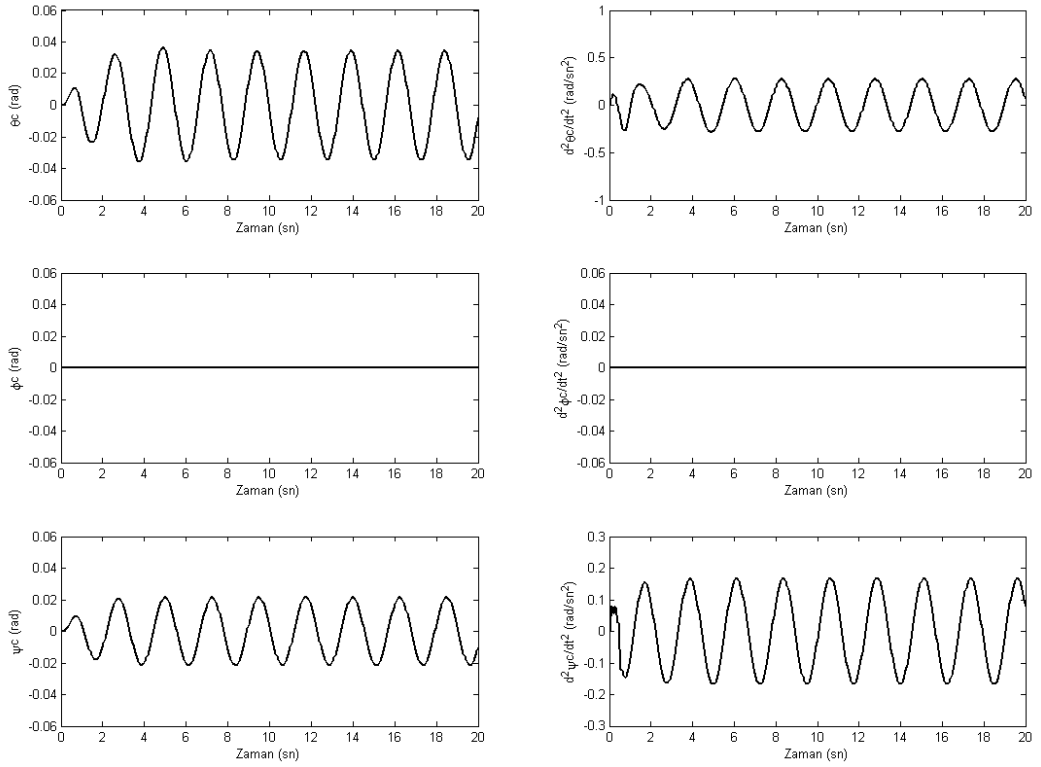
$$F_{Yr1}(t) = Y_{r1} \sin(\omega_{Yr1} t) \quad (5.1)$$

$$\omega_{Yr1} = 2\pi \frac{V}{\lambda_{Yr1}} \quad (5.2)$$

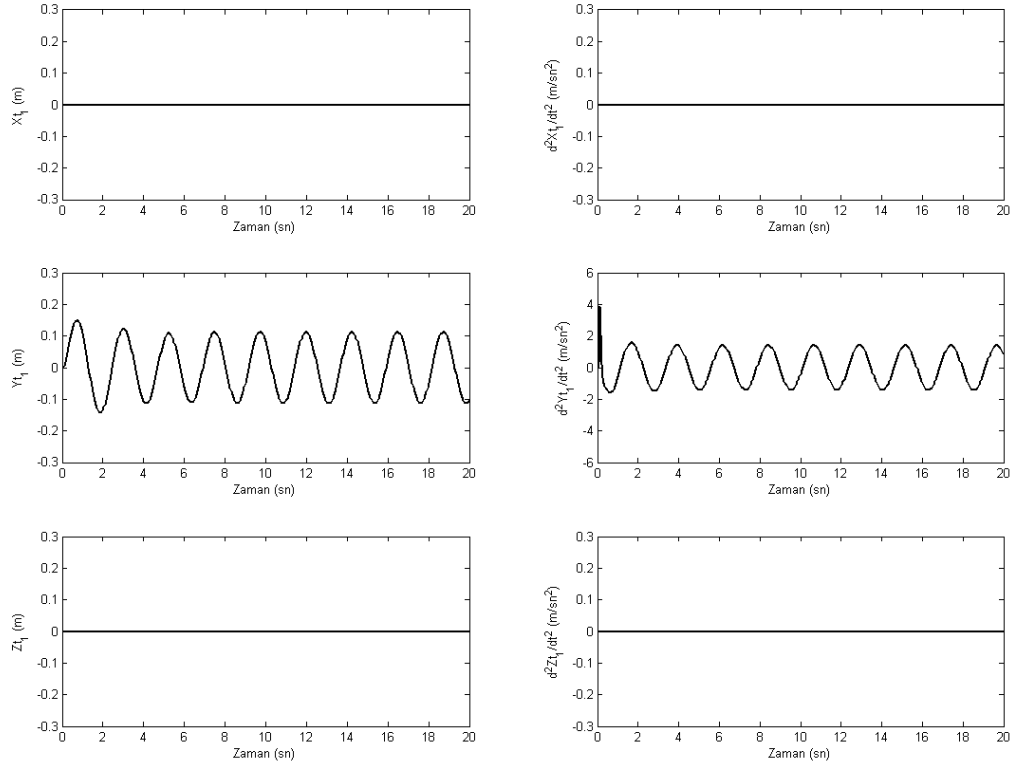
Yanal doğrultuda düzgünsüzlük fonksiyonu ve bu sinüs fonksiyonunun frekansı (5.1) ve (5.2) eşitlikleri ile hesaplanabilir. (5.2) eşitliğindeki lokomotif hızı V 'nin birimi $[m/sn]$ olmalıdır. Fonksiyonu belirli yapan genlik, dalga boyu ve lokomotif hızı parametreleri, Ek 1'de verilmiştir. Girilen ray düzgünsüzlüğü dinamik sistemin 54 serbestlik derecesinden sadece 24'ünü tetikleyebilmiştir. Tetiklenen serbestlik dereceleri : $Y_c, Y_{t1}, Y_{t2}, Y_{t3}, Y_{w1}, Y_{w2}, Y_{w3}, Y_{w4}, Y_{w5}, Y_{w6}, \theta_c, \theta_{t1}, \theta_{t2}, \theta_{t3}, \psi_c, \psi_{t1}, \psi_{t2}, \psi_{t3}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, \psi_{w5}, \psi_{w6}$ 'dır.



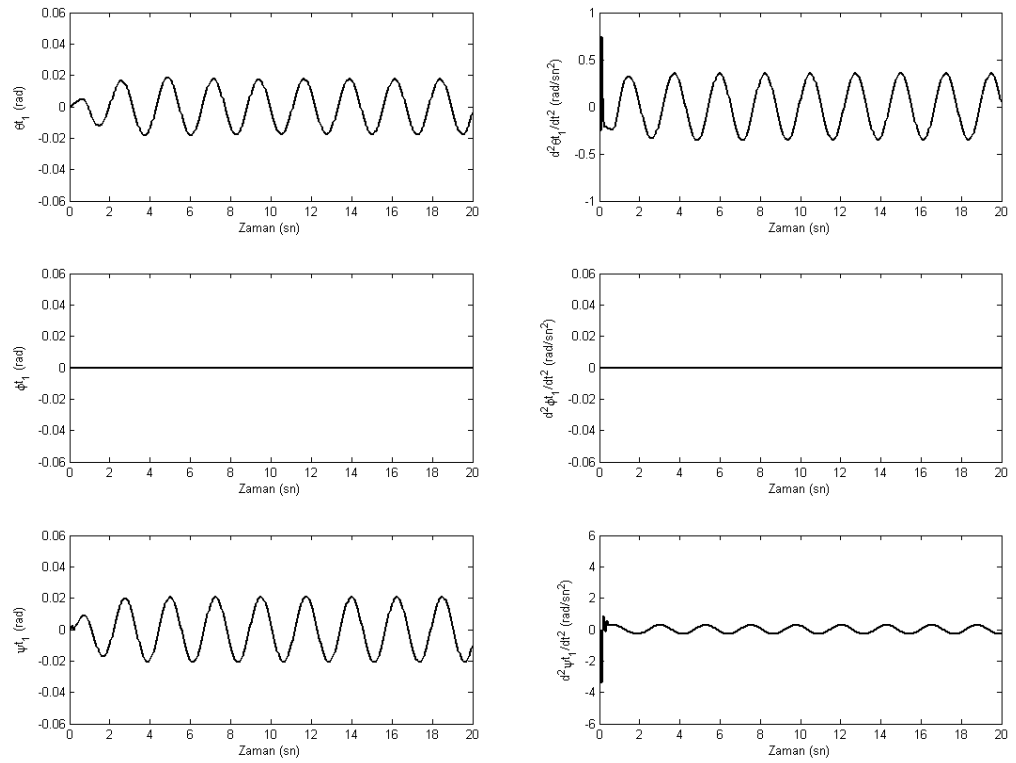
Şekil 5.2 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



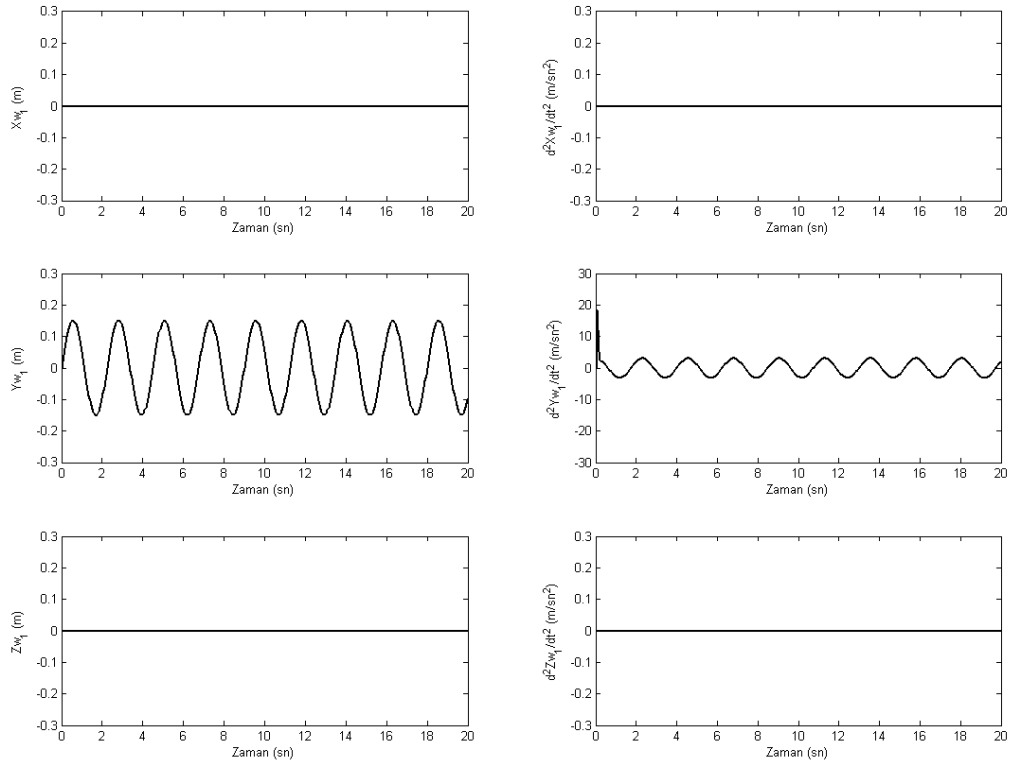
Şekil 5.3 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



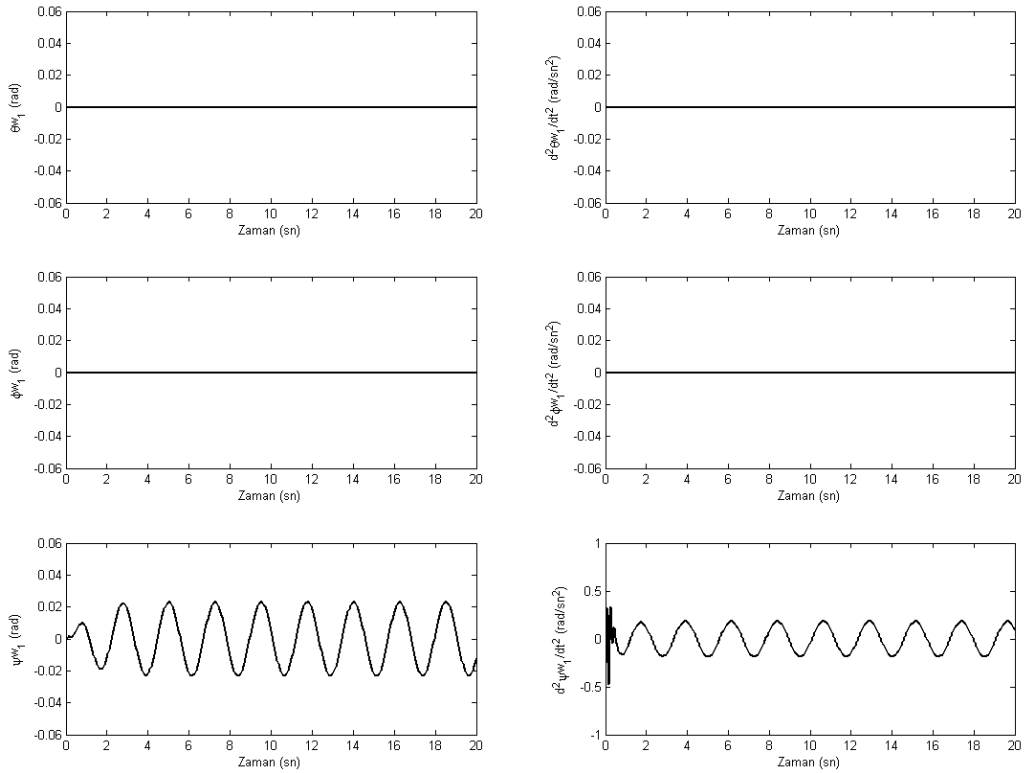
Şekil 5.4 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.5 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

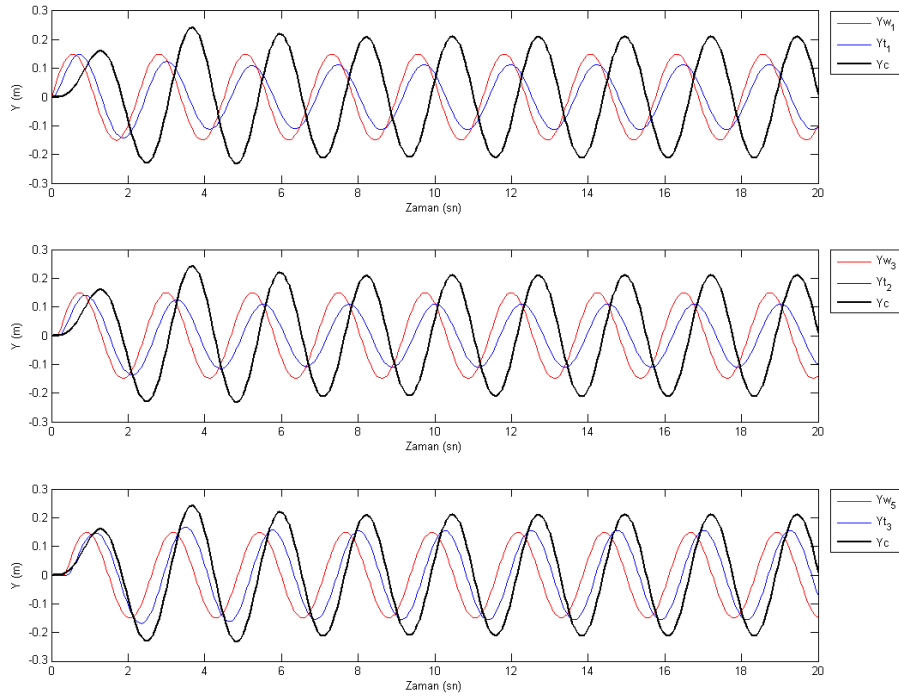


Şekil 5.6 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

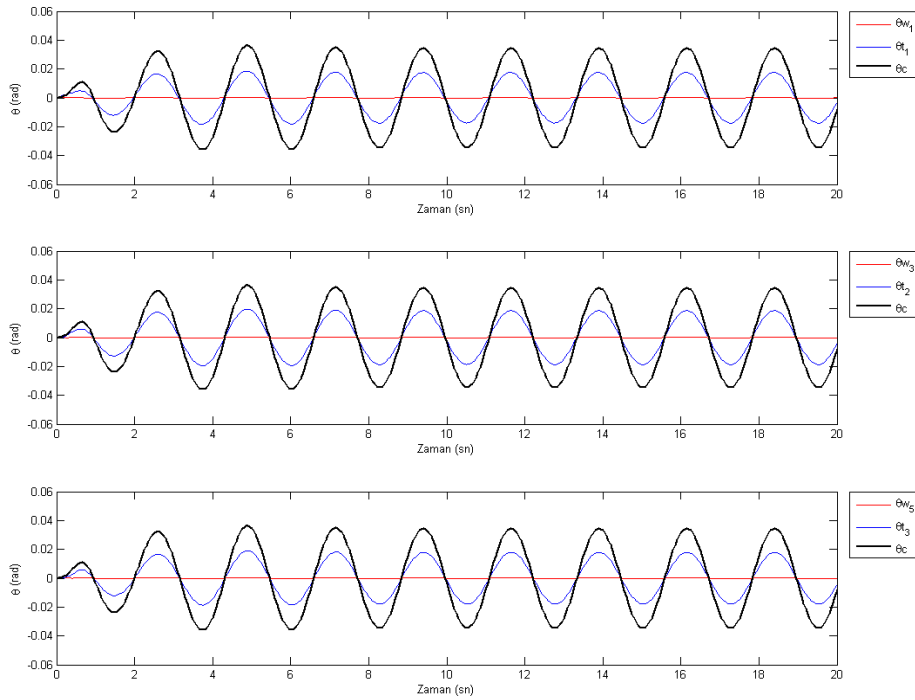


Şekil 5.7 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

I. tekerlek–seti, I.boji ve kabinin Y , θ , ψ serbestlik derecelerinin karşılaştırılması Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da daha detaylı görülebilir.

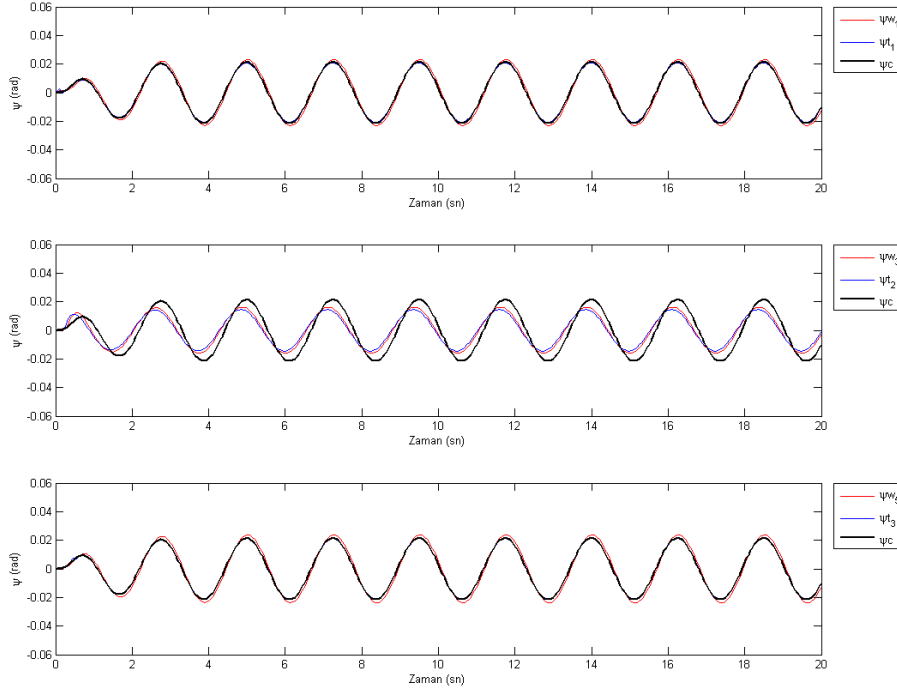


Şekil 5.8 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal titreşimlerin yer değiştirmeleri



Şekil 5.9 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısıl titreşimlerinin yer değiştirmeleri

Sisteme ray girişi olarak sadece yanal ray düzgünsüzlük fonksiyonu seçildiğinden tekerlek–setinin yalpalama serbestlik derecesi tetiklenmemiştir. Bojiler ve kabindeki yalpalama hareketleri ise tekerlek-setlerinin yanal hareketlerinin sonucu ortaya çıkmıştır.

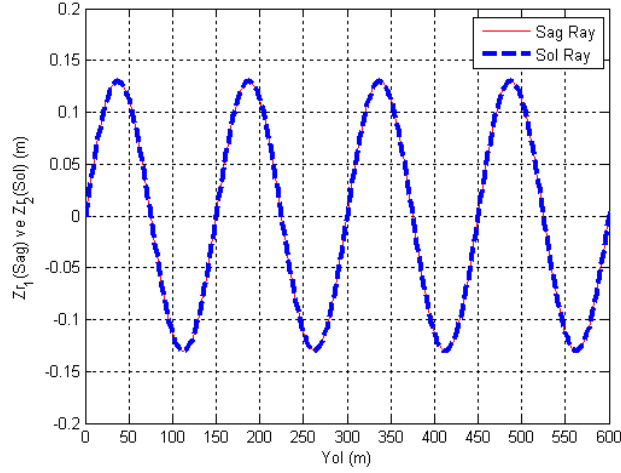


Şekil 5.10 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal sapma açısasal titreşimlerinin yer değiştirmeleri

I. ve III.bojilerin yanal sapma hareketi nerede ise gövdenin hareketi ile aynıdır bunun sebebi I. ve III.bojileri gövdeye bağlayan x yönünde çok büyük yay katsayısına sahip bağlantı çubuklarının olmasıdır. Ortadaki bojide ise bu bağlantı çubuğu olmadığından yanal sapma açısasal titreşim hareketi gövdenin hareketinden daha az ortaya çıkmıştır.

5.2 II.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Aynı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişi)

Yapılan ikinci simülasyonda sağ ve sol raylardan aynı genliğe ve dalga boyuna sahip sinüs fonksiyonu ray düzgünsüzlük fonksiyonu olarak seçilmiştir. (Şekil 5.11)



Şekil 5.11 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu

$$F_{Z_{r1}}(t) = Z_{r1} \sin(\omega_{Z_{r1}} t) \quad (5.3)$$

$$\omega_{Z_{r1}} = 2\pi \frac{V}{\lambda_{Z_{r1}}} \quad (5.4)$$

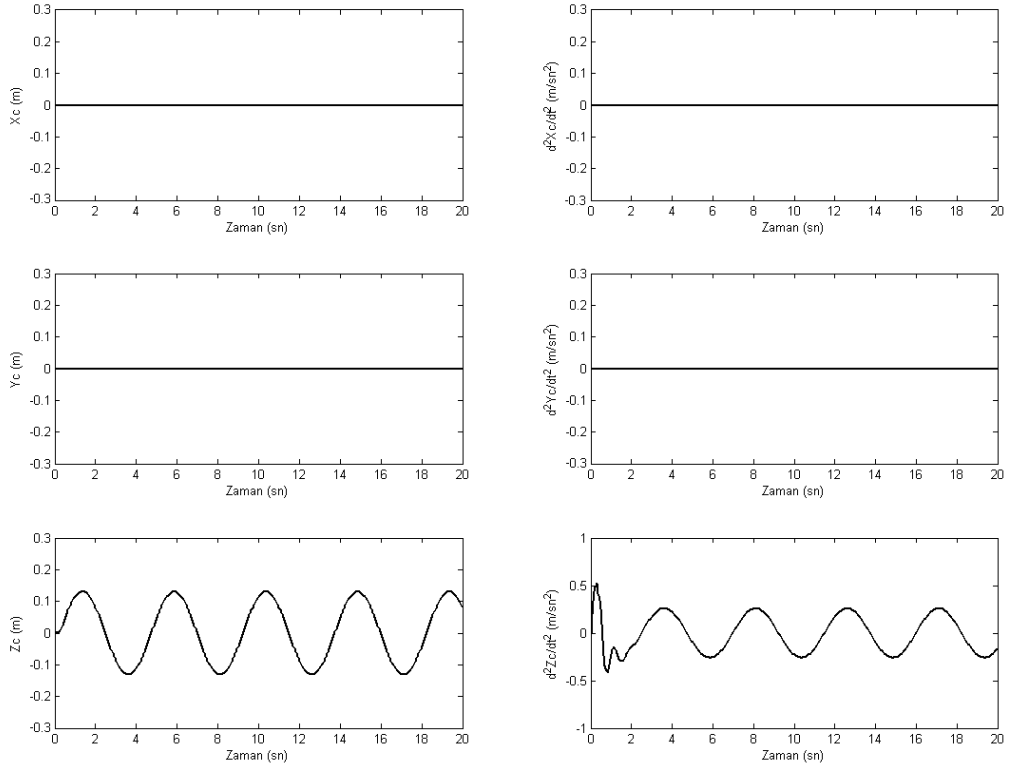
Sağ ray için düşey düzgünlük fonksiyonu ve bu sinüs fonksiyonunun frekansı (5.3) ve (5.4) eşitlikleri ile hesaplanabilir. (5.4) eşitliğindeki lokomotif hızı V 'nin birimi $[m/sn]$ olmalıdır. Fonksiyonu belirli yapan genlik, dalga boyu ve lokomotif hızı parametreleri, Ek 1'de verilmiştir.

$$F_{Z_{r2}}(t) = Z_{r2} \sin(\omega_{Z_{r2}} t) \quad (5.5)$$

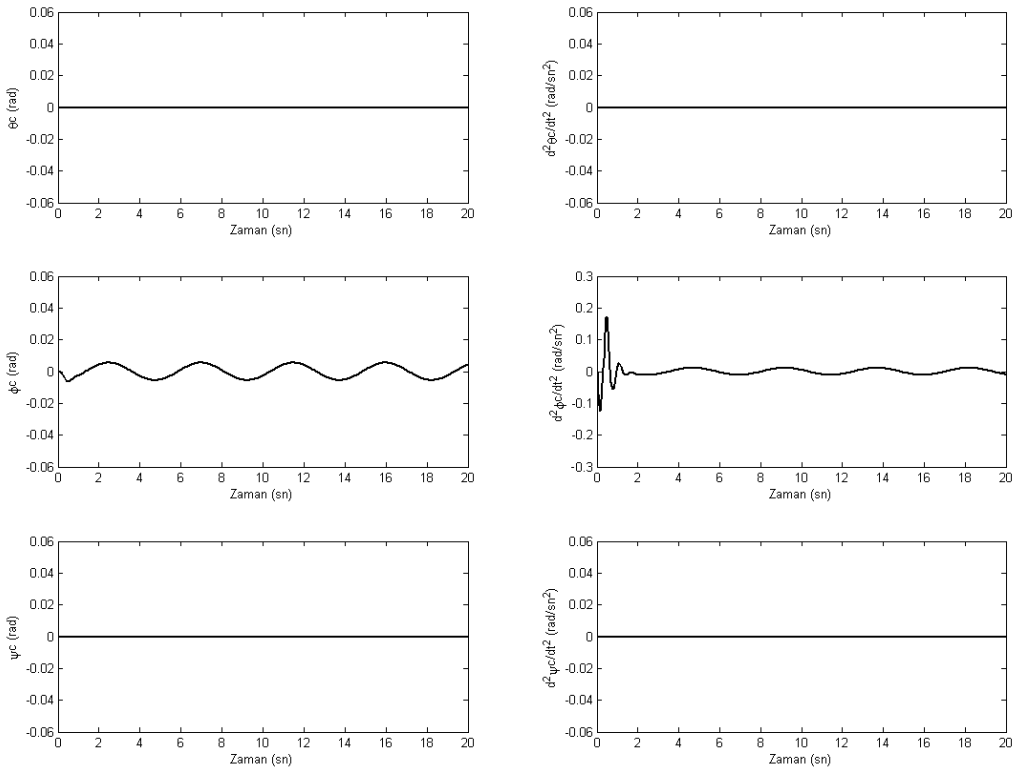
$$\omega_{Z_{r2}} = 2\pi \frac{V}{\lambda_{Z_{r2}}} \quad (5.6)$$

Sol ray için düşey düzgünlük fonksiyonu ve bu sinüs fonksiyonunun frekansı (5.5) ve (5.6) eşitlikleri ile hesaplanabilir. (5.6) eşitliğindeki lokomotif hızı V 'nin birimi yine $[m/sn]$ olmalıdır. Fonksiyonu belirli yapan genlik, dalga boyu ve lokomotif hızı parametreleri, Ek 1'de verilmiştir.

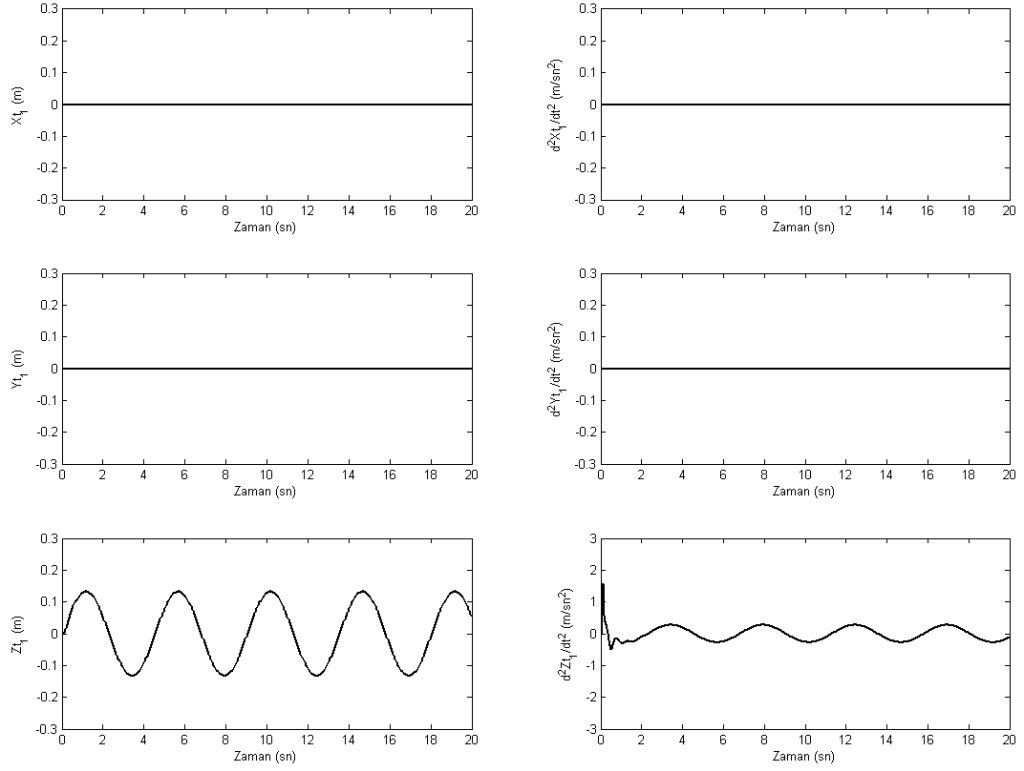
Sağ ve sol raylardan düşey doğrultuda aynı düzgünlük fonksiyonu girişi, yukarıdaki eşitliklerle anlatılan genel durumun bir özel halidir ve (5.3) ile (5.5) ve (5.4) ile (5.6) eşitlikleri birbirlerine eşittir. Girilen ray düzgünlüğü dinamik sistemin 54 serbestlik derecesinden sadece 14'ünü tetikleyebilmiştir. Tetiklenen serbestlik dereceleri : $Z_c, Z_{t1}, Z_{t2}, Z_{t3}, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_{w4}, Z_{w5}, Z_{w6}, \varphi_c, \varphi_{t1}, \varphi_{t2}, \varphi_{t3}$ 'dır.



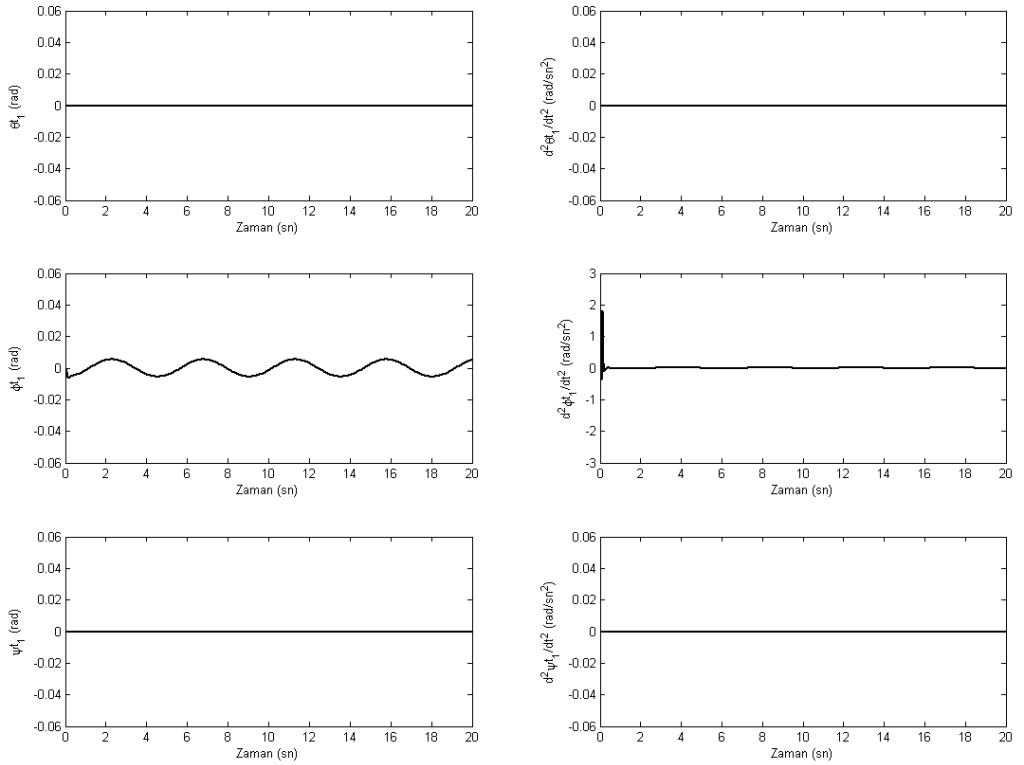
Şekil 5.12 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.13 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

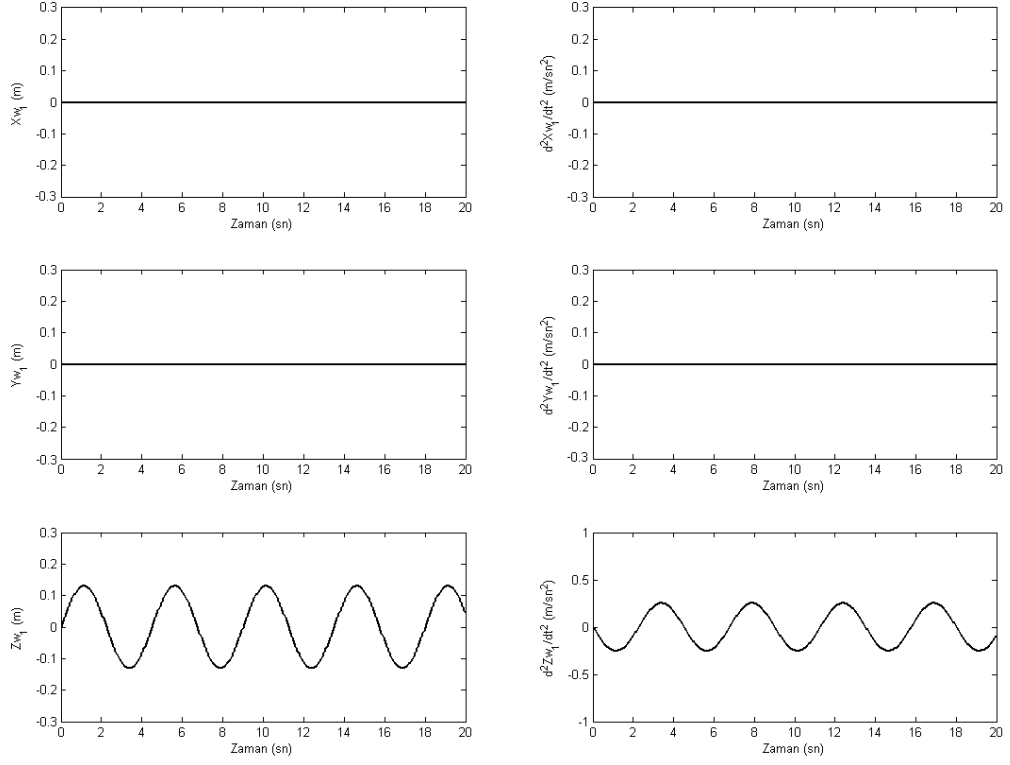


Şekil 5.14 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

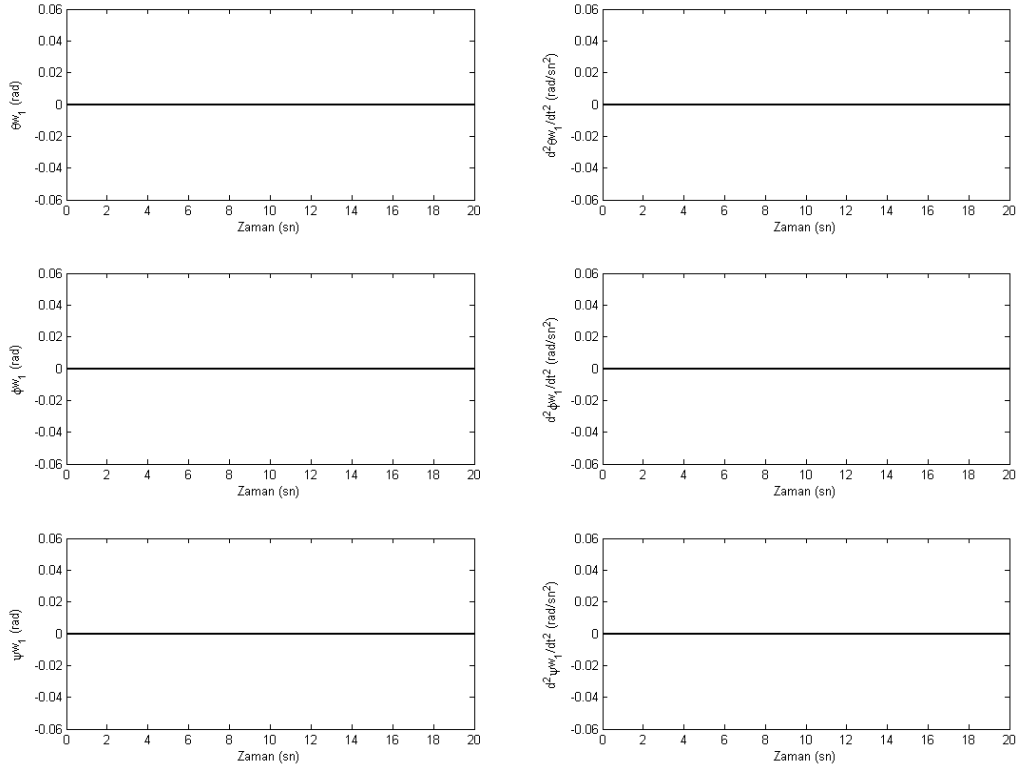


Şekil 5.15 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Şekil 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15’de görüldüğü üzere, düşey doğrultuda sağ ve sol ray düzgünlük fonksiyonları aynı seçildiğinde kabinde tetiklenen serbestlik dereceleri Z_c , φ_c ve I.bojide tetiklenen serbestlik dereceleri Z_{t1} , φ_{t1} olmaktadır. Bu aynı durum diğer bojiler ve için de geçerlidir.



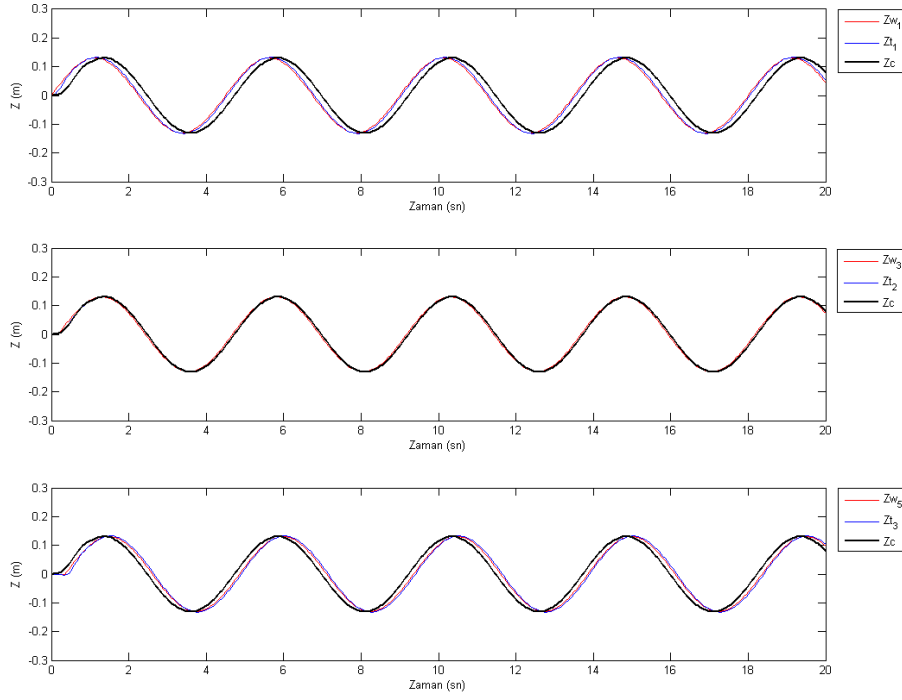
Şekil 5.16 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.17 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısai titreşimlerin yer değıştirme ve ivmeleri

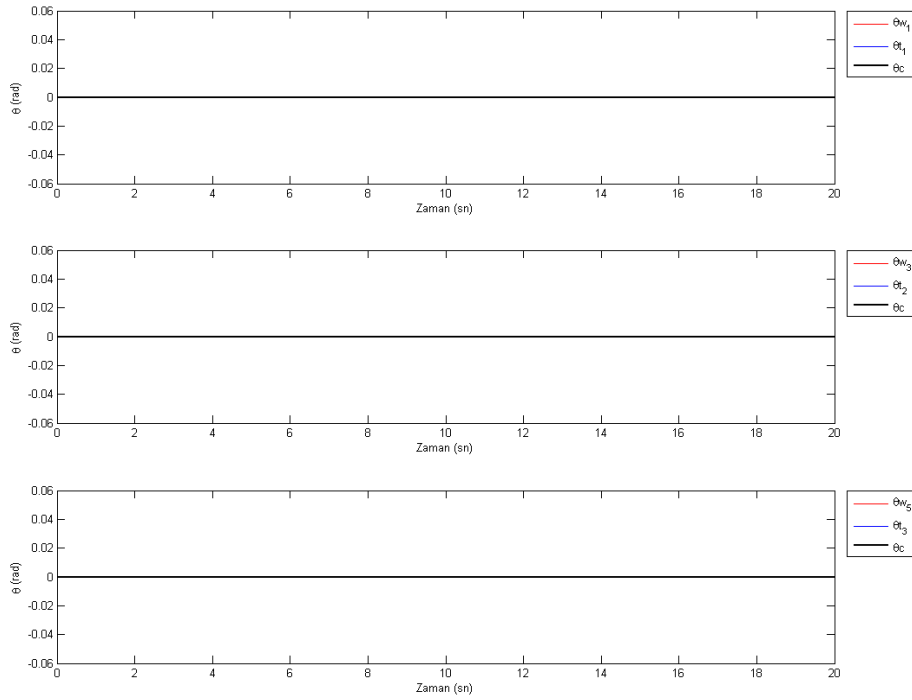
Sağ ve sol ray düzgünsüzlüklerinin genlik ve dalga boyları aynı olduğundan tekerlek setlerinin düşey serbestlik derecesinden başka hiçbir serbestlik derecesi tetiklenmemiştir.

I. tekerlek–seti, I.boji ve kabinin Z , θ , φ serbestlik derecelerinin karşılaştırılması Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de daha detaylı görülebilir.

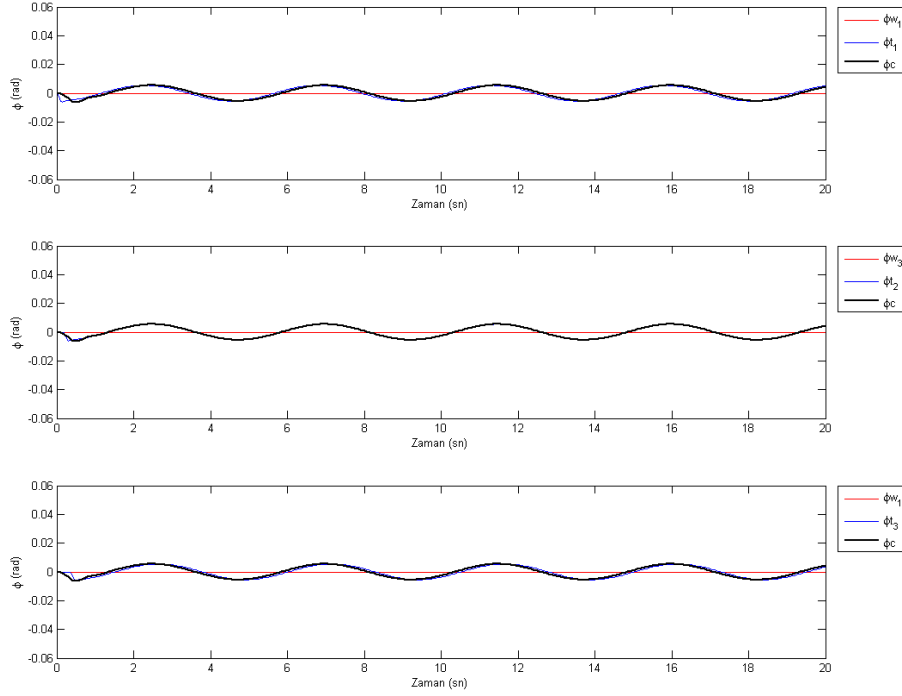


Şekil 5.18 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri

Şekil 5.19’da görüldüğü üzere, sağ ve sol ray düzgünsüzlüklerinin genlik ve dalga boyları aynı olduğundan hiçbir alt elemanın yalpalama serbestlik derecesi tetiklenmemiştir.



Şekil 5.19 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısız titreşimlerinin yer değiştirmeleri

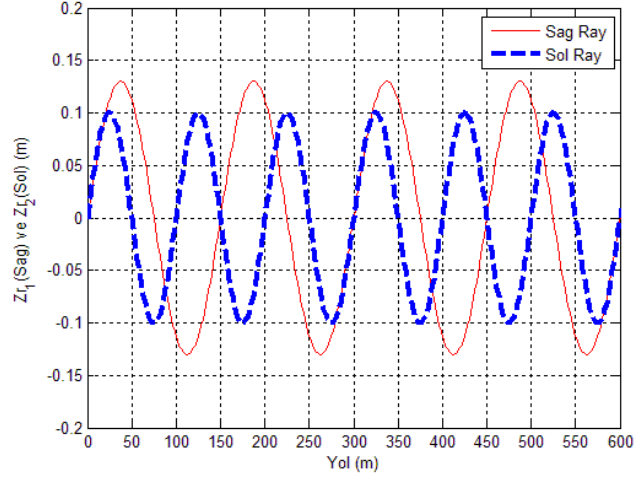


Şekil 5.20 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan kafa vurma açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri

I.bojinin kafa vurma hareketi gövdeden önce tetiklenmiş, daha sonra II.bojinin kafa vurma hareketi başlamıştır. Kabinin kafa vurma hareketi neredeyse III.bojinin kafa vurma hareketi ile aynı anda tetiklenmiştir. Bojilerdeki tetikleme gecikmeleri L_b boyu ile doğru orantılı olurken kabindeki gecikme kütleli atalet momentinin çok büyük olmasından dolayıdır.

5.3 III.Senaryo (Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünsüzlük Fonksiyonu Girişii)

Yapılan üçüncü simülasyonda ise sağ ve sol raylardan farklı genliğe ve dalga boyuna sahip sinüs fonksiyonu ray düzgünsüzlük fonksiyonları olarak seçilmiştir. (Şekil 5.21)

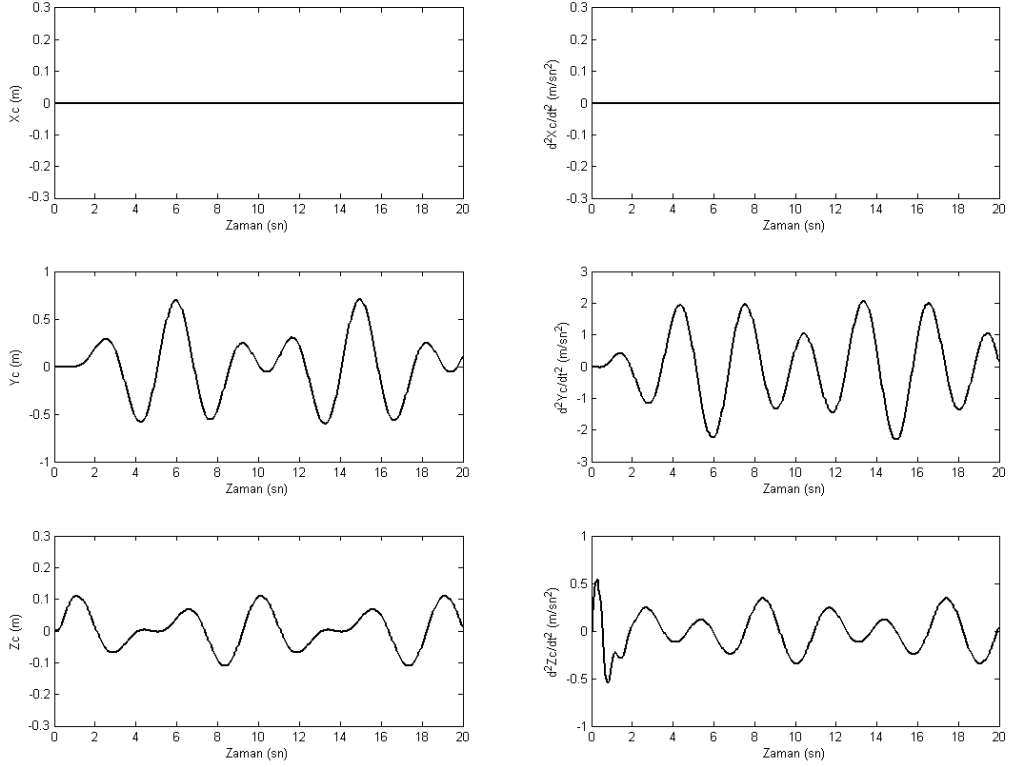


Şekil 5.21 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu

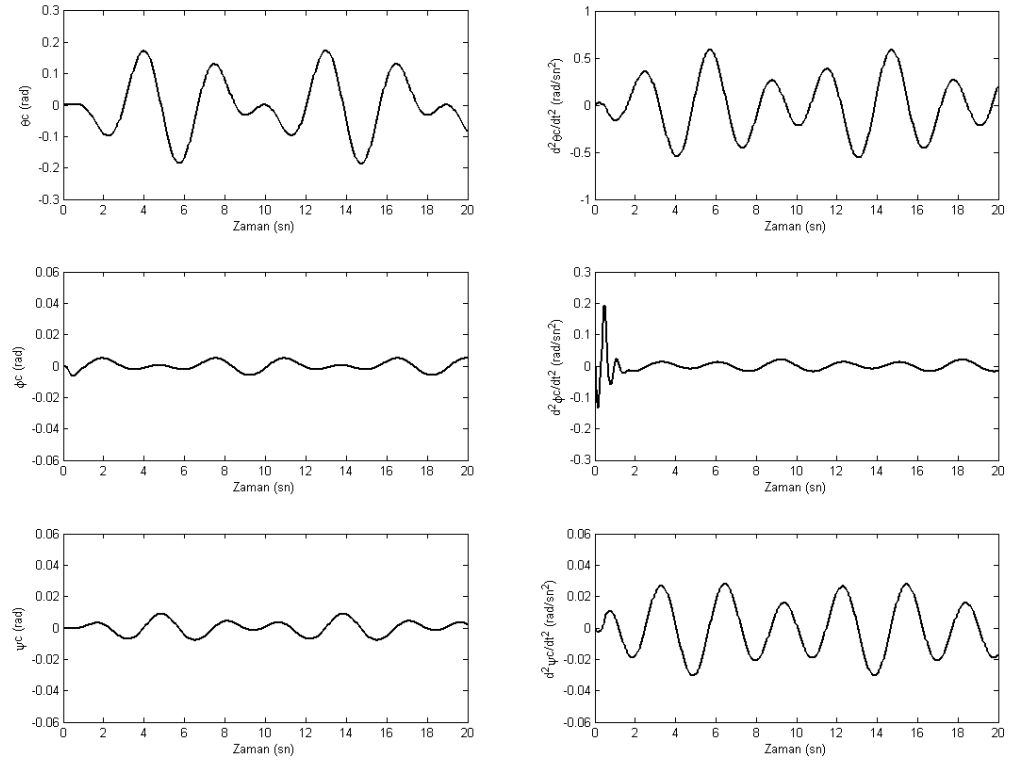
Sağ ve sol raylardan düşey doğrultuda farklı düzgünsüzlük fonksiyonu girişleri, genel hal olup farklı genlik ve dalga boyları ile tanımlıdır ve (5.3), (5.4), (5.5) ve (5.6) eşitlikleri ray düzgünsüzlük fonksiyonlarını ifade etmektedir.

Girilen ray düzgünsüzlüğü dinamik sistemin 54 serbestlik derecesinden 44'ünü tetikleyebilmiştir. Tetiklenen serbestlik dereceleri : $Y_c, Y_{t1}, Y_{t2}, Y_{t3}, Y_{w1}, Y_{w2}, Y_{w3}, Y_{w4}, Y_{w5}, Y_{w6}, Z_c, Z_{t1}, Z_{t2}, Z_{t3}, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_{w4}, Z_{w5}, Z_{w6}, \theta_c, \theta_{t1}, \theta_{t2}, \theta_{t3}, \theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}, \theta_{w4}, \theta_{w5}, \theta_{w6}, \varphi_c, \varphi_{t1}, \varphi_{t2}, \varphi_{t3}, \psi_c, \psi_{t1}, \psi_{t2}, \psi_{t3}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, \psi_{w5}, \psi_{w6}$ 'dır.

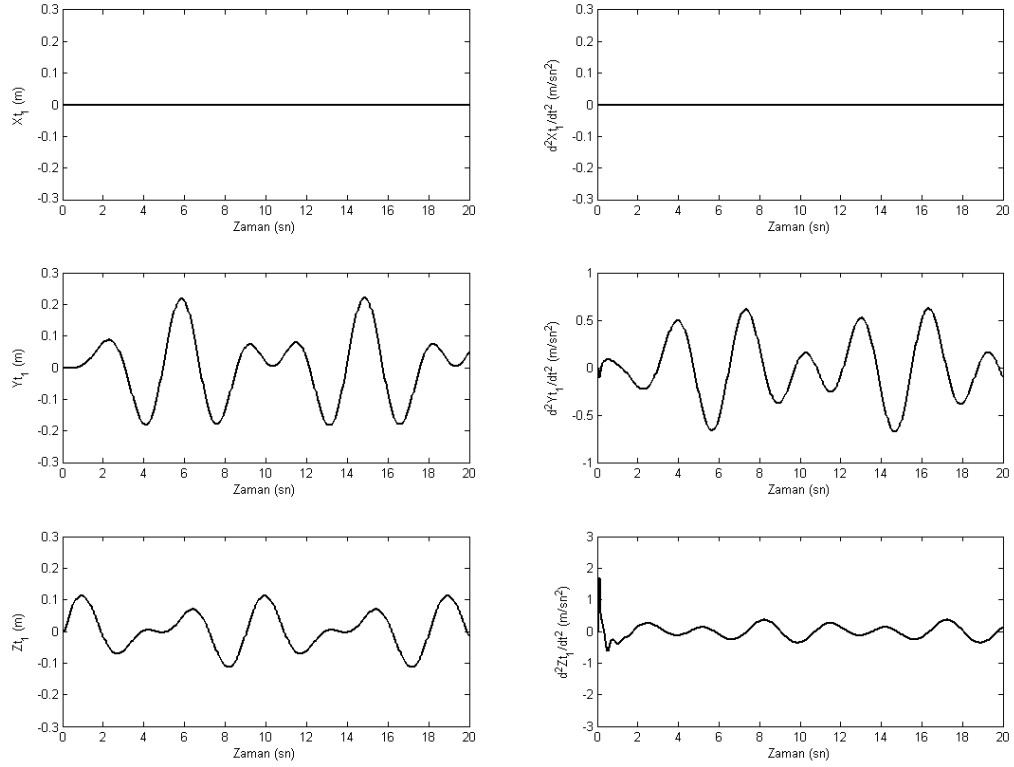
Sol ve sağ ray düzgünsüzlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan kabinin boyamsal serbestlik derecesi X_c hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.



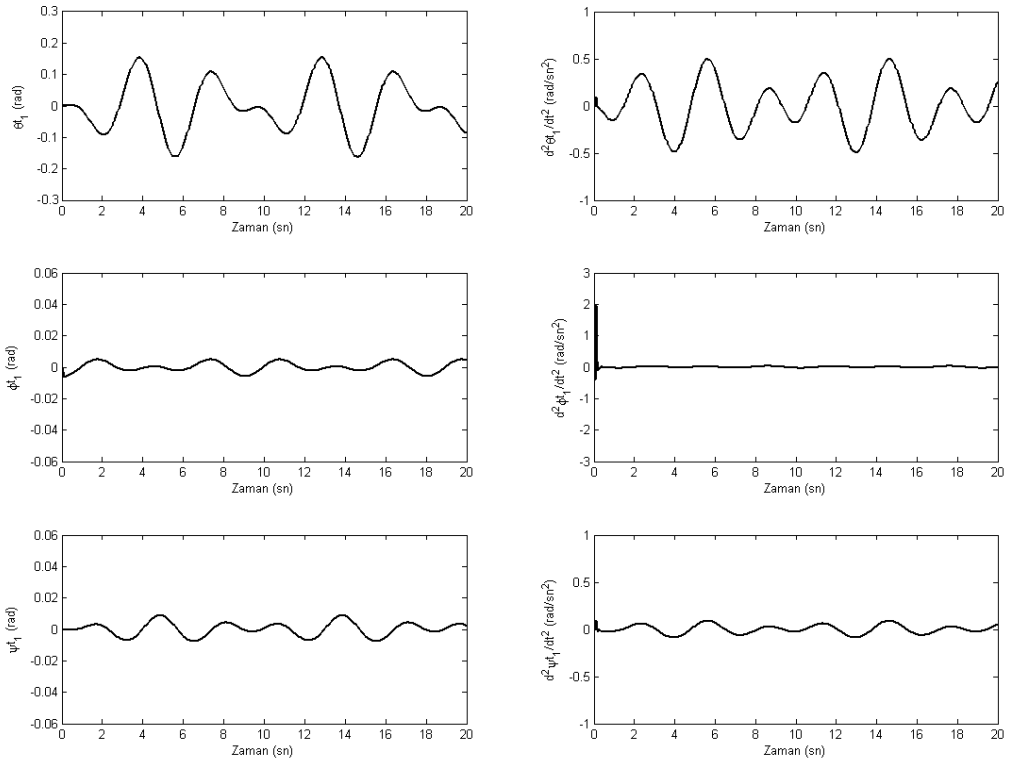
Şekil 5.22 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.23 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

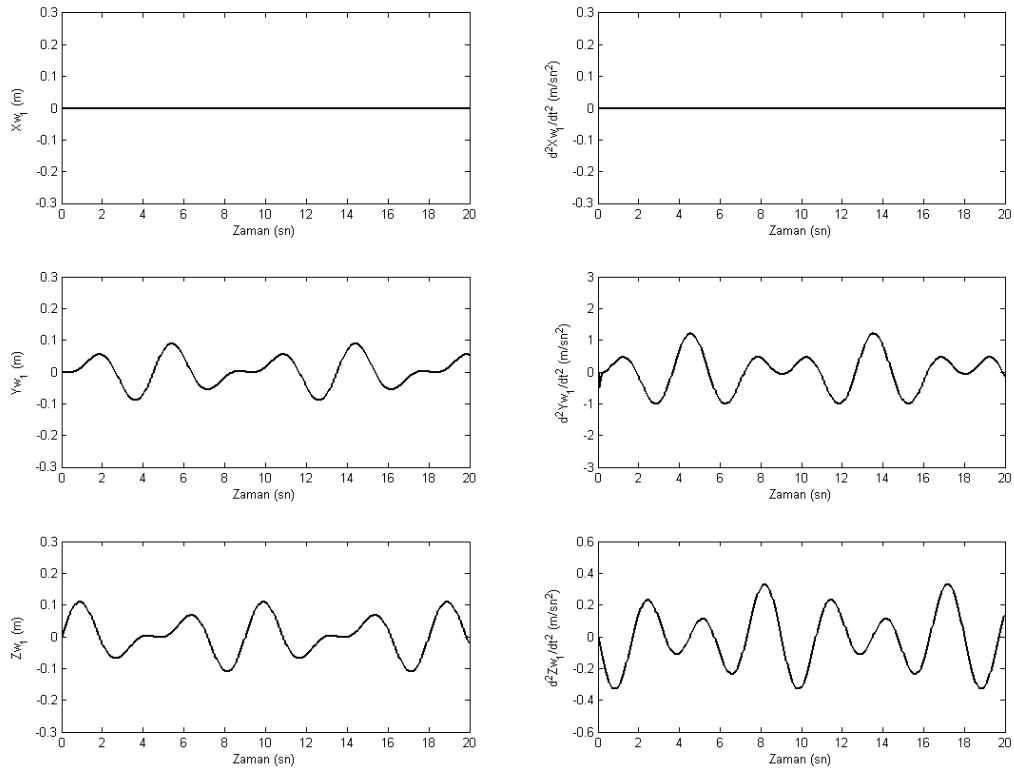


Şekil 5.24 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



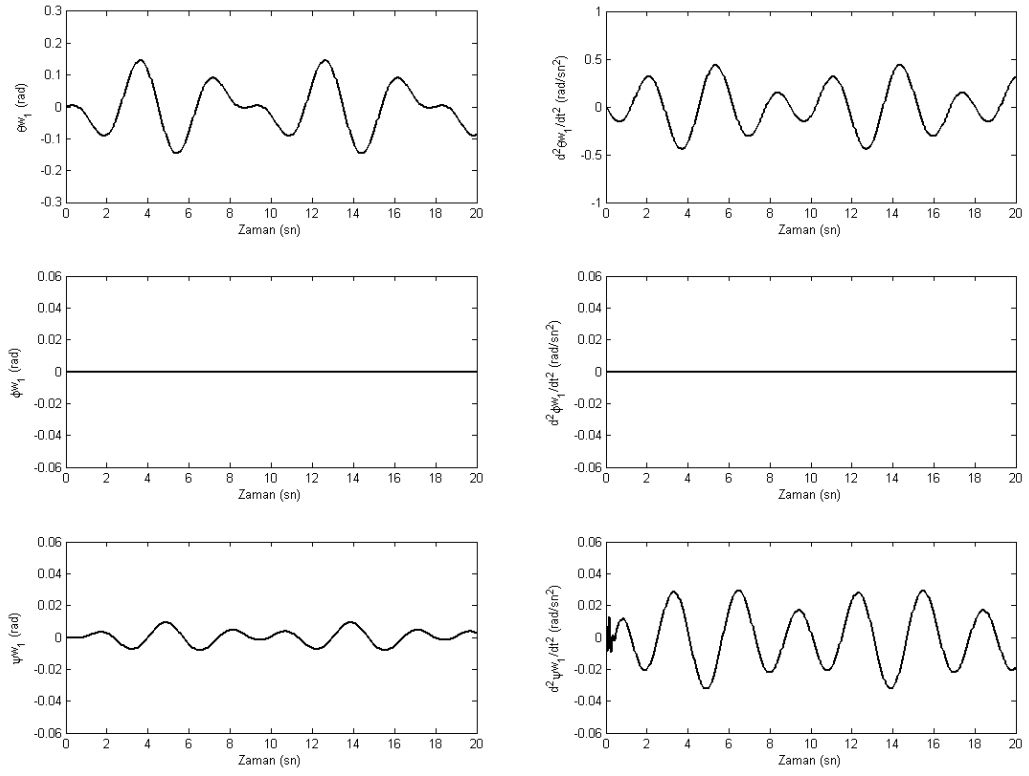
Şekil 5.25 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısız titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Sağ ve sol ray düzgünsüzlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan bojilerin boylamsal serbestlik dereceleri $X_{1,2,3}$ hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.



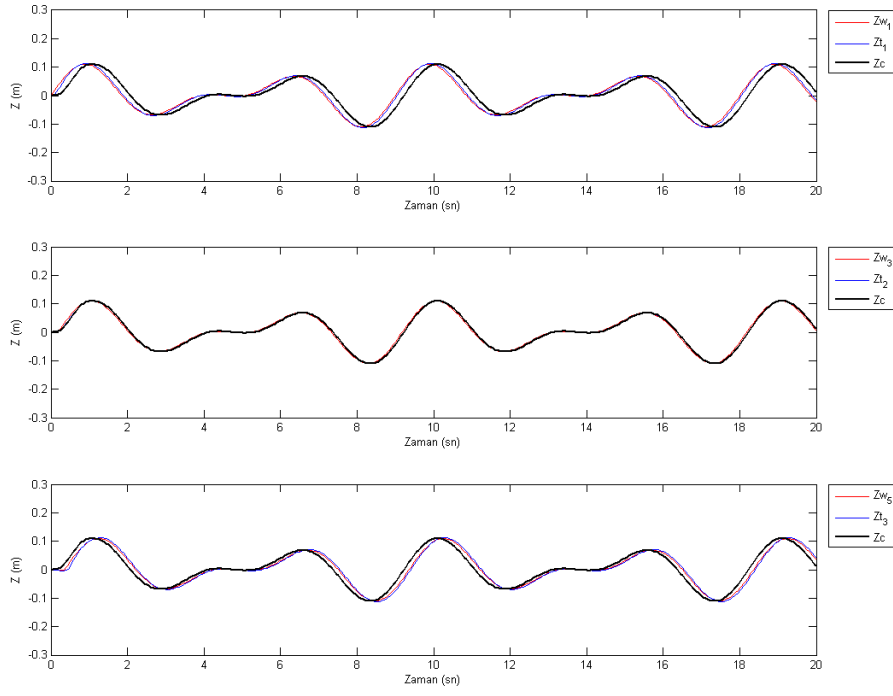
Şekil 5.26 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Sağ ve sol ray düzgünsüzlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan tekerlek setlerinin bojilerin boylamsal serbestlik dereceleri $X_{w1,\dots,6}$ hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.

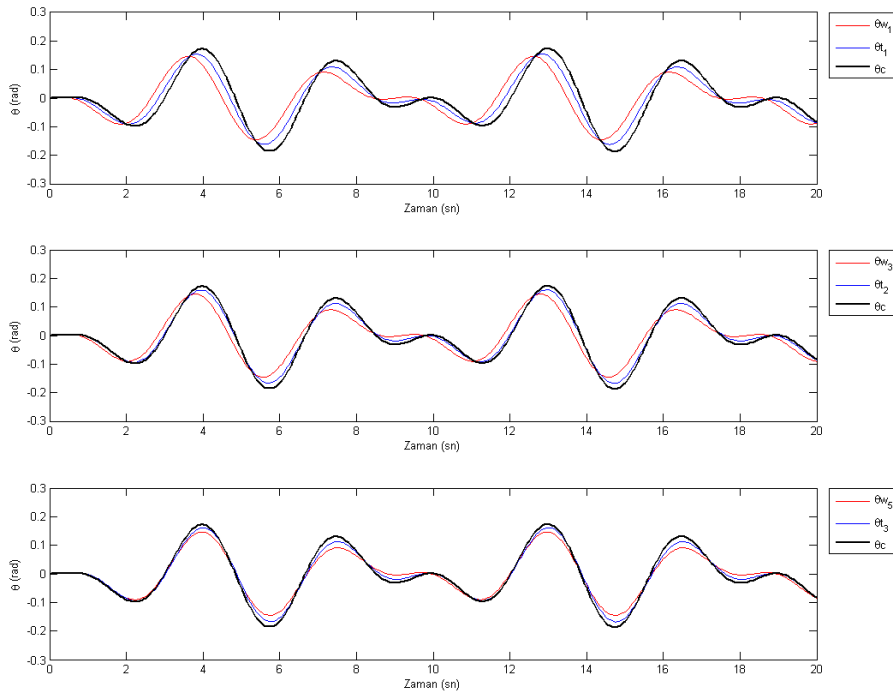


Şekil 5.27 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısız titreşimlerin yer değıştirme ve ivmeleri

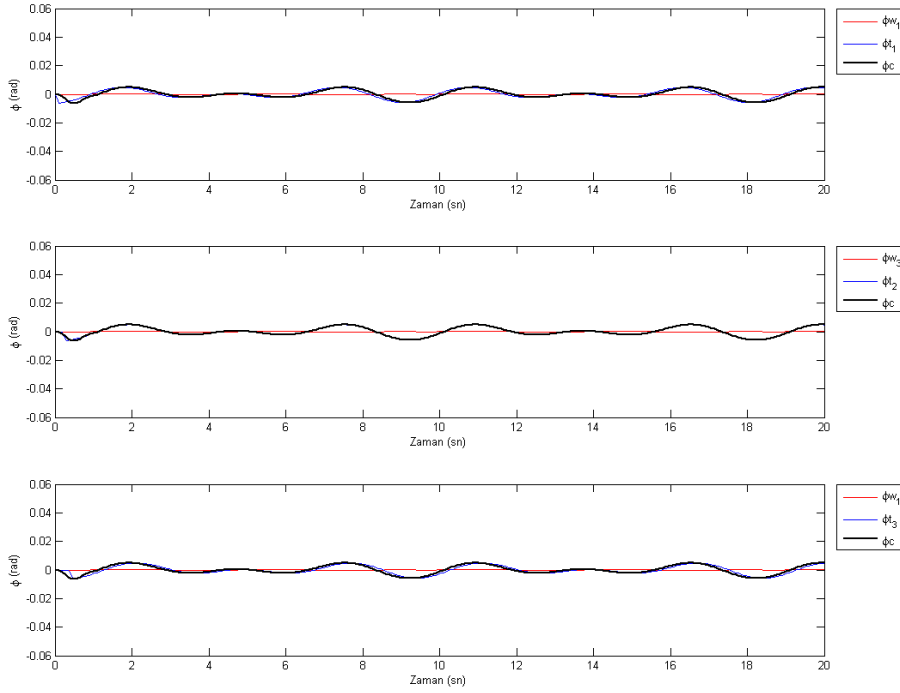
I. tekerlek–seti, I.boji ve kabinin Z , θ , φ serbestlik derecelerinin karşılaştırılması Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da daha detaylı görülebilir.



Şekil 5.28 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri



Şekil 5.29 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri



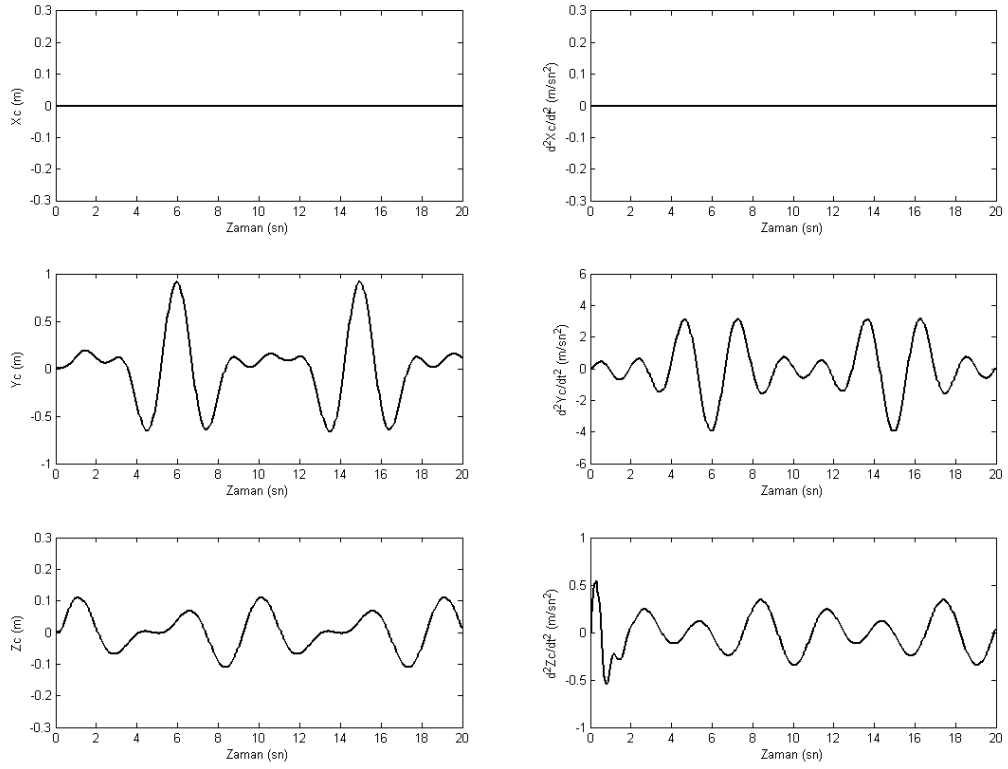
Şekil 5.30 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan kafa vurma açılal titreşimlerinin yer değiştirmeleri

5.4 IV.Senaryo (Yanal Doğrultuda ve Düşey Doğrultuda Sağ ve Sol Raylardan Farklı Düzgünlük Fonksiyonu Giriş)

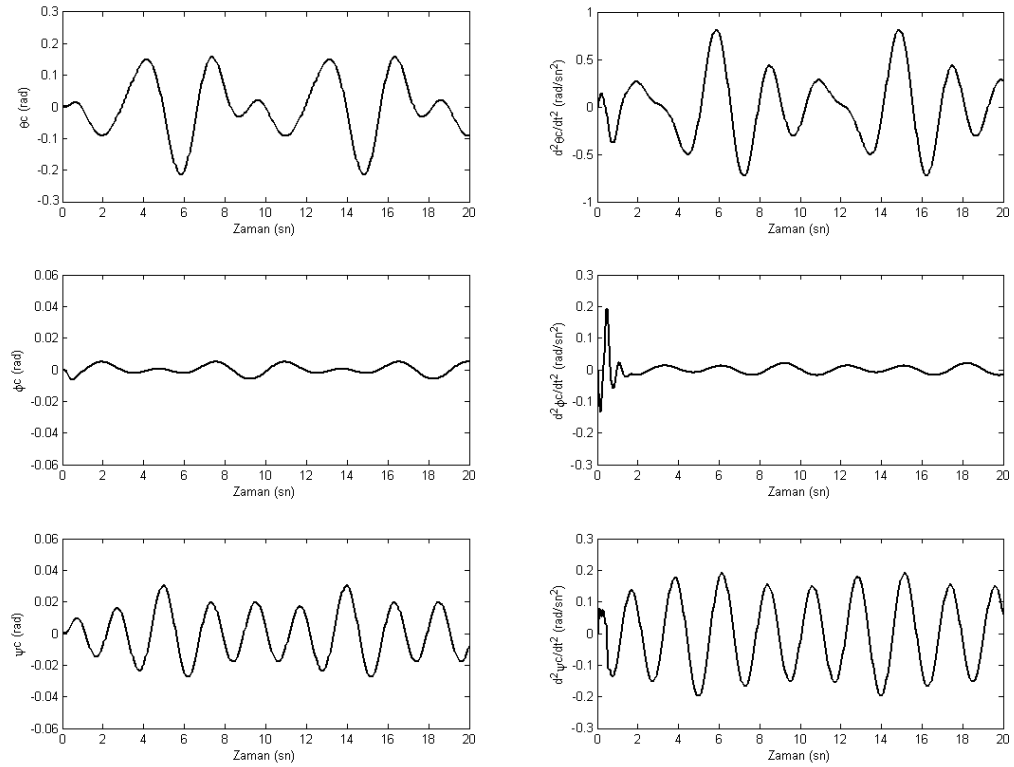
Yapılan dördüncü simülasyon ise sistemi zorlayan en genel hal olup 5.1 ve 5.3 bölümlerinde uygulanan yanal ve farklı düşey ray düzgünlüklerinin birleşimidir. (Şekil 5.1 ve 5.21)

Girilen ray düzgünlüğü dinamik sistemin 54 serbestlik derecesinden 44'ünü tetikleyebilmiştir. Tetiklenen serbestlik dereceleri : $Y_c, Y_{t1}, Y_{t2}, Y_{t3}, Y_{w1}, Y_{w2}, Y_{w3}, Y_{w4}, Y_{w5}, Y_{w6}, Z_c, Z_{t1}, Z_{t2}, Z_{t3}, Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, Z_{w4}, Z_{w5}, Z_{w6}, \theta_c, \theta_{t1}, \theta_{t2}, \theta_{t3}, \theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}, \theta_{w4}, \theta_{w5}, \theta_{w6}, \varphi_c, \varphi_{t1}, \varphi_{t2}, \varphi_{t3}, \psi_c, \psi_{t1}, \psi_{t2}, \psi_{t3}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, \psi_{w5}, \psi_{w6}$ 'dır.

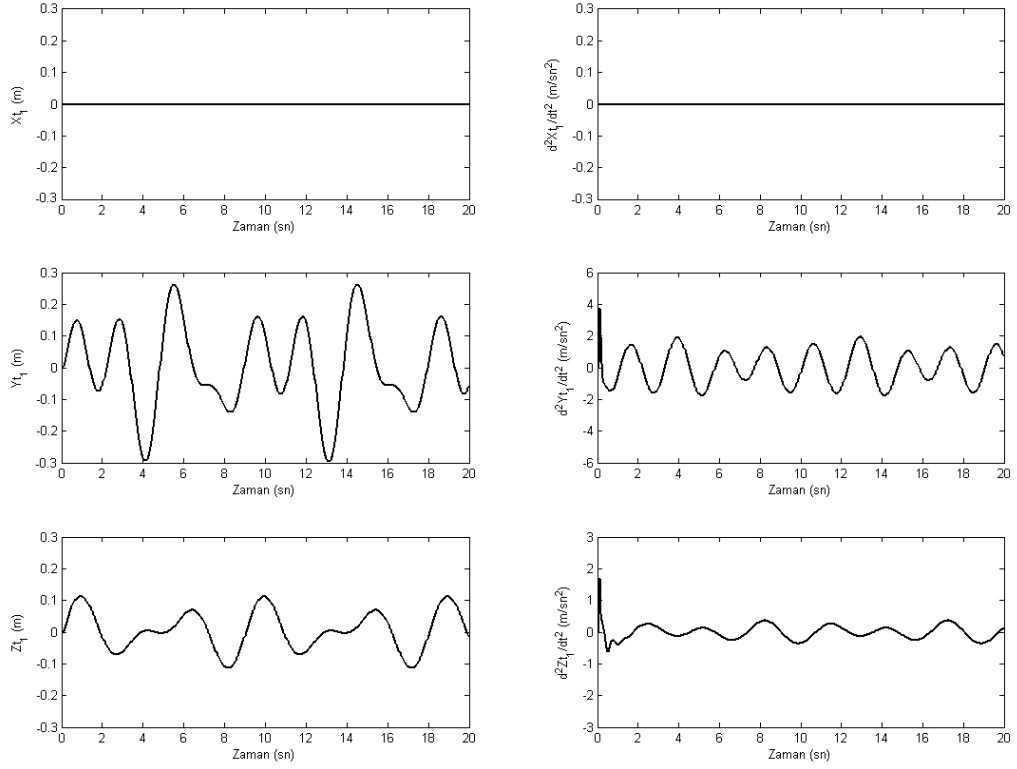
Sağ ve sol ray düzgünlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan kabinin boylamsal serbestlik derecesi X_c hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.



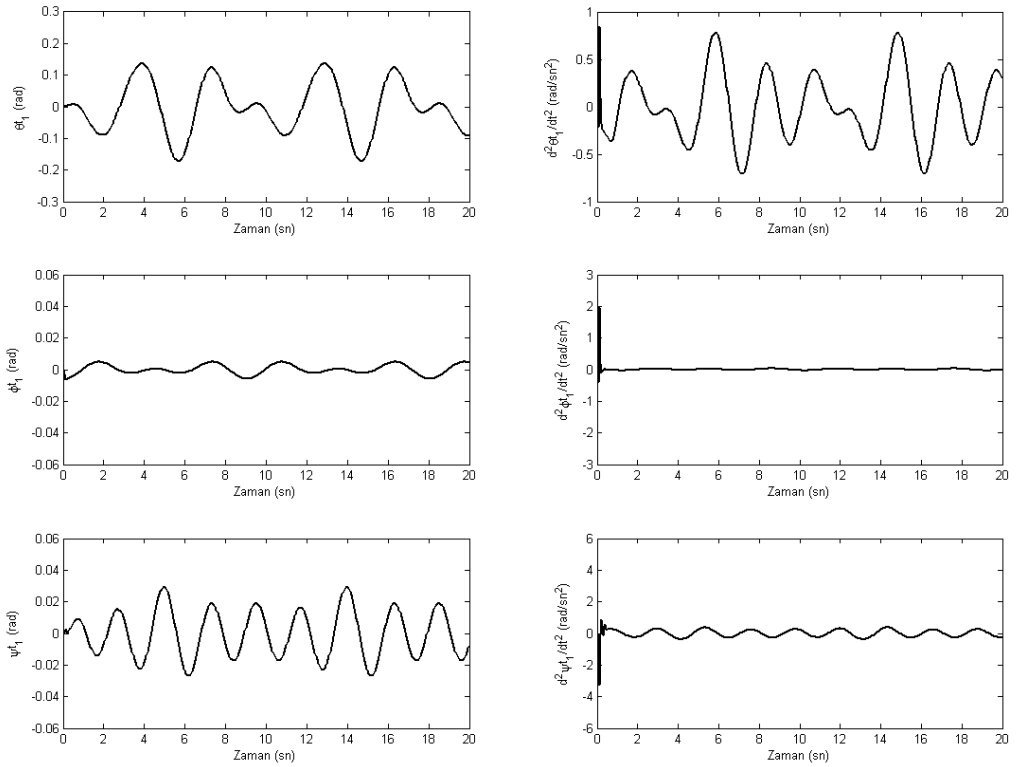
Şekil 5.31 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.32 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

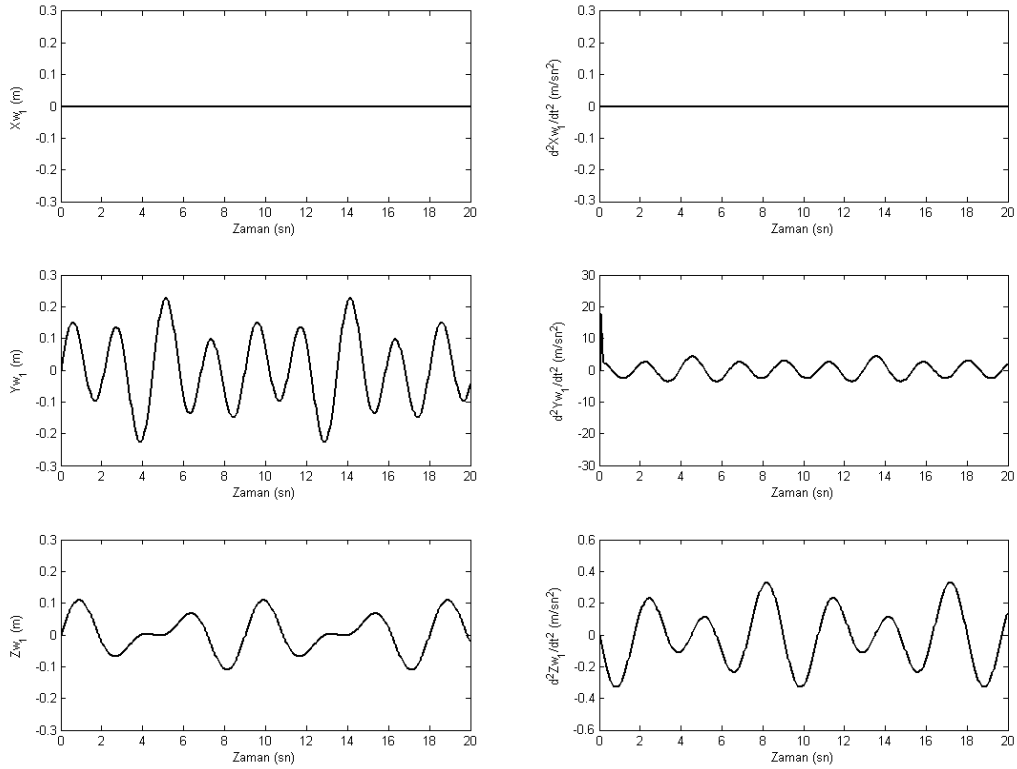


Şekil 5.33 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri



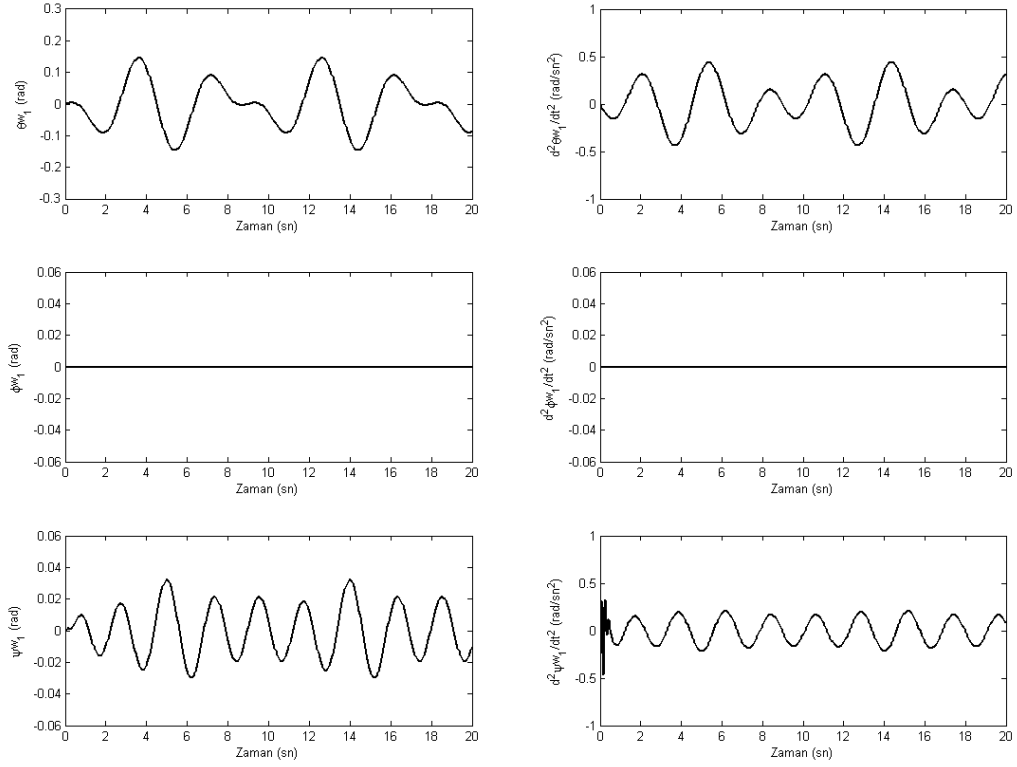
Şekil 5.34 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.bojide oluşan açısıl titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Sağ ve sol ray düzgünlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan bojilerin boylamsal serbestlik dereceleri $X_{1,2,3}$ hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.



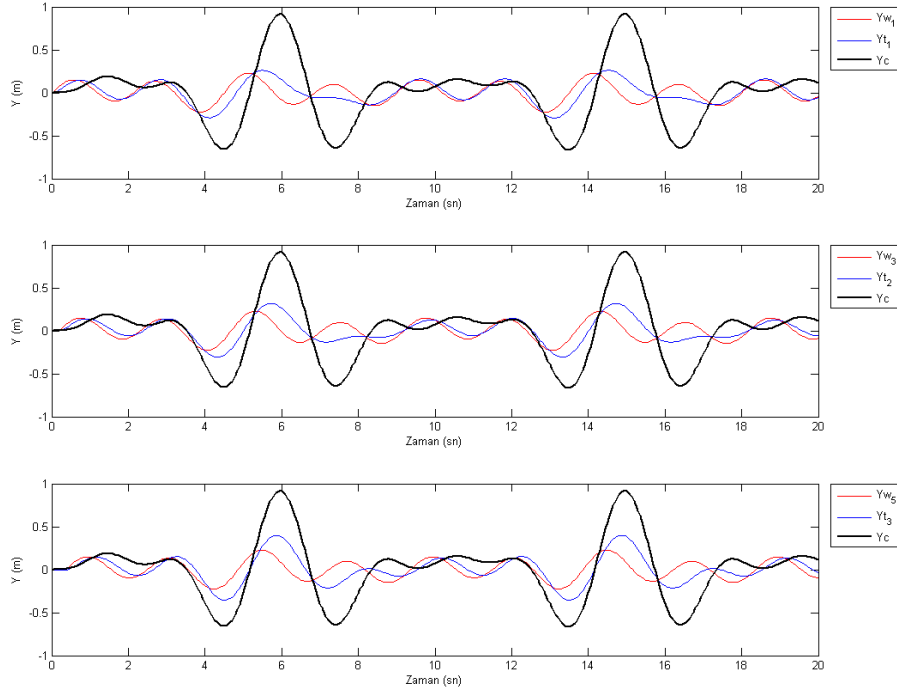
Şekil 5.35 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan doğrusal titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri

Sağ ve sol ray düzgünlüklerinin genlik ve dalga boyları farklı olduğundan tekerlek setlerinin bojilerin boylamsal serbestlik dereceleri $X_{w1,\dots,6}$ hariç diğer tüm serbestlik dereceleri tetiklenmiştir.

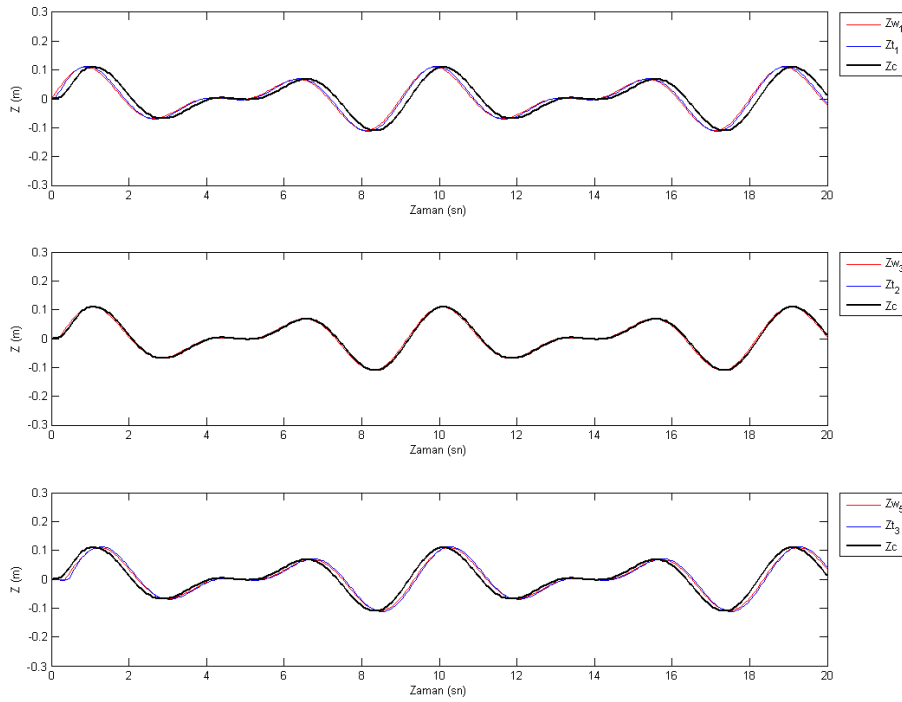


Şekil 5.36 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–setinde oluşan açısai titreşimlerin yer değıştirme ve ivmeleri

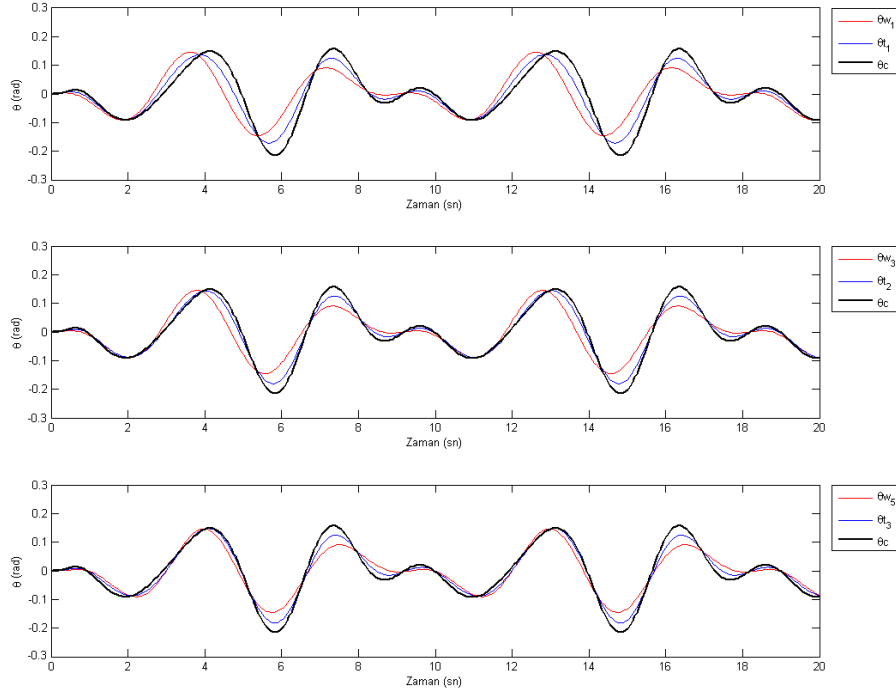
I. tekerlek–seti, I.boji ve kabinin Y , Z , θ , φ , ψ serbestlik derecelerinin karşılaştırılması Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de daha detaylı görülebilir.



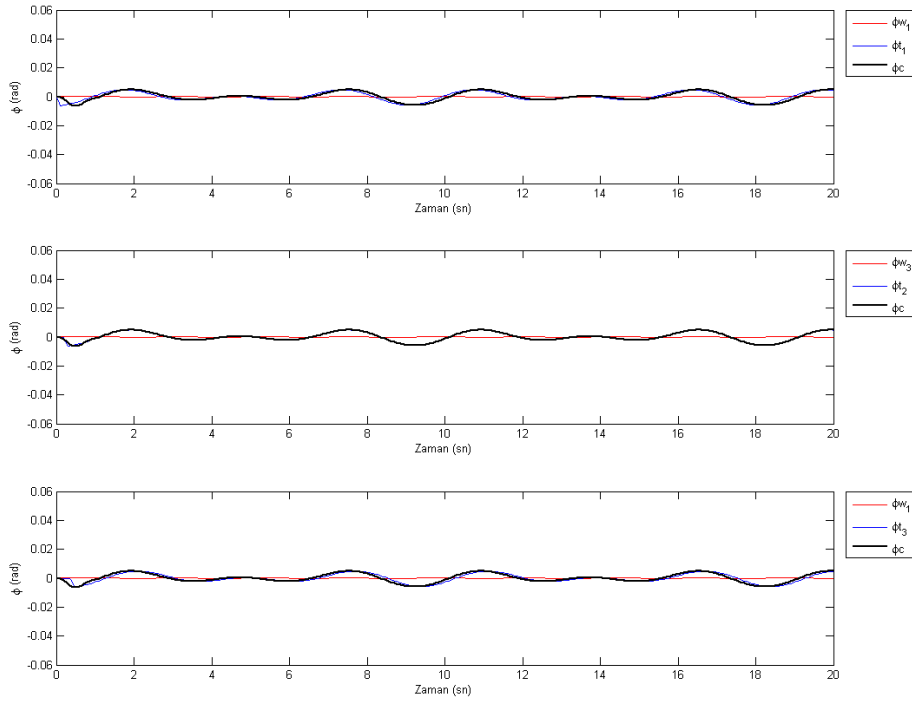
Şekil 5.37 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal titreşimlerin yer değiştirmeleri



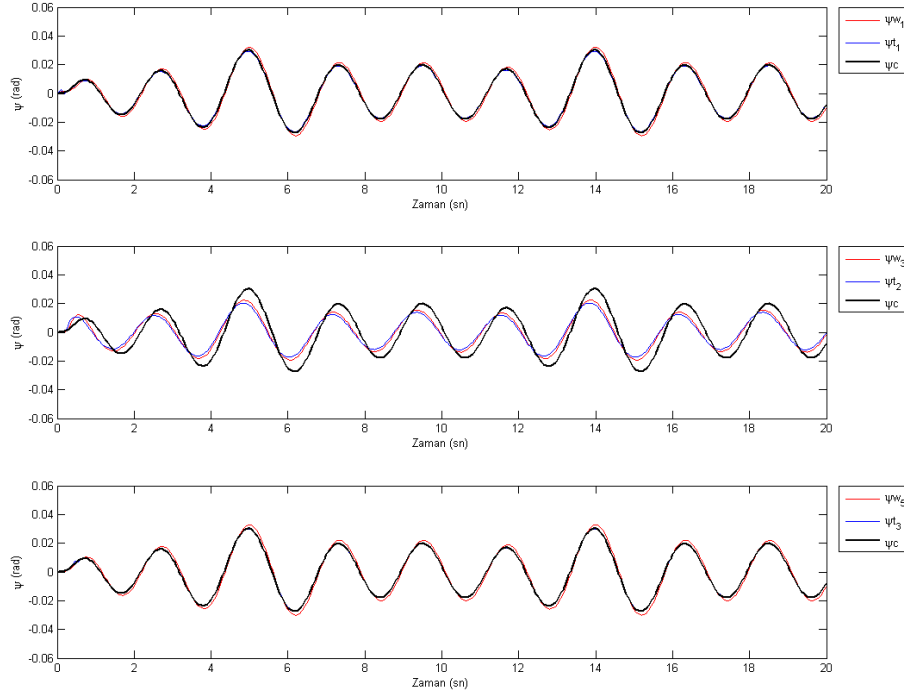
Şekil 5.38 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan düşey titreşimlerin yer değiştirmeleri



Şekil 5.39 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yalpalama açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri



Şekil 5.40 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan kafa vurma açısai titreşimlerinin yer değiştirmeleri



Şekil 5.41 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile I.tekerlek–seti, I.boji ve kabinde oluşan yanal sapma açısıl titreşimlerinin yer değiştirmeleri

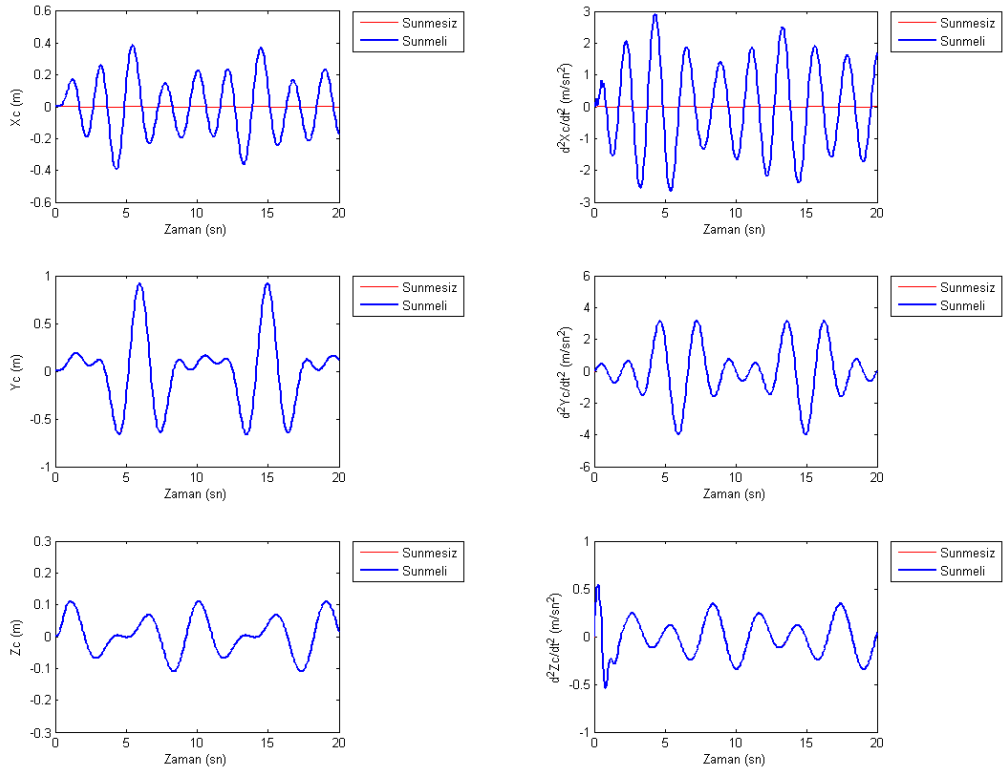
5.5 Sünme Faktörünün IV. Senaryo Üzerindeki Etkileri

Bölüm 3’de tekerlek-setleri denklemlerinin oluşturulurken boylamsal X , yanal Y yanal sapma açısı ψ yönlerinde sünme ifadeleri hesaba katılmıştı.

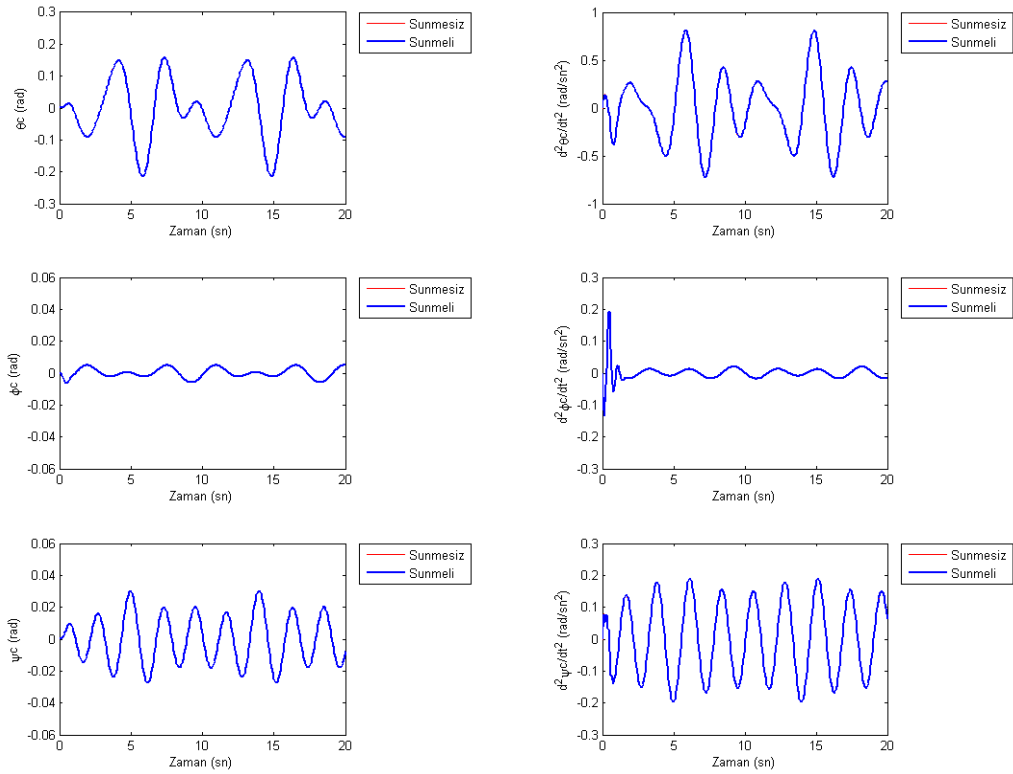
Sünme olayı gerçekte dinamik sistemi lineerlikten uzaklaştırarak non–lineer bir yapıda olmaya zorlamaktadır. Bu lineer–olmayan etkinin tam anlamıyla hissedilebilmesi için lokomotif hızının ve sünme katsayılarının her simülasyon hızında dinamik olarak geri beslenip tekrar hesaplanması ve sisteme bir çevrim dahilinde tekrar girilmesi gerekmektedir. Bu modelleme neticesinde simülasyon çözüm zamanı çok artacak ve sistem çok hantal olacaktır ama gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilebilecektir.

Çalışmada sabit bir lokomotif hızı için sünme katsayıları hesaplanmış ve sisteme dahil edilmiştir. Seçilen lokomotif hızı ve sünme katsayıları Ek 1’de verilmiştir.

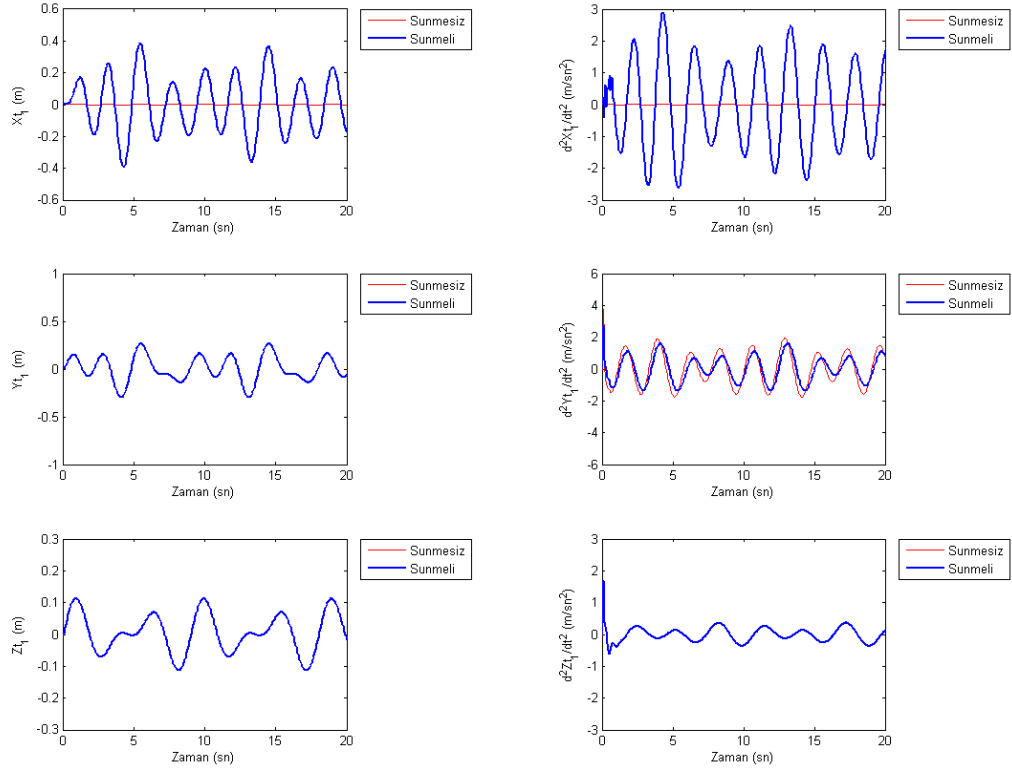
Sünmenin etkilerini gözlemlenmesinde 5.4 bölümündeki en genel ray düzgünlüğü girişleri kullanılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde sünme faktörünün kabinin yanal ve düşey hareketleri üzerinde çok büyük etkisi görülmemektedir. Bu serbestlik derecelerinin aktif kontrolü yapılırken sünme olayı göz ardı edilerek analizler yapılmıştır.



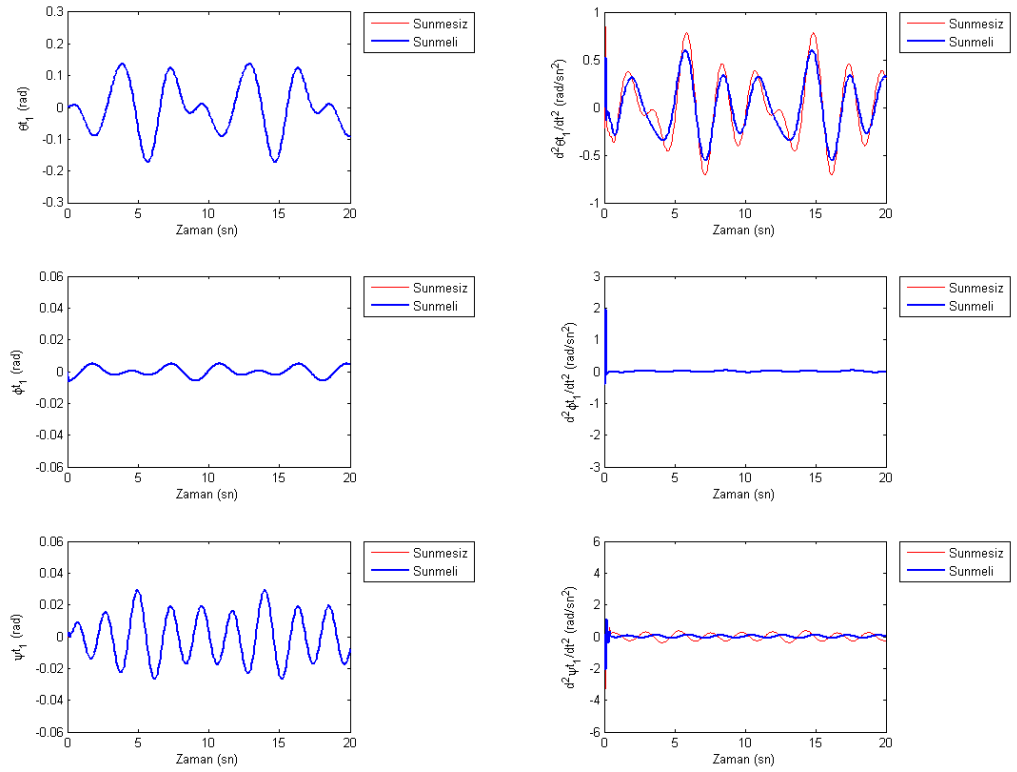
Şekil 5.42 Sünme faktörünün kabinin doğrusal titreşimlerine etkileri



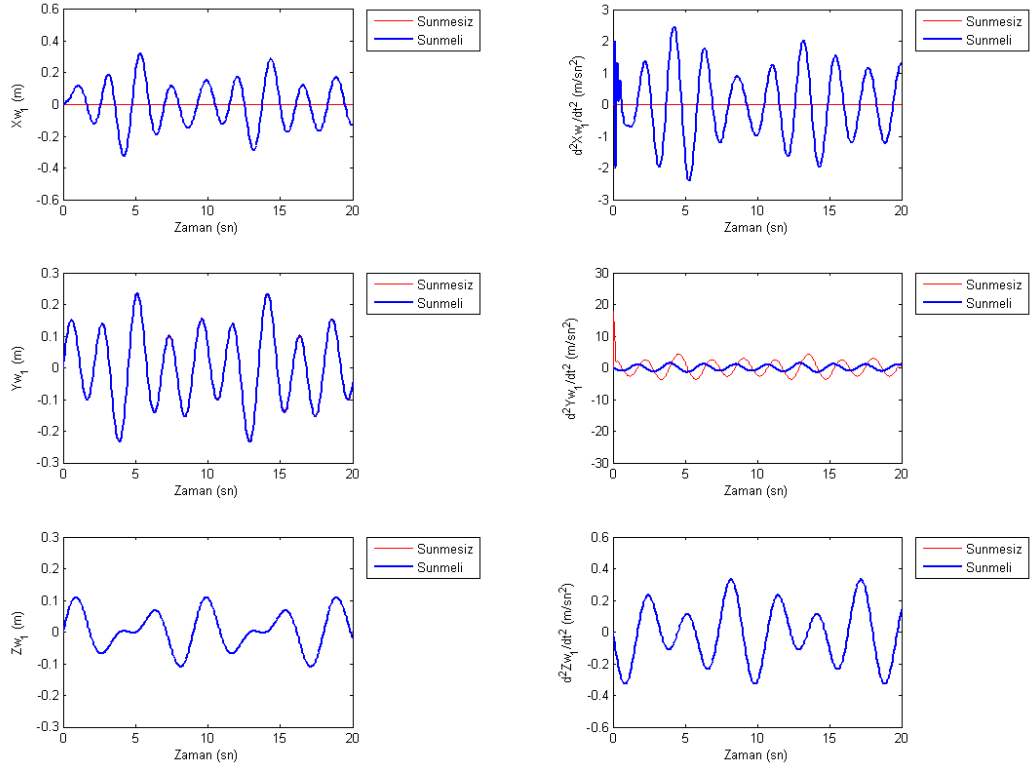
Şekil 5.43 Sünme faktörünün kabinin açısıl titreşimlerine etkileri



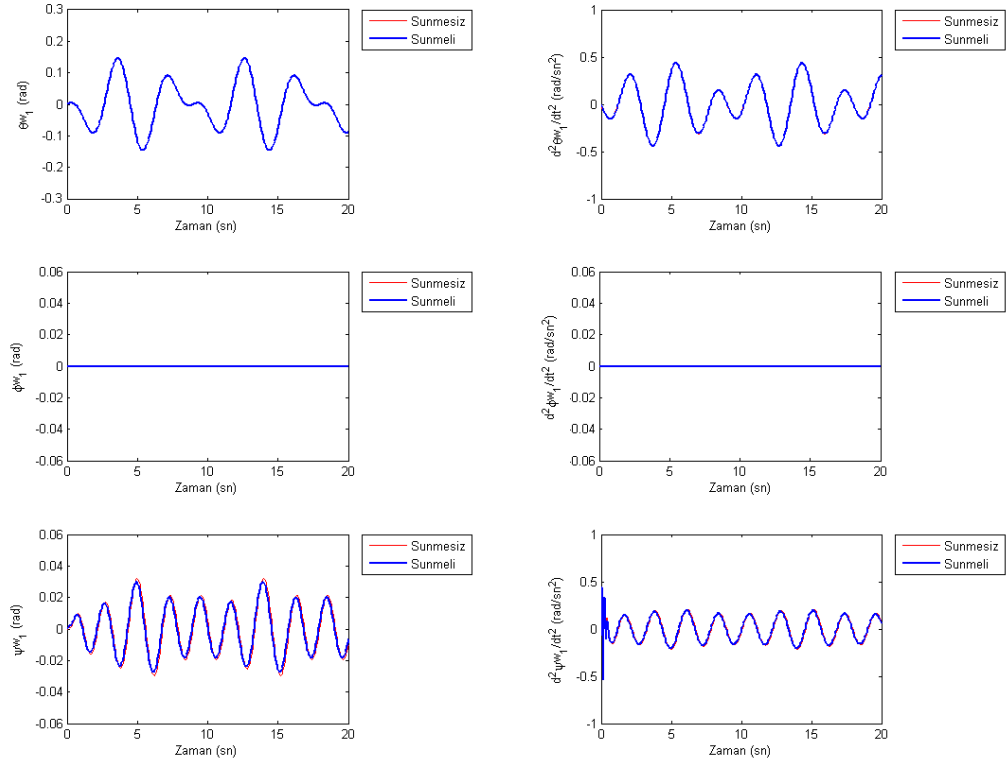
Şekil 5.44 Sünme faktörünün I.bojinin doğrusal titreşimlerine etkileri



Şekil 5.45 Sünme faktörünün I.bojinin açısai titreşimlerine etkileri



Şekil 5.46 Sünme faktörünün I.tekerlek–setinin doğrusal titreşimlerine etkileri



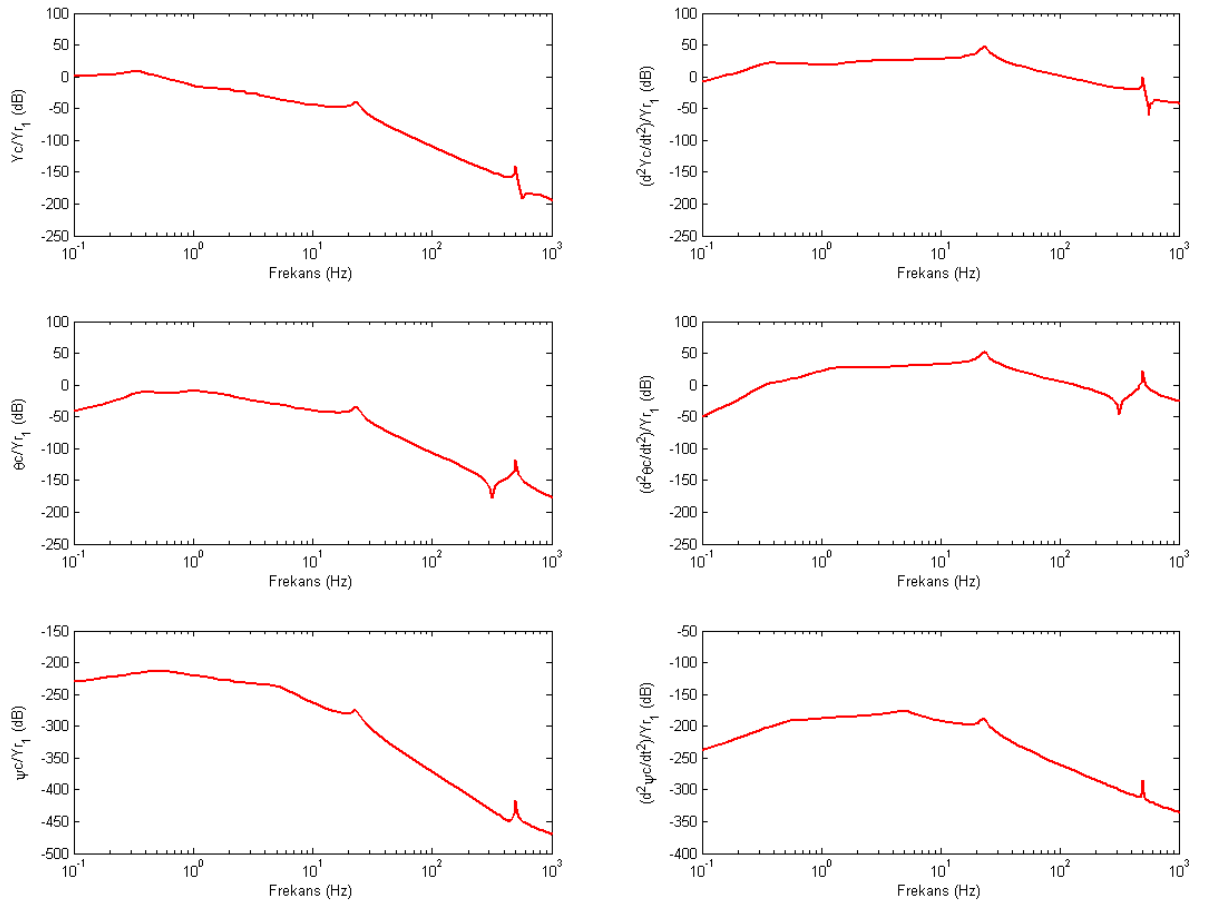
Şekil 5.47 Sünme faktörünün I.tekerlek–setinin açısal titreşimlerine etkileri

5.6 Kabin Titreşimlerinin Frekans Alanında Gözlemlenmesi

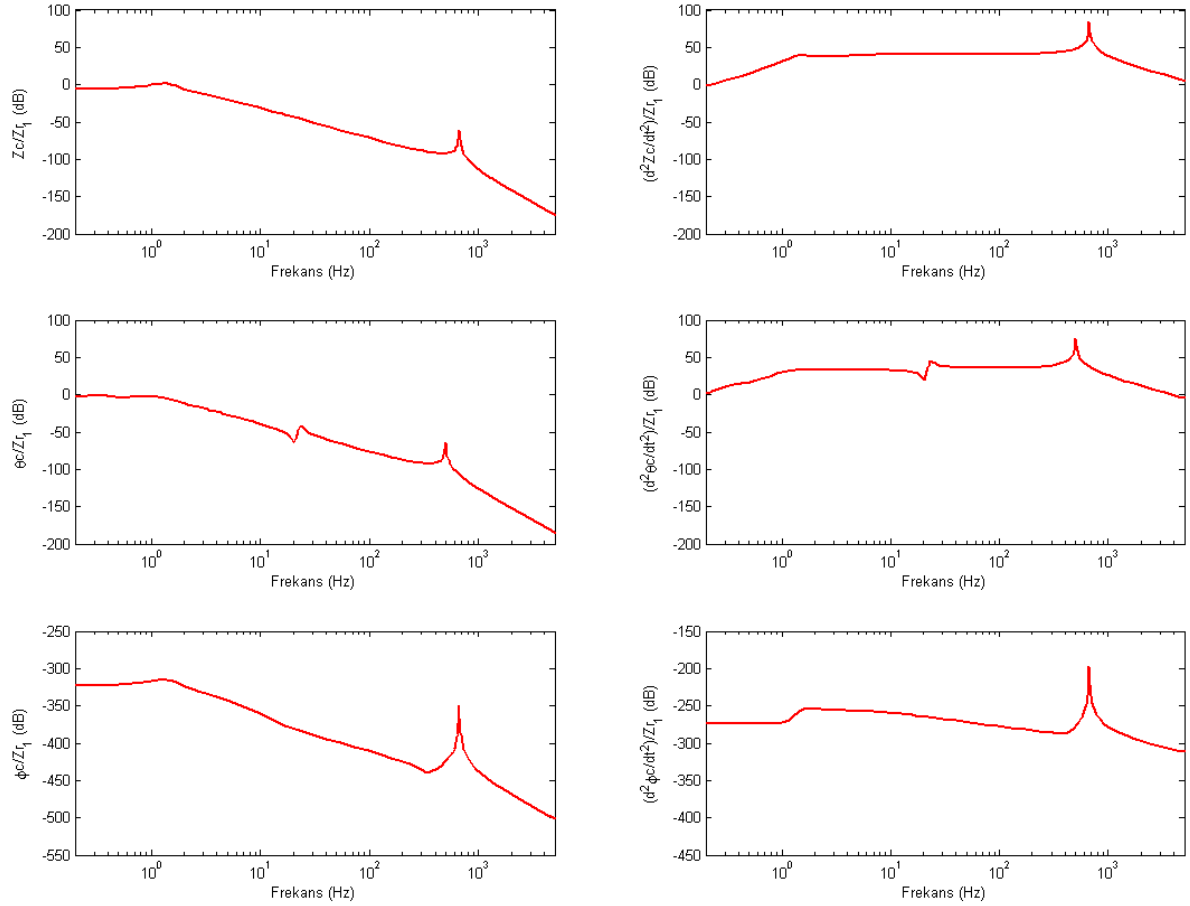
54 serbestlik dereceli lokomotif modelinin 54 adet doğal frekans değeri bulunmaktadır. Bu değerler; 0.2199, 0.3494, 0.4972, 1.1141, 1.1141, 1.1143, 1.1143, 1.1187, 1.1213, 1.1254, 1.1254, 1.1254, 1.1254, 1.1254, 1.2212, 1.2315, 1.2902, 1.3734, 1.3993, 1.6860, 4.3294, 4.3423, 4.3426, 4.4563, 4.4563, 4.4563, 4.4842, 4.5513, 4.7013, 5.2063, 5.2065, 5.2996, 7.2253, 7.2253, 8.2010, 23.3543, 23.3544, 23.3544, 23.3544, 23.3544, 23.3544, 499.5607, 499.5607, 499.5607, 499.5607, 499.5607, 499.5607, 665.8024, 665.8024, 665.8024, 665.8024 ve 665.8024 Hz'dir.

Şekil 5.48'de yanal doğrultuda ray girişi neticesinde kabin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları gösterilmiştir.

Şekil 5.49'da ise düşey doğrultuda ray girişi neticesinde kabin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları gösterilmiştir.



Şekil 5.48 Yanal ray düzgünlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları



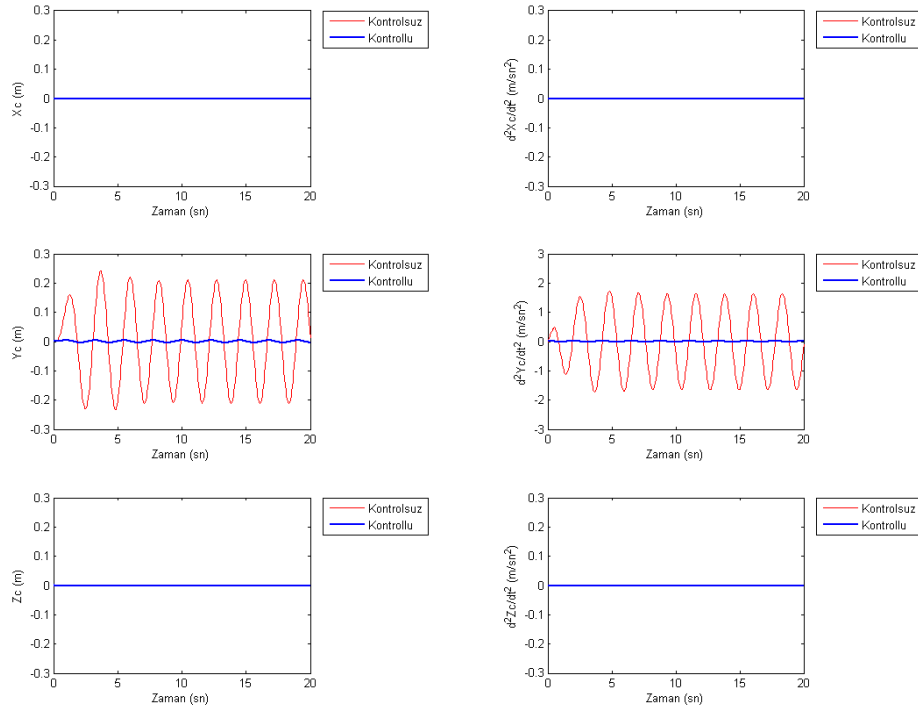
Şekil 5.49 Düşey ray düzgünlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları

5.7 Kabin Titreşimlerinin Aktif Kontrolü

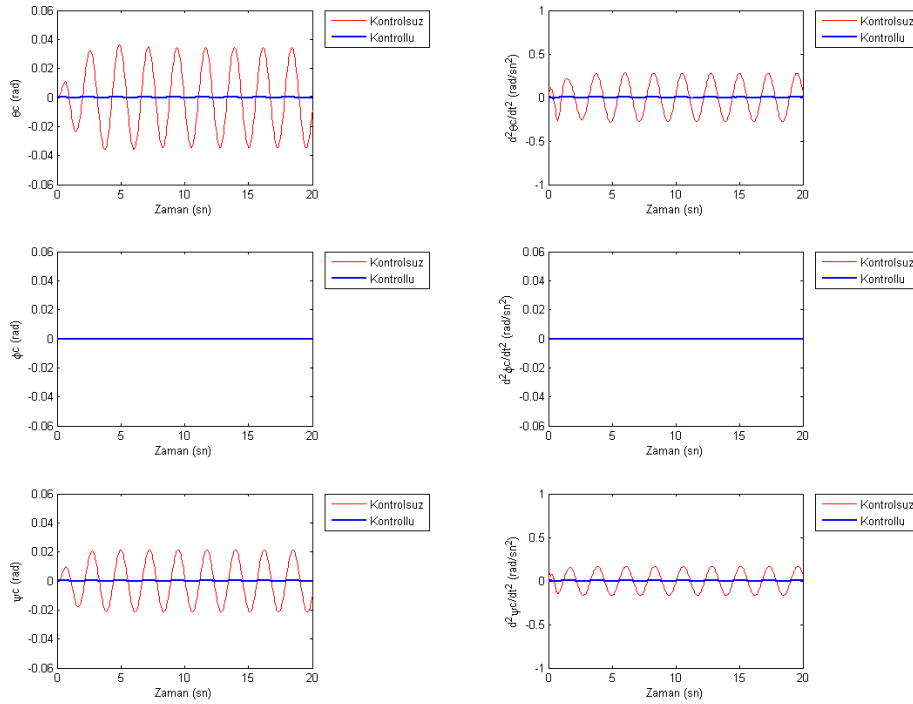
Bölüm 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'de dinamik sisteme, farklı yanal ve düşey ray düzgünlük fonksiyonları giriş olarak uygulanmıştır. Kabin, boji ve tekerlek–setlerinin tetiklenen serbestlik dereceleri gözlemlenmiştir. Oluşan titreşimlerin yer değiştirme ve ivmeleri zaman alanında değişim grafikleri çizdirilmiş ve dinamik sistemin doğru çalıştığı görülmüştür.

Bu bölümde ise farklı yanal ve düşey ray düzgünlük fonksiyonları neticesinde oluşan kabin titreşimlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin tasarlanan aktif titreşim kontrolcüsü ile minimize edilmeye çalışılmıştır. Kabinin zaman ve frekans alanlarında kontrollü ve kontrolsüz cevap grafikleri çizdirilmiştir. Gerekli olan kontrolcü kuvvetleri de ayrıca grafiklerde verilmiştir.

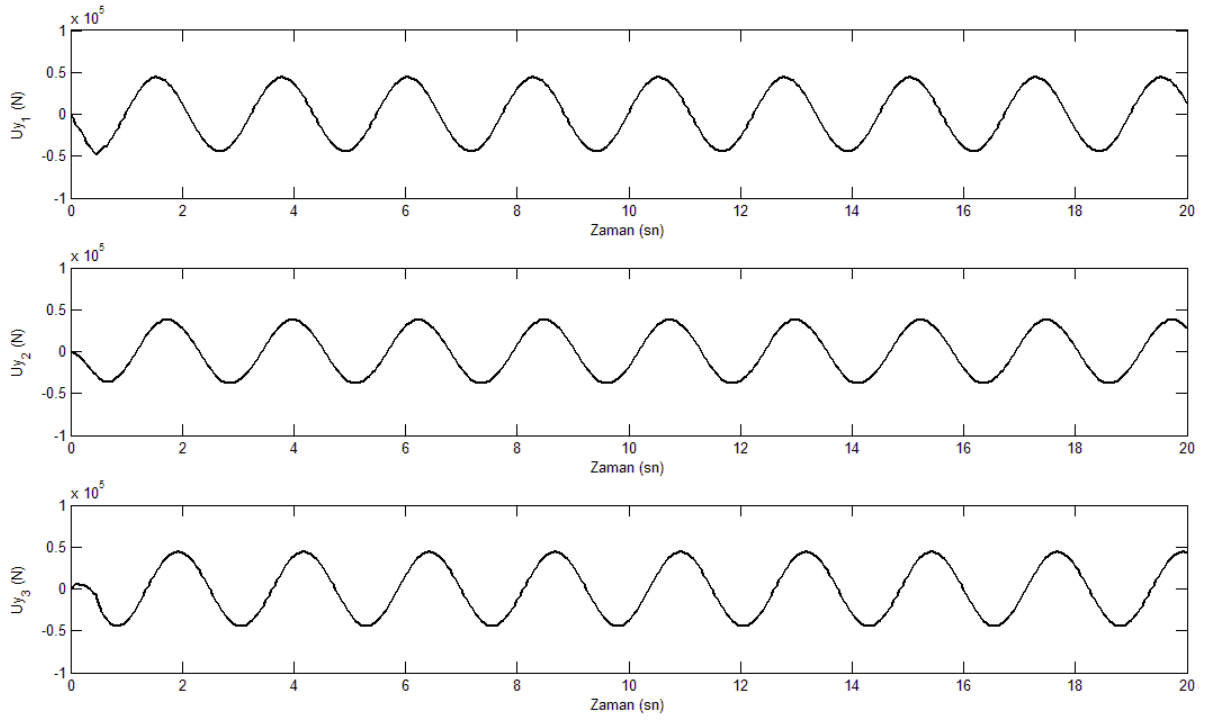
5.7.1 I.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü



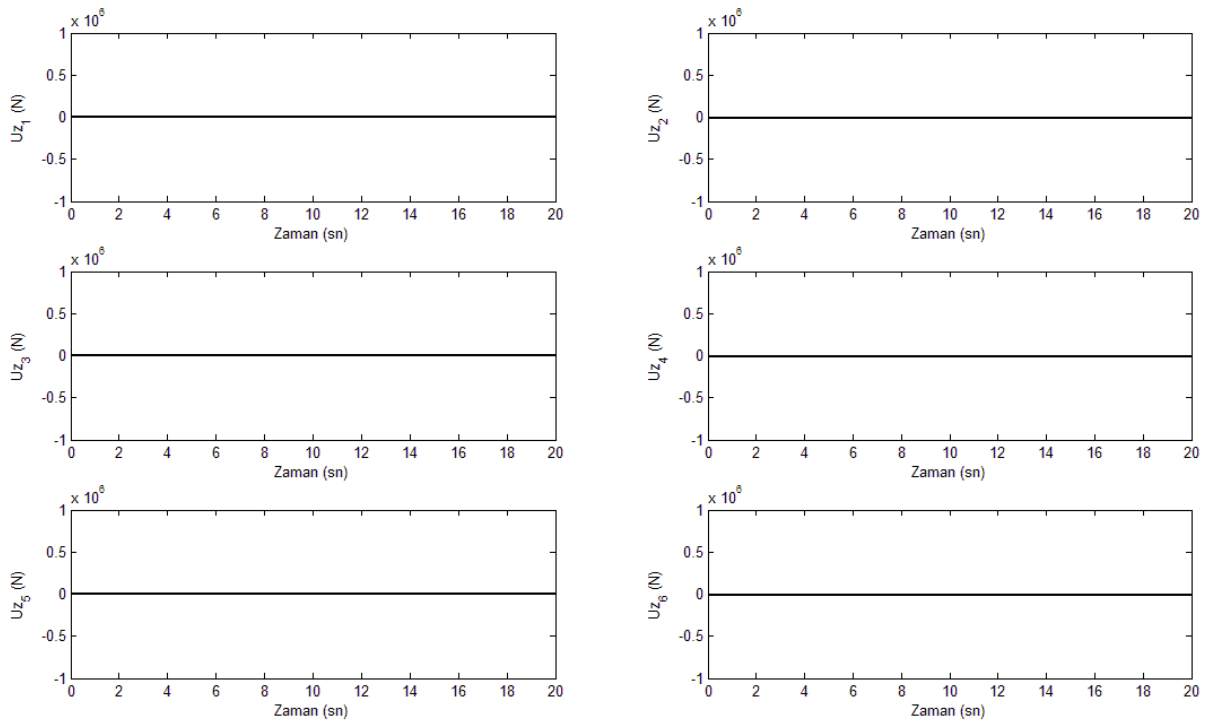
Şekil 5.50 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



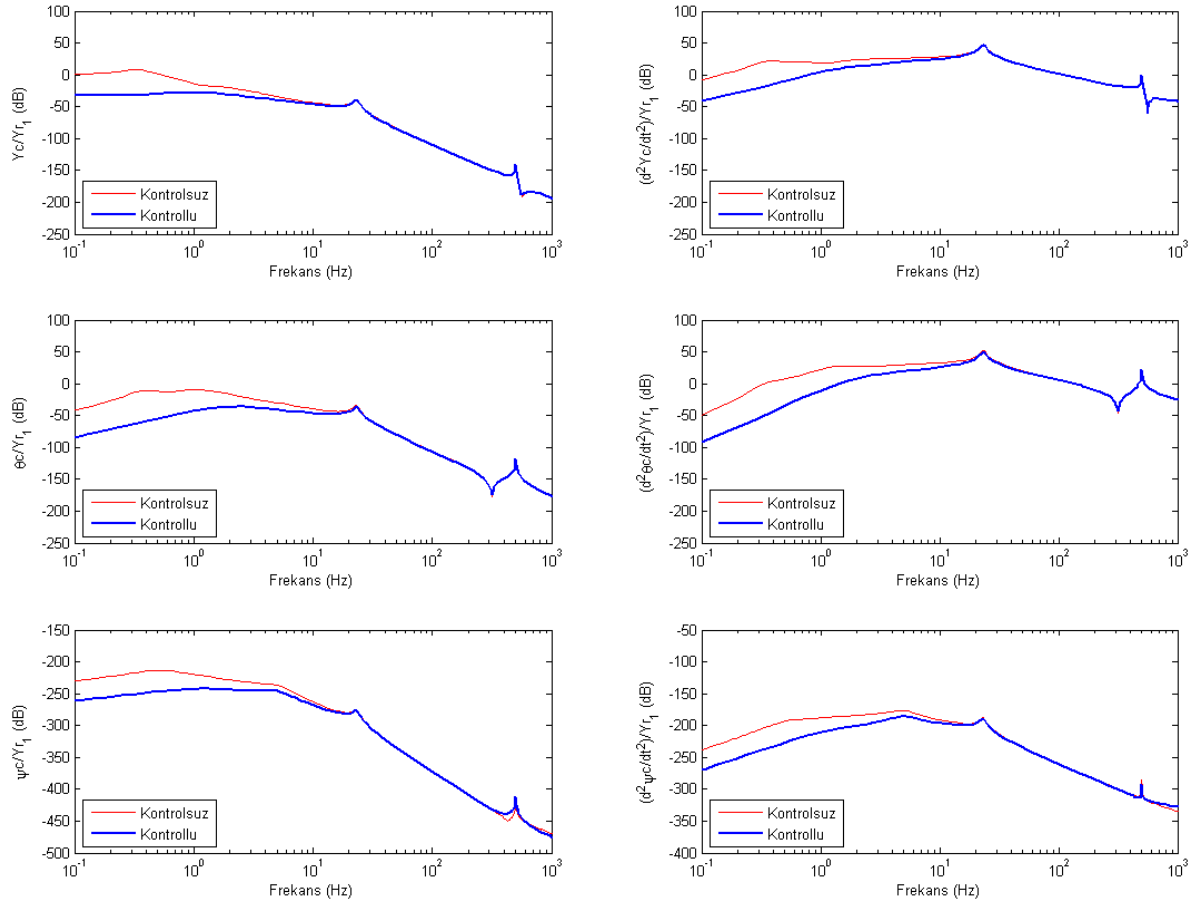
Şekil 5.51 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.52 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanıl aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

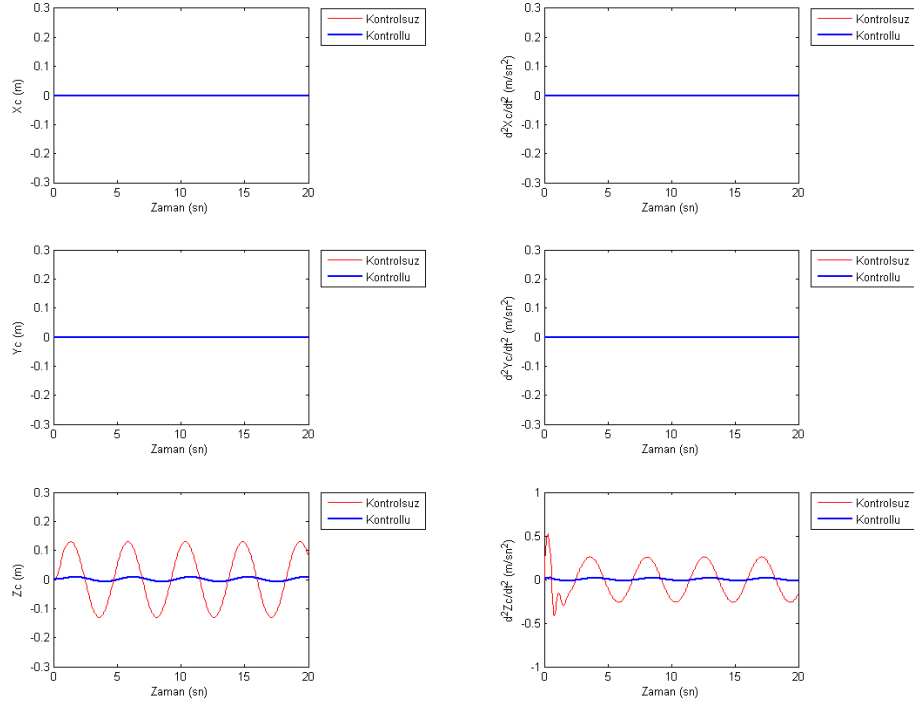


Şekil 5.53 I.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

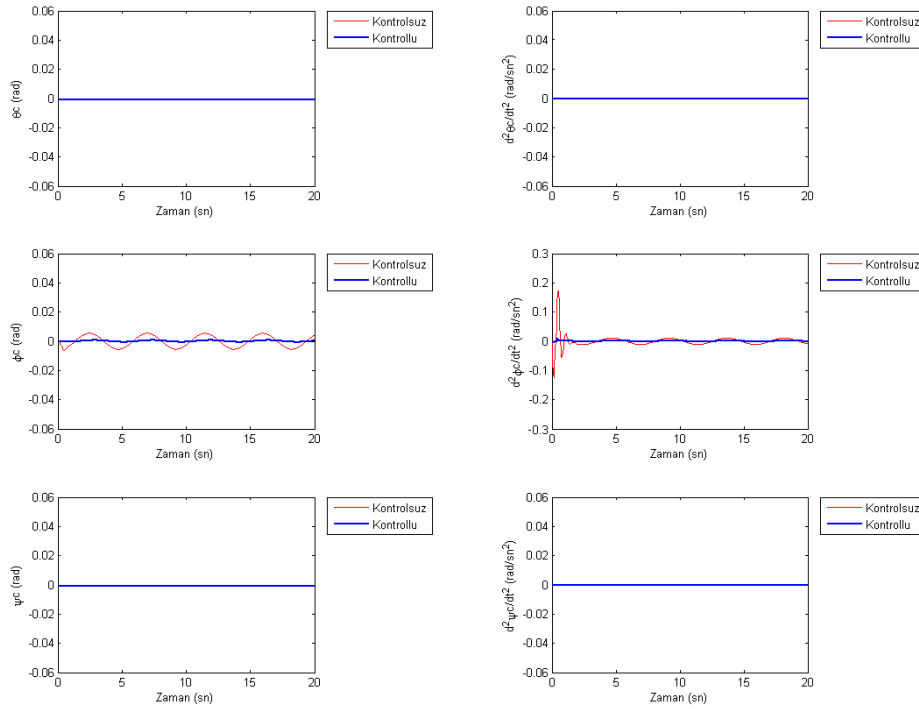


Şekil 5.54 Yanal ray düzgünsüzlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü yer değıştirme ve ivmelerinin frekans cevapları

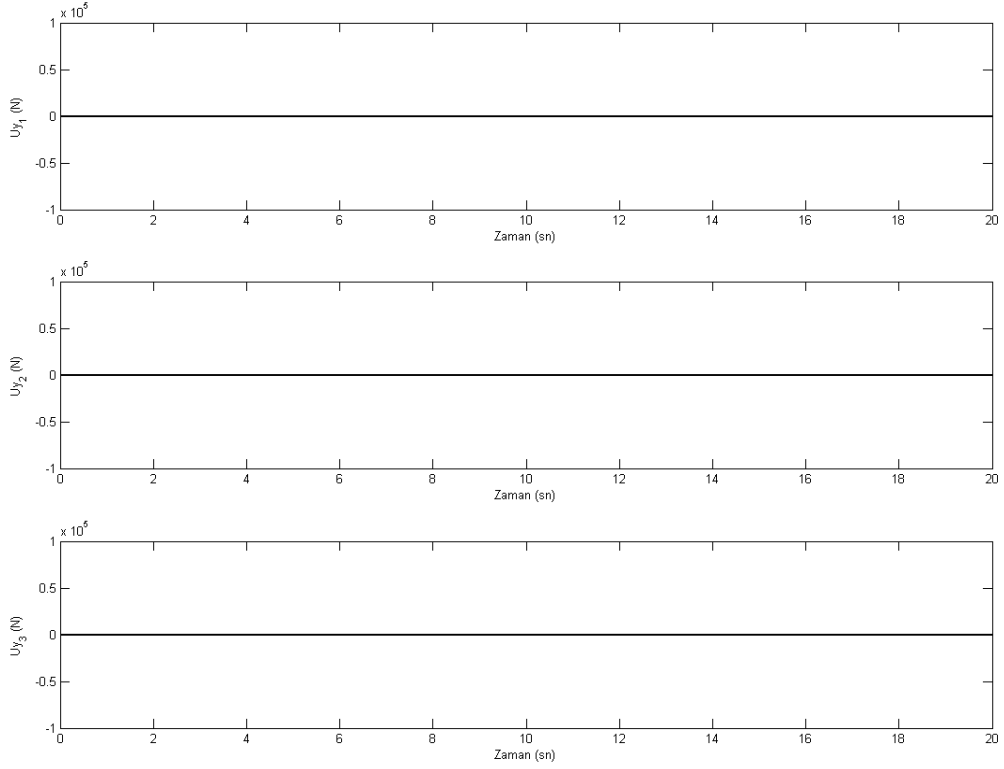
5.7.2 II.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü



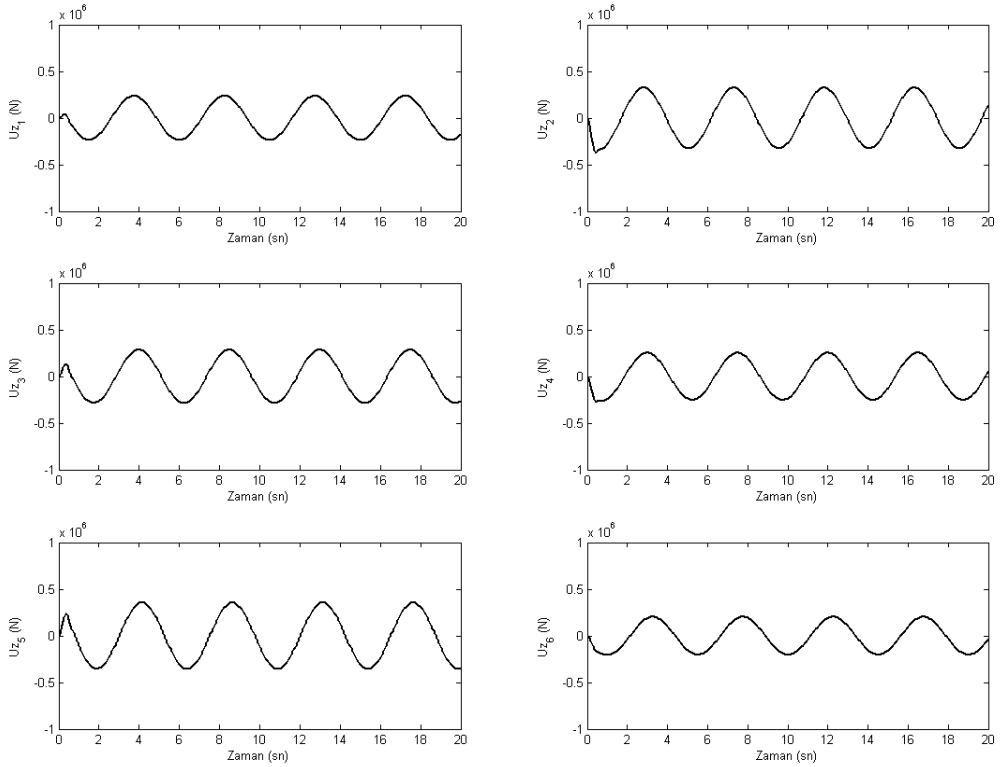
Şekil 5.55 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



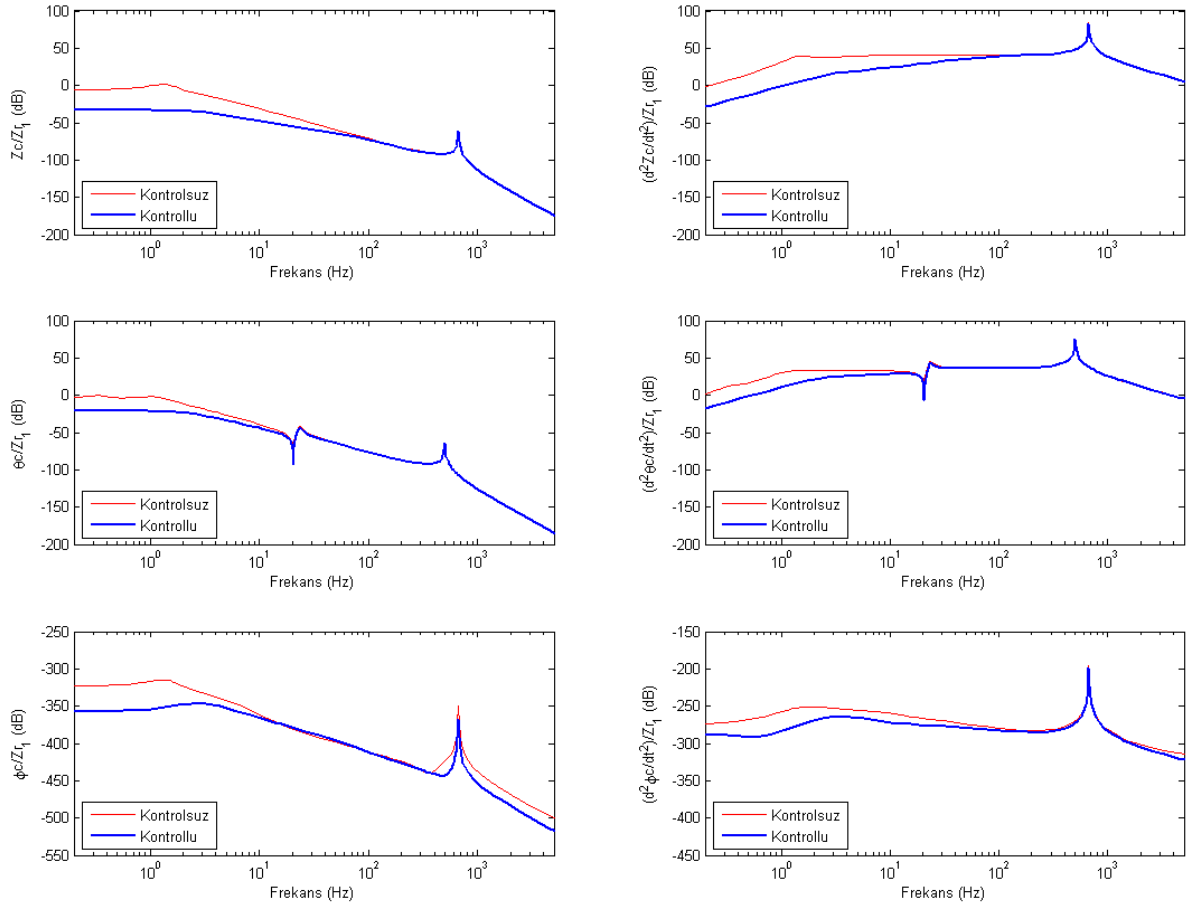
Şekil 5.56 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.57 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanıl aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

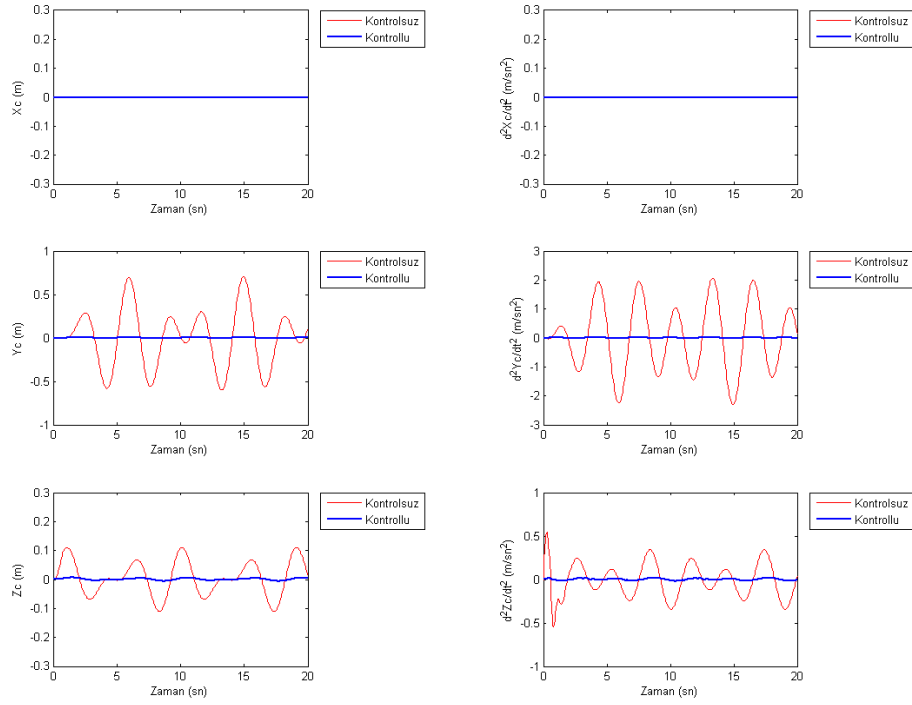


Şekil 5.58 II.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

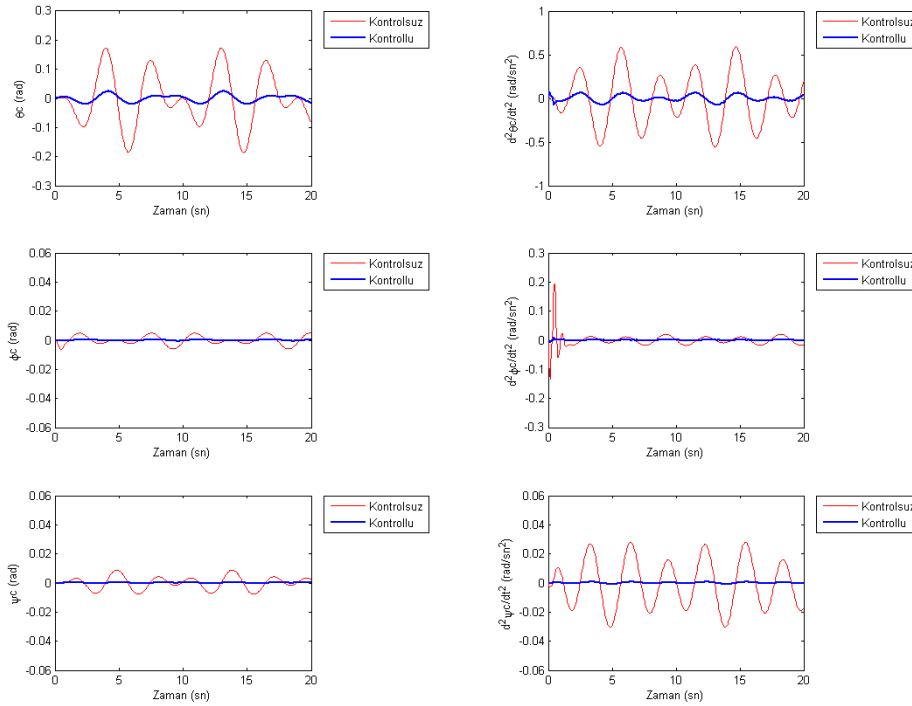


Şekil 5.59 Düşey ray düzgünlük fonksiyonu girilmesi ile kabinin titreşimlerinin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları

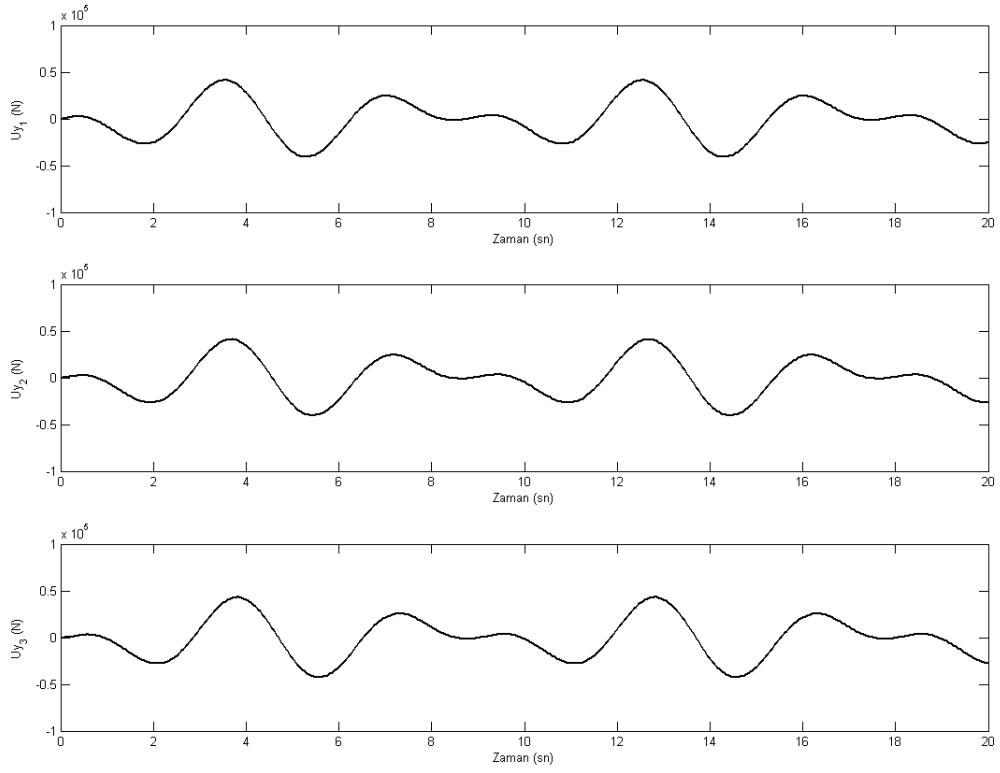
5.7.3 III.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü



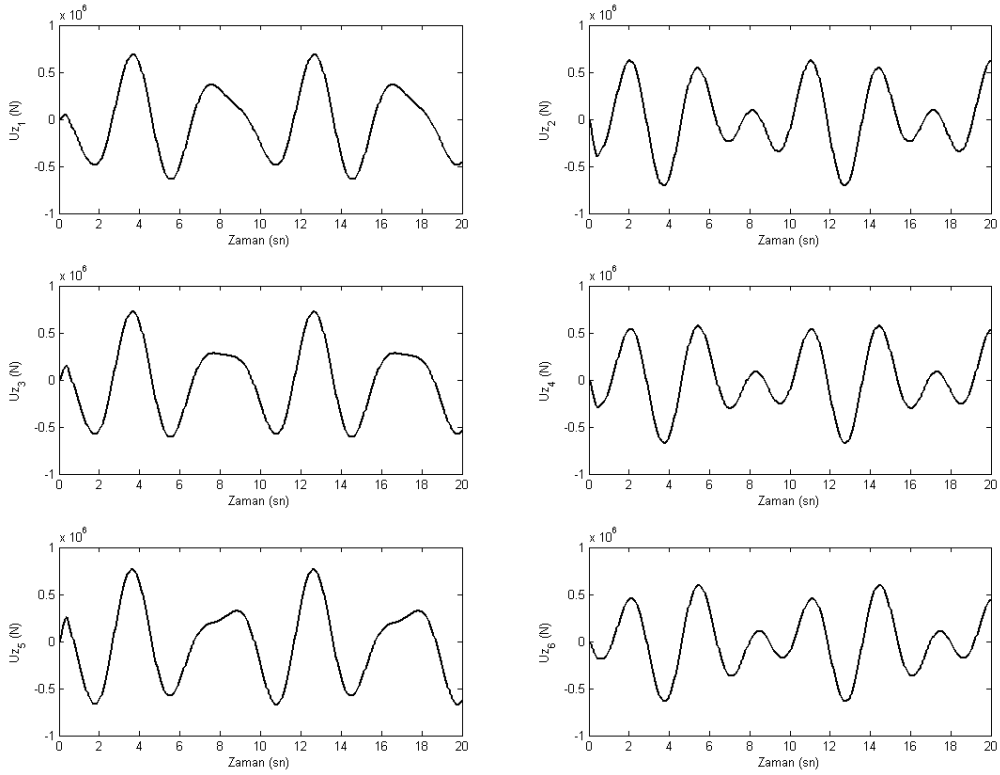
Şekil 5.60 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.61 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısıl titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri

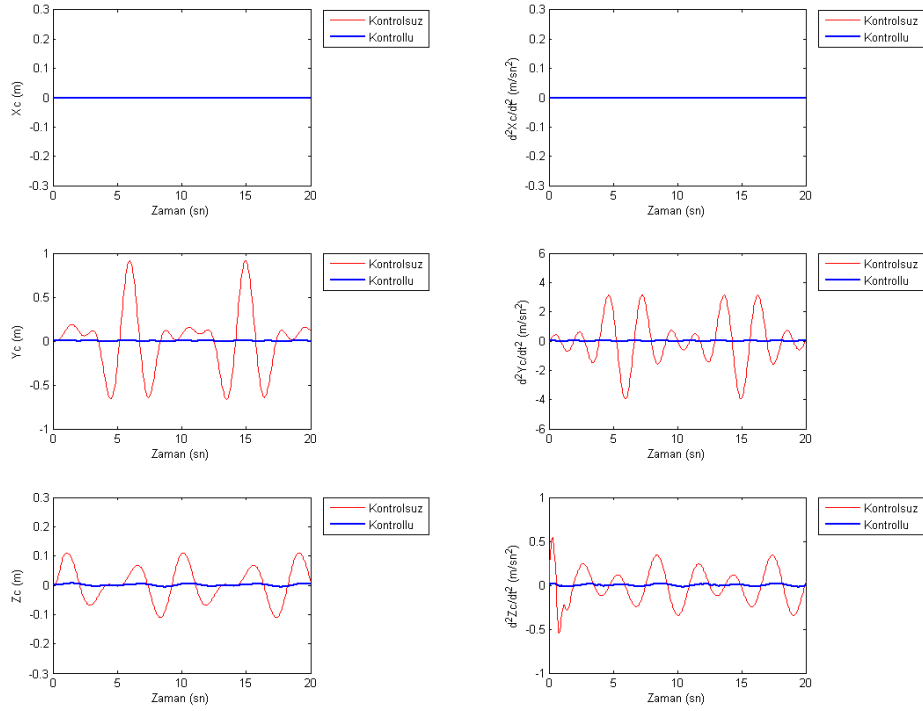


Şekil 5.62 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

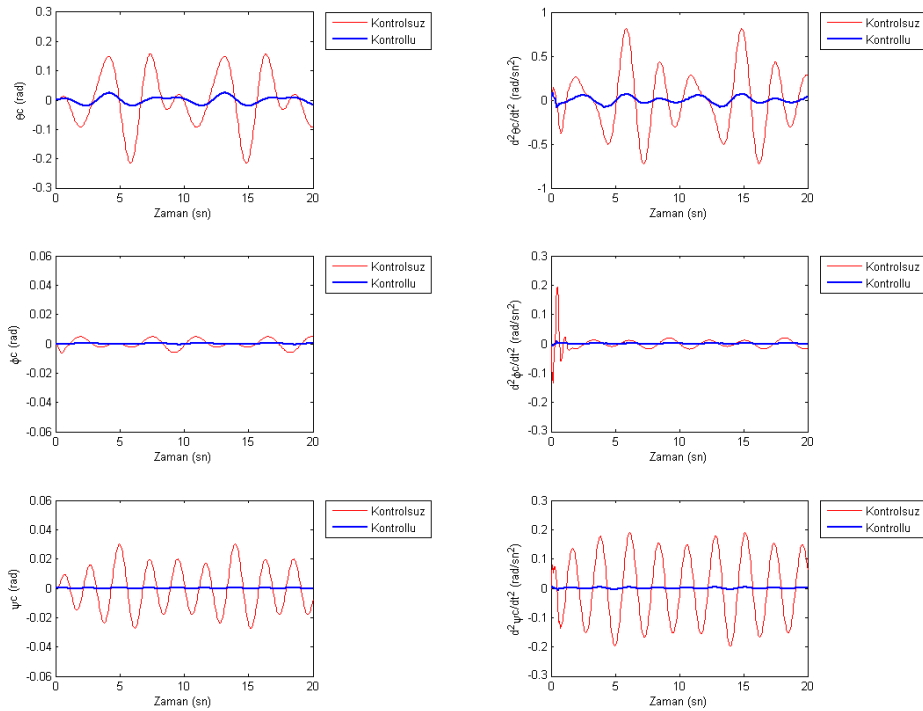


Şekil 5.63 III.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

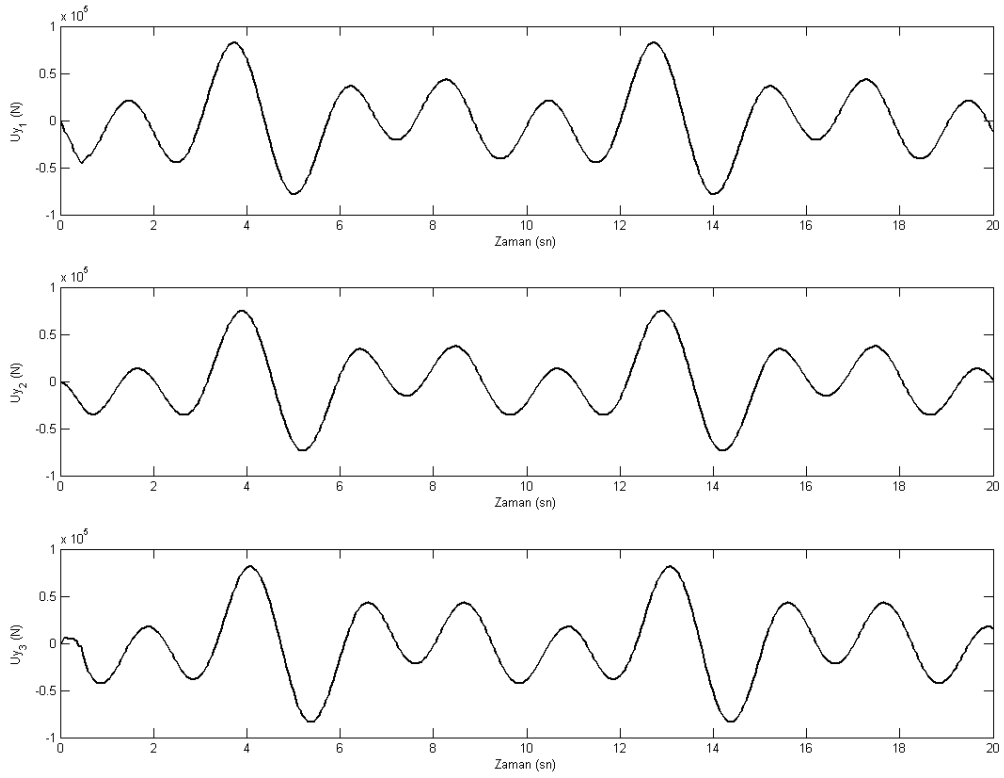
5.7.4 IV.Senaryoda Uygulanan Ray Düzgünsüzlük Fonksiyonu ile Kabinde Oluşan Titreşimlerin Aktif Kontrolü



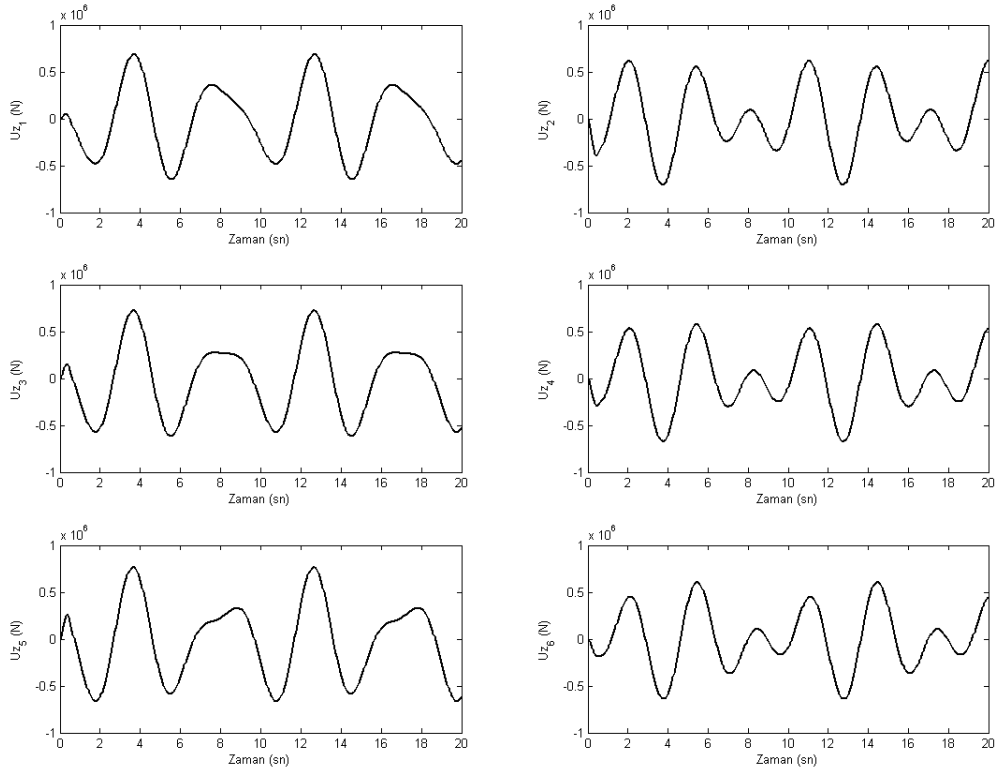
Şekil 5.64 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan doğrusal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.65 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünsüzlük fonksiyonu ile kabinde oluşan açısal titreşimlerin kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme ve ivmeleri



Şekil 5.66 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün yanal aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri



Şekil 5.67 IV.Senaryoda uygulanan ray düzgünlük fonksiyonu ile aktif kontrolcünün düşey aktüatörlerinde gerekli olan kontrol kuvvetleri

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikle, raylı taşımacılığın öneminden ve Türkiye'deki tarihçesinden bahsedilerek son yıllarda yapılmakta olan yeni projelere değinilmiştir. Daha sonra lokomotiflerin tarihsel gelişiminden ve lokomotif tiplerinden söz edilmiştir.

Daha sonra ise Tübitak–MAM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü'nde yürütülen TRENSİM projesi dahilinde Toshiba–E43000 elektrikli hat lokomotifinin genel özelliklerinden bahsedilerek lokomotif için dinamik analiz modeli kurulmuştur. 54 serbestlik dereceli tam taşıt modelinin her serbestlik derecesi için hareket denklemleri “Lagrange Denklemi” ile oluşturulmuştur. Çalışmada bahsi geçen 54 serbestlik dereceli lokomotif modeli, ileride yapılabilecek yeni çalışmalara ışık tutabilmesi açısından parametrik olarak oluşturulmuştur. Böylece oluşturulan modelin diğer lokomotiflerin analizleri için de esnek yapıda olması sağlanmıştır. Ayrıca lokomotifin seyir hızına etki eden faktörlerden söz edilerek boylamsal model kurulmuştur. Dinamik analiz modelinin kurulması ve bu modele ait simülasyonlar için Matlab–Simulink yazılımı kullanılmıştır.

Ray–tekerlek temas problemi, sünme faktörleri ve rayların elastikiyetleri konularında detaylı bilgi verilip gerekli sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Yanal ve düşey sonlu eleman analizleri neticesinde ray elemanının yanal ve düşey yönlerdeki yay katsayıları(Hertz–y ve Hertz–z) değerleri ortaya çıkartılmıştır.

Bölüm 5.1'de lokomotife sadece yanal doğrultuda ray düzgünsüzlük fonksiyonunu giriş olarak kabul eden I.Senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7'de görüldüğü üzere, 54 serbestlik derecesinden 24 tanesinin tetiklendiği gözlemlenmiştir.

Bölüm 5.2'de lokomotife sadece düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan aynı düzgünsüzlük fonksiyonunu giriş olarak kabul eden II.Senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.17'de görüldüğü üzere, 54 serbestlik derecesinden 14 tanesinin tetiklendiği gözlemlenmiştir.

Bölüm 5.3'de lokomotife sadece düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan farklı düzgünsüzlük fonksiyonunu giriş olarak kabul eden III.Senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.27'de görüldüğü üzere, 54 serbestlik derecesinden 44 tanesinin tetiklendiği gözlemlenmiştir. Sağ ve sol ray için farklı ray düzgünsüzlüğü, aynı zamanda kabinin yanal hareketini de tetiklemektedir.

Bölüm 5.4’de lokomotif hem yanal doğrultuda hem de düşey doğrultuda sağ ve sol raylardan farklı düzgünlük fonksiyonunu giriş olarak kabul eden IV.Senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 ve 5.36’da görüldüğü üzere, 54 serbestlik derecesinden yine 44 tanesinin tetiklendiği gözlemlenmiştir. Bu senaryoda, III.Senaryo’dan farklı olarak yanal giriş de olduğundan kabinin yanal titreşim hareketinin genliğinde artış gözlemlenmiştir.

Şekil 5.8, 5.10, 5.18, 5.20, 5.28, 5.29, 5.30, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41’de görüldüğü üzere tekerlek–setleri, bojiler ve kabinin titreşim hareketlerinde, faz farkı ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi I., II. ve III. bojilerin, I., ...,VI. tekerlek-setlerinin ve kabinin, ağırlık merkezleri arasındaki mesafe farkından kaynaklanan zaman gecikmesidir. Buradan da anlaşıldığı üzere oluşturulan dinamik model sorunsuz çalışmaktadır.

Bölüm 5.5’te, IV.Senaryo’ya ayrıca sünme etkisi dahil edilmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.42, 5.44 ve 5.46’da görüldüğü üzere, boylamsal serbestlik dereceleri de tetiklenmiştir. Boylamsal hareketlerin de tetiklenmesi ile tam taşıt modelinin 54 adet hareket denkleminin hepsinin çalıştığı gözlemlenmiştir. Önceki senaryolarda boylamsal doğrultuda ray düzgünlüğü ihmal edildiğinden, boylamsal hareket gözlemlenmemiştir, fakat tekerlek–setinin boylamsal denklemine dahil olan sünme ifadesi (3.19) neticesinde sistemin boylamsal yöndeki titreşim hareketleri de tetiklenmektedir.

Bölüm 5.6’da 54 serbestlik dereceli lokomotif modelinin doğal frekans değerleri, sistemin (54x54 boyutlu) [K] ve [M] matrisleri bulunarak, hesap edilmiştir. Şekil 5.48 ve 5.49’da görüldüğü üzere, Matlab–Simulink yazılımı yardımı ile de frekans cevapları ayrıca elde edilmiştir. Matlab–Simulink yazılımı yardımı ile elde edilen frekans cevaplarının matris yöntemi ile bulunan doğal frekans değerleri ile örtüştüğü görülmüştür. Yapılan frekans analizleri sonucundan kabinin doğal frekans değerlerinin 1Hz civarında olduğu görülmüştür. Bojilerin doğal frekans değerlerinin ise 1–4 Hz civarında olduğu ve tekerlek–setlerine ait doğal frekans değerlerinin 4–665 Hz civarında olduğu görülmüştür. Tekerlek–setlerine ait doğal frekans değerlerinin bazılarının çok yüksek çıkmasının, ray elemanının yanal ve düşey yöndeki yay katsayılarının (Hertz–y ve Hertz–z) büyüklüğünden kaynaklandığı görülmüştür.

Bölüm 5.7’de, bölüm 4.3’de tasarlanan aktif titreşim kontrolcülerini kullanılarak kabinin titreşim hareketlerini minimize edilmeye çalışılmıştır. Aktif titreşim kontrolü için bulanık mantık kontrolcü algoritmasının tasarımında yine Matlab–Simulink yazılımının modülü olan “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılmıştır. Kabin hareketlerini bastırmaya çalışan kontrolcüler

boji ile kabin arasına (3 adet yanal ve 6 adet düşey) yerleştirilmiş bu sayede kabin ile doğrudan etkileşim içinde olmaları sağlanmıştır.

Daha önceki dört senaryo için, kabinin titreşim hareketlerinin yer değiştirme ve ivmeleri zaman alanında kontrolcülü ve kontrolcüsüz olarak karşılaştırılmıştır. Kontrolcünün performansını anlayabilmek için lokomotif kabinini titreşim hareketi yapmaya en çok zorlayan IV. Senaryo'daki kontrollü zaman cevaplarını kontrolcüsüz durum ile karşılaştırmamız yeterlidir. Şekil 5.64 ve 5.65'de verilen kabinin titreşim hareketlerinin yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevaplarına daha detaylı incelediğimizde; kabinin yanal yer değiştirmesi 0.91m 'den $8 \times 10^{-3}\text{m}$ 'ye, yanal ivmesi 3.95m/sn^2 'den $4.45 \times 10^{-2}\text{m/sn}^2$ 'ye, düşey yer değiştirmesi 0.11m 'den $5.85 \times 10^{-3}\text{m}$ 'ye, düşey ivmesi 0.34m/sn^2 'den $2.12 \times 10^{-2}\text{m/sn}^2$ 'ye, yalpalama açısız yer değiştirmesi 0.21rad 'dan $2.43 \times 10^{-2}\text{rad}$ 'a, yalpalama açısız ivmesi 0.81rad/sn^2 'den $7.21 \times 10^{-2}\text{rad/sn}^2$ 'ye, kafa vurma açısız yer değiştirmesi $5.9 \times 10^{-3}\text{rad}$ 'dan $5.2 \times 10^{-4}\text{rad}$ 'a, kafa vurma açısız ivmesi $2.36 \times 10^{-2}\text{rad/sn}^2$ 'den $2.57 \times 10^{-3}\text{rad/sn}^2$ 'ye, yanal sapma açısız yer değiştirmesi $3.61 \times 10^{-2}\text{rad}$ 'dan $6.57 \times 10^{-4}\text{rad}$ 'a ve yanal sapma açısız ivmesi de 0.19rad 'dan $2.67 \times 10^{-3}\text{rad}$ 'a bastırıldığı görülmüştür.

Şekil 5.54 ve 5.59'da görüldüğü üzere, lokomotif yanal veya düşey doğrultularda ray düzgünlük fonksiyonları etkilediğinde kabin gövdesinde oluşan doğrusal ve açısız titreşim hareketlerinin yer değiştirme ve ivmeleri frekans bazında da başarı ile bastırılmıştır. Aktif titreşim kontrolcüsünün başarılı işleyişi ile sürüş konforu artmış ve ray düzgünlüklerinden kaynaklanan rahatsız edici etkiler (özellikle ivmeler) olabildiğince azaltılmıştır.

Dört değişik ray düzgünlüğü senaryosunda kabinin titreşim hareketlerini minimize etmek için yanal ve düşey kontrolcü aktüatörlerinde gerekli olan kuvvetler her senaryo sonunda verilmiştir. Kabinin titreşim hareketlerinin yer değiştirme ve ivme değerlerindeki bastırma oranları azaltılarak gerekli olan kontrolcü kuvvetleri de azaltılabilir.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçların, akademik çalışmalarda kullanılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

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*, İ.T.Ü., 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", *Strojnski 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 Tez, Y.T.Ü., İstanbul.

Sezer, S. (2007), *Titreşim Analiz Metotları Ders Notları*, Y.T.Ü., İstanbul.

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 Tez, Y.T.Ü., 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.

INTERNET KAYNAKLARI

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

[2] <http://e40003.me.metu.edu.tr/43000/>

[3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Locomotive>

[4] http://www.fresno.k12.ca.us/divdept/sscience/history/industrial_revolution.htm

[5] http://matthewpippin.com/images/E_Images/Education_LWW/BuildingPyramids6LWW.jpg

[6] <http://www.scalefour.org/resources/images/uic60.gif>

[7] <http://schools-wikipedia.org/images/301/30137.jpg>

[8] <http://www.tcdd.gov.tr/genel/harita.jpg>

[9] <http://www.tcdd.gov.tr/genel/marmaray/marmarayharita.jpg>

[10] http://www.tribology-abc.com/calculators/e2_2.htm

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

[12] <http://www.ulastirmamemursen.org/v5/guncel/59-hizli-tren.html>

[13] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/TGV_World_Speed_Record_574_km_per_hour.jpg

[14] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9f/JR-Maglev-MLX01-2.jpg/180px-JR-Maglev-MLX01-2.jpg>

EKLER

- Ek 1 Lokomotif dinamik analiz modelinde kullanılan parametreler ve bulanık mantık kontrolcüsünün ölçekleme çarpanları
- Ek 2 Sonlu eleman analizlerinde kullanılan UIC-60 rayının detay resmi

Ek 1. Lokomotif dinamik analiz modelinde kullanılan 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, kütleli 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 düzgünlük fonksiyonları parametreleri ve diğer parametreler aşağıda verilmiştir.

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

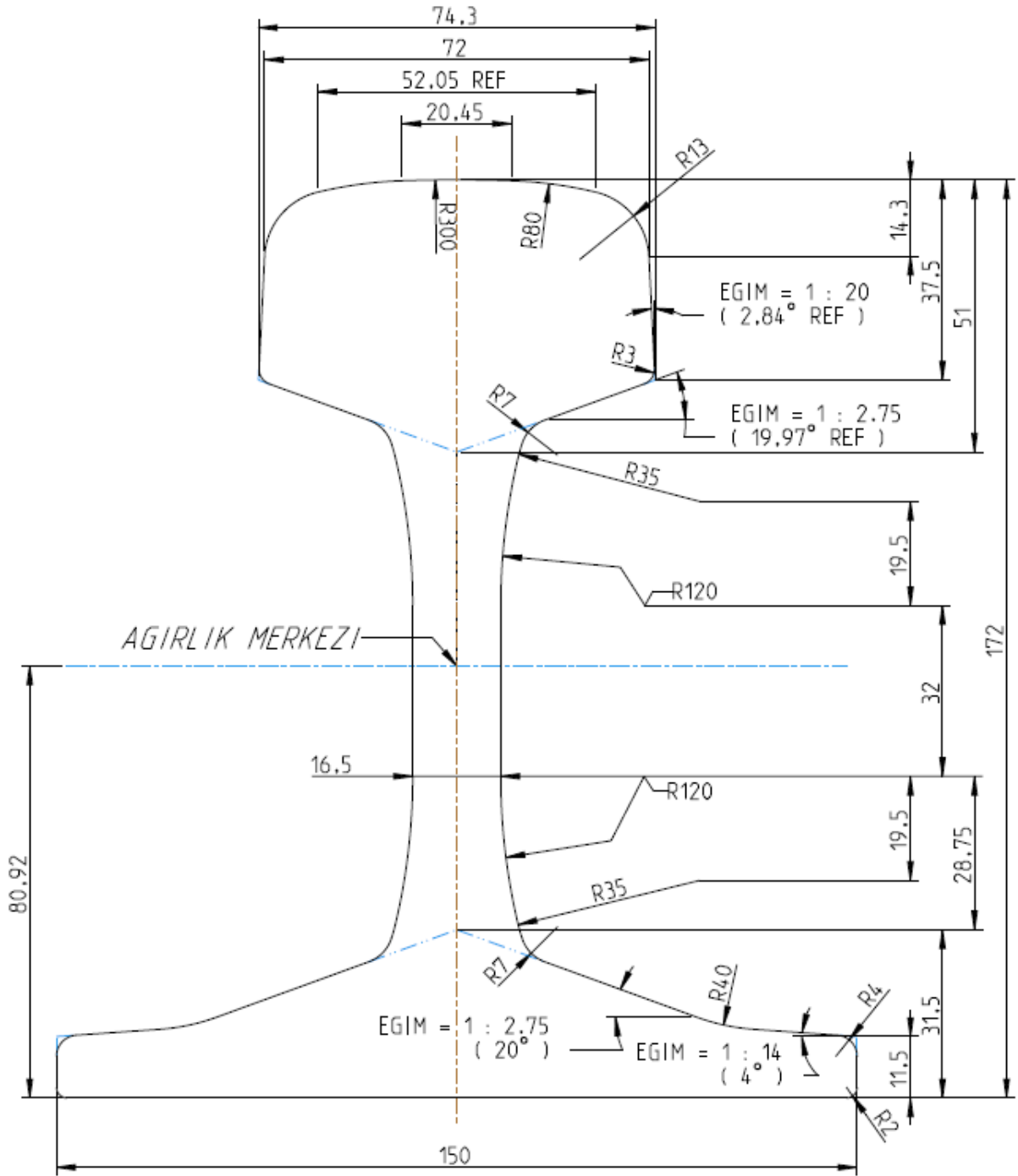
Bulanık Mantık Yanal Kontrolcüsüne ait ölçekleme çarpanları:

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

Bulanık Mantık Düşey Kontrolcüsüne ait ölçekleme çarpanları:

$$G_{e_z} = 0.1845 \quad G_{e_z} = 0.45 \quad G_{u_z} = 50000$$

Ek 2. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan UIC-60 rayının detay resmi



UIC-60 (HADDELENMİS, DÜZ TABANLI KESİT)

AGIRLIK = 60.2 kg/m

KESİT ALANI = 7670 mm²

Şekil Ek 2.1 UIC-60 demiryolu rayı detay resmi [6]

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 24.03.1984

Doğum yeri İstanbul

Lise 1999-2002 İstanbul Kartal Köy Hizmetleri Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2006 Yıldız Üniversitesi Makine Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü,

Yüksek Lisans 2007-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve
Kontrol Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2006-Devam ediyor OMCO İstanbul Kalıp San. ve Tic. A.Ş.,
Kalıp Tasarım Mühendisi