

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK HIZLI TRENİN RÜZGÂR VE ESNEK ZEMİN ETKİSİ
ALTINDAKİ TİTREŞİMLERİNİN YAPAY ZEKÂ
ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Mustafa EROĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

MAYIS 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK HIZLI TRENİN RÜZGÂR VE ESNEK ZEMİN ETKİSİ
ALTINDAKİ TİTREŞİMLERİNİN YAPAY ZEKÂ
ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Mustafa EROĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep KOZAN

MAYIS 2023

Mustafa Eroğlu tarafından hazırlanan “Yüksek Hızlı Trenin Rüzgâr Ve Esnek Zemin Etkisi Altındaki Titreşimlerinin Yapay Zekâ Algoritmaları İle Aktif Kontrolü” adlı tez çalışması 23.05.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim **Dalı** **Makina Tasarım ve İmalat Bilim** Dalı’nda **Doktora tezi** olara kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “YÜKSEK HIZLI TRENİN RÜZGÂR VE ESNEK ZEMİN ETKİSİ ALTINDAKİ TİTREŞİMLERİNİN YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROLÜ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(23/05/2023)

Mustafa EROĞLU





Eşime ve çocuklarıma



TEŞEKKÜR

Tez sürecinde ve tüm süreçlerde bana desteklerini esirgemeyen ve her zaman yardımcı olan değerli hocam tez danışmanım Prof. Dr. Recep KOZAN'a teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimimde danışmanım olan ayrıca doktora sürecinde de her zaman yardımlarını eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. İsmail ESEN'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmamın zorlu süreçlerini kolaylaştıran ve bu tez çalışmasında geliştirilen simülasyon yazılım programında önemli katkıları bulunan değerli hocam Doç. Dr. Mehmet Akif KOÇ'a teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunan ve tez çalışması esnasında eksik noktaları belirleyerek yardımcı olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL'a teşekkür ederim.

2211-C Yurt içi öncelikli alanlar doktora burs programı kapsamında beni destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ve son olarak anneme, babama ve ayrıca sevgili eşim Rabia EROĞLU ile oğlum Muhammed Enes EROĞLU'ya teşekkür ederim.

Mustafa EROĞLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxvii
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. MATEMATİK MODELLEME	15
3.1. Tren Köprü Modeli.....	15
3.1.1. Hareketli kuvvet modeli.....	16
3.1.2. Hareketli kütle modeli.....	17
3.1.3. Hareketli yaylı kütle modeli.....	17
3.1.4. Tren köprü etkileşim modeli	17
3.2. Tren Track Köprü Modeli	18
3.2.1. Tren modeli	18
3.2.2. Track modeli	22
3.2.3. Köprü (Esnek zemin) modeli	22
3.3. TTKE Modelinin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	24
3.3.1. Trenin hareket denklemi	24
3.3.2. Track-köprü sisteminin hareket denklemi.....	32
3.4. Çapraz Rüzgâr Modeli	35
3.5. Hareket Denklemlerinin Çözümü.....	38
4. SAYISAL DOĞRULAMA	43
5. ANALİZ SONUÇLARI	47
5.1. TKE Sisteminin Analizi	48
5.1.1. Köprü mod sayısının tren dinamiğine etkisi	48
5.1.2. Çözme adımının etkisi	51
5.1.3. Sabit tren hızının etkisi	54
5.1.4. Vagon kütlelerinin etkisi.....	56
5.1.5. Tren hızının TTKE sisteminin dinamik cevaplarına etkisi	60
5.1.6. Köprü sönümünün etkisi	65
5.1.7. Köprü uzunluğunun tren dinamiğine etkisi.....	65
5.1.8. Temas kuvvetlerinin analizi	69
5.2. TTKE Sisteminin Analizi.....	74
5.2.1. TTKE sisteminin akış şeması.....	74

5.2.2. TKE ve TTKE modellerinin karşılaştırılması	76
5.2.3. Track parametrelerinin TTKE modelinin dinamik cevaplarına etkisi	87
5.2.4. Çoklu vagon geçişlerinin TTKE modeline etkisinin incelenmesi.....	89
5.3. Rüzgâr Analizi Sonuçları	92
6. YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROL UYGULAMASI	97
6.1. PID Kontrolcü	98
6.2. Kendinden Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolcü	99
6.3. Kayan Kipli Kontrol	102
6.4. Yapay Zekâ Destekli Aktif Titreşim Kontrolcü Sonuçları.....	104
6.4.1. Sabit tren hızı ve değişken vagon kütlelerinin zaman analizleri.....	104
6.4.2. Tren hızının etkisinin incelenmesi	110
6.4.3. Köprü uzunluğunun etkisi	113
6.4.4. Rüzgâr ve aktif kontrolcü sonuçları	115
7. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	123
KAYNAKLAR.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	141

KISALTMALAR

B	: Büyük
ÇB	: Çok büyük
ÇK	: Çok küçük
DBK	: Dinamik büyütme katsayısı
FEM	: Finite element method
K	: Küçük
KKK	: Kayan kipli kontrol
KUBPID	: Kendinden uyarlamalı bulanık Proportional Integral Derivative
NB	: Negatif büyük
NK	: Kayan kipli kontrol
OB	: Orta büyük
OK	: Kayan kipli kontrol
PB	: Pozitif büyük
PID	: Proportional Integral Derivative
PK	: Kayan kipli kontrol
RMS	: Root mean square
S	: Sıfır
TKE	: Tren-köprü etkileşimi
TTKE	: Tren-track-köprü etkileşimi
TTKES	: Tren-track-köprü etkileşimi sistemi



SİMGELER

m_c	: Vagon kütlesi
m_{b1}	: Ön bojinin kütlesi
m_{b2}	: Arka bojinin kütlesi
m_w	: Teker kütlesi
I_{cz}	: Vagonun yunuslama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{cx}	: Vagonun yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{cy}	: Vagonun yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{bz}	: Bojilerin yunuslama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{bx}	: Bojilerin yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{by}	: Bojilerin yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{wx}	: Tekerlerin yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
I_{wy}	: Tekerlerin yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti
k_{by}	: İkincil süspansiyon sisteminin dikey rijitlik katsayısı
k_{bz}	: İkincil süspansiyon sisteminin yanal rijitlik katsayısı
k_{bx}	: İkincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına rijitlik katsayısı
k_{wy}	: Birincil süspansiyon sisteminin dikey rijitlik katsayısı
k_{wx}	: Birincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına rijitlik katsayısı
c_{by}	: İkincil süspansiyon sisteminin dikey sönüm katsayısı
c_{bz}	: İkincil süspansiyon sisteminin yanal sönüm katsayısı
c_{bx}	: İkincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına sönüm katsayısı
c_{wy}	: Birincil süspansiyon sisteminin dikey sönüm katsayısı
c_{wz}	: Birincil süspansiyon sisteminin yanal sönüm katsayısı
c_{wx}	: Birincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına sönüm katsayısı
L	: Köprü uzunluğu
l_b	: Vagon ve boji merkezleri arası uzunlamasına mesafe
l_w mesafe	: Boji ve birincil dikey süspansiyon sistemi arasındaki uzunlamasına mesafe
h_w	: Boji ve birincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe
h_c	: Vagon ve ikincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe

h_b	: Boji ve ikincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe
a	: Vagon merkezinin ikincil süspansiyon sistemine olan yanal uzaklığı
l_r	: Tekerin rayla temas noktasının tekerseti merkezine olan uzaklığı
d	: Birincil süspansiyon sisteminin vagon merkezine olan uzaklığı
f	: Boji merkezinin uç noktasına olan uzaklığı
s	: Tekerseti ve uzunlamasına ikincil süspansiyon arasındaki yanal mesafe
e	: Tekerseti ve uzunlamasına birincil süspansiyon arasındaki yanal mesafe
v	: Tren hızı
k_{pe}	: Elastik pedin rijitlik katsayısı
k_b	: Balastın rijitlik katsayısı
k_f	: Balast-köprü arasının rijitlik katsayısı
c_{pe}	: Elastik pedin sönümü
c_b	: Balastın sönümü
c_f	: Balast-köprü arasının sönüm katsayısı
E_r	: Ray kirişinin elastikiyet modülü
I_r	: Ray kirişinin alan atalet momenti
w_r	: Ray kirişinin dikey yerdeğiştirmesi
μ_r	: Ray kirişinin birim uzunluğunun kütlesi
F_r	: Ray kirişine etkiyen toplam teker kuvveti
ω_r	: Ray kirişinin sönümleme dairesel frekansını
x_r	: Ray kirişü üzerine etkiyen kuvvetin konumu
x_b	: Ray kirişü üzerine etkiyen kuvvetin konumu
ω_b	: Köprü kirişinin sönümleme dairesel frekansı
μ_b	: Köprü kirişinin birim uzunluğunun kütlesi
E_b	: Köprü kirişinin elastikiyet modülü
I_b	: Köprü kirişinin alan atalet momenti
f_g	: Tren tarafından köprü kirişine uygulanan statik kuvvet
ω_{mf}	: Rüzgârın frekansını
$\Delta\omega$	: Rüzgâr frekansı artışını
N	: Rüzgâr frekanslarının sayısı
ϕ_{mf}	: Rüzgârın faz açısını
$S_u(\omega_{mf})$	: Yatay rüzgâr spektrumları
$S_w(\omega_{mf})$	: Dikey rüzgâr spektrumları

U	: Ortalama rüzgâr hızı
λ	: Davenport faktörü
ρ	: Havanın yoğunluğu
C_s	: Yanal aerodinamik katsayısı
C_l	: Dikey aerodinamik katsayısı
C_m	: Moment aerodinamik katsayısı
β	: Rüzgârın trene etkiyen bağıl açısı
V_r	: Rüzgâr ile tren arasındaki bağıl hız
P	: Atmosfer basıncı
R	: Özgül gaz sabitini
T	: Havanın sıcaklığı
ζ	: Sönüm oranı
N_v	: Vagon sayısı
α	: Rüzgâr açısı
$e(t)$	: Hata sinyali
k_p	: P tip kontrolcü kazancı
k_i	: I tip kontrolcü kazancı
k_d	: D tip kontrolcü kazancı
u	: Kontrolcü kuvveti
u_{eq}	: Eşdeğer kontrol sinyali
u_{sw}	: Anahtarlama kontrol sinyali
s	: Kayma yüzeyi
α_k	: Kayma yüzeyi katsayısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Tren alt sisteminin parametreleri.	20
Tablo 3.2. Track ve köprü kirişi parametreleri.....	23
Tablo 3.3. Yüksek hızlı tren modelinin genelleştirilmiş koordinatları.....	28
Tablo 5.1. Sağ ve sol köprü kirişinin titreşim mod frekansı ve kritik hızları.....	49
Tablo 5.2. Kiriş mod sayısının tren ve köprü dinamiği üzerine etkisinin karşılaştırılması.	51
Tablo 5.3. Köprü ortasının yer değiştirmesi ve vagon yer değiştirmesi için zaman adımı boyutunun (Δt) çözüm doğruluğu üzerindeki etkisi.....	54
Tablo 5.4. Farklı köprü uzunlukları için köprü-kiriş sisteminin ilk dört kritik hızları.	66
Tablo 6.1. k_p katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.	101
Tablo 6.2. k_i katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.	101
Tablo 6.3. k_p katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.	101
Tablo 6.4. Farklı kontrolcülerin uygulanması durumunda vagonun dikey ivmelenme değerlerinin RMS değeri.	122



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. TTKES'nin tarihsel olarak gelişim sırası.	16
Şekil 3.2. TTKE modelinin grafiksel gösterimi.	18
Şekil 3.3. Trenin matematik modeli (a) Yan görünüş (b) Üst görünüş (c) Ön görünüş.	21
Şekil 3.4. Track-köprü alt sisteminin matematik modeli.	22
Şekil 3.5. Kiriş tipleri (a) Serbest kiriş (b) Ankastre kiriş (c) Sabitlenmiş kiriş (d) Basit mesnetli kiriş.	24
Şekil 3.6. Rüzgâr hız vektörleri ve trene etkiyen aerodinamik kuvvetler (a) Üst görünüş (b) Ön görünüş.	35
Şekil 4.1. Önerilen çözüm yönteminin doğrulamasında kullanılacak olan 2 serbestlik dereceli model.	44
Şekil 4.2. Önerilen çözüm yönteminin doğrulamasında kullanılacak olan 4 serbestlik dereceli model.	44
Şekil 4.3. 2 serbestlik dereceli ve 4 serbestlik dereceli doğrulama örneklerinin karşılaştırılması.	45
Şekil 4.4. 2 serbestlik dereceli ve 4 serbestlik dereceli doğrulama örneklerinin karşılaştırılması.	46
Şekil 5.1. 31 serbestlik dereceli tam raylı araç ve köprü modeli.	48
Şekil 5.2. Kiriş titreşim modları.	50
Şekil 5.3. Köprü titreşim mod sayısının TKE sistemine etkisi.	50
Şekil 5.4. Tren hızı=50 km/sa olması durumunda zaman adımı boyutunun (Δt) vagon ve köprünün dinamik tepkileri üzerindeki etkisi a-) Vagonun dikey yer değiştirmesi b-) Vagonun dikey ivmelenmesi c-) Köprü ortasının yer değiştirmesi.	52
Şekil 5.5. Tren hızı=300 km/sa olması durumunda zaman adımı boyutunun (Δt) vagon ve köprünün dinamik tepkileri üzerindeki etkisi a-) Vagonun dikey yer değiştirmesi b-) Vagonun dikey ivmelenmesi c-) Köprü ortasının yer değiştirmesi.	53
Şekil 5.6. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Dikey yerdeğiştirme b) Yatay yerdeğiştirme.	55
Şekil 5.7. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Yunuslama hareketi b) Yuvarlanma hareketi.	55
Şekil 5.8. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Dikey ivmelenme b) Yatay ivmelenme.	56
Şekil 5.9. Köprünün dinamik cevapları.	56
Şekil 5.10. Vagon kütlelerinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Dikey yerdeğiştirme (b) Yanal yerdeğiştirme.	57
Şekil 5.11. Vagon kütlelerinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Dikey ivmelenme (b) Yanal ivmelenme.	57

Şekil 5.12. Vagon kütlesinin köprü kirişinin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Sol köprü ortasının yerdeğiştirmesi (b) Sağ köprü ortasının değiştirmesi.	58
Şekil 5.13. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Yunuslama hareketi (b) Yuvarlanma hareketi.	59
Şekil 5.14. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Yunuslama ivmelenmesi (b) Yuvarlanma ivmelenmesi.	59
Şekil 5.15. Vagon kütlesinin bojilerin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Ön bojinin yerdeğiştirmesi (b) Arka bojinin yerdeğiştirmesi.	60
Şekil 5.16. Vagon kütlesinin bojilerin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Ön bojinin ivmelenmesi (b) Arka bojinin ivmelenmesi.	60
Şekil 5.17. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum dikey yerdeğiştirme (b) Maksimum yanal yerdeğiştirme.	61
Şekil 5.18. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum yunuslama hareketi (b) Maksimum yuvarlanma hareketi.	61
Şekil 5.19. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum dikey ivmelenme (b) Maksimum yanal ivmelenme.	62
Şekil 5.20. Artan tren hızı ve farklı vagon kütlesi için vagonun yer değiştirmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi.	63
Şekil 5.21. Artan hız ve farklı vagon kütlesi için vagonun ivmelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (b) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.	64
Şekil 5.22. Artan hız ve farklı vagon kütlesi için vagonun dinamik davranışları (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi.	64
Şekil 5.23. Köprü sönümünün dinamik büyütme faktörü üzerine etkisinin kıyaslanması (a) Sağ köprü kiriş i (b) Sol köprü kiriş i.	66
Şekil 5.24. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun yerdeğiştirmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi.	66
Şekil 5.25. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun dinamik davranışları (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi.	67
Şekil 5.26. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun ivmelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (b) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.	68
Şekil 5.27. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi (a) Sağ köprü kiriş i (b) Sol köprü kiriş i.	69
Şekil 5.28. Temas kuvvetlerinin analizi (a) Vagonun temas kuvveti (b) Bojilerin temas kuvveti (c) Sağ tekerlerin temas kuvveti (d) Sol tekerlerin temas kuvveti.	71
Şekil 5.29. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) Ön bojinin temas kuvveti (b) Arka bojinin temas kuvveti (c) Vagonun temas kuvveti.	72

Şekil 5.30. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) 1. sağ tekerin temas kuvveti (b) 1. sol tekerin temas kuvveti (c) 2. sağ tekerin temas kuvveti (d) 2. sol tekerin temas kuvveti.	72
Şekil 5.31. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) 3. sağ tekerin temas kuvveti (b) 3. sol tekerin temas kuvveti (c) 4. sağ tekerin temas kuvveti (d) 4. sol tekerin temas kuvveti.	73
Şekil 5.32. TTKE sisteminin akış şeması.	75
Şekil 5.33. Vagonun yerdeğiştirmesi ve ivmesinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Dikey yerdeğiştirme (b) Yanal yerdeğiştirme (c) Dikey ivmelenme (d) Yanal ivmelenme.	76
Şekil 5.34. Vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketlerinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Yunuslama hareketi (b) Yuvarlanma hareketi (c) Yunuslama ivmelenmesi (d) Yuvarlanma ivmelenmesi.	77
Şekil 5.35. Köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Sağ köprü kirişi (b) Sol köprü kirişi.	78
Şekil 5.36. Track yapısının vagon dinamiğine etkisi (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi.	79
Şekil 5.37. Vagon dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.	80
Şekil 5.38. Vagon dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi (c) Vagonun maksimum yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenmesi.	81
Şekil 5.39. Köprü dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Sağ köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmesi (b) Sol köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmesi.	82
Şekil 5.40. Köprü uzunluğu dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.	82
Şekil 5.41. Köprü uzunluğu dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi.	84
Şekil 5.42. Köprü uzunluğu dikkate alınarak köprünün dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Sol köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi (b) Sağ köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi.	85
Şekil 5.43. Değişen köprü uzunluğuna karşı vagon dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli için karşılaştırılması (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.	86
Şekil 5.44. Değişen köprü uzunluğuna karşı vagon dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli için karşılaştırılması (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi (c) Vagonun maksimum	

yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenmesi.	87
Şekil 5.45. Elastik pedin farklı rijitlik katsayıları dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi (c) Vagonun yunuslama hareketi (d) Vagonun yuvarlanma hareketi.	88
Şekil 5.46. Balastın farklı rijitlik katsayıları dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi (c) Vagonun yunuslama hareketi (d) Vagonun yuvarlanma hareketi.	89
Şekil 5.47. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.	90
Şekil 5.48. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi.	91
Şekil 5.49. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak köprünün dinamik tepkilerinin kıyaslanması.	91
Şekil 5.50. Vagona farklı hızlarda ve dik açıyla etki eden rüzgâr dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi.	93
Şekil 5.51. Vagona farklı hızlarda ve dik açıyla etki eden rüzgârın tren üzerinde oluşturduğu kuvvet ve moment grafikleri (a) Dikey kuvvet (b) Yanal kuvvet (c) Moment.	94
Şekil 5.52. Vagona farklı açılarda ve sabit hızda etki eden rüzgâr dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi.	95
Şekil 5.53. Vagona farklı açılarda ve sabit hızda etki eden rüzgârın tren üzerinde oluşturduğu kuvvet ve moment grafikleri (a) Dikey kuvvet (b) Yanal kuvvet (c) Moment.	96
Şekil 6.1. Aktif kontrolcülerin TTKE modeline eklenmesi.	97
Şekil 6.2. Aktif kontrolcünün yapısı.	98
Şekil 6.3. PID kontrolcünün yapısı.	99
Şekil 6.4. KUBPID kontrolcünün çalışma yapısı.	100
Şekil 6.5. TTKE kontrol sisteminin girdi ve çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonları.	101
Şekil 6.6. KKK kontrolcünün çalışma yapısı.	102
Şekil 6.7. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmesine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) $m_c=80$ ton için vagonun dikey yerdeğiştirmesi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yanal yerdeğiştirmesi.	105
Şekil 6.8. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun dikey ve yanal ivmelenmesine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun dikey ivmelenmesi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yanal ivmelenmesi (c) $m_c=80$ ton için vagonun dikey ivmelenmesi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yanal ivmelenmesi.	106

- Şekil 6.9.** Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütlerdeki vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun yunuslama hareketi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yuvarlanma hareketi (c) $m_c=80$ ton için vagonun yunuslama hareketi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yuvarlanma hareketi. 107
- Şekil 6.10.** Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütlerdeki vagonun yunuslama ve yuvarlanma ivmelenmesine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun yunuslama ivmelenmesi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yuvarlanma ivmelenmesi (c) $m_c=80$ ton için vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yuvarlanma ivmelenmesi. 108
- Şekil 6.11.** Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütlerdeki vagonların titreşim kontrolünü sağlamak için ürettikleri kontrolcü sinyalleri (a) $m_c=40$ ton için 1. eyleyicinin kontrol kuvveti (b) $m_c=40$ ton için 2. eyleyicinin kontrol kuvveti (c) $m_c=80$ ton için 1. eyleyicinin kontrol kuvveti (d) $m_c=80$ ton için 2. eyleyicinin kontrol kuvveti. 109
- Şekil 6.12.** Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütlerdeki vagonların titreşim kontrolünü sağlamak için ürettikleri kontrolcü sinyalleri (a) $m_c=40$ ton için 3. eyleyicinin kontrol kuvveti (b) $m_c=40$ ton için 4. eyleyicinin kontrol kuvveti (c) $m_c=80$ ton için 3. eyleyicinin kontrol kuvveti (d) $m_c=80$ ton için 4. eyleyicinin kontrol kuvveti. 109
- Şekil 6.13.** Tren hızının vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi. 110
- Şekil 6.14.** Tren hızının vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (b) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi. 112
- Şekil 6.15.** Köprü uzunluğunun vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi. 113
- Şekil 6.16.** Köprü uzunluğunun vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi. 114
- Şekil 6.17.** Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 116
- Şekil 6.18.** Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 117
- Şekil 6.19.** Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 117
- Şekil 6.20.** Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 118

- Şekil 6.21.** Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol..... 119
- Şekil 6.22.** Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 120
- Şekil 6.23.** Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 121
- Şekil 6.24.** Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol. 122



YÜKSEK HIZLI TRENİN RÜZGÂR VE ESNEK ZEMİN ETKİSİ ALTINDAKİ TİTREŞİMLERİNİN YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROLÜ

ÖZET

Yüksek hızlı trenlerde tren ve ray arasındaki etkileşim probleminden dolayı raylı aracın sürüş güvenliği ve yolcu konforu olumsuz etkilenir. Bu problemlerin başında ray düzgünsüzlükleri, esnek zemin etkisi ve rüzgâr yükü ve sismik yükler gibi dış etkiler gelmektedir. Bu tez çalışmasında tren-track-köprü etkileşim (TTKE) sisteminin dinamik cevaplarını belirlemek amacıyla bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Tam tren modeli yatay ve dikey yöndeki dinamik cevaplarını da incelemek amacıyla 31 serbestlik dereceli olarak modellenirken, köprü ve ray ise Euler-Bernoulli kiriş teromine göre modellenmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında yapay zekâ algoritmaları ile aktif süspansiyon sisteminin kullanılması da incelenmiştir. Aktif süspansiyonun temel amacı trenin rahatsız edici etkilerini ikincil süspansiyona yerleştirilen doğrusal eyleyici ile bertaraf etmektir. Ayrıca yüksek hızlı trenin maruz kalabileceği rüzgâr yükünün etkisini azaltmak da oldukça önemlidir. Çünkü tarihte rüzgâr nedeniyle yıkılan köprüler ve raydan çıkan trenler mevcuttur. Tren ve köprü kirişine ait ikinci dereceden hareket denklemleri Lagrange yöntemi ile çıkarılmış ve sonra durum uzay formları yardımıyla birinci dereceden diferansiyel denklemlere indirgenmiştir. Dördüncü dereceden diferansiyel denklem olan basit mesnetli köprü ve ray kirişleri Galerkin yöntemi kullanılarak ikinci dereceden hareket denklemlerine dönüştürülmüştür. Bu diferansiyel denklemler dördüncü dereceden Runge-Kutta algoritması kullanılarak zaman alanında yüksek hassasiyette ve kısa sürede çözdürülmüştür. Bu çalışma da sunulan yöntemin sayısal sonuçlarını doğrulamak amacıyla literatürde kabul görmüş birkaç çalışmalarla da kıyaslanmıştır. Köprü parametreleri kullanılarak hesap edilen kirişin ilk dört doğal frekansı belirlenmiş ve bu belirlenen frekansa karşılık gelen trenin kritik hızları olan rezonans hızları hesaplanmıştır. Rezonans hızlarında hareket eden tren özellikle düşük sönümlü kirişlerde maksimum ivmelenme genliklerinin artmasına neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında trenin değişken hızlarında maksimum dinamik cevaplar belirlenmiş ve kritik hızların tren ray etkileşimi açısından önemli bir kavram olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca iyi sönümlenen kirişlerin maksimum dinamik cevapları azalttığı da görülmüştür.

Bu tez çalışmasında tren ile köprü arasında bulunan travers ve balasttan oluşan track yapısının etkisi de incelenmiştir. Track yapısı demiryollarında neredeyse iki asırdan beri kullanıldığı için bu çalışmanın içeriğine de eklenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda track yapısı ve track parametrelerinin yüksek hızlı trenlerin dinamik davranışı üzerindeki etkisi detaylıca incelenmiştir.

Yüksek hızlı trenlerin rüzgârlı bölgelerde köprü geçişleri esnasında hem rüzgârdan hem de köprü titreşimlerinden kaynaklanan bozucu etkilerin azaltılması amacıyla PID,

kendinden uyarlamalı bulanık PID ve Kayan kipli kontrol olmak üzere 3 farklı yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler kullanılmıştır. Bu kontrolcülerin vagonun dikey ve yanal yöndeki dinamik cevapları üzerindeki performansları detaylıca incelenmiştir. Bu kapsamda rüzgârın trene etki etme açısı ve rüzgâr hızı gibi değişkenlerde ayrı ayrı analiz edilmiştir. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler kullanılarak pasif kontrole göre üstün performans sergilediği görülmüştür. Sonuç olarak bu tez çalışmasında modellenen TTKE sistemi yazılımı sayesinde tren, track ve köprüye ait tüm parametrelerin etkisi, tren hızının etkisi, rüzgâr açısı ve hızı gibi değişkenlerin etkisi zaman alan ve pahalı olan deneysel çalışmalara gerek kalmadan belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada sunulan tez yedi başlık altında incelenmiştir. Birinci başlıkta yüksek hızlı trenlerin dünyada ve ülkemizde sahip olduğu özelliklere ve önemine vurgu yapılmıştır. Ayrıca artan tren hızlarının mühendislik açıdan oluşturduğu problemlere değinilerek bunlara çözümler önerilmiştir. Tezin ikinci bölümünde şimdiye kadar yüksek hızlı trenlerin ve bağlantılı olabileceği konuların araştırılması yapılmış ve detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde ise yüksek hızlı trenlerin detaylı analizlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla matematik modeli oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında tamamen gerçekçi bir analiz yapılacağından dolayı bir trende incelenebilecek tüm parametreler dikkate alınarak 31 serbestlik dereceli tam model oluşturulmuştur. Bunların yanısıra yüksek hızlı trenlerin geçtiği köprülerin detaylı modellemesi ve demiryolu hattında bulunan track yapısının modellemesi de analizlere dahil edilmiştir. Ayrıca esnek zemin olarak dikkate alınan köprülerin dışında bu tez çalışmasında rüzgâr yükü de dikkate alınmıştır. Literatürdeki rüzgâr yükü analizleri de incelenerek özellikle köprü geçişleri esnasında yüksek hızlı trenin maruz kaldığı rüzgâr yükü de modellenmiştir. Yüksek hızlı trenin matematik modellemesi oluşturulduktan sonra analizlerinin gerçekleştirilmesi için hareket denklemleri elde edilmiş ve daha sonra Matlab yazılımı kullanılarak hareket denklemleri çözdürülmüştür. Bu çalışma da önerilen çözme yönteminin doğrulanması ise bu tezin dördüncü bölümünde verilmiştir. İncelenen yüksek hızlı trenin modeli çok karmaşık olduğundan dolayı basit iki farklı model oluşturularak bu çalışma da kullanılan çözme yöntemi ile çözdürülmüş ve literatürde bulunan sonuçları ile kıyaslanarak çalışmanın doğruluğu yapılmıştır. Bu tez çalışmasında sunulan yüksek hızlı tren ve köprü etkileşim modelinin analiz sonuçları beşinci bölümde verilmiştir. Öncelikle tren-köprü etkileşim analizi gerçekleştirilmiş ve daha sonra track yapısı dikkate alınarak tren-track-köprü etkileşim analizi yapılmış olup bu ikisi birbiri ile kıyaslanarak track yapısının etkisi incelenmiştir. Bu analizlerin yapılmasından önce incelenen köprünün titreşim mod sayısı ve çözme adımının etkisi belirlenmiştir. Ayrıca bu bölümde vagon kütlesi, köprü uzunluğu, track parametrelerinin etkisi, köprü sönümü gibi faktörler de detaylıca araştırılmıştır. Altıncı bölümde bu tez çalışmasında titreşimlerin kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılan yapay zeka destekli aktif kontrolcüler sunulmuştur. Yüksek hızlı trenlerin köprü geçişleri ve rüzgâr etkisi altında meydana gelen titreşimler PID, kendinden uyarlamalı bulanık PID ve kayan kipli kontrol kullanılarak azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda vagon ile boji arasına yerleştirilen dört adet eyleyici aracılığıyla vagonun dikey yöndeki deplasmanlarının en aza indirilmesini amaçlayan bir kontrolcü simülasyon yazılımı yapılmıştır. Kullanılan kontrolcülerin performansları trenin sabit ve değişken hızı, vagonun farklı kütlesi, değişken köprü uzunluğu, rüzgârın hızı ve açısı gibi birçok parametre dikkate alınarak kıyaslanmıştır. Sonuç olarak yüksek hızlı trenin titreşimlerinin kontrolünde sırasıyla kayan kipli kontrol, kendinden uyarlamalı bulanık

PID ve PID kontrol daha başarılı olmuştur. Ayrıca kayan kipli kontrolün diğer kontrolcülere kıyasla oldukça başarılı sonuç verdiği analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasının yedinci ve son bölümünde ise çalışma da yapılan tüm analizlerin tartışmalı sonuçları detaylıca verilmiştir.





ACTIVE CONTROL OF HIGH SPEED TRAIN VIBRATIONS UNDER WIND AND FLEXIBLE FOUNDATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

SUMMARY

Due to the interaction problem between the train and the rail in high-speed trains, the railway vehicle's driving safety and passenger comfort are adversely affected. At the beginning of these problems are rail irregularity, flexible foundation effect, and external effects such as wind load and seismic loads. In this thesis, simulation software has been developed to determine the dynamic responses of the train-track-bridge interaction (TTBI) system. While the full train model was modeled with 31 degrees of freedom to examine the dynamic responses in the lateral and vertical directions, the bridge and the rail were modeled according to the Euler-Bernoulli beam theory. In addition, in this thesis, the use of artificial intelligence algorithms and the active suspension system also have been examined. The primary purpose of the active suspension control is to eliminate the disturbing effects of the train with the linear actuator placed on the secondary suspension system. It is also crucial to reduce the effect of the wind load that the high-speed train may be exposed to. Because in the past trains have derailed and bridges have been damaged by the wind. With the use of state space forms, the Lagrangian approach is used to extract the second-order equations of motion for the train and bridge beam and then convert them to first-order differential equations. Simply supported bridge and rail beams, the fourth-order differential equations, are transformed into second-order equations of motion using the Galerkin method. These differential equations are solved quickly and with high precision in the time domain using the fourth-order Runge-Kutta algorithm. To verify the numerical results of the presented method, this study has also been compared with several accepted studies in the literature. The first four natural frequencies of the beam, which have been calculated using the bridge parameters, have been determined, and the resonance velocities, which are the critical speeds of the train corresponding to this determined frequency, have been calculated. The train moving at resonance speeds causes the maximum acceleration amplitudes to increase, especially in low-damped beams. In this thesis, maximum dynamic responses have been determined at variable speeds of the train. It has been understood that critical speeds are an important concept in terms of train-rail interaction. It has also been seen that well-damped beams reduce the maximum dynamic responses.

In this thesis, the effect of the track system consisting of sleeper and ballast between the high-speed train and the bridge has also been examined. Since the track system has been used in high-speed railways for almost two centuries, it is essential to include it in the content of this study. In this context, the effect of the track system and the impact of the track parameters on the dynamic behavior of high-speed trains has been studied in detail.

To reduce the disruptive effects caused by crosswind and bridge vibrations during bridge crossings of high-speed trains in windy areas, three different artificial intelligence-supported active controllers, namely PID, self-tuning fuzzy PID, and sliding mode control, have been used. The performances of these controllers on the dynamic responses of the high-speed train's wagon in the vertical and lateral directions have been studied in detail. In this context, variables such as the effect of the wind angle on the train and the wind speed have been analyzed separately. It has been observed that it exhibits superior performance compared to passive control by using artificial intelligence-supported active controllers. As a result, thanks to the TTBI system software modeled in this thesis, the effect of all parameters of the train, track, and bridge, the impact of train velocity, and the effect of variables such as wind angle and velocity can be determined without the need for time-consuming and expensive experimental studies.

The thesis presented in this study has been examined in seven sections. The first section emphasizes the features and importance of high-speed trains in the world and our country. In addition, engineering problems caused by increasing train speeds have been mentioned, and solutions have been proposed. In the second part of the thesis, high-speed trains and related subjects have been researched, and a detailed literature review has been carried out. In the third section, a mathematical model has been created to conduct detailed analyzes of high-speed trains. Since a completely realistic analysis will be made in this thesis study, a full model with 31 degrees of freedom has been created by considering all the parameters that can be examined in a train. In addition, the detailed modeling of the bridges where high-speed trains pass and the modeling of the track structure on the railway line are also included in the analysis. In addition to the bridges, which are considered flexible ground, wind load is also taken into account in this thesis. By examining the wind load analysis in the literature, the wind load exposed to the high-speed train, especially during bridge crossings, is also modeled. After the mathematical modeling of the high-speed train was created, the equations of motion were obtained for analysis, and then the equations of motion were solved using Matlab software. This study's proposed solution method is verified in the fourth section of this thesis. Since the examined high-speed train model is very complex, two different models were created and solved with the proposed method used in this study. The accuracy of the study was made by comparing the results in the literature. The analysis results of the high-speed train and bridge interaction model presented in this thesis are given in the fifth section. First of all, a train-bridge interaction analysis was carried out, and then a train-track-bridge interaction analysis was carried out considering the track structure, and the effect of the track structure has been examined by comparing these two analyses. Before these analyses, the number of vibration modes of the bridge and the effect of the step size were determined. In addition, in this section, parameters such as the mass of the wagon, the length of the bridge, the effect of the track parameters, and the damping of the bridge are investigated in detail.

The sixth section presents artificial intelligence-supported active controllers used to control vibrations in this thesis study. It is aimed to reduce the vibrations that occur under the influence of the wind load and bridge crossings of high-speed trains by using PID, self-tuning fuzzy PID, and sliding mode control. In this context, a controller simulation software has been developed that aims to minimize the vertical displacement of the wagon by means of four actuators placed between the wagon and

the bogie. The performances of the controllers used have been compared by considering many parameters, such as the constant and variable speed of the train, the different mass of the wagon, the variable bridge length, and the speed and angle of the wind load. As a result, sliding mode control, self-adaptive fuzzy PID, and PID control were more successful in controlling the vibrations of the high-speed train, respectively. In addition, it is understood from the analysis results that the sliding mode control gives very successful results compared to other controllers. In the seventh and last part of this thesis, the controversial results of all the analyzes made in the study are given in detail.





1. GİRİŞ

Günümüz ulaşım araçlarında en çok karayolları tercih edilmektedir. Fakat karayollarında yapılan ulaşım demiryollarına nazaran daha güvenli ve daha ekonomik olamamaktadır. Demiryollarında yapılan gelişmelerle birlikte daha hızlı ve konforlu ulaşım sebebiyle raylı araçlar tercih edilmektedir. Son yüzyılda insanların veya yüklerin belirli bir yerden başka yerlere taşınması amacıyla yüksek hızlı trenler oldukça dikkat çekmektedir. Dünyada ilk yüksek hızlı tren 1964 senesinde Japonya'da Tokyo ve Osaka arasındaki hatta çalışan Tokaido Shinkansen adlı trendir ve hızı 200 km/sa olmuştur. Ayrıca bu hız kademeli olarak 250-300 km/sa hızlara ve 1996 senesinde ise 443 km/sa değerine çıkmıştır. 2007 senesinde Fransa'da Paris-Lyon yüksek hızlı treni 574.8 km/sa hıza ulaşmıştır [1]. Tarihte en yüksek hız ise Japonya'da manyetik levitasyon teknolojisini kullanan ve 603 km/sa hıza çıkabilen maglev trenlerdir [2]. Fakat tren hızlarının artmasıyla birlikte demiryolu aracının sürüş güvenliği ve taşınan yolcuların konforu ile ilgili iç veya dış etkiler olmak üzere birtakım problemler ortaya çıkmaktadır. İç etkiler olarak bu problemlerin başında ise yüksek hızlı trenin üzerinden geçtiği esnek yapı ile aracın arasındaki dinamik etkileşimden kaynaklanan sorunlar gelmektedir. Çünkü trenlerin geçtiği zeminler tren yükünden dolayı zeminin rijitliğine bağlı olmak üzere elastik deformasyonlara uğrayabilmektedir. Dolayısıyla esneyen zeminden dolayı üzerinden geçen trene bir bozucu girdi etki etmektedir. Fakat literatür incelendiğinde araç modellerinin dinamik cevaplarını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda zeminin esnekliği genellikle ihmal edilmektedir. Köprü gibi esnek yapıların üzerinden belirli hızda geçen hareketli yük köprü ile etkileşime girerek köprüyü titreştirir ve titreşen köprü üzerinden geçen hareketli yükü etkiler. Bu durumdan dolayı tren ve köprü dinamikleri ayrı ayrı olarak değerlendirilmeli ve birbirini etkiledikleri de bilinmelidir. Dış etki olarak ise genellikle güçlü yan rüzgârlar, deprem ve sel gibi doğal afetler vs. gelmektedir. Rüzgârlı bölgelerde özellikle köprü geçişlerinde trenin yanal davranışlarını ciddi anlamda etkileyip treni raydan çıkararak kaza yapmasına sebebiyet verebilmektedir. Benzer şekilde trenin yüksek hızda hareket etmesi esnasında deprem gibi doğal afet olması

hali trenin raydan çıkma tehlikesini oluşturmaktadır. Bunun gibi etkiler demiryolu mühendisliği açısından önemli bir problem olarak görülmektedir.

Tren ve ağır tonajlı kara taşıtlarının yol tutuşu ve konforun sağlanması için süspansiyon sistemleri kullanılmaktadır. Araçlarda süspansiyon sistemleri tekerlekler ile araç gövdesi arasına konumlandırılırlar. Süspansiyon sistemi genel olarak yay, sönüm elemanları ve bunların bağlantılarından oluşmaktadır. Süspansiyon sistemlerinin temel amacı yoldan araca etki edecek olumsuz etkileri sönümlemektir. Bu kapsamda otomotiv endüstrisinde ve akademik çalışmalarda araç titreşimlerinin sönümlenmesi üzerine çalışılmaktadır. Günümüzde süspansiyon sistemi olarak genel de pasif süspansiyon kullanılmaktadır. Pasif süspansiyon sisteminde klasik olarak yay ve damper kullanılmaktadır. Klasik pasif süspansiyonların yay ve sönüm eleman katsayıları sabit olmakta ve sınırlı olarak başarılı olmaktadır. Bundan dolayı pasif süspansiyonlu taşıtlarda hem yol tutuşu hem de konforun her ikisini de artırmak mümkün değildir. Bu iki değer birbirini olumsuz etkilemektedir. Yani taşıtlarda yol tutuşunun artırılması için yüksek rijitlik katsayılı süspansiyon sistemi kullanılmalıdır. Fakat bu durumda dış kaynaklı etkenlerden dolayı oluşan etkiler sönümlenmeden araca iletilir ve konforu olumsuz etkiler. Bundan dolayı pasif süspansiyon sistemlerinde yay ve damper değerleri optimize edilerek en uygunu seçilir. Pasif süspansiyonun yanı sıra yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemi de mevcuttur. Yarı aktif süspansiyon sisteminde damper manyetik alan ile kontrol edilebilen bir sıvıdan oluşur. Burada asıl amaç manyetik alan ile damperin sönüm katsayısını sürekli istenen seviyelerde tutulmasıdır. Aktif süspansiyon sistemlerinde ise pasif süspansiyonda bulunan yay ve dampere ek olarak bir eyleyici bulunmaktadır. Aslında aktif süspansiyon kavramı mekanik pasif sisteme sensör, kontrolcü ve eyleyici eklenmesidir. Aktif süspansiyon sistemi pasif ve yarı aktif süspansiyon sistemlerine göre çok daha iyi sürüş güvenliği ve yolcu konforu sağlamaktadır. Fakat aktif süspansiyon sistemi ekstradan enerjiye ihtiyaç duymakta ve ileri kontrol stratejileri ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Aktif kontrolde kullanılacak kontrolcü sönümleme yapmak amacıyla uygulanacak olan kuvveti hesaplayıp eyleyici aracılığıyla sisteme uygular. Yüksek hızlı trenlerin veya ağır araçların sürüş güvenliği ve yolcu konforunu artırmak amacıyla aktif süspansiyon kontrollerinin yapıldığı görülmektedir. Aktif

süspansiyonun performansının artırılması amacıyla birtakım kontrolcüler tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasının başlıca amacı yukarıda bahsedilen problemlerin çözümlenebilmesi amacıyla gerçek bir yüksek hızlı tren modelinin bilgisayar simülasyon yazılımını oluşturmaktadır. Bu kapsamda trenin belirtilen iç ve dış etkilere maruz kalması durumunda gerek trenin sürüş güvenliğini gerekse de taşınan yolcuların konforunu maksimum şekilde sağlayabilecek yapay zekâ destekli kontrolcülerini geliştirmektir. Bu bağlamda bu çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde konu ile ilgili literatür taraması yapılarak şimdiye kadar yapılan tren-köprü modelleri incelenmiş ve bu çalışmada en güncel olan model geliştirilmiştir. Ayrıca uygulanan kontrolcü ve rüzgâr modelleri de literatürde geniş kapsamlı incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde incelenecek olan modelin oluşturulması daha sonra bu modelin hareket denklemlerinin elde edilmesi ve çözümü sunulmuştur. Ayrıca esnek zemin olarak modellenen köprünün ve rüzgâr modelleri oluşturulup tüm sisteme entegre edilmiştir. Dördüncü bölümde ise üçüncü bölümde önerilen çözüm yönteminin doğruluğunun sağlanması yapılmıştır. Bu kapsamda literatürden farklı birkaç model alınarak bu çalışmadaki yöntemle çözdürülüp sonuçları karşılaştırılmış ve doğruluğu test edilmiştir. Beşinci bölümde bu çalışmanın sadece pasif kontrol olması durumundaki sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda köprü kirişinin mod sayısı, çözüm adımı, tren kütlesi ve hızı, köprü sönümü ve uzunluğu, track parametreleri, rüzgâr etkisi ve çoklu vagon geçişleri gibi parametrelerin derinlemesine bir araştırması yapılmıştır. Çalışmanın altıncı bölümünde yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin tanıtımı yapılarak trenin dinamik davranışları üzerindeki performansları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise çalışmada elde edilen bulguların sonuçları verilmiştir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Yüksek hızlı trenlerin kullanım amacının genişlemesiyle beraber bu alanla ilgili çalışmalar hızla artmaktadır. Günümüzde daha hızlı ulaşım amacıyla yüksek hızlı trenler tercih edilmektedir. Araştırmacılar ulaşım süresinin kısalması için daha yüksek hızlara çıkan raylı sistem araçları üzerine çalışmaktadır. Nitekim Japonya’da 4072 km uzunluğunda Shinkansen hattında yüksek hızlı trenin hızı 320 km/sa olarak ölçülmüştür. Dünyada en uzun yüksek hızlı tren hattı ise 30 bin km ile Çin’de bulunmaktadır ve bu tren 400 km/h hıza kadar çıkabilmektedir. Tarihte en yüksek hız ise manyetik levitasyon teknolojisini kullanan Japonya’da 603 km/sa olan maglev trenlerdir [2]. Artan bu hızların seyahat sürelerini azaltması önemli derecede avantaj sağlarken yüksek hızların getirdiği dezavantajlarda bulunmaktadır. Bu dezavantajların en önemlisi titreşimdir ve titreşimler özellikle yolcu konforu ve sürüş güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Zemin kaynaklı tren titreşimleri bunların en başında gelmektedir. Aynı zamanda zemin titreşimi gürültü oluşturarak çevredeki yapılara da zarar vermektedir [3]. Zemin kaynaklı bir başka titreşim örneği ise ray düzgünlüğüdür. Demiryolu hatlarında ray profilinin zamanla aşınmasından dolayı ray teker arasında temas problemleri oluşmaktadır [4,5]. Zemin kaynaklı bu titreşimler daha çok yolcu konforunu etkilerken, dış kaynaklı titreşimler hem konforu hem de sürüş güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Dış kaynaklı titreşimler olarak rüzgâr ve deprem etkileri gösterilebilir. Yüksek hızlı trenin köprü geçişleri sırasında hızı 25 m/s’den fazla olan kuvvetli rüzgâra maruz kalması çok ciddi güvenlik endişesi yaratmaktadır [6]. Bunun için yüksek hızlı trenlerin sürüş güvenliğini sağlamak için rüzgârlı bölgelere genellikle rüzgâr bariyeri kurulmaktadır [7,8]. Ayrıca demiryolu köprüleri aşırı uzun sütunlar üzerinde bulunduğundan olası bir depremde fazla titreşimler oluşturmaktadır ve trenin raydan çıkma tehlikesi meydana gelmektedir [9,10]. Nitekim 2010 senesinde Tayvan’da Kaohsiung depreminden, 2014 senesinde Japonya’daki Niigata depreminden dolayı yüksek hızlı trenler raydan çıkarak kaza yapmıştır [1].

Yüksek hızlı tren tasarımında hareketli trenin etkisinde olan köprü ve trenin tasarımı oldukça önemlidir. Köprü ve tren aslında birbirlerini etkileyen iki farklı alt sistemden

oluşmaktadır. Burada üzerinde çalışılması gereken ve yüksek hızlı trenlerin sürüş dinamiğini olumsuz etkileyen temel bileşen esnek yapı olarak bilinen köprü elemanlarıdır. Çok önceki ve en basit çalışmalara bakıldığında bu konunun atası kiriş üzerinde hareketli sabit kuvvet modeli olduğu görülmektedir. Bu bağlamda Kolousek ve arkadaşları sürekli köprü kirişlerinin titreşimlerini köprü üzerinden sadece tek bir hareketli ve sabit kuvvetin geçmesi durumunda incelemiştir [11]. Sabit kuvvet modelinde esnek köprü üzerinden geçen yüksek hızlı trenin dinamiği ihmal edilmiş ve sanki tek bir noktadan sabit bir kuvvetmiş gibi uygulanmıştır ve buna benzer çalışmalar birkaç araştırmacı tarafından da incelenmiştir [12–15]. Daha sonraları ise Timoshenko, hareketli harmonik kuvvet modelini önererek kiriş üzerinden geçen değişken kuvvetin analizini yapmıştır [16]. Fakat bu çalışmalarda kiriş üzerinde hareket eden tren sadece bir kuvvet olarak alınmış ve kütle ile ataletleri ihmal edilmiştir. Kiriş analizinde sabit hızda hareket eden bir kuvvetin incelenmesi yeterli gelmemektedir. Daha sonraları yapılan çalışmalarda ise kiriş üzerinden geçen yükün kütlesi ve atalet etkilerini hesaba katan hareketli kütle modeli geliştirilmiştir [17–19]. Buraya kadar verilen çalışmalarda hareketli yük ve kütle modeli olarak incelenen çalışmalarda köprünün dinamik cevabı makul ve gerçekçi sonuçlar verse de köprü üzerinden geçen trenin dinamiği açısından yeterli olmamaktadır. Çünkü tren ve köprü her ne kadar birbirinden farklı alt sistemler olsa da birbirlerini etkilemekte ve trenin süspansiyon sistemlerinin etkisi incelenememektedir. Günümüzdeki tren modellerini tamamen yansıtmasa da bu konunun incelenmesi açısından tek serbestlik dereceli en basit model Biggs tarafından sunulmuştur [20]. Biraz daha gelişmiş bir model olan 4 serbestlik dereceli iki akslı araç-köprü modeli ise Fryba ve Wen gibi araştırmacılar tarafından sunulmuştur [13,21,22]. Mızrak ve Esen [23] nümerik ve deneysel yöntemler kullanarak tren gövdesi, boji ve iki adet teker setinden oluşan 5 serbestlik dereceli çeyrek raylı araç modeli üzerinde vagon kütlesi ve tren hızının dinamik etkilerini incelemiştir. Çeyrek raylı araç modeline koltuk ilavesi yapılarak elde edilen 6 serbestlik dereceli modellerde bulunmaktadır [24]. Geçtiğimiz yüzyıl içerisinde hareketli yük, hareketli kütle ve basit modeller tren-köprü dinamik etkileşiminin temellerini ortaya koymuştur. Wang ve ark. tren-köprü analizi için iki boji, dört teker seti ve tren gövdesinden oluşan yarım raylı araç modelini FEM kullanarak analiz etmişlerdir [25]. Tren modelinde tüm etkenleri dikkate alarak daha doğru sonuçlar elde

etmek amacıyla 3D tam tren modeli kullanılır [26]. Tam tren modelinde yatay yerdeşiştirmeler, yuvarlanma ve yunuslama hareketleri de incelenebilmektedir. Zhu ve arkadaşları trenlerin sürüş kalitesi için aktif süspansiyon sistemleri kullanarak 17 serbestlik dereceli tam raylı aracın yatay yer değiştirmelerini kontrol altına almıştır [27]. Yine üç boyutlu dinamik analiz örneği olarak literatürde 27 serbestlik dereceli [6,28], 38 serbestlik dereceli [29] tam raylı araç modelleri de kullanılmaktadır.

Son yıllarda üstün analiz performansına sahip bilgisayarların ve denklem çözme kabiliyetleri yüksek olan yöntemlerin gelişmesiyle çok daha modern modeller geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir. Modern çalışmalarda vagon, iki adet boji seti ve teker setlerinden oluşan tren alt sistemi ile köprü kirişinin birlikte çalışıldığı modellere tren-köprü etkileşim (TKE) modeli denilmektedir. Yine literatürde TKE'nin gelişimini ve farklı bakış açıları ile incelenmesini sağlayan birkaç çalışmada mevcuttur [30–33]. Ayrıca bu kapsamda Wang ve ark. TKE modeli kullanarak kafes köprü üzerinde hareket eden yüksek hızlı trenin aerodinamik kuvvetlerini ölçmüşlerdir [34]. Zhang ve ark. köprü ve aracın dinamik cevabını değişken hızları dikkate alarak analiz etmiştir [35]. Koç ve ark. trenin kütle ve hızı ile birlikte rayın rijitliğini dikkate alarak TKE modelinin dinamik cevaplarını incelemiştir [36]. Ayrıca günümüzde çeyrek tren modeli [37,38], yarım tren modeli [39–41], tam tren modelleri [29] de çalışılmaktadır.

Buraya kadar incelenen çalışmalarda tren ve köprü olmak üzere iki farklı alt sistemden bulunan çalışmalar incelenmiştir. Fakat gerçek sistemde yüksek hızlı trenin geçtiği demiryolu hattında ray pedi, travers ve balasttan oluşan track sistemi bulunmaktadır. Yani şu anki analizler kapsamında en modern çalışma tren-track-köprü etkileşim sistem (TTKES) analizi olmaktadır. Aslında tren, track ve köprü esasında tren-track ve track-köprü ile birleştirilmiş dinamik bir sistemden oluşmaktadır. Bir başka deyişle track sistemi köprü ve tren arasında bir bağlantı oluşturur [42]. Yani balastsız tracklar olarak TKE ve balastlı track olarak da tren-track-köprü etkileşim (TTKE) analizi demiryolu dinamiğinin anlaşılması için kullanılmaktadır. Dolayısıyla neredeyse 200 yıldan beri demiryolu hatları balastlı track üzerine kurulduğu için TKE çalışmaları yetersiz kalmaktadır [43]. Bundan dolayı Zhai ve ark. yüksek hızlı TTKE modelinin simülasyon ve modellemesi geniş çerçevede tanıtmıştır [42,44,45]. Zhu ve diğerleri

ise TTKE'yi daha iyi modellemek ve trenin sürüş güvenliğini ve sürüş konforunu daha iyi değerlendirmek için geliştirmiştir [46,47]. Chen ve ark. doğrusal olmayan bir TTKE sisteminin deprem altında dinamik bir tepki analizini gerçekleştirmiştir [48].

Şimdiye kadar ki yapılan çalışmalarda çeşitli TTKE modelleri gerçekleştirilmiştir. Genel olarak bu modelde tren, bojiler ve tekersetleri multibody dinamiği temelleri üzerine kurulurken, ray ve köprü modeli ise basitleştirilmiş kiriş modeli olarak modellenirler. Yapılan çalışmalar incelendiğinde en sık karşılaşılan yöntemler ise Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişleridir. Ayrıca literatürde Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişleri haricinde Rayleigh ve Shear kiriş teorileri de bulunmaktadır [49,50]. Kirişlerin kayma deformasyonu, eğilme deformasyonu, doğrusal ve dairesel atalet etkisi dikkate alındığı çalışmalarda Timoshenko [40,51–53], eğilme deformasyonu ve dairesel atalet etkisi gibi parametrelerin dikkate alınmadığı ve kiriş yüksekliğinin kiriş uzunluğuna kıyasla çok küçük olduğu durumlarda ise Euler-Bernoulli [54] kiriş modeli tercih edilmektedir. Bu kapsamda, Cheung ve ark. 2 serbestlik dereceli hareketli araca maruz kalan Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenebilen açık aralıklı homojen köprülerin titreşim analizini yapmıştır [55]. Hirzinger ve ark. hareketli kütle yay sönüm sistemine maruz kalan Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenebilen köprünün dinamik cevaplarını belirlemiştir [56]. König ve ark. tren-track-köprü-toprak etkileşimini dikkate alarak yüksek hızlı trenlerde köprü kirişlerini Euler-Bernoulli teoremine göre modellemiş ve köprünün dinamik davranışlarını farklı kombinasyonlarda göstermiştir [57]. Yine Lou ve arkadaşları da araç, ray ve köprünün dinamik etkisini iki tip track modeli kullanarak araştırmıştır. Çalışmalarında travers kütlelerinin artmasıyla dinamik cevapların değiştiğini göstermiştir [58]. Uzun aralıklı kirişlerde kayma deformasyon değerleri çok önemli olmadığı için Euler Bernoulli kirişleri tercih edilir [59]. Kayma deplasmanı etkisini içeren Timoshenko kiriş teorileri kullanılarak yapılan birçok çalışma da mevcuttur [60,61]. Koç çalışmasında 10 serbestlik dereceli yüksek hızlı tren modeline maruz kalan köprüyü Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorileri kullanarak modellemiş ve köprü ve tren dinamiği açısından ikisini kıyaslamıştır [40]. Ayrıca, bazı çalışmalar da her iki kiriş teoremi uygulanarak kirişlerin dinamik cevabı karşılaştırılmıştır [62,63]. Esen çalışmasında iki parametrelili bir zemin üzerinde basitçe desteklenen

Timoshenko kirişinin titreşim analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmıştır [64]. Euler-Bernoulli kiriş teorisiyle ilgili Chen ve ark. Eksenel kuvvete maruz kalan kirişlerin yüksek frekanslı titreşim analizi üzerine çalışmıştır [65]. Bir başka çalışmada ise döndürme hareketi etkisinde olan kirişlerin yanal titreşimleri üzerine çalışılmıştır [66]. Literatürde eksenel ve döndürme kuvvetleri haricinde gelişigüzel dinamik yüklemeye zorlanan kirişlerde Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılmıştır [67]. Bu çalışmanın kapsamında da incelenecek olan köprü kirişi üzerinden geçen raylı aracın uyguladığı kuvvet hareketli yük olarak varsayılmaktadır. Hareketli yüke maruz kalan Euler-Bernoulli kirişlerin dinamik analizi izogeometrik yaklaşım kullanılarak da yapılmıştır [68]. İzogeometrik yaklaşım ilgili mühendislik probleminin simülasyonu ve çözümü için güçlü ve güvenilir bir araç olarak ifade edilmiştir. Pala bir ucu yay ve sönüm elemanları ile desteklenmiş cracked Timoshenko kirişlerin sönümlü titreşimlerini araştırmıştır [52]. Dixit, hasarlı kirişlerin dinamik cevabını belirlemek için Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerini kullanmış ve elde ettiği sonuçları birbirleri ile kıyaslamıştır [69]. Sonuç olarak Timoshenko kiriş teorisi Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre kayma deformasyonu ve dairesel atalet etkisi içerdiği için dinamik cevabı belirleme de daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemiştir. Heydari ve ark. çalışmalarında hasarlı kısa kirişler için zorlanmış eğilme titreşim analizi üzerine çalışmış ve kiriş modeli olarak Timoshenko kirişini kullanmıştır. Elde ettiği sonuçları Euler-Bernoulli modeli ile de kıyaslamıştır. Çalışmasında kısa kirişler için Timoshenko kiriş modelinin kullanılmasının daha avantajlı olduğunu göstermiştir [70].

Sistemlerin diferansiyel hareket denklemlerini elde etmek için birkaç yöntem bulunmaktadır. Newtonun ikinci yasası [71] ve D’Alambert [72] prensibinde kütle, yay ve sönüm özelliklerini kullanılarak ilgili kuvvetlerin incelenmesi ile çok basit sistemlerin hareket denklemleri elde edilebilir. Tek serbestlik dereceli ve çoklu kütle, yay ve sönüm elemanına sahip sistemler için en uygun yaklaşım virtüel işler [73] prensibidir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemlerini elde etmek için en sık kullanılan yöntem ise standart enerji yöntemi olan Lagrange yöntemi [74] ve Hamilton yöntemleridir [75]. Kiriş olarak modellenen ve dördüncü dereceden kısmi diferansiyel denklem olan ray ve köprü elemanları için ise Ritz yöntemi [76] veya

Galerkin yöntemi [77] kullanılarak ikinci dereceden diferansiyel denkleme dönüştürülerek hareket denklemleri tespit edilebilir.

Tren dinamiğinde, TTKE modelinin hareket denklemlerinin çözümü için ya normal mode superpozisyon yöntemi [78–81] ya da direkt nümerik entegrasyon yöntemi kullanılır. Direct numerical integration yönteminde sistemin hareket denklemi adım adım sayısal prosedür uygulanarak çözümlenir. Bu yöntemde genellikle zaman türevleri belirli bir zaman aralığında diferansiyel formüller kullanılarak simule edilir [74]. Direkt nümerik entegrasyon da dördüncü dereceden Runge-Kutta [82] ve Euler yöntemi [83] içeren explicit ve Wilson θ [84,85], Newmark β [23,46,86] gibi yöntemleri içeren implicit yaklaşımları bulunmaktadır. Fakat bu yöntemlerde tren ray hareketinin çözümlenmesi için kullanılan zaman adım boyutu çözüm zamanı ve gerekli olan bilgisayar hafızasını artırdığı dikkate alınmalıdır.

Yukarıda bahsi geçen tren ve kiriş olarak modellenen köprüler arasındaki etkileşimden doğan titreşimlerin azaltılması için çeşitli aktif kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Aktif kontrolcünün performansını artırmak amacıyla yapılan birkaç yaklaşım bulunmaktadır. Son yıllarda birçok araştırmacı kullanım kolaylığı açısından PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüsü tercih etmektedir. Güçlü çalışmasında 8 serbestlik dereceli araç modelini yolcu ve araç titreşimleri üzerine PID ile aktif kontrol üzerine çalışmıştır. 3 farklı durumda kontrol stratejisi uygulamış ve bunları konfor ve yol tutuşu üzerine etkilerini incelemiştir [87]. Hanafî yarı aktif araç süspansiyon sisteminin kontrolünü PID kontrolcü kullanarak matlab/simulink ortamında gerçekleştirmiştir [88]. Yine benzer şekilde Rao çalışmasında matlab/simulink ortamında PID kontrolcü kullanarak otomobillerin yarı aktif süspansiyon sistemi kontrolünü gerçekleştirmiş ve araç gövdesinin yerdeğiştirme ve ivmelenme değerlerini oldukça azaltmıştır [89]. Gandhi ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada 4 serbestlik dereceli yarı araç modelinin performans analizini PID kontrolcü haricinde 3 farklı alternatif kontrolcü kullanarak yapmıştır [90]. PID kontrolcüler trenlerde veya ağır araçların dışında birçok alanda kullanım imkanı vardır. Örneğin Thenozhi ve arkadaşları bina yapılarında PID ile titreşim kontrolü üzerine çalışmıştır. Lyapunov kararlılık teorisi ile PID katsayıları ayarlamış kazanç katsayıları optimum olmasa bile kontrolcü kararlı performans sergilemiştir [91].

Ayrıca PID kontrolcüler DC motor hız kontrolünde de oldukça tercih edilmektedir. Bu konuda Adar ve arkadaşları DC motorun farklı hız değerlerine daha kısa sürede ulaşabilmesi amacıyla PI ve aynı zamanda kendinden uyarlamalı bulanık PI kontrolcü kullanmıştır [92].

PID tipi kontrolcüler tek başına kullanıldıkları gibi başka kontrolcüler ile beraber bir araya gelerek yeni bir kontrolcü olarak da kullanılabilir. Bunların en çok tercih edileni PID katsayılarının sürekli güncellenebileceği bulanık mantık kontrolcüsüdür. Khodadadi ve Ghadiri aktif süspansiyonlu yarım araç modelinde aktif kontrolcü olarak kendinden uyarlamalı bulanık PID kullanmış ve bunlarla birlikte PID, bulanık mantık ve H_{∞} kontrolcülerini kıyaslamıştır [93]. Metin tezinde İstanbul’da kullanılan hafif metro taşıtının farklı serbestlik derecelerindeki modelini bulanık mantık kontrol uygulamasıyla gerçekleştirmiştir [94]. Yine benzer şekilde Atalay tezinde E43000 lokomotifinin dinamik modelini Matlab/Simulink’te oluşturarak lokomotifin yanal ve düşey titreşim analizlerini bulanık mantık kontrolü ile simüle etmiştir [95]. Aynı çalışma üzerine Ören tezinde Simmechanics modelini kurmuş ve bulanık mantık kontrolcü ile titreşim kontrolü yapmıştır [96]. Metin ve Güçlü yapmış olduğu iki farklı çalışmanın birinde 11 serbestlik dereceli raylı araç modelinin yolcu konforu ve sürüş güvenliğini ayrı ayrı PID ve bulanık mantık kontrolü ile geliştirirken diğer çalışmalarında ise 6 serbestlik dereceli hafif raylı ulaşım aracında PID ve PID tipi bulanık mantık kontrollerini kıyaslamıştır [24,97]. Paksoy ve ark. MR damperli tam araç modelinde araç titreşimlerini PID, bulanık mantık ve her iki kontrolcünün birleşiminden oluşan kendinden uyarlamalı bulanık PID (KUBPID) ile yarı aktif kontrolünü yapmış ve KUBPID diğer iki kontrolcüye kıyasla titreşim azaltma performansında daha iyi sonuçlar vermiştir [98]. Özmen ve Közkurt trafikte insan hataları ve ekonomik olmayan sürücü alışkanlıklarını azaltmak amacıyla bulanık mantık destekli araç sürücü kontrol sisteminin modellenmesini ve simülasyonunu önermiştir [99]. Doğan ve ark. çeyrek araç modeli kullanarak Matlab/Simulink ortamında süspansiyon sisteminin kontrolünü PID ve bulanık mantık kullanarak ayrı ayrı kontrolünü gerçekleştirmiştir [100]. PID kontrolcü tek başına kullanılabildiği gibi başka kontrolcülerle birlikte de kullanım alanına sahiptir. Emam çalışmasında çeyrek araç modeli kullanarak süspansiyon sisteminin kontrolünü kendinden uyarlamalı

bulanık PID ile sağlamıştır [101]. Eroğlu ve ark. çeyrek araç ve köprü etkileşim modelinin kontrolünü kendinden uyarlamalı bulanık PID kontrolcüsü kullanarak gerçekleştirmektedir [102].

Titreşimlerin aktif kontrolü üzerine yapılan çalışmalarında dikkat çeken diğer bir kontrolcü ise dış etkilere ve bilinmeyen parametrelere karşı gürbüzlük sağlayan kontrol metodu olan kayan kipli kontrol (KKK)'dür. Zhang ve ark ile Bai ve Guo çeyrek araç modelinde önerdiği KKK yönteminin aktif süspansiyon için iyi bir kontrol performansı elde edileceğini göstermiştir [103,104]. Du ve ark, belirsiz tam araç aktif süspansiyon sistemi için kontrol sorunuyla başa çıkmak için bir terminal kayan kipli kontrol yaklaşımı önermiştir [105]. Singh, aktif çeyrek araba modelinin süspansiyon sistemindeki titreşim bastırmada yeni uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tabanlı süper bükümlü kayan kipli kontrol denetleyicisinin etkinliğini sunmuştur [106]. Yağız ve Yüksek 4 serbestlik dereceli araç modelinin kontrolünü kayan kipli kontrolcüsü kullanarak gerçekleştirmiştir [107]. KKK kullanılarak birçok çalışmada çeyrek araç modeli üzerine çalışılmış olup, KKK ile birlikte bulanık mantık [108], yapay sinir ağı [87] uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) [109] ve derin öğrenme [110] de kullanılmış çalışmalarda mevcuttur.

Literatürde tercih edilen bir diğer kontrol yöntemi ise Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) dür. LQR kontrol dinamik bir sistemin minimum maliyetle en iyi performansının elde edilmesini sağlayan bir optimal kontrol teorisidir. Bu konuda Ben ve ark. yarım araç modeli kullanarak pasif, yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemlerini sürüş güvenliği ve yol tutuşu açısından karşılaştırmıştır [111]. Aktif süspansiyon sisteminin kontrolünde LQR kullanmış ve önerilen metodun rastgele bozucu yol girişine karşın daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Agharkli ve ark. LQR kontrol tekniğini çeyrek araç modeli için aktif süspansiyon sistemine uygulamıştır. Farklı tümsek girdilerine karşı aktif titreşim kontrolü ile sürüş konforu ve daha iyi yol tutuşu açısından gelişme olmuştur [112]. Sever ve ark. LQR kontrolcü kullanarak biyodinamik sürücü modeli içeren çeyrek araç modelinde sürüş konforunu ve güvenliğini sağlamak amacıyla titreşim kontrolünü gerçekleştirmiştir [113]. LQR kontrolcüler araç süspansiyon sistemi dışında birçok yerde kullanım alanına sahiptir. Örneğin Çakır ve Bayraktar ana muharebe tankında silah salınımlarının azaltılması

amacıyla LQR kontrolcü kullanmış ve tankın yalpalama, yuvarlanma gibi hareketlerini kontrol altına almıştır [114]. Bir diğer çalışmada ise LQR kullanılarak akıllı esnek konsol kirişlerin aktif süspansiyon kontrolü yapılmıştır [115].

Yüksek hızlı trenlerin genellikle köprü geçişleri esnasında rüzgâr gibi dış etkilere maruz kalması durumu da literatürde oldukça incelenmiştir. Çünkü güçlü rüzgârlardan dolayı raydan çıkarak kaza yapan trenler ve hatta yıkılan köprüler bulunmaktadır [1,116]. Bu kapsamda Baker kamyon ve tren gibi kara taşıtları üzerinde güçlü rüzgârların etkisini kararlı ve kararsız aerodinamik kuvvetler ile bu kuvvetlerin araç sistemine etkisini detaylıca incelemiştir [117–121]. Xia ve ark. rüzgâr-tren-köprü sistem modelinin dinamik analizi gerçekleştirerek trenin sürüş güvenliği ve köprünün dinamik cevabını simüle etmiştir [6]. Heleno ve ark. çapraz rüzgârlara karşı demiryolu aracının sürüş güvenliği etkisini araştırmıştır [122]. Weiwei ve ark. uzun açıklıklı bir asma köprünün dinamik tepkisi ve rüzgâr etkisi altında bir trenin çalışma güvenliği üzerine çalışmıştır [123]. Montenegro ve ark. tren tipi, track durumu ve köprü yanal davranışları gibi çapraz rüzgârlardan etkilenen tren dinamiklerini incelemiştir [124]. Yine bir başka çalışmalarında farklı rüzgâr modellerini inceleyerek bunların trenin dinamik cevaplarına olan etkisini kıyaslamalı olarak çalışmışlardır [125]. Xu ve ark. çapraz rüzgârlarda tren ve askılı köprü sistemlerinin dinamik analizini gerçekleştirmek için bir çerçeve sunmaktadır [126]. Rüzgârlı bölgelerde yüksek hızlı trenlerin geçtiği köprülere rüzgâr bariyerleri konulmaktadır. Bu bariyerlerin tren-köprü sisteminin aerodinamik kuvvetleri üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır [7]. Deng ve ark. rüzgâr bariyerli ve bariyersiz köprü-tünel bölümünde çapraz rüzgârların yüksek hızlı trenlere olan aerodinamik etkisini araştırmıştır [127]. Niu ve ark. bir ve iki taraflı rüzgâr kırıcı duvarların, yüksek hızlı trenin kararsız aerodinamik performansı ve tren etrafındaki akış alanı özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelemiştir [128]. Wang ve ark. gelişmiş bir hareketli tren rüzgâr tüneli test düzeneği kullanarak rüzgâr bariyerinin tren gövdesi üzerindeki dinamik aerodinamik etkileşimini yorumlamıştır [129]. Yang ve ark. tünel-köprü-tünel senaryosunda yan rüzgârlar altında seyahat eden yüksek hızlı trenin geçişi sırasında trenin dinamik yanıt etkisini belirlemiştir [130]. Wang ve ark. bir köprüde yan rüzgârlar altındaki bir trenin aerodinamik özelliklerini bir rüzgâr tüneli kullanılarak incelenmiştir [34]. Gao ve ark.

modern bir hızlı trenin farklı doğal yan rüzgârlardaki kararsız aerodinamik yükleri, tam ölçekli testlerle ölçülmüş, ortalamaları ve dalgalanmalarını incelemiştir [131].



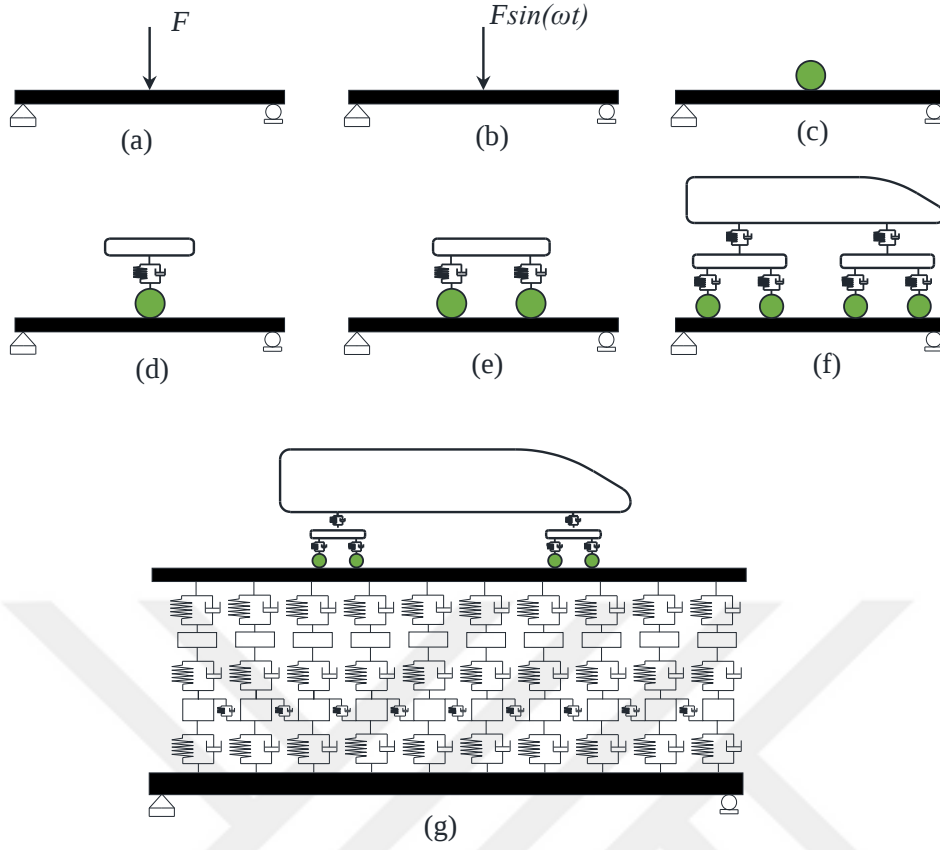
3. MATEMATİK MODELLEME

Birbirleri ile etkileşim halinde bulunan sistemlerin analizlerini gerçekleştirmek amacıyla öncelikle o sistemin matematik modelinin elde edilmesi önem arz etmektedir. Çünkü birbirleri ile etkileşim halinde bulunan iki ya da birçok elemandan oluşan sistemlerin dinamik kuvvetlerinin belirlenmesi amacıyla matematik modelleri oluşturulur. Oluşturulan model üzerinden matematiğin bazı teori ve kabulleri yapılarak çözümlemeleri elde edilir. Bu bölümde tez çalışmasında incelenen kapsamlı tren-track-köprü modelinin tarihteki ilk modellemeleri de ele alınarak detaylıca incelenecektir. Ayrıca çalışma içerisinde kullanılan esnek zemin (köprü) ve rüzgâr modeli de tanıtılacaktır.

3.1. Tren Köprü Modeli

19. yüzyılın ortalarında yük ve yolcuların taşınmasının önemli bir konu olmasıyla birlikte tren-köprü etkileşim çalışmaları oldukça hız kazanmıştır [42]. Tren ve köprü her ne kadar bağımsız da olsa köprü üzerinde hareket eden bir tren doğrudan köprüyü etkilemektedir. Köprünün olumsuz etkilenen dinamik davranışından dolayı trenin sürüş esnasındaki dinamik performansı da oldukça etkilenmektedir. Bundan dolayı tren ve köprünün ayrı ayrı incelenip tren-köprü sisteminin daha uzun ömürlü ve güvenli olması amacıyla eşzamanlı olarak değerlendirilip dikkate alınması gereklidir.

Yüksek hızlı trenlerin hızlı bir şekilde hayatımıza girmesiyle birlikte tren ve köprü gibi esnek yapıların etkileşim analizlerinin sayısı dünya genelinde akademik ve bilimsel çalışmalarda oldukça artmıştır. Fakat tren-köprü gibi çok karmaşık bir sistemin matematik modeli geçmişten günümüze kadar kademe kademe ilerleyerek oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. TTKES'nin tarihsel olarak gelişim sırası.

3.1.1. Hareketli kuvvet modeli

Yüksek hızlı tren tasarımında hareketli trenin etkisinde olan köprü ve trenin tasarımı oldukça önemlidir. Köprü ve tren aslında birbirlerini etkileyen iki farklı alt sistemden oluşmaktadır. Burada üzerinde çalışılması gereken ve yüksek hızlı trenlerin sürüş dinamiğini olumsuz etkileyen temel bileşen esnek yapı olarak bilinen köprü elemanlarıdır. Çok önceki ve en basit çalışmalara bakıldığında bu konunun atası Şekil 3.1 'de verilen kiriş üzerinde hareketli sabit kuvvet modeli olduğu görülmektedir. Burada tren tamamen bir tek bir kuvvet olarak ele alınmış ve aracın dinamiği ihmal edilmiştir. Bu bağlamda Kolousek ve arkadaşları sürekli köprü kirişlerinin titreşimlerini köprü üzerinden sadece tek bir hareketli ve sabit kuvvetin geçmesi durumunda incelemiştir [11]. Sabit kuvvet modelinde esnek köprü üzerinden geçen yüksek hızlı trenin dinamiği ihmal edilmiş ve sanki tek bir noktadan sabit bir kuvvetmiş gibi uygulanmıştır ve buna benzer çalışmalar birkaç araştırmacı tarafından da incelenmiştir [12–15]. Daha sonraları ise Timoshenko, hareketli harmonik kuvvet modelini önererek Şekil 3.1b'de de görüldüğü gibi kiriş üzerinden geçen değişken

kuvvetin analizini yapmıştır [16]. Fakat bu çalışmalarda kiriş üzerinde hareket eden tren sadece bir kuvvet olarak alınmış ve kütle ile ataletleri ihmal edilmiştir.

3.1.2. Hareketli kütle modeli

Kiriş üzerinden geçen sabit veya harmonik değişen yük modelinden sonra hareketli yükün atalet etkilerini dikkate alan model ise Şekil 3.1c’de gösterilmiştir. Hareketli yük modelinde yükün kütlesi tamamen ihmal edilirken bu modelde nispeten küçüktse olsa köprü üzerinden geçen trenin tek bir kütleyle indirgenmiş hali belirtilmiştir. Bu model günümüz tren-köprü etkileşim çalışmalarının en basit modeli olarak bilinmektedir ve bu model ilk olarak Willis [132] ve Stokes [133] tarafından önerilmiş ve analiz edilmiştir. Daha sonraları yapılan çalışmalarda ise kiriş üzerinden geçen yükün kütlesi ve atalet etkilerini hesaba katan hareketli kütle modeli geliştirilmiştir [17–19].

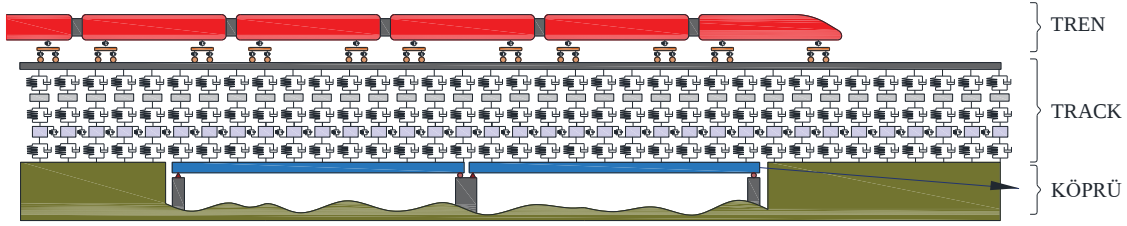
3.1.3. Hareketli yaylı kütle modeli

Hareketli yük ve kütle modelinde köprü kirişi üzerinden geçen yük veya kütle ile köprü etkileşimi incelenmiş olup aracın dinamik cevaplarının incelenmesi durumu söz konusu değildir. Buraya kadar verilen çalışmalarda hareketli yük ve kütle modeli olarak incelenen çalışmalarda köprünün dinamik cevabı makul ve gerçekçi sonuçlar verse de köprü üzerinden geçen trenin dinamiği açısından yeterli olmamaktadır. Çünkü tren ve köprü her ne kadar birbirinden farklı alt sistemler olsa da birbirlerini etkilemekte ve trenin süspansiyon sistemlerinin etkisi incelenmemektedir. Günümüzdeki tren modellerini tamamen yansıtmasa da bu konunun incelenmesi açısından Şekil 3.1d’de gösterilen tek serbestlik dereceli en basit model Biggs tarafından sunulmuştur [20]. Şekil 3.1e’de biraz daha gelişmiş bir model olan 4 serbestlik dereceli iki akslı araç-köprü modeli ise Fryba ve Wen tarafından sunulmuştur [13,21]. Geliştirilen biraz daha modern tren-köprü etkileşim modelleri sayesinde aracın dikey ve yunuslama hareketleri incelenebilmektedir.

3.1.4. Tren köprü etkileşim modeli

Geçtiğimiz yüzyıl içerisinde hareketli yük, hareketli kütle ve basit modeller araç-köprü dinamik etkileşiminin temellerini ortaya koymuştur. Son birkaç on yılda üstün analiz performansına sahip bilgisayarların ve denklem çözme kabiliyetleri yüksek olan yöntemlerin gelişmesiyle çok daha modern modeller geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir. Bu modern modellerde trenler genellikle multi-body teorisi ile

modellenirken köprüler sonlu elemanlar veya sürekli kiriş teorisi kullanılarak modellenirler. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi vagon, iki adet boji seti ve teker setlerinden oluşan tren alt sistemi ile köprü kirişinin birlikte çalışıldığı modellere tren-köprü etkileşim (TKE) modeli denilmektedir. Tren-köprü modelleri genellikle 10 serbestlik dereceli olarak modellenirler. Literatürde tren-köprü etkileşimini gelişimini ve farklı bakış açıları ile incelenmesini sağlayan birçok çalışmalar mevcuttur [30–33,36].



Şekil 3.2. TTKE modelinin grafiksel gösterimi.

3.2. Tren Track Köprü Modeli

Buraya kadar incelenen çalışmalarda tren ve köprü olmak üzere iki farklı alt sistemden bulunan çalışmalar incelenmiştir. Fakat gerçek sistemde yüksek hızlı trenin geçtiği demiryolu hattında ray pedi, travers ve balasttan oluşan track sistemi bulunmaktadır. Yani şu anki analizler kapsamında en modern çalışma tren-track-köprü etkileşim sistem (TTKES) analizi olmaktadır. Aslında tren, track ve köprü esasında tren-track ve track-köprü ile birleştirilmiş dinamik bir sistemden oluşmaktadır. Bir başka deyişle track sistemi köprü ve tren arasında bir bağlantı oluşturur [42].

Bu bölümde Şekil 3.2’de de detaylı gösterilen 3 ayrı alt sistemden oluşan tren-track-köprü elemanlarının her birinin detaylı olarak anlatımı yapılacaktır.

3.2.1. Tren modeli

Bu çalışmada önerilen tren modeli Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilmiştir. İncelenen araç modeli literatürde daha önce çalışılan birçok model [44,47,134,135] gibi olmak üzere sabit hızda hareket eden bir adet vagon, önde ve arkada bulunan birer boji ve teker setlerinden oluşmaktadır. Her bir eleman tanımlı özelliklere sahip yay ve sönüm elemanları ile birbirlerine bağlanmıştır. Teker setleri ile bojiler birbirlerine birincil süspansiyon elemanları ile bağlanırken, vagon ve bojiler birbirlerine ikincil süspansiyon elemanı ile bağlanmıştır [136]. Aracın dikey ve yanal titreşimlerini analiz etmek amacıyla üç boyutlu (3D) model oluşturulmuştur. Şekil 3.3’deki tren modelinin parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu modelde trenin hareket yönü x eksen

yönünde seçilmiştir. Tüm dikey yer değiştirmeler y eksenine doğrultusunda alınırken yatay yer değiştirmeler z eksenine doğrultusunda alınmıştır. Şekil 3.3'de yer değiştirmeler ve dönme hareketleri sırasıyla r_{12} ve θ_{12} olarak temsil edilmiştir. Burada ilk indis tren gövdesi, boji ve teker gibi tren kısımlarını temsil ederken ikinci indis x , y , z gibi tren kısımlarının hareket yönünü temsil etmektedir. Örneğin r_{cy} tren gövdesinin dikey hareketini gösterirken r_{cz} yatay yöndeki hareketini göstermektedir. r_{b1y} , r_{b1z} , r_{b2y} ve r_{b2z} sırasıyla ön bojinin dikey ve yatay yer değiştirmesini ve arka bojinin dikey ve yatay yer değiştirmesini temsil etmektedir. Ön boji tarafında bulunan teker setlerinin dikey yer değiştirmesi r_{w1y} ve r_{w2y} ile tanımlanırken yatay yer değiştirmeleri r_{w1z} ve r_{w2z} ile tanımlanmıştır. Benzer olarak arka boji tarafında bulunan teker setlerinin dikey yer değiştirmesi r_{w3y} ve r_{w4y} ile tanımlanırken yatay yer değiştirmeleri r_{w3z} ve r_{w4z} ile tanımlanmıştır.

Trenin yuvarlanma, yunuslama ve yalpalama hareketi sırasıyla x eksenine, z eksenine ve y eksenine etrafında olarak kabul edilmiştir. Tren gövdesinin, ön ve arka bojinin yunuslama hareketi sırasıyla θ_{cz} , θ_{b1z} ve θ_{b2z} olarak belirlenmiştir. Tren gövdesinin, ön ve arka bojinin ve teker setlerinin yuvarlanma hareketi sırasıyla θ_{cx} , θ_{b1x} , θ_{b2x} ve θ_{wx} olarak belirlenmiştir. Tren gövdesinin, ön ve arka bojinin ve teker setlerinin yalpalama hareketi sırasıyla θ_{cy} , θ_{b1y} , θ_{b2y} ve θ_{wy} olarak belirlenmiştir.

m_c , m_{b1} , m_{b2} , ve m_w parametreleri sırasıyla tren gövdesinin kütlelerini, ön ve arka bojinin kütlelerini ve teker setlerinin kütlelerini temsil etmektedir. I_{cz} , I_{b1z} ve I_{b2z} parametreleri sırasıyla tren gövdesinin, ön ve arka bojinin yunuslama eksenindeki kütle atalet momentlerini temsil etmektedir. I_{cx} , I_{b1x} , I_{b2x} ve I_{wx} parametreleri sırasıyla tren gövdesinin, ön ve arka bojinin ve teker setlerinin yuvarlanma eksenindeki kütle atalet momentlerini temsil etmektedir. Benzer olarak I_{cy} , I_{b1y} , I_{b2y} ve I_{wy} parametreleri sırasıyla tren gövdesinin, ön ve arka bojinin ve teker setlerinin yalpalama eksenindeki kütle atalet momentlerini temsil etmektedir. l_{b1} ve l_{b2} sırasıyla ön bojinin kütle merkezi ile tren gövdesinin kütle merkezi arasındaki uzaklığı ve arka bojinin kütle merkezi ile tren gövdesinin kütle merkezi arasındaki uzaklığı belirtmektedir. l_{w1} ve l_{w2} mesafeleri ise ön iki tekerlerin ön boji merkezine olan uzaklığı temsil eder. Benzer şekilde l_{w3} ve l_{w4} mesafeleri ise arka iki tekerlerin arka boji merkezine olan uzaklığı temsil etmektedir.

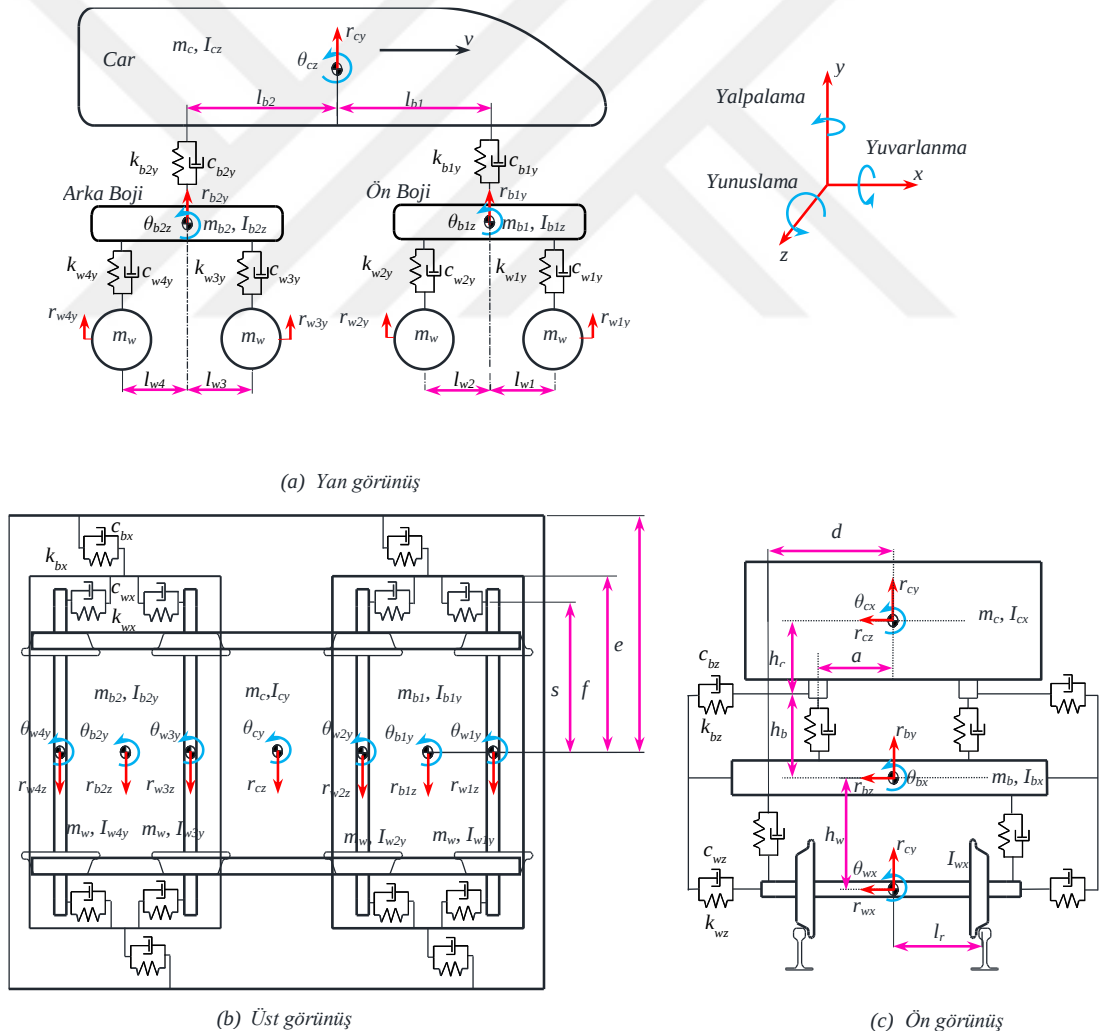
Tablo 3.1. Tren alt sisteminin parametreleri.

Vagonun kütlesi (m_c)	40 ton	İkincil süspansiyon sisteminin yanal sönüm katsayısı ($C_{biz}, i=1,2$)	10 kNs/m
Ön ve arka bojinin kütlesi ($m_{b1}=m_{b2}$)	3.04 ton	İkincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına sönüm katsayısı ($C_{bix}, i=1,2$)	100 kNs/m
Tekerlerin kütlesi ($m_{wi}, i=1,2,3,4$)	1.78 ton	Birincil süspansiyon sisteminin dikey sönüm katsayısı ($C_{wiy}, i=1,2,3,4$)	90.2 kNs/m
Vagonun yunuslama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti (I_{cz})	2080 ton m ²	Birincil süspansiyon sisteminin yanal sönüm katsayısı ($C_{wiz}, i=1,2,3,4$)	10 kNs/m
Vagonun yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti (I_{cx})	75 ton m ²	Birincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına sönüm katsayısı ($C_{wix}, i=1,2,3,4$)	10 kNs/m
Vagonun yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti (I_{cy})	224 ton m ²	Köprü uzunluğu (L)	50 m
Bojilerin yunuslama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti ($I_{biz}, i=1,2$)	3.93 ton m ²	Vagon ve boji merkezleri arası uzunlamasına mesafe ($l_{bi}, i=1,2$)	8.75 m
Bojilerin yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti ($I_{bix}, i=1,2$)	1.9 ton m ²	Boji ve birincil dikey süspansiyon sistemi arasındaki uzunlamasına mesafe ($l_{wi}, i=1,2,3,4$)	1.25 m
Bojilerin yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti ($I_{biy}, i=1,2$)	2.1 ton m ²	Boji ve birincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe (h_w)	0.22 m
Tekerlerin yuvarlanma hareketi etrafındaki kütle atalet momenti ($I_{wix}, i=1,2,3,4$)	1.25 ton m ²	Vagon ve ikincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe (h_c)	0.8 m
Tekerlerin yalpalama hareketi etrafındaki kütle atalet momenti ($I_{wiy}, i=1,2,3,4$)	1.4 ton m ²	Boji ve ikincil yanal süspansiyon sistemi arasındaki dikey mesafe (h_b)	0.5 m
İkincil süspansiyon sisteminin dikey rijitlik katsayısı ($k_{biy}, i=1,2$)	1180 kN/m	Vagon merkezinin ikincil süspansiyon sistemine olan yanal uzaklığı (a)	1 m
İkincil süspansiyon sisteminin yanal rijitlik katsayısı ($k_{biz}, i=1,2$)	15000 kN/m	Tekerin rayla temas noktasının Tekerseti merkezine olan uzaklığı (l_r)	0.7175 m
İkincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına rijitlik katsayısı ($k_{bix}, i=1,2$)	10000 kN/m	Birincil süspansiyon sisteminin vagon merkezine olan uzaklığı (d)	1 m
Birincil süspansiyon sisteminin dikey rijitlik katsayısı ($k_{wiy}, i=1,2,3,4$)	530 kN/m	Boji merkezinin uç noktasına olan uzaklığı (f)	1 m
Birincil süspansiyon sisteminin yanal rijitlik katsayısı ($k_{wiz}, i=1,2,3,4$)	350 kN/m	Tekerseti ve uzunlamasına ikincil süspansiyon arasındaki yanal mesafe (s)	0.9 m
Birincil süspansiyon sisteminin uzunlamasına rijitlik katsayısı ($k_{wix}, i=1,2,3,4$)	340 kN/m	Tekerseti ve uzunlamasına birincil süspansiyon arasındaki yanal mesafe (e)	1.2 m
İkincil süspansiyon sisteminin dikey sönüm katsayısı ($C_{biy}, i=1,2$)	39.2 kNs/m		

k_{w1y} , k_{w2y} , k_{w3y} ve k_{w4y} parametreleri ilgili boji ve tekerler arasındaki dikey yöndeki yay katsayısını temsil ederken k_{w1z} , k_{w2z} , k_{w3z} ve k_{w4z} parametreleri ise yatay yöndeki yay katsayılarını ifade etmektedir. C_{w1y} , C_{w2y} , C_{w3y} ve C_{w4y} parametreleri y eksenindeki dikey sönüm katsayısını temsil ederken C_{w1z} , C_{w2z} , C_{w3z} ve C_{w4z} eksenindeki yatay sönüm katsayısını temsil etmektedir. Bunlara ek olarak k_{b1y} ve k_{b2y} parametreleri ilgili boji ve tren gövdesi arasındaki dikey yöndeki yay katsayısını ifade ederken C_{b1y} ve C_{b2y} parametresi dikey yöndeki sönüm katsayısını ifade etmektedir. Benzer bir ifade ile k_{b1z} ve k_{b2z} parametreleri ilgili boji ve tren gövdesi arasındaki z ekseninde yatay yöndeki

yay katsayısını ifade ederken c_{b1z} ve c_{b2z} parametresi yatay yöndeki sönüm katsayısını ifade etmektedir. v ifadesi ise köprü kirişi boyunca soldan sağa doğru sabit hızda hareket eden trenin hızını temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında tren-track-köprü etkileşim analizi gerçekleştirmek amacıyla aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

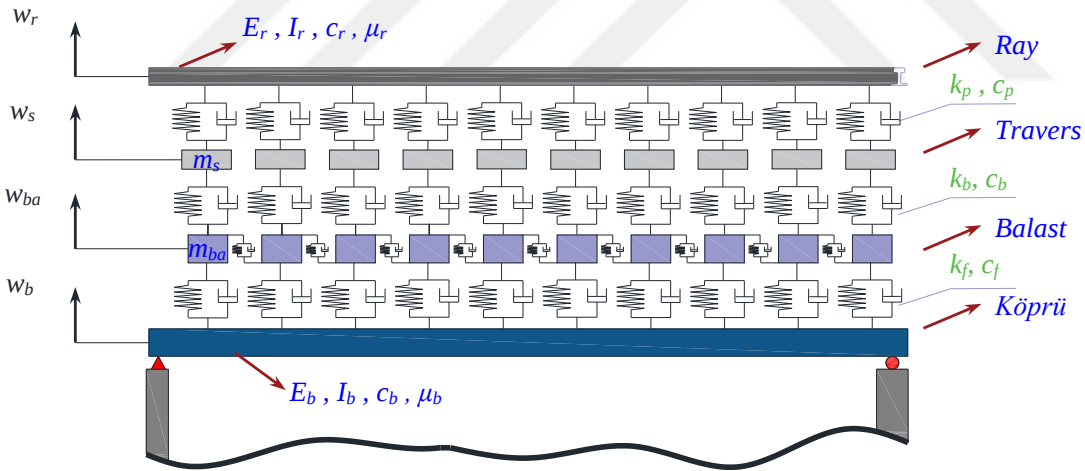
- Tablo 3.2’de görüldüğü gibi bir tren gövdesi ve iki boji 5 serbestlik dereceli olarak modellenirken tekersetlerinin her biri 4 serbestlik dereceli olarak modellenmiştir.
- Araç hızı sabit kabul edilmiş ve herhangi bir yavaşlama veya ivmelenme hareketi söz konusu değildir.
- Tren tekerlekleri daima raylarla temas halinde olmakta ve zıplama hareketi olmamaktadır.



Şekil 3.3. Trenin matematik modeli (a) Yan görünüş (b) Üst görünüş (c) Ön görünüş.

3.2.2. Track modeli

Track, üzerinde bulunan trene kılavuzluk yaparken aynı zamanda trenden gelen yükleri köprü ya da ana karaya iletmede görevlidir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi track olarak belirtilen sistem aslında ray, travers, balast ve bağlantı elemanları gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Ray-travers, travers-balast ve balast-köprü arasında sırasıyla katsayıları k_{pe} , k_b , k_f , c_{pe} , c_b , c_f olmak üzere sadece dikey yönde yay ve sönüm elemanları ile bağlantı bulunmaktadır. Birçok demiryolunda balastlı track bulunurken bazı demiryolları ise rayların beton döşemeler üzerine serildiği balastsız track olarak inşa edilebilmektedir [42]. TTKES analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanılabilecek farklı modeller mevcuttur. Balast ve traversin olmadığı rayların sadece köprü kirişi veya ana kara üzerine yerleştirildiği tek katmanlı [54,73,75,137,138], rayla birlikte sadece traversin bulunduğu iki katmanlı model [3–5,134] ve ray, travers ve balastın bulunduğu çoklu katmanlı track modelleri de [46,47] bulunmaktadır. Çok katmanlı track modellerinde, balast ve traversin altındaki katmanlar genellikle birbirine bağlı dağılmış eşdeğer kütle elemanları olarak kabul edilirler [42,44].



Şekil 3.4. Track-köprü alt sisteminin matematik modeli.

3.2.3. Köprü (Esnek zemin) modeli

Gelişen teknolojiyle birlikte trenlerin veya araçların hızları gittikçe artma eğilimindedirler. Artan hızlarla birlikte araçların geçtiği zeminle olan etkileşimleri önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Araçların köprü üzerinden geçişlerinden dolayı oluşan titreşimler hem üzerinden geçen aracın dinamik davranışlarını hem de köprünün dinamik davranışlarını oldukça etkilemektedir. Bu

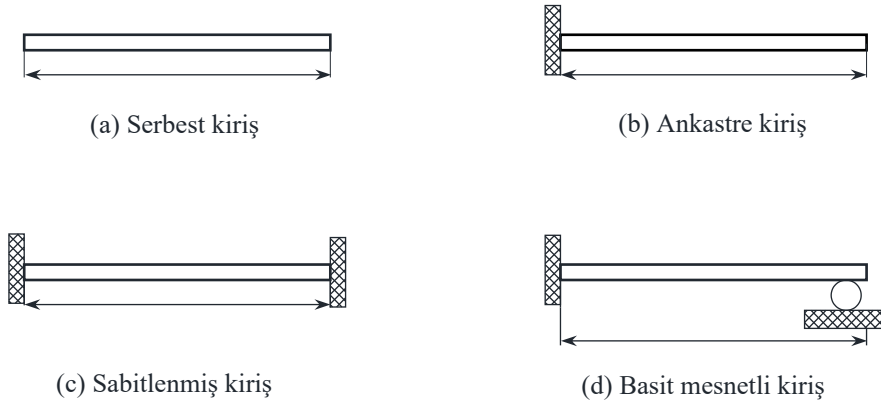
yüzden araştırmacılar tarafından köprü tasarımları konusunda bilimsel ve deneysel çalışmalara oldukça yer verilmiştir.

Tablo 3.2. Track ve köprü kirişi parametreleri.

	Kiriş Parametresi		
	Ray	Sağ köprü	Sol köprü
Elastikiyet modülü (GPa)	210	207	200
Kesit atalet momenti (m^4)	0.174	0.2	0.2
Birim uzunluğunun kütlesi (kg/m)	52.5	20000	18000
Eşdeğer sönüm katsayısı (Ns/m)	1750	1750	1750
Track Parametresi			
Traversin kütlesi (kg)	237	Balastın kütlesi (kg)	683
Ray ve travers arasındaki rijitlik katsayısı (N/m)	1.2×10^8	Ray ve travers arasındaki sönüm katsayısı (Ns/m)	1.24×10^5
Travers ve balast arasındaki rijitlik katsayısı (N/m)	2.4×10^8	Travers ve balast arasındaki sönüm katsayısı (Ns/m)	5.88×10^4
Balast ve köprü arasındaki rijitlik katsayısı (N/m)	6.5×10^7	Balast ve köprü arasındaki sönüm katsayısı (Ns/m)	3.12×10^4

Köprüler genel olarak kiriş teorileri kullanılarak modellenirler. Literatür incelendiğinde köprüler için Euler-Bernoulli, Timoshenko ve Rayleigh gibi kiriş teoremlerinin kullanıldığı görülmektedir. Demiryolu hatlarındaki köprü kesit ebatları köprü uzunluğuna göre küçük kaldığından dolayı demiryolu köprüleri genellikle Euler-Bernoulli kirişleri olarak modellenirler [139]. Ayrıca uzun aralıklı kirişlerde döner ataleti ve kayma çökmesi değerleri çok önemli olmadığı için Euler Bernoulli kirişleri tercih edilir [59]. Döner ataleti ve kayma çökmesini içeren Timoshenko kiriş teorileri kullanılarak yapılan birçok çalışma da mevcuttur [60,61]. Örneğin Heydari ve ark. sürekli model kullanarak Timoshenko hasarlı kirişlerin titreşim analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında Euler-Bernoulli kiriş modeli ile kıyaslama yaparak kısa kiriş olması durumunda önerdiği çalışmanın daha avantajlı olduğunu belirtmiştir [70]. Bazı çalışmalarda da her iki kiriş teorisi kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları birbirleri ile de kıyaslanmıştır [40,69].

Köprü analizlerinde hareket denklemlerinin çözümlenebilmesi amacıyla incelenen köprü kirişinin sınır şartlarının belirlenmiş olması gerekmektedir. Bu çalışmada esnek zemin modeli olarak ele alınan köprü modeli Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenmiştir. Literatürde sıkça karşılaşılan Euler-Bernoulli kiriş tipleri Şekil 3.5'te gibi belirtilmiştir [140]. Bu tez çalışmasında köprü modeli basit mesnetli kiriş tipi olarak modellenmiştir.



Şekil 3.5. Kiriş tipleri (a) Serbest kiriş (b) Ankastre kiriş (c) Sabitlenmiş kiriş (d) Basit mesnetli kiriş.

3.3. TTKE Modelinin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Hareket denklemlerini elde etmek için öncelikle incelenen sistemin matematik modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu bölümde Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilen tren modelinin ve track-köprü sistem modelinin hareket denklemleri elde edilecektir. Sistemlerin hareket denklemlerinin elde edilmesi için literatürde tercih edilen yöntemlerin en yaygını Lagrange yöntemidir. Lagrange yönteminde incelenen modelin toplam kinetik ve potansiyel enerjisi ele alınır. Lagrange fonksiyonu ise denklem 3.1'de gösterildiği gibi kinetik enerji ve potansiyel enerjinin farkıdır.

$$L = E_k - E_p \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de belirtilen formüle göre Lagrange ifadesini belirlemek için öncelikle sistemlerin potansiyel ve kinetik enerjilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Daha sonra bu enerji formüllerinin farkları alınarak Lagrange ifadesi hesap edilir. Daha sonra bu denklem aşağıda formülde kullanılır [141]. Burada D sistemin disipatif sönüm fonksiyonunu, q ilgili genelleştirilmiş koordinatını, Q ise genelleştirilmiş kuvveti tanımlamaktadır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.2)$$

3.3.1. Trenin hareket denklemi

Trene ait parametreler yukarıdaki gibi belirlendikten ve TTKE varsayımları yapıldıktan sonra trene ait hareket denklemleri bu bölümde elde edilecektir. Yüksek

hızlı tren modelinin kinetik enerji, potansiyel enerji ve disipatif sönüm fonksiyonu aşağıdaki denklemlerde çıkarılmış.

$$\begin{aligned}
E_k = \frac{1}{2} & \left[\int_0^L \mu_r [\dot{w}_r^2(x, t)] dx + \int_0^L \mu_b [\dot{w}_b^2(x, t)] dx + m_c \dot{r}_{cy}^2 + m_c \dot{r}_{cz}^2 \right. \\
& + I_{cz} \dot{\theta}_{cz}^2 + I_{cx} \dot{\theta}_{cx}^2 + I_{cy} \dot{\theta}_{cy}^2 + m_{b1} \dot{r}_{b1y}^2 + m_{b1} \dot{r}_{b1z}^2 \\
& + I_{b1z} \dot{\theta}_{b1z}^2 + I_{b1x} \dot{\theta}_{b1x}^2 + I_{b1y} \dot{\theta}_{b1y}^2 + m_{b2} \dot{r}_{b2y}^2 + m_{b2} \dot{r}_{b2z}^2 \\
& + I_{b2z} \dot{\theta}_{b2z}^2 + I_{b2x} \dot{\theta}_{b2x}^2 + I_{b2y} \dot{\theta}_{b2y}^2 + m_w \dot{r}_{w1y}^2 + m_w \dot{r}_{w1z}^2 \\
& + I_{w1x} \dot{\theta}_{w1x}^2 + I_{w1y} \dot{\theta}_{w1y}^2 + m_w \dot{r}_{w2y}^2 + m_w \dot{r}_{w2z}^2 \\
& + I_{w2x} \dot{\theta}_{w2x}^2 + I_{w2y} \dot{\theta}_{w2y}^2 + m_w \dot{r}_{w3y}^2 + m_w \dot{r}_{w3z}^2 \\
& + I_{w3x} \dot{\theta}_{w3x}^2 + I_{w3y} \dot{\theta}_{w3y}^2 + m_w \dot{r}_{w4y}^2 + m_w \dot{r}_{w4z}^2 \\
& \left. + I_{w4x} \dot{\theta}_{w4x}^2 + I_{w4y} \dot{\theta}_{w4y}^2 + m_s \dot{w}_s^2 + m_{ba} \dot{w}_{ba}^2 \right] \quad (3.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_p = & \frac{1}{2} \left[\int_0^L E_r I_r \left[w_r''^2(x, t) \right] dx + \int_0^L E_b I_b \left[w_b''^2(x, t) \right] dx \right. \\
& + k_{b1y} [r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz} l_{b1} - \theta_{cx} a + \theta_{b1x} a]^2 \\
& + k_{b1y} [r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz} l_{b1} + \theta_{cx} a - \theta_{b1x} a]^2 \\
& + k_{b2y} [r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz} l_{b2} - \theta_{cx} a + \theta_{b2x} a]^2 \\
& + k_{b2y} [r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz} l_{b2} + \theta_{cx} a - \theta_{b2x} a]^2 \\
& + k_{w1y} [r_{b1y} - r_{w1y} + \theta_{b1z} l_{w1} - \theta_{b1x} d + \theta_{w1x} d]^2 \\
& + k_{w1y} [r_{b1y} - r_{w1y} + \theta_{b1z} l_{w1} + \theta_{b1x} d - \theta_{w1x} d]^2 \\
& + k_{w2y} [r_{b1y} - r_{w2y} - \theta_{b1z} l_{w2} - \theta_{b1x} d + \theta_{w2x} d]^2 \\
& + k_{w2y} [r_{b1y} - r_{w2y} - \theta_{b1z} l_{w2} + \theta_{b1x} d - \theta_{w2x} d]^2 \\
& + k_{w3y} [r_{b2y} - r_{w3y} + \theta_{b2z} l_{w3} - \theta_{b2x} d + \theta_{w3x} d]^2 \\
& + k_{w3y} [r_{b2y} - r_{w3y} + \theta_{b2z} l_{w3} + \theta_{b2x} d - \theta_{w3x} d]^2 \\
& + k_{w4y} [r_{b2y} - r_{w4y} - \theta_{b2z} l_{w4} - \theta_{b2x} d + \theta_{w4x} d]^2 \\
& + k_{w4y} [r_{b2y} - r_{w4y} - \theta_{b2z} l_{w4} + \theta_{b2x} d - \theta_{w4x} d]^2 \\
& + 2k_{bz} [r_{cz} - r_{b1z} - \theta_{cx} h_c - \theta_{b1x} h_b]^2 \\
& + 2k_{bz} [r_{cz} - r_{b2z} - \theta_{cx} h_c - \theta_{b2x} h_b]^2 \\
& + 2k_{wz} [r_{b1z} - r_{w1z} - \theta_{b1x} h_w]^2 \\
& + 2k_{wz} [r_{b1z} - r_{w2z} - \theta_{b1x} h_w]^2 \\
& + 2k_{wz} [r_{b2z} - r_{w3z} - \theta_{b2x} h_w]^2 \\
& + 2k_{wz} [r_{b2z} - r_{w4z} - \theta_{b2x} h_w]^2 + 2k_{bx} [\theta_{cy} e - \theta_{b1y} f]^2 \\
& + 2k_{bx} [\theta_{cy} e - \theta_{b2y} f]^2 + 2k_{wx} [\theta_{b1y} s - \theta_{w1y} s]^2 \\
& + 2k_{wx} [\theta_{b1y} s - \theta_{w2y} s]^2 + 2k_{wx} [\theta_{b2y} s - \theta_{w3y} s]^2 \\
& + 2k_{wx} [\theta_{b2y} s - \theta_{w4y} s]^2 + k_p [w_{r,l} - w_{s,l}]^2 \\
& + k_p [w_{r,r} - w_{s,r}]^2 + k_b [w_{s,l} - w_{ba,l}]^2 \\
& + k_b [w_{s,r} - w_{ba,r}]^2 + k_f [w_{ba,l} - w_{b,l}]^2 \\
& \left. + k_f [w_{ba,r} - w_{b,r}]^2 \right] \tag{3.4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D = \frac{1}{2} & \left[\int_0^L c_r \dot{w}_r^2(x, t) dx + \int_0^L c_b \dot{w}_b^2(x, t) dx \right. \\
& + c_{b1y} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz} l_{b1} - \dot{\theta}_{cx} a + \dot{\theta}_{b1x} a]^2 \\
& + c_{b1y} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz} l_{b1} + \dot{\theta}_{cx} a - \dot{\theta}_{b1x} a]^2 \\
& + c_{b2y} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz} l_{b2} - \dot{\theta}_{cx} a + \dot{\theta}_{b2x} a]^2 \\
& + c_{b2y} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz} l_{b2} + \dot{\theta}_{cx} a - \dot{\theta}_{b2x} a]^2 \\
& + c_{w1y} [\dot{r}_{b1y} - \dot{r}_{w1y} + \dot{\theta}_{b1z} l_{w1} - \dot{\theta}_{b1x} d + \dot{\theta}_{w1x} d]^2 \\
& + c_{w1y} [\dot{r}_{b1y} - \dot{r}_{w1y} + \dot{\theta}_{b1z} l_{w1} + \dot{\theta}_{b1x} d - \dot{\theta}_{w1x} d]^2 \\
& + c_{w2y} [\dot{r}_{b1y} - \dot{r}_{w2y} - \dot{\theta}_{b1z} l_{w2} - \dot{\theta}_{b1x} d + \dot{\theta}_{w2x} d]^2 \\
& + c_{w2y} [\dot{r}_{b1y} - \dot{r}_{w2y} - \dot{\theta}_{b1z} l_{w2} + \dot{\theta}_{b1x} d - \dot{\theta}_{w2x} d]^2 \\
& + c_{w3y} [\dot{r}_{b2y} - \dot{r}_{w3y} + \dot{\theta}_{b2z} l_{w3} - \dot{\theta}_{b2x} d + \dot{\theta}_{w3x} d]^2 \\
& + c_{w3y} [\dot{r}_{b2y} - \dot{r}_{w3y} + \dot{\theta}_{b2z} l_{w3} + \dot{\theta}_{b2x} d - \dot{\theta}_{w3x} d]^2 \\
& + c_{w4y} [\dot{r}_{b2y} - \dot{r}_{w4y} - \dot{\theta}_{b2z} l_{w4} - \dot{\theta}_{b2x} d + \dot{\theta}_{w4x} d]^2 \\
& + c_{w4y} [\dot{r}_{b2y} - \dot{r}_{w4y} - \dot{\theta}_{b2z} l_{w4} + \dot{\theta}_{b2x} d - \dot{\theta}_{w4x} d]^2 \\
& + 2c_{bz} [\dot{r}_{cz} - \dot{r}_{b1z} - \dot{\theta}_{cx} h_c - \dot{\theta}_{b1x} h_b]^2 \\
& + 2c_{bz} [\dot{r}_{cz} - \dot{r}_{b2z} - \dot{\theta}_{cx} h_c - \dot{\theta}_{b2x} h_b]^2 \\
& + 2c_{wz} [\dot{r}_{b1z} - \dot{r}_{w1z} - \dot{\theta}_{b1x} h_w]^2 \& \\
& + 2c_{wz} [\dot{r}_{b1z} - \dot{r}_{w2z} - \dot{\theta}_{b1x} h_w]^2 \\
& + 2c_{wz} [\dot{r}_{b2z} - \dot{r}_{w3z} - \dot{\theta}_{b2x} h_w]^2 \\
& + 2c_{wz} [\dot{r}_{b2z} - \dot{r}_{w4z} - \dot{\theta}_{b2x} h_w]^2 \\
& + 2c_{bx} [\dot{\theta}_{cy} e - \dot{\theta}_{b1y} f]^2 + 2c_{bx} [\dot{\theta}_{cy} e - \dot{\theta}_{b2y} f]^2 \\
& + c_{wx} [\dot{\theta}_{b1y} s - \dot{\theta}_{w1y} s]^2 + 2c_{wx} [\dot{\theta}_{b1y} s - \dot{\theta}_{w2y} s]^2 \\
& + 2c_{wx} [\dot{\theta}_{b2y} s - \dot{\theta}_{w3y} s]^2 + 2c_{wx} [\dot{\theta}_{b2y} s - \dot{\theta}_{w4y} s]^2 \\
& + c_p [\dot{w}_{r,l} - \dot{w}_{s,l}]^2 + c_p [\dot{w}_{r,r} - \dot{w}_{s,r}]^2 \& \\
& + c_b [\dot{w}_{s,l} - \dot{w}_{ba,l}]^2 + c_b [\dot{w}_{s,r} - \dot{w}_{ba,r}]^2 \\
& \left. + c_f [\dot{w}_{ba,l} - \dot{w}_{b,l}]^2 + c_f [\dot{w}_{ba,r} - \dot{w}_{b,r}]^2 \right] \tag{3.5}
\end{aligned}$$

Lagrange ifadesi denklem 3.3 ve denklem 3.4'te verilen kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki farka eşittir. Lagrange ifadesi ($L=E_k-E_p$) olarak tanımlanabilir. Burada η_k trenin genelleştirilmiş koordinatlarıdır ve Tablo 3.3'de görüldüğü gibi trenin tüm 31 serbestlik derecesini içermektedir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}_k(t)} \right) - \frac{\partial L}{\partial \eta_k(t)} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\eta}_k(t)} = 0, k = 1, 2, \dots, 31, \quad (3.6)$$

Tablo 3.3. Yüksek hızlı tren modelinin genelleştirilmiş koordinatları.

Parametre	Dikey Hareket	Yanal Hareket	Yunuslama	Yuvarlanma	Yalpalama
Vagon	r_{cy}	r_{cz}	θ_{cz}	θ_{cx}	θ_{cy}
Ön boji	r_{b1y}	r_{b1z}	θ_{b1z}	θ_{b1x}	θ_{b1y}
Arka boji	r_{b2y}	r_{b2z}	θ_{b2z}	θ_{b2x}	θ_{b2y}
1. Tekerseti	r_{w1y}	r_{w1z}		θ_{w1x}	θ_{w1y}
2. Tekerseti	r_{w2y}	r_{w2z}		θ_{w2x}	θ_{w2y}
3. Tekerseti	r_{w3y}	r_{w3z}		θ_{w3x}	θ_{w3y}
4. Tekerseti	r_{w4y}	r_{w4z}		θ_{w4x}	θ_{w4y}

Şekil 3.3'de görülen 31 serbestlik dereceli tam tren modelinin hareket denklemleri denklem 3.6'da ki Lagrange ifadesi kullanılarak aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

Vagonun dikey yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{cy} = & -2c_{b1y}/m_c [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz}l_{b1}] \\ & -2c_{b2y}/m_c [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz}l_{b2}] - 2k_{b1y}/m_c [r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz}l_{b1}] \\ & -2k_{b2y}/m_c [r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz}l_{b2}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Vagonun yanal yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned} \ddot{r}_{cz} = & -2c_{bz}/m_c [2\dot{r}_{cz} - \dot{r}_{b1z} - \dot{r}_{b2z} - 2\dot{\theta}_{cx}h_c - \dot{\theta}_{b1x}h_b - \dot{\theta}_{b2x}h_b] \\ & -2k_{bz}/m_c [2r_{cz} - r_{b1z} - r_{b2z} - 2\theta_{cx}h_c - \theta_{b1x}h_b - \theta_{b2x}h_b] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Vagonun yunuslama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_{cz} = & -2c_{b1y}l_{b1}/I_{cz} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz}l_{b1}] \\ & + 2c_{b2y}l_{b2}/I_{cz} [\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz}l_{b2}] \\ & - 2k_{b1y}l_{b1}/I_{cz} [r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz}l_{b1}] \\ & + 2k_{b2y}l_{b2}/I_{cz} [r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz}l_{b2}] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Vagonun yuvarlanma eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{cx} = & -2c_{b1y}a^2/I_{cx}[\dot{\theta}_{cx} - \dot{\theta}_{b1x}] - 2c_{b2y}a^2/I_{cx}[\dot{\theta}_{cx} - \dot{\theta}_{b2x}] \\ & -2k_{b1y}a^2/I_{cx}[\theta_{cx} - \theta_{b1x}] - 2k_{b2y}a^2/I_{cx}[\theta_{cx} - \theta_{b2x}]\end{aligned}\quad (3.10)$$

Vagonun yalpalama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{cy} = & -2c_{bx}e/I_{cy}[2\dot{\theta}_{cy}e - \dot{\theta}_{b1y}f - \dot{\theta}_{b2y}f] \\ & -2k_{bx}e/I_{cy}[2\theta_{cy}e - \theta_{b1y}f - \theta_{b2y}f]\end{aligned}\quad (3.11)$$

Ön bojinin dikey yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{r}_{b1y} = & 2c_{b1y}/m_{b1}[\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz}l_{b1}] \\ & -c_{w1y}/m_{b1}[2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{1L}, t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w1}] \\ & -c_{w2y}/m_{b1}[2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{2L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w2}] \\ & + 2k_{b1y}/m_{b1}[r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz}l_{b1}] \\ & -k_{w1y}/m_{b1}[2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{1L}, t)q_i + 2\theta_{b1z}l_{w1}] \\ & -k_{w2y}/m_{b1}[2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{2L}, t)q_i - 2\theta_{b1z}l_{w2}]\end{aligned}\quad (3.12)$$

Ön bojinin yanal yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{r}_{b1z} = & 2c_{bz}/m_{b1}[\dot{r}_{cz} - \dot{r}_{b1z} - \dot{\theta}_{cx}h_c + \dot{\theta}_{b1x}h_b] \\ & - 2c_{wz}/m_{b1}[2\dot{r}_{b1z} - \dot{r}_{w1z} - \dot{r}_{w2z} - 2\dot{\theta}_{b1x}h_w] \\ & + 2k_{bz}/m_{b1}[r_{cz} - r_{b1z} - \theta_{cx}h_c + \theta_{b1x}h_b] \\ & - 2k_{wz}/m_{b1}[2r_{b1z} - r_{w1z} - r_{w2z} - 2\theta_{b1x}h_w]\end{aligned}\quad (3.13)$$

Ön bojinin yunuslama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{b1z} = & c_{w2y}l_{w2}/I_{b1z}[2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{2L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w2}] \\ & -c_{w1y}l_{w1}/I_{b1z}[2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{1L}, t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w1}] \\ & -k_{w1y}l_{w1}/I_{b1z}[2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{1L}, t)q_i + 2\theta_{b1z}l_{w1}] \\ & +k_{w2y}l_{w2}/I_{b1z}[2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{2L}, t)q_i - 2\theta_{b1z}l_{w2}]\end{aligned}\quad (3.14)$$

Ön bojinin yuvarlanma eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_{b1x} = & 2c_{b1y}a^2/I_{b1x}[\dot{\theta}_{cx} - \dot{\theta}_{b1x}] \\
& + c_{w1y}d/I_{b1x}[2\dot{\theta}_{w1x}d - \varphi_i(\xi_{1R}, t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{1L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b1x}d] \\
& + c_{w2y}d/I_{b1x}[2\dot{\theta}_{w2x}d - \varphi_i(\xi_{2R}, t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{2L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b1x}d] \\
& + 2k_{b1y}a^2/I_{b1x}[\theta_{cx} - \theta_{b1x}] \\
& + k_{w1y}d/I_{b1x}[2\theta_{w1x}d - \varphi_i(\xi_{1R}, t)q_i + \varphi_i(\xi_{1L}, t)q_i - 2\theta_{b1x}d] \\
& + k_{w2y}d/I_{b1x}[2\theta_{w2x}d - \varphi_i(\xi_{2R}, t)q_i + \varphi_i(\xi_{2L}, t)q_i - 2\theta_{b1x}d]
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Ön bojinin yalpalama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_{b1y} = & 2c_{bx}f/I_{b1y}[\dot{\theta}_{cy}e - \dot{\theta}_{b1y}f] \\
& - 2c_{wx}s^2/I_{b1y}[2\dot{\theta}_{b1y} - \dot{\theta}_{w1y} - \dot{\theta}_{w2y}] \\
& + 2k_{bx}f/I_{b1y}[\theta_{cy}e - \theta_{b1y}f] \\
& - 2k_{wx}s^2/I_{b1y}[2\theta_{b1y} - \theta_{w1y} - \theta_{w2y}]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Arka bojinin dikey yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{b2y} = & 2c_{b2y}/m_{b2}[\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz}l_{b2}] \\
& - c_{w3y}/m_{b2}[2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{3L}, t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w3}] \\
& - c_{w4y}/m_{b2}[2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{4L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w4}] \\
& + 2k_{b2y}/m_{b2}[r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz}l_{b2}] \\
& - k_{w3y}/m_{b2}[2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{3L}, t)q_i + 2\theta_{b2z}l_{w3}] \\
& - k_{w4y}/m_{b2}[2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{4L}, t)q_i - 2\theta_{b2z}l_{w4}]
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Arka bojinin yanal yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{b2z} = & 2c_{bz}/m_{b2}[\dot{r}_{cz} - \dot{r}_{b2z} - \dot{\theta}_{cx}h_c - \dot{\theta}_{b2x}h_b] \\
& - 2c_{wz}/m_{b2}[2\dot{r}_{b2z} - \dot{r}_{w3z} - \dot{r}_{w4z} - 2\dot{\theta}_{b2x}h_w] \\
& + 2k_{bz}/m_{b2}[r_{cz} - r_{b2z} - \theta_{cx}h_c - \theta_{b2x}h_b] \\
& - 2k_{wz}/m_{b2}[2r_{b2z} - r_{w3z} - r_{w4z} - 2\theta_{b2x}h_w]
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Arka bojinin yunuslama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_{b2z} = & -c_{w3y}l_{w3}/I_{b2z}[2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{3L}, t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w3}] \\
& + c_{w4y}l_{w4}/I_{b2z}[2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R}, t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{4L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w4}] \\
& - k_{w3y}l_{w3}/I_{b2z}[2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{3L}, t)q_i + 2\theta_{b2z}l_{w3}] \\
& + k_{w4y}l_{w4}/I_{b2z}[2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R}, t)q_i - \varphi_i(\xi_{4L}, t)q_i - 2\theta_{b2z}l_{w4}]
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Arka bojinin yuvarlanma eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_{b2x} = & 2c_{b2y}a^2/I_{b2x}[\dot{\theta}_{cx} - \dot{\theta}_{b2x}] \\
& + c_{w3y}d/I_{b2x}[2\dot{\theta}_{w3x}d - \varphi_i(\xi_{3R}, t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{3L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b2x}d] \\
& + c_{w4y}d/I_{b2x}[2\dot{\theta}_{w4x}d - \varphi_i(\xi_{4R}, t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{4L}, t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b2x}d] \\
& + 2k_{b2y}a^2/I_{b2x}[\theta_{cx} - \theta_{b2x}] \\
& + k_{w3y}d/I_{b2x}[2\theta_{w3x}d - \varphi_i(\xi_{3R}, t)q_i + \varphi_i(\xi_{3L}, t)q_i - 2\theta_{b2x}d] \\
& + k_{w4y}d/I_{b2x}[2\theta_{w4x}d - \varphi_i(\xi_{4R}, t)q_i + \varphi_i(\xi_{4L}, t)q_i - 2\theta_{b2x}d]
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Arka bojinin yalpalama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_{b2y} = & 2c_{bxf}/I_{b2y}[\dot{\theta}_{cye} - \dot{\theta}_{b2yf}] - 2c_{wx}s^2/I_{b2y}[2\dot{\theta}_{b2y} - \dot{\theta}_{w3y} - \dot{\theta}_{w4y}] \\
& + 2k_{bxf}/I_{b2y}[\theta_{cye} - \theta_{b2yf}] - 2k_{wx}s^2/I_{b2y}[2\theta_{b2y} - \theta_{w3y} - \theta_{w4y}]
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Tekersetlerinin hareket denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir. Burada, (k=1,2-3,4 j=1,2)'dir.

Dikey yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{wky} = & 2c_{wky}/m_w[\dot{r}_{bjy} - \dot{r}_{wky} + \dot{\theta}_{bjz}l_{wk}] \\
& + 2k_{wky}/m_w[r_{bjy} - r_{wky} + \theta_{bjz}l_{wk}]
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Yanal yöndeki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
\ddot{r}_{wkz} = & 2c_{wz}/m_w[\dot{r}_{bjz} - \dot{r}_{wkz} - \dot{\theta}_{bjx}h_w] \\
& + 2k_{wz}/m_w[r_{bjz} - r_{wkz} - \theta_{bjx}h_w]
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Yuvarlanma eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{w_kx} = & c_{w_ky}d/I_{w_kx}[2\dot{\theta}_{bjx}d - \varphi_i(\xi_{kL},t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{kR},t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{w_kx}d] \\ & + k_{w_ky}d/I_{w_kx}[2\theta_{bjx}d - \varphi_i(\xi_{kL},t)q_i + \varphi_i(\xi_{kR},t)q_i - 2\theta_{w_kx}d]\end{aligned}\quad (3.24)$$

Yalpalama eksenini etrafındaki hareket denklemi:

$$\ddot{\theta}_{w_ky} = 2c_{wx}S^2/I_{w_ky}[\dot{\theta}_{bjy} - \dot{\theta}_{w_ky}] + 2k_{wx}S^2/I_{w_ky}[\theta_{bjy} - \theta_{w_ky}] \quad (3.25)$$

3.3.2. Track-köprü sisteminin hareket denklemi

Track-köprü sistemi karmaşık olduğundan dolayı raylar genellikle Winkler elastik temelleri üzerinde duran sonsuz Euler-Bernoulli veya Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak modellenirken, travers ve balast bireysel katı cisim olarak modellenerek hareket denklemleri belirlenir [44,142]. Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre rayın diferansiyel denklemi denklem 3.26'de verilmiştir. Burada E_r ve I_r sırasıyla ray kirişinin elastikiyet modülü ve alan atalet momentini temsil etmektedir. w_r ray kirişinin belirli t zamanındaki dikey yer değiştirmesini, μ_r ray kirişinin birim uzunluğunun kütlesini, F_r ray kirişine etkiyen toplam teker kuvvetini, δ Dirac-Delta fonksiyonunu, ω_r ray kirişinin sönümlenme dairesel frekansını temsil etmektedir. x_r ve x_b sırasıyla ray ve köprü kirişinin üzerine etkiyen kuvvetin kirişin sol referansına göre konumunu temsil etmektedir ve değeri denklem 3.28'de gibi belirlenmektedir.

Bu çalışmada köprü altsistemi üniform basit mesnetli Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenmiştir. Köprü kiriş modeline ait hareket denklemi denklem 3.27'de verilmiştir. Verilen denklemlerde μ_b köprü kirişin birim uzunluğunun kütlesi, ω_b köprü kirişinin sönümlenme dairesel frekansını, E_b ve I_b sırasıyla köprü kirişinin elastikiyet modülü ve alan atalet momentini temsil etmektedir.

$$E_r I_r \frac{\partial^4 w_r(x,t)}{\partial x^4} + \mu_r \frac{\partial^2 w_r(x,t)}{\partial t^2} + 2\mu_r \omega_r \frac{\partial w_r(x,t)}{\partial t} = - \sum_{r=1}^n F_r \delta(x - x_r) \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned}E_b I_b \frac{\partial^4 w_b(x,t)}{\partial x^4} + \mu_b \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} + 2\mu_b \omega_b \frac{\partial w_b(x,t)}{\partial t} \\ = - \sum_{b=1}^n [k_f(w_{ba} - w_b) + c_f(\dot{w}_{ba} - \dot{w}_b)] \delta(x - x_b)\end{aligned}\quad (3.27)$$

$$x_1 = vt, x_2 = vt - 2l_w, x_3 = vt - l_{b1} - l_{b2}, x_4 = vt - l_{b1} - l_{b2} - 2l_w, \quad (3.28)$$

Aşağıda sırasıyla sağ ray, sol ray, sağ köprü ve sol köprü kiriş sapmalarının seri analitik fonksiyonların çözümü için Galerkin yöntemi kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} w_{R,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) q_i(t), & w_{L,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_{i+n}(x) q_{i+n}(t), \\ w_{R,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \phi_i(t), & w_{L,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_{i+n}(x) \phi_{i+n}(t), \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{w}_{R,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \dot{q}_i(t), & \dot{w}_{L,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_{i+n}(x) \dot{q}_{i+n}(t), \\ \dot{w}_{R,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \dot{\phi}_i(t), & \dot{w}_{L,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi_{i+n}(x) \dot{\phi}_{i+n}(t), \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} w''_{R,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi''_i(x) q_i(t), & w''_{L,r}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi''_{i+n}(x) q_{i+n}(t), \\ w''_{R,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi''_i(x) \phi_i(t), & w''_{L,b}(x, t) &= \sum_{i=1}^n \varphi''_{i+n}(x) \phi_{i+n}(t), \end{aligned} \quad (3.31)$$

Burada q ve ϕ sırasıyla ray ve köprü kirişlerinin çökmesini temsil eden genelleştirilmiş koordinatlardır. φ kirişin sınır koşullarıyla elde edilen salınım şeklini temsil etmektedir. Bu salınım şekilleri arasındaki ortogonalite şartları denklem 3.32’de verilmiştir.

$$\varphi_i(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.32)$$

Ortogonalite şartları aşağıdaki denklemde belirtilmiştir.

$$\int_0^L \mu \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx = N_i \delta_{ij}, \quad \int_0^L EI \varphi''_i(x) \varphi''_j(x) dx = \Pi_i \delta_{ij} \quad (3.33)$$

Burada, δ_{ij} Kronecker deltayı temsil etmektedir.

Track-köprü sisteminin Lagrange denklemini aşağıdaki gibi türetilmiştir

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_i(t)} \right) - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i(t)} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\lambda}_i(t)} = Q_i, i = 1, 2, \dots, 32, \quad (3.34)$$

$$Q_i = \int_0^L \varphi_i(x) f_{ci}(x, t) dx, \quad i = 1, 2, \dots, 32, \quad (3.35)$$

Track-köprü sisteminin geliştirilmiş koordinatları aşağıdaki denklemde verilmiştir. Bu çalışma ray ve köprü kirişleri ile track sisteminde bulunan balast ve traversin de ilk dört titreşim modunu dikkate almıştır. Burada q , γ , ψ ve ϕ sırasıyla ray kirişini, traversi, balastı ve köprü kirişini temsil etmektedir.

$$\lambda(t) = \begin{pmatrix} q_1(t) & q_2(t) & q_3(t) & q_4(t) & q_5(t) & q_6(t) & q_7(t) & q_8(t) \\ \gamma_1(t) & \gamma_2(t) & \gamma_3(t) & \gamma_4(t) & \gamma_5(t) & \gamma_6(t) & \gamma_7(t) & \gamma_8(t) \\ \psi_1(t) & \psi_2(t) & \psi_3(t) & \psi_4(t) & \psi_5(t) & \psi_6(t) & \psi_7(t) & \psi_8(t) \\ \phi_1(t) & \phi_2(t) & \phi_3(t) & \phi_4(t) & \phi_5(t) & \phi_6(t) & \phi_7(t) & \phi_8(t) \end{pmatrix}^T, \quad (3.36)$$

Şekil 3.4'te gösterilen track-köprü sisteminin hareket denklemleri denklem 3.33'te verilen ortagonallik şartları kullanılarak elde edilmiştir. Sırasıyla ray kirişinin, traversin, balastın ve köprü kirişinin hareket denklemleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. Burada f_g ile gösterilen ifade tren tarafından köprü kirişine uygulanan statik kuvveti temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{i(t)} = & -S_1 q_{i(t)} / N_1 - c_1 \dot{q}_{i(t)} / N_1 \\ & + \varphi_i(\xi_{1R}, t) / N_1 \left[c_{w1y} \left[\dot{r}_{b1y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{1R}, t) \dot{q}_i + \dot{\theta}_{b1z} l_{w1} - \dot{\theta}_{b1x} d + \dot{\theta}_{w1x} d \right] \right. \\ & \quad \left. + k_{w1y} \left[r_{b1y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{1R}, t) q_i + \theta_{b1z} l_{w1} - \theta_{b1x} d + \theta_{w1x} d \right] - f g_1 \right] \\ & + \varphi_i(\xi_{2R}, t) / N_1 \left[c_{w2y} \left[\dot{r}_{b2y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{2R}, t) \dot{q}_i - \dot{\theta}_{b2z} l_{w2} - \dot{\theta}_{b2x} d + \dot{\theta}_{w2x} d \right] \right. \\ & \quad \left. + k_{w2y} \left[r_{b2y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{2R}, t) q_i - \theta_{b2z} l_{w2} - \theta_{b2x} d + \theta_{w2x} d \right] - f g_2 \right] \\ & + \varphi_i(\xi_{3R}, t) / N_1 \left[c_{w3y} \left[\dot{r}_{b3y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{3R}, t) \dot{q}_i + \dot{\theta}_{b3z} l_{w3} - \dot{\theta}_{b3x} d + \dot{\theta}_{w3x} d \right] \right. \\ & \quad \left. + k_{w3y} \left[r_{b3y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{3R}, t) q_i + \theta_{b3z} l_{w3} - \theta_{b3x} d + \theta_{w3x} d \right] - f g_3 \right] \\ & + \varphi_i(\xi_{4R}, t) / N_1 \left[c_{w4y} \left[\dot{r}_{b4y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{4R}, t) \dot{q}_i - \dot{\theta}_{b4z} l_{w4} - \dot{\theta}_{b4x} d + \dot{\theta}_{w4x} d \right] \right. \\ & \quad \left. + k_{w4y} \left[r_{b4y} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_{4R}, t) q_i - \theta_{b4z} l_{w4} - \theta_{b4x} d + \theta_{w4x} d \right] - f g_4 \right] \end{aligned} \quad (3.37)$$

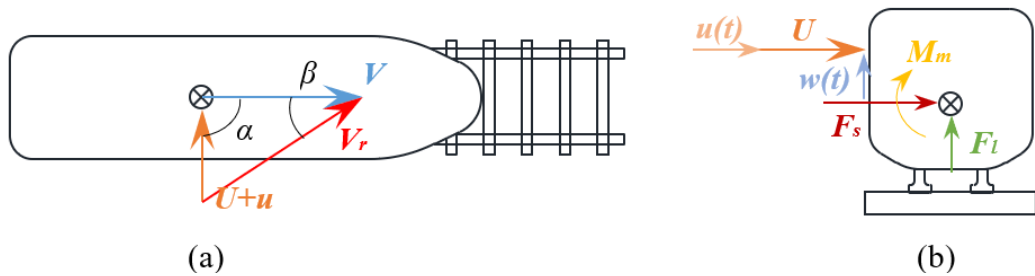
$$\ddot{w}_{s,r} = \frac{1}{m_s} \left[k_p [w_{r,r} - w_{s,r}] - k_b [w_{s,r} - w_{ba,r}] + c_p [\dot{w}_{r,r} - \dot{w}_{s,r}] - c_b [\dot{w}_{s,r} - \dot{w}_{ba,r}] \right], \quad (3.38)$$

$$\ddot{w}_{ba,r} = \frac{1}{m_{ba}} \left[k_b [w_{s,r} - w_{ba,r}] - k_f [w_{ba,r} - w_{b,r}] + c_b [\dot{w}_{s,r} - \dot{w}_{ba,r}] - c_f [\dot{w}_{ba,r} - \dot{w}_{b,r}] \right] \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}_{i(t)} = & -Sb_1 \phi_{i(t)} / N_{b_1} - cb_1 \dot{\phi}_{i(t)} / N_{b_1} \\ & - c_f \varphi_i(\xi_R, t) / N_{b_1} \left[\dot{w}_{ba,R} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_R, t) \dot{\phi}_i \right] \\ & - k_f \varphi_i(\xi_R, t) / N_{b_1} \left[w_{ba,R} - \sum_{i=1}^n \varphi_i(\xi_R, t) \phi_i \right] \end{aligned} \quad (3.40)$$

3.4. Çapraz Rüzgâr Modeli

Bu bölümde Şekil 3.6’da da gösterildiği gibi yüksek hızlı trenleri olumsuz etkileyen ve bir doğal tehlike olan aşırı rüzgârlar incelenecektir. Bu tür oluşumlar yüksek hızlı tren mühendisliğinde yeni kaygılar meydana getirirken üzerinde çalışılmasının önemli olduğu da bilinmektedir. Özellikle de trenler yüksek sütunlara sahip uzun viyadüklerden veya köprülerden geçerken çok güçlü rüzgârlara maruz kalmaktadırlar. Çünkü bilinmektedir ki literatürde çok güçlü rüzgârlardan dolayı raydan çıkan trenler bulunmaktadır [121]. Örneğin Japonya’da kaydedilen kaza verilerine göre 1999’a değin toplamda 29 tren kazası direkt olarak çapraz rüzgârlardan dolayı meydana gelmiştir [116]. Bu durumlarda trenin raydan çıkmasını önlemek amacıyla kuvvetli rüzgârların olduğu yerlerde trenlerin hızları azaltılabilir veya bu bölgelere rüzgâr bariyeri de kurulabilir.



Şekil 3.6. Rüzgâr hız vektörleri ve trene etkiyen aerodinamik kuvvetler (a) Üst görünüş (b) Ön görünüş.

Güçlü bir çapraz rüzgârlara maruz kalan yüksek hızlı trenlerin sürüş güvenliğini değerlendirebilmek için öncelikle o trenin üzerinden geçtiği yapı ile etkileşiminin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü yüksek hızda hareket eden trenlerin rüzgâr dolayısıyla raydan çıkma durumu etkileşim halinde bulunduğu zeminle ilgilidir.

Araştırmacılar tarafından temelde iki ana rüzgâr modeli kullanılmaktadır. Bunlar ortalama hız ve türbülans yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak, rüzgârın kararsız bileşeninin yapay bir rüzgârla simüle edildiği ayrık rüzgâr modelleri ve güç spektral yoğunluğu tabanlı belirlenen rüzgârın zamanla değişen dalgalı bileşeni olarak türbülanslı rüzgâr modelleridir [122,143].

Cao ve ark. [144] tarafından önerilen türbülanslı rüzgâr modeli rüzgâr hızı alanı, rüzgâr hızının ortalama değeri ile karakterize edilen ortalama bileşen ve rüzgâr hızının ortalama değer etrafında dalgalanan değerlerini temsil eden türbülanslı bileşen olmak üzere iki bileşenden oluşur. Önerilen türbülanslı rüzgâr modeline göre sırasıyla zamana bağlı yatay ve dikey yöndeki rüzgâr tanımları aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$u_j(t) = \sqrt{2\Delta\omega} \sum_{m=1}^j \sum_{f=1}^N \sqrt{S_u(\omega_{mf})} G_{jm}(\omega_{mf}) \cos(\omega_{mf}t + \varphi_{mf}) \quad (3.41)$$

$$w_j(t) = \sqrt{2\Delta\omega} \sum_{m=1}^j \sum_{f=1}^N \sqrt{S_w(\omega_{mf})} G_{jm}(\omega_{mf}) \cos(\omega_{mf}t + \varphi_{mf}) \quad (3.42)$$

Burada ω_{mf} rüzgârın frekansını $\Delta\omega$ frekans artışını, N rüzgâr frekanslarının sayısını, φ_{mf} 0 ile 2π arasında eşit dağılan rastgele oluşturulan faz açısını temsil etmektedir. $S_u(\omega_{mf})$ ve $S_w(\omega_{mf})$ yatay ve dikey rüzgâr spektrumlarını temsil etmektedir. $G_{jm}(\omega_{mf})$ katsayı matrisi elemanını tanımlamaktadır ve aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$G_{jm}(\omega_{mf}) = \begin{cases} 0 & ; m > j \\ C^{|j-m|} & ; m = 1 \\ C^{|j-m|} \sqrt{(1-C^2)} & ; m < j \end{cases} \quad (3.43)$$

$$\Gamma_{jm}(\Delta_{jm}, \omega_{mf}) = \left(e^{-\frac{\lambda \omega_{mf} \Delta}{2\pi U}} \right)^{|j-m|} = C^{j-m} \quad (3.44)$$

Verilen denklemlerde U ortalama rüzgâr hızını, λ 7 ile 10 arasında sabit olan Davenport'un boyutsuz faktörünü tanımlamaktadır.

Rüzgârın frekansı aşağıdaki denklemdeki gibi verilmiştir.

$$\omega_{mf} = (f - 1)\Delta\omega + \frac{m}{n}\Delta\omega, \quad f = 1, 2, \dots, N \quad (3.45)$$

Denklem 3.41 ve 3.42'de verilen Kaimal spektrumu [145] olarak bilinen yatay yöndeki rüzgâr spektrumu ve Lumney and Panofsky spektrumu [146] olarak bilinen dikey rüzgâr spektrumları aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$S_u(\omega_{mf}) = \frac{u_*^2}{\omega_{mf}} \frac{200f_z}{(1 + 50f_z)^{\frac{5}{3}}} \quad (3.46)$$

$$S_w(\omega_{mf}) = \frac{u_*^2}{\omega_{mf}} \frac{3.36f_z}{(1 + 10f_z)^{\frac{5}{3}}} \quad (3.47)$$

Burada f_z , z yüksekliğindeki normalleştirilmiş frekanstır, u_* rüzgâr akışının sürtünme hızıdır ve aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir.

$$f_z = \frac{\omega_{mf}z}{2\pi U} \quad (3.48)$$

$$u_* = \frac{kU}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3.49)$$

Verilen denklemlerde z_0 pürüzlülük uzunluğunu, k ise von Karman sabitini temsil etmektedir ve 0.4'e eşittir.

Tren üzerine etkiyen aerodinamik rüzgâr kuvveti yarı kararlı bir yaklaşıma dayalıdır. Aslında rüzgâr yüküne maruz kalan trende oluşan küçük ölçekli türbülans ile trenin toplam maruz kalan rüzgâr yükü tam olarak birbirleri ile ilişkili değildir. Yani oluşan rüzgâr yükü genellikle anlık değil belli bir süre içerisinde gerçekleşir. Trene etkiyen aerodinamik yan, kaldırma ve moment rüzgâr yükünün hesaplanması aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$F_s(t) = \frac{1}{2} \rho A C_s (V_r(t))^2 \beta(t) \quad (3.50)$$

$$F_l(t) = \frac{1}{2} \rho A C_l (V_r(t))^2 \beta(t) \quad (3.51)$$

$$M_m(t) = \frac{1}{2} \rho A h C_m (V_r(t))^2 \beta(t) \quad (3.52)$$

Burada verilen değerlerde ρ havanın yoğunluğunu, A rüzgârın etkilediğini referans alınan yüzey alanını, h ilgili referans yüksekliğini, C_s , C_l ve C_m sırasıyla trenin aerodinamik yan, kaldırma ve moment katsayısını temsil etmektedir. β rüzgârın trene etkiyen bağıl açıdır ve denklem 3.54'te verilmiştir. V_r ise rüzgâr ile tren arasındaki bağıl hızdır.

Havanın sıcaklığa göre yoğunluğu ise aşağıdaki denklemle ifade edilebilir. Burada P atmosfer basıncını, R ise özgül gaz sabitini vermektedir. T ise havanın °C cinsinden sıcaklığıdır.

$$\rho = \frac{P}{R * (273 + T)} \quad (3.53)$$

$$\beta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{U \sin \alpha + u(t)}{V + U \cos \alpha} \right) \quad (3.54)$$

$$V_r = \sqrt{(v + U \cos \alpha)^2 + (U \sin \alpha + u(t))^2 + w(t)^2} \quad (3.55)$$

Burada v tren hızını temsil ederken, α ile tanımlanan açı rüzgârın trenin hareket doğrultusuna göre treni etkilediği açıyı temsil etmektedir. Rüzgârın trene göre bağıl hızı ise denklem 3.55'te verilmiştir. Burada $u(t)$ ve $w(t)$ sırasıyla yatay ve dikey yönde değişken olan türbülanslı rüzgâr hızını vermektedir.

3.5. Hareket Denklemlerinin Çözümü

TTKES modeli için hareket denklemleri Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, ilk dört titreşim modu dikkate alınarak yol ve köprü dinamiği hesaplanmış ve her bir eleman ikinci dereceden dört diferansiyel denklem ile temsil edilmiştir. Daha sonra trene ait 31, rayla birlikte track sistemine ait 24, köprüye ait 8 olmak üzere toplam 63 adet ikinci mertebeden diferansiyel denklem oluşturulmuştur.

Bu denklemler durum uzayı formları yardımıyla denklem 3.41’de görüldüğü gibi 126 birinci mertebeden diferansiyel denkleme indirgenmiştir. Daha sonra bu denklemleri çözmek için dördüncü mertebeden Runge Kutta yöntemi kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
x_1 = r_{cy} \gg \dot{x}_1 = \dot{r}_{cy} = x_2 & \quad x_{26} = \dot{\theta}_{b2z} \gg \dot{x}_{26} = \ddot{\theta}_{b2z} & \quad x_{51} = \theta_{w3x} \gg \dot{x}_{51} = \dot{\theta}_{w3x} = x_{52} \\
x_2 = \dot{r}_{cy} \gg \dot{x}_2 = \ddot{r}_{cy} & \quad x_{27} = \theta_{b2x} \gg \dot{x}_{27} = \dot{\theta}_{b2x} = x_{28} & \quad x_{52} = \dot{\theta}_{w3x} \gg \dot{x}_{52} = \ddot{\theta}_{w3x} \\
x_3 = r_{cz} \gg \dot{x}_3 = \dot{r}_{cz} = x_4 & \quad x_{28} = \dot{\theta}_{b2x} \gg \dot{x}_{28} = \ddot{\theta}_{b2x} & \quad x_{53} = \theta_{w3y} \gg \dot{x}_{53} = \dot{\theta}_{w3y} = x_{54} \\
x_4 = \dot{r}_{cz} \gg \dot{x}_4 = \ddot{r}_{cz} & \quad x_{29} = \theta_{b2y} \gg \dot{x}_{29} = \dot{\theta}_{b2y} = x_{30} & \quad x_{54} = \dot{\theta}_{w3y} \gg \dot{x}_{54} = \ddot{\theta}_{w3y} \\
x_5 = \theta_{cz} \gg \dot{x}_5 = \dot{\theta}_{cz} = x_6 & \quad x_{30} = \dot{\theta}_{b2y} \gg \dot{x}_{30} = \ddot{\theta}_{b2y} & \quad x_{55} = r_{w4y} \gg \dot{x}_{55} = \dot{r}_{w4y} = x_{56} \\
x_6 = \dot{\theta}_{cz} \gg \dot{x}_6 = \ddot{\theta}_{cz} & \quad x_{31} = r_{w1y} \gg \dot{x}_{31} = \dot{r}_{w1y} = x_{32} & \quad x_{56} = \dot{r}_{w4y} \gg \dot{x}_{56} = \ddot{r}_{w4y} \\
x_7 = \theta_{cx} \gg \dot{x}_7 = \dot{\theta}_{cx} = x_8 & \quad x_{32} = \dot{r}_{w1y} \gg \dot{x}_{32} = \ddot{r}_{w1y} & \quad x_{57} = r_{w4z} \gg \dot{x}_{57} = \dot{r}_{w4z} = x_{58} \\
x_8 = \dot{\theta}_{cx} \gg \dot{x}_8 = \ddot{\theta}_{cx} & \quad x_{33} = r_{w1z} \gg \dot{x}_{33} = \dot{r}_{w1z} = x_{34} & \quad x_{58} = \dot{r}_{w4z} \gg \dot{x}_{58} = \ddot{r}_{w4z} \\
x_9 = \theta_{cy} \gg \dot{x}_9 = \dot{\theta}_{cy} = x_{10} & \quad x_{34} = \dot{r}_{w1z} \gg \dot{x}_{34} = \ddot{r}_{w1z} & \quad x_{59} = \theta_{w4x} \gg \dot{x}_{59} = \dot{\theta}_{w4x} = x_{60} \\
x_{10} = \dot{\theta}_{cy} \gg \dot{x}_{10} = \ddot{\theta}_{cy} & \quad x_{35} = \theta_{w1x} \gg \dot{x}_{35} = \dot{\theta}_{w1x} = x_{36} & \quad x_{60} = \dot{\theta}_{w4x} \gg \dot{x}_{60} = \ddot{\theta}_{w4x} \\
x_{11} = r_{b1y} \gg \dot{x}_{11} = \dot{r}_{b1y} = x_{12} & \quad x_{36} = \dot{\theta}_{w1x} \gg \dot{x}_{36} = \ddot{\theta}_{w1x} & \quad x_{61} = \theta_{w4y} \gg \dot{x}_{61} = \dot{\theta}_{w4y} = x_{62} \\
x_{12} = \dot{r}_{b1y} \gg \dot{x}_{12} = \ddot{r}_{b1y} & \quad x_{37} = \theta_{w1y} \gg \dot{x}_{37} = \dot{\theta}_{w1y} = x_{38} & \quad x_{62} = \dot{\theta}_{w4y} \gg \dot{x}_{62} = \ddot{\theta}_{w4y} \\
x_{13} = r_{b1z} \gg \dot{x}_{13} = \dot{r}_{b1z} = x_{14} & \quad x_{38} = \dot{\theta}_{w1y} \gg \dot{x}_{38} = \ddot{\theta}_{w1y} & \quad x_{63} = q_1 \gg \dot{x}_{63} = \dot{q}_1 = x_{64} \\
x_{14} = \dot{r}_{b1z} \gg \dot{x}_{14} = \ddot{r}_{b1z} & \quad x_{39} = r_{w2y} \gg \dot{x}_{39} = \dot{r}_{w2y} = x_{40} & \quad \vdots \\
x_{15} = \theta_{b1z} \gg \dot{x}_{15} = \dot{\theta}_{b1z} = x_{16} & \quad x_{40} = \dot{r}_{w2y} \gg \dot{x}_{40} = \ddot{r}_{w2y} & \quad x_{62+4n} = \dot{q}_n \gg \dot{x}_{62+4n} = \ddot{q}_n \\
x_{16} = \dot{\theta}_{b1z} \gg \dot{x}_{16} = \ddot{\theta}_{b1z} & \quad x_{41} = r_{w2z} \gg \dot{x}_{41} = \dot{r}_{w2z} = x_{42} & \quad x_{62+4n+1} = \gamma_1 \gg \dot{x}_{62+4n+1} = \dot{\gamma}_1 \\
x_{17} = \theta_{b1x} \gg \dot{x}_{17} = \dot{\theta}_{b1x} = x_{18} & \quad x_{42} = \dot{r}_{w2z} \gg \dot{x}_{42} = \ddot{r}_{w2z} & \quad \vdots \\
x_{18} = \dot{\theta}_{b1x} \gg \dot{x}_{18} = \ddot{\theta}_{b1x} & \quad x_{43} = \theta_{w2x} \gg \dot{x}_{43} = \dot{\theta}_{w2x} = x_{44} & \quad x_{62+8n} = \dot{\gamma}_n \gg \dot{x}_{62+8n} = \ddot{\gamma}_n \\
x_{19} = \theta_{b1y} \gg \dot{x}_{19} = \dot{\theta}_{b1y} = x_{20} & \quad x_{44} = \dot{\theta}_{w2x} \gg \dot{x}_{44} = \ddot{\theta}_{w2x} & \quad x_{62+8n+1} = \psi_1 \gg \dot{x}_{62+8n+1} = \dot{\psi}_1 \\
x_{20} = \dot{\theta}_{b1y} \gg \dot{x}_{20} = \ddot{\theta}_{b1y} & \quad x_{45} = \theta_{w2y} \gg \dot{x}_{45} = \dot{\theta}_{w2y} & \quad \vdots \\
& \quad \quad \quad = x_{46} & \quad \quad \quad \\
x_{21} = r_{b2y} \gg \dot{x}_{21} = \dot{r}_{b2y} = x_{22} & \quad x_{46} = \dot{\theta}_{w2y} \gg \dot{x}_{46} = \ddot{\theta}_{w2y} & \quad x_{62+12n} = \dot{\psi}_n \gg \dot{x}_{62+12n} = \ddot{\psi}_n \\
x_{22} = \dot{r}_{b2y} \gg \dot{x}_{22} = \ddot{r}_{b2y} & \quad x_{47} = r_{w3y} \gg \dot{x}_{47} = \dot{r}_{w3y} = x_{48} & \quad x_{62+12n+1} = \phi_1 \gg \dot{x}_{62+12n+1} = \dot{\phi}_1 \\
x_{23} = r_{b2z} \gg \dot{x}_{23} = \dot{r}_{b2z} = x_{24} & \quad x_{48} = \dot{r}_{w3y} \gg \dot{x}_{48} = \ddot{r}_{w3y} & \quad \vdots \\
x_{24} = \dot{r}_{b2z} \gg \dot{x}_{24} = \ddot{r}_{b2z} & \quad x_{49} = r_{w3z} \gg \dot{x}_{49} = \dot{r}_{w3z} = x_{50} & \quad x_{62+16n} = \dot{\phi}_n \gg \dot{x}_{62+16n} = \ddot{\phi}_n \\
x_{25} = \theta_{b2z} \gg \dot{x}_{25} = \dot{\theta}_{b2z} = x_{26} & \quad x_{50} = \dot{r}_{w3z} \gg \dot{x}_{50} = \ddot{r}_{w3z} & \quad \vdots
\end{aligned} \tag{3.56}$$

Denklemler, denklem 3.56 ile verilen durum değişkenleri ile durum uzayı formunda yazıldığında, denklemin diğer koordinatlara ait hareketleri aşağıdakiler elde edilir:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{f}(t), \quad (3.57)$$

$$\mathbf{X}(t) = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{62+(16n-1)} \ x_{62+16n}\}^T, \quad (3.58)$$

Toplam altmış iki birinci mertebeden diferansiyel denklemden oluşan diferansiyel denklem sistemi için Runge-Kutta yönteminin dört tekrarlı katsayısı aşağıdaki gibi yazılır [147].

$$\begin{aligned} k_{1(1)}^i &= f(t_i, x_{1(i)}, x_{2(i)}, x_{3(i)}, \dots, x_{62+16n(i)}), \\ &\vdots \\ k_{1(62+16n)}^i &= f(t_i, x_{1(i)}, x_{2(i)}, x_{3(i)}, \dots, x_{62+16n(i)}), \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} k_{2(1)}^i &= f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_{1(i)} + \frac{1}{2}k_{1(1)}^i\Delta t, x_{2(i)} + \frac{1}{2}k_{1(2)}^i\Delta t, x_{3(i)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}k_{1(3)}^i\Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + \frac{1}{2}k_{1(62+16n)}^i\Delta t\right) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} k_{2(62+16n)}^i &= f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_{1(i)} + \frac{1}{2}k_{1(1)}^i\Delta t, x_{2(i)} + \frac{1}{2}k_{1(2)}^i\Delta t, x_{3(i)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}k_{1(3)}^i\Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + \frac{1}{2}k_{1(62+16n)}^i\Delta t\right) \\ k_{3(1)}^i &= f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_{1(i)} + \frac{1}{2}k_{2(1)}^i\Delta t, x_{2(i)} + \frac{1}{2}k_{2(2)}^i\Delta t, x_{3(i)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}k_{2(3)}^i\Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + \frac{1}{2}k_{2(62+16n)}^i\Delta t\right), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} k_{3(62+16n)}^i &= f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_{1(i)} + \frac{1}{2}k_{2(1)}^i\Delta t, x_{2(i)} + \frac{1}{2}k_{2(2)}^i\Delta t, x_{3(i)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}k_{2(3)}^i\Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + \frac{1}{2}k_{2(62+16n)}^i\Delta t\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_{4(1)}^i &= f(t_i + \Delta t, x_{1(i)} + k_{3(1)}^i \Delta t, x_{2(i)} + k_{3(2)}^i \Delta t, x_{3(i)} \\
&\quad + k_{3(3)}^i \Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + k_{3(62+16n)}^i \Delta t) \\
&\vdots
\end{aligned} \tag{3.62}$$

$$\begin{aligned}
k_{4(62+16n)}^i &= f(t_i + \Delta t, x_{1(i)} + k_{3(1)}^i \Delta t, x_{2(i)} + k_{3(2)}^i \Delta t, x_{3(i)} \\
&\quad + k_{3(3)}^i \Delta t, \dots, x_{62+16n(i)} + k_{3(62+16n)}^i \Delta t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_{1(i+1)} &= x_{1(i)} + \frac{\Delta t}{6} (k_{1(1)}^i + 2k_{2(1)}^i + 2k_{3(1)}^i + k_{4(1)}^i) \\
x_{2(i+1)} &= x_{2(i)} + \frac{\Delta t}{6} (k_{1(2)}^i + 2k_{2(2)}^i + 2k_{3(2)}^i + k_{4(2)}^i) \\
&\vdots \\
x_{(62+16n)(i+1)} &= x_{(62+16n)(i)} \\
&\quad + \frac{\Delta t}{6} (k_{1(62+16n)}^i + 2k_{2(62+16n)}^i + 2k_{3(62+16n)}^i + k_{4(62+16n)}^i)
\end{aligned} \tag{3.63}$$

Runge-Kutta analizine göre bütün başlangıç şartları sıfır kabul edilerek hesaplamaya başlanır. Her bir zaman adımında denklem 3.59-62'deki katsayılar hesaplanarak denklem 3.63'te ki gibi TTKES analizi gerçekleştirilmektedir.

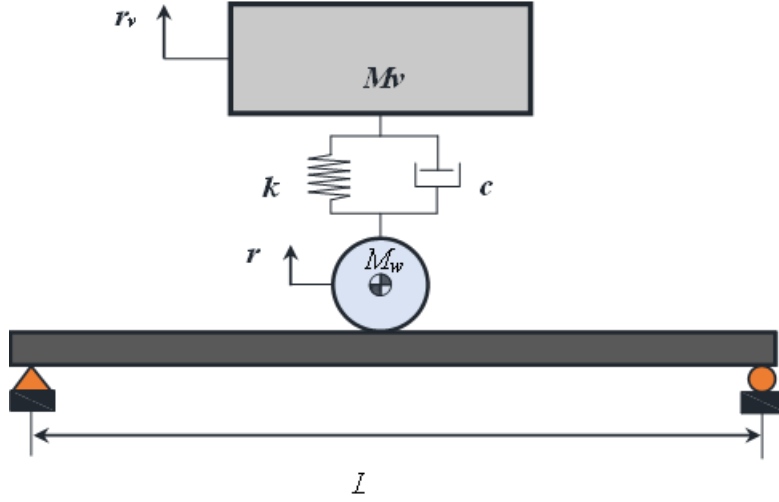


4. SAYISAL DOĞRULAMA

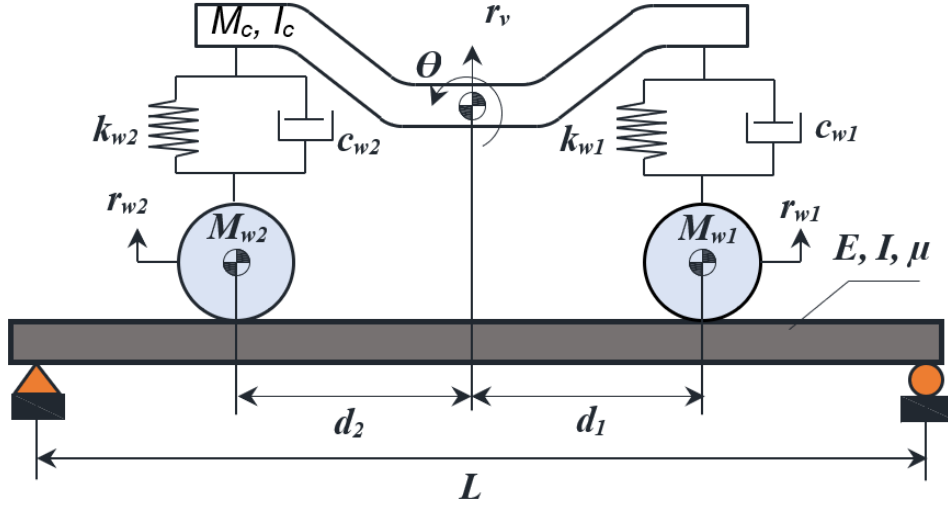
Bu tez çalışmasında incelenen TTKES modelinin dinamik incelemesinin yapılması için öncelikle tüm sistemin hareket denklemleri Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Tren, track ve köprü ayrı ayrı modellenmiş olup her bir alt sistem için hareket denklemleri elde edilmiştir. Bu kapsamda trene ait 31, tracka ait 24 ve köprüye ait 8 denklem olmak üzere 63 adet ikinci dereceden diferansiyel denklem elde edilmiştir. Daha sonra bu denklemler durum uzay formları yardımıyla 126 adet birinci dereceden diferansiyel denkleme indirgenmiştir. Daha sonra bu denklemler dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak Matlab programında hassas ve kısa sürede çözdürülmüştür.

Bu bölümde matematik modeli ve hareket denklemleri verilen sistemin doğruluğunu kontrol etmek için literatürde daha önce çalışılmış benzer yöntemlerin sonuçları ile kıyaslanacaktır. Bu kapsamda Şekil 4.1’de gösterilen tek akslı hareketli araç modeli incelenmiştir. İncelenen bu model literatürde daha önce yapılan birkaç araştırmacı tarafından da kullanılmıştır [20,75,148,149]. İncelenen model de köprü kirişinin elastikiyet modülü 2.87 GPa, alan atalet momenti 2.9 m^4 , kirişin birim uzunluğunun kütlesi 2303 kg/m, kiriş uzunluğu ise 25 m olarak alınmıştır. Yaylı kütle 5.75 ton alınırken tekerin kütlesi ihmal edilmiştir. Süspansiyonun rijitlik katsayısı 1595 kN/m alınırken, sistem sönümsüz olarak kabul edilmiştir.

Bir diğer doğrulama modeli ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu modelde 4 serbestlik dereceli olarak modellenen çeyrek araç kullanılmıştır. Yang ve Wu tarafından yapılan bu doğrulama örneğinde ise elastikiyet modülü 2.943 GPa, alan atalet momenti 8.65 m^4 , kirişin birim uzunluğunun kütlesi 36000 kg/m, kiriş uzunluğu ise 30 m alınmıştır. Yaylı kütle 540 ton alınırken boji ve tekerler arasındaki süspansiyon sisteminin rijitlik katsayısı 41350 kN/m olarak alınmış ve sistem sönümsüz olarak kabul edilmiştir. Ayrıca iki teker arasındaki mesafe 17.5 m ve tren hızı 27.78 m/s olarak kabul edilmiştir [22].



Şekil 4.1. Önerilen çözüm yönteminin doğrulamasında kullanılacak olan 2 serbestlik dereceli model.

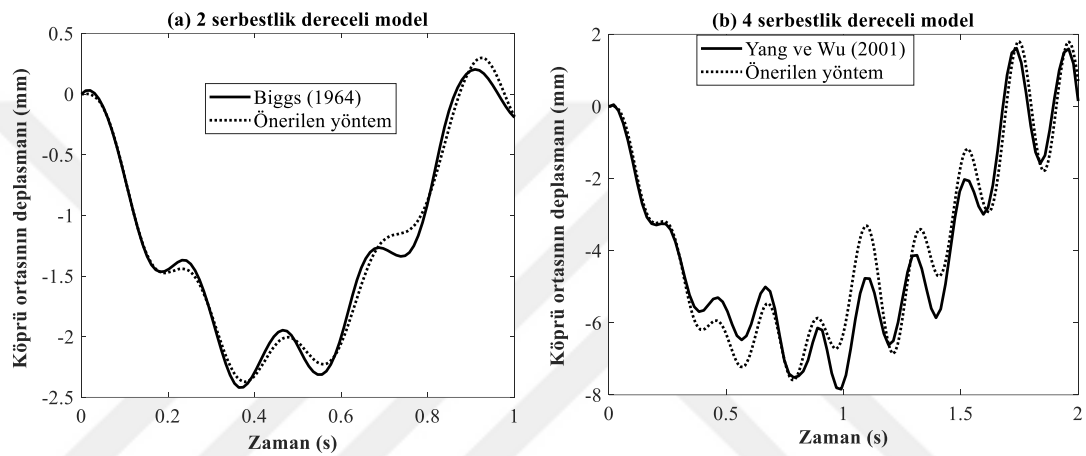


Şekil 4.2. Önerilen çözüm yönteminin doğrulamasında kullanılacak olan 4 serbestlik dereceli model.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilen doğrulama örnekleri kullanılarak bu çalışmada kullanılan çözüm yönteminin doğrulaması yapılmıştır. Biggs tarafından yapılan örneğin sonuçları ile bu çalışmanın sonuçları Şekil 4.3a’da, Yang ve Wu tarafından çalışılmış örneğin sonuçları ile bu çalışmanın sonuçları Şekil 4.3b’de verilmiştir. Grafiğe göre köprü kirişinin orta noktasının yer değiştirmesi zamana göre verilmiştir. Her iki grafik incelendiğinde bu çalışma da önerilen yöntem ile doğrulama için kullanılan yöntemler oldukça birbirlerine yakın olduğu görülmüştür.

Yukarıda verilen örneklerde iki farklı model için doğrulama yapılmıştır. Çalışmanın doğruluğunu tekrar test etmek için güncel yapılmış bir çalışma ile de karşılaştırılmıştır.

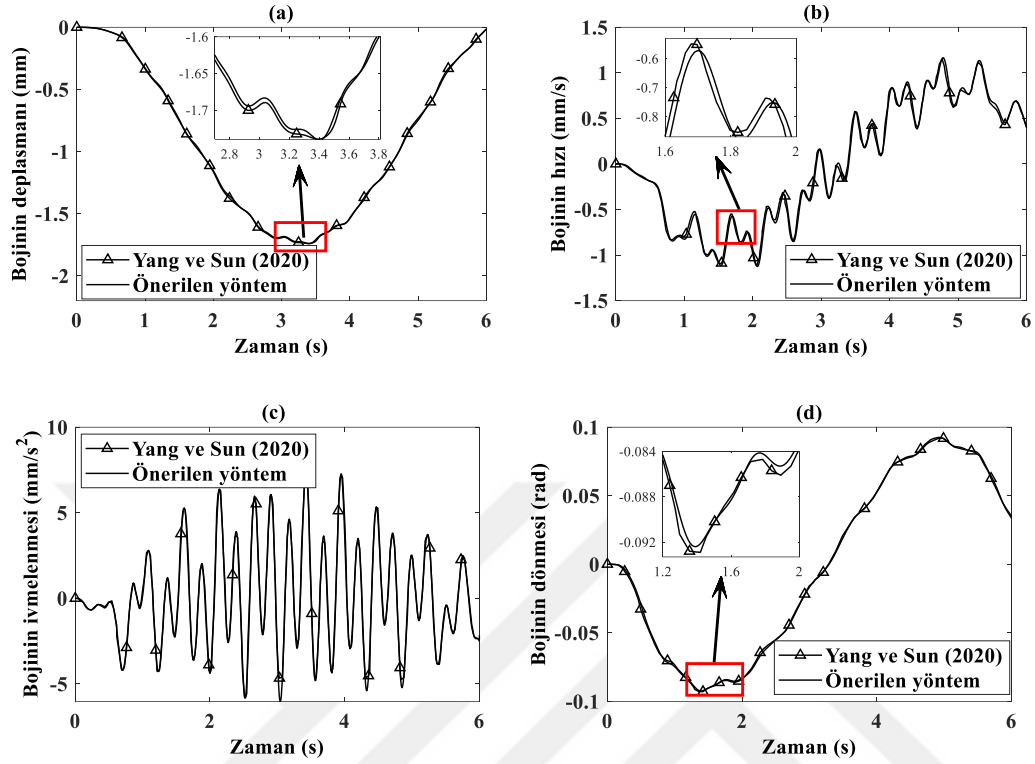
Bunun için Şekil 4.2’de verilen 4 serbestlik dereceli çeyrek raylı araç modeli doğrulama için tekrar kullanılmıştır. Yang ve Sun [37] tarafından yapılan bir çalışmada kullanılan çeyrek raylı araç parametreleri şu şekilde seçilmiştir: Kiriş uzunluğu 30 m, alan köprü kirişinin alan atalet momenti 0.175 m^4 , kirişin elastikiyet modülü 27.5 GPa, kirişinin birim uzunluğun kütlesi 1000 kg/m olarak alınmıştır. Bojinin kütlesi 1500 kg, tekerlerin kütlesi 15 kg, bojinin kütle atalet momenti 2738 kgm^2 olarak kabul edilmiştir. Boji ile tekerler arasındaki süspansiyon sisteminin rijitlik katsayısı 85 kN/m alınırken sönüm ihmal edilmiştir. İki teker arasındaki mesafe 2.5 m olarak alınırken raylı aracın hızı ise sabit 5 m/s olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.3. 2 serbestlik dereceli ve 4 serbestlik dereceli doğrulama örneklerinin karşılaştırılması.

Yang ve Sun tarafından yapılan çalışma ile bu tezdeki önerilen yöntemle yapılan aynı örneğin karşılaştırmalı sonucu Şekil 4.4’te verilmiştir. Şekil 4.4a’da bojinin dikey yöndeki deplasmanı zamana göre verilmiştir. Şekil 4.4b’de ise bojinin dikey yöndeki hızı zamana göre verilmiştir. Şekil 4.4c’de bojinin dikey yöndeki ivmelenme grafiği zamana göre verilmiştir. Şekil 4.4d’de ise bojinin kütle merkezi etrafındaki dönme açısı verilmiştir. Grafiklere göre her iki yöntemle çözülen analiz sonuçları neredeyse birebir aynı çıktığı görülmüştür. Ayrıca, referans alınan çalışmada sistemin hareket denklemlerinin çözümünde Newmark- β yöntemi kullanılırken, bu çalışmada Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca ilgili çalışmada çözüm zaman aralığı $\Delta t=0.001 \text{ s}$ olarak alınırken, bu çalışmada $\Delta t=0.01 \text{ s}$ alınmıştır. Bu çalışmada önerilen çözüm yöntemi kullanılarak, kaba bir zaman aralığı olmasına rağmen aracın dinamik tepkilerinin literatürde sunulan çalışma ile hemen hemen aynı olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Örneğin Şekil 4.3a’da önerilen çözüm yönteminin sonuçları ile

referans alınan çalışmanın sonuçları arasındaki fark sadece %2 iken, Şekil 4.3b’de bu fark en fazla %10 değerine çıkmıştır.



Şekil 4.4. 2 serbestlik dereceli ve 4 serbestlik dereceli doğrulama örneklerinin karşılaştırılması.

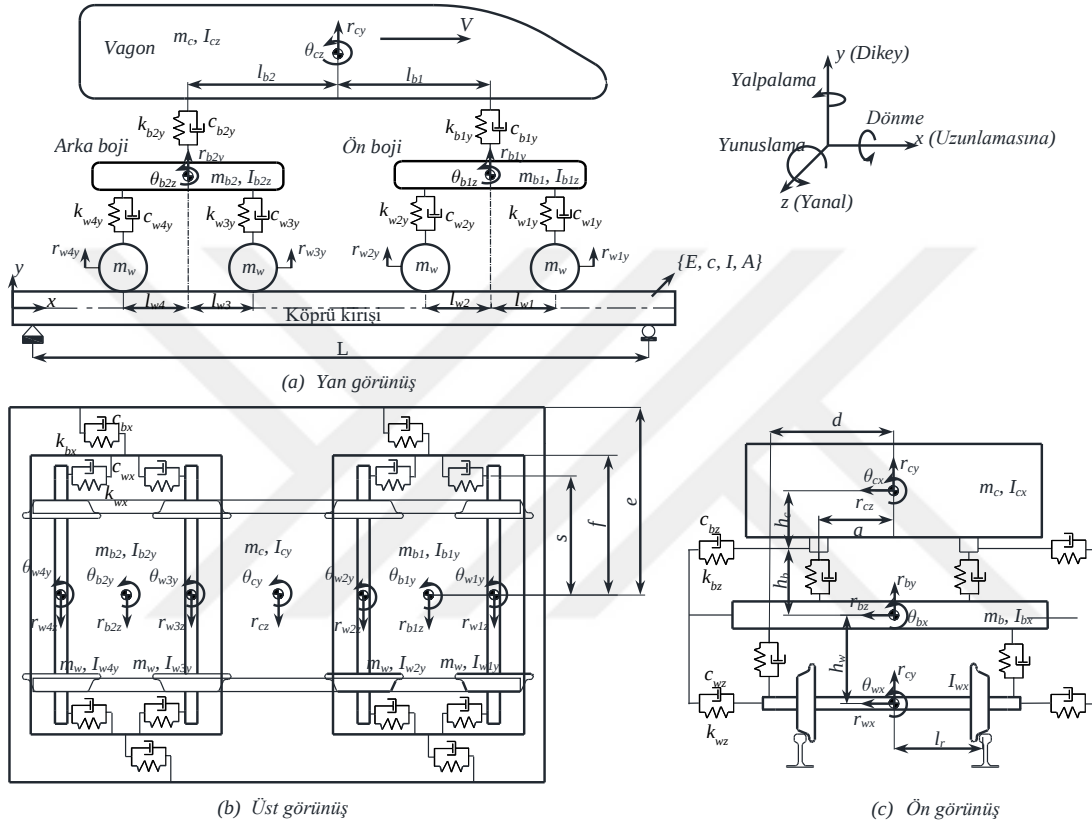
5. ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde yüksek hızlı trenin dinamik cevaplarını belirlemek amacıyla bilgisayar programı kullanılarak bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım sayesinde tren dinamiğini etkileyen neredeyse tüm unsurlar dikkate alınmıştır. Ayrıca tren-köprü çifti ve tren-track-köprü sistem modellerinin tren dinamiğine olan etkisinin kıyaslaması yani track alt sisteminin tren dinamiğini nasıl etkilediği de bu kısımda incelenecektir. Sunulan analiz sonuçlarında tracklı ve tracksız modellerin tren ve köprü dinamiğine olan etkileri detaylıca incelenmiştir. Dahası incelenen köprünün uzunluğu ve track parametrelerinin tren dinamiğine olan etkisi tren hızına göre belirlenerek rezonans kavramına da değinilmiştir. Ayrıca bu çalışma da geliştirilen yazılım simülasyonu kullanılarak Şekil 3.2’de görüldüğü gibi artarda gelen çoklu vagon olması durumunda track-köprü alt sisteminin dinamik değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Yani geliştirilen modellemeyi kullanarak trenin hızlarının, köprünün uzunluğunun, tren-track-köprü süspansiyon parametre değerlerinin ve hatta çoklu vagonun etkisi ayrı ayrı incelenebilir.

Tren dinamiğini incelemek için öncelikle tüm sistem elemanlarına ait özellikleri belirlemek gerekmektedir. Örneğin bu çalışmada kullanılacak tren modeli 31 serbestlik dereceli tam raylı araç olarak modellenirken, köprü elemanı basit mesnetli Euler-Bernoulli kiriş teoremi kullanılarak modellenmiştir. Bu durumda kiriş tipi elemanlarının titreşim modlarının belirlenmesi önemli bir konu haline gelmektedir. Bu kısımda kiriş olarak modellenen köprülerin titreşim mod sayısının etkisi de incelenmiştir. Ayrıca hem trenin hem de köprünün hareket denklemlerinin çözülmesi amacıyla kullanılacak olan Runge-Kutta metodu için en uygun zaman adımının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde çalışmanın önemli bir parçası olan zaman adımının seçilmesi de detaylıca incelenmiştir. Bunlara ek olarak bu kısımda vagon kütlelerinin, tren hızının, köprü uzunluğu ve sönümünün ve teker kontak kuvvetlerinin analizi gerçekleştirilecektir.

5.1. TKE Sisteminin Analizi

Bu bölümde tren-köprü dinamik etkileşiminin detaylıca incelemesi yapılacaktır. Bu kapsamda oluşturulan model Şekil 5.1’de görüldüğü gibi vagon, ön boji, arka boji, tekersetleri ve köprüden oluşmaktadır. Analiz sırasında oluşturulan modelin parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Şekilde verilen TKE’ne ait hareket denklemleri ve çözme adımları 3. Bölümde sunulmuştur.



Şekil 5.1. 31 serbestlik dereceli tam raylı araç ve köprü modeli.

5.1.1. Köprü mod sayısının tren dinamiğine etkisi

Çalışmada analize başlamadan önce köprünün mod frekanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde de Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre modellenebilen köprülerin titreşim mod sayısının TKE'yi nasıl değiştirdiği incelenecektir. Öncelikle kirişin doğal frekans hesabı denklem 5.1’deki gibi belirlenmiştir. Burada ω kirişin dairesel doğal frekansını, EI kirişin eğilme dayanımını, μ ise kirişin birim uzunluğunun kütlesini ve L kiriş uzunluğunu temsil etmektedir.

$$\omega_j^2 = \frac{j^4 \pi^4 EI}{\mu L^4} \text{ (rad/s)} \quad (5.1)$$

Denklem 5.2’de önceki denklem kullanılarak kirişin titreşim frekansı verilmiştir.

$$f_j = \frac{\omega_j}{2\pi} = \frac{j^2\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (Hz) \quad (5.2)$$

Yüksek hızlı trenlerin esnek köprü üzerinden geçişi sırasında tren ile köprü etkileşime girmektedir. Etkileşim sonucunda köprüler titreşmeye başlar ve titreşen köprü üzerinden geçen treni oldukça olumsuz etkilemektedir. Bu titreşimler trenin bazı hızlarında oldukça fazla olmaktadır. Bu durum tren-köprü sisteminin rezonans frekanslarına bağlıdır. Eğer köprü üzerinden geçen trenin hızı köprünün rezonans frekansına eşit olursa köprü salınımları oldukça artar ve köprünün yıkılması söz konusu olabilir. Bu hızlara da kritik hız denir ve trenin bu hızlarda hareket etmemesi istenir. Kritik hızın belirlenmesinde önemli bir faktör ise trenin uzunluğudur ve buna göre tren-köprü sisteminin kritik hızı denklem 5.3’teki gibi hesaplanabilir [148]. Buna binaen sağ ve sol köprü kirişinin ilk dört titreşim frekansı ve bu frekansa karşılık gelen kritik hızlar Tablo 5.1’de verilmiştir.

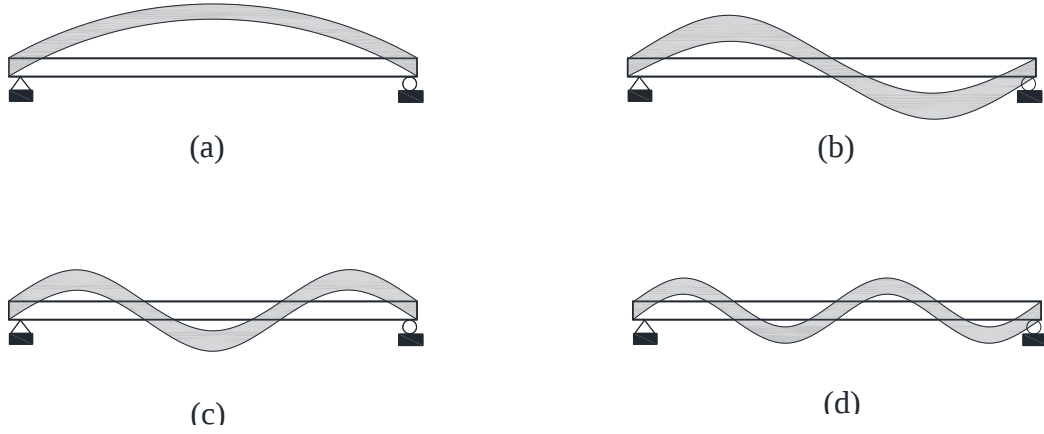
$$v_{cr,j} = \frac{df_{b,j}}{i} \quad (5.3)$$

Denklemde $f_{b,j}$ köprü kirişinin j -inci doğal frekansını, i yarım salınım döngülerinin sayısını temsil eder. d ifadesi ise ön bojinin ön tekeri ile arka bojinin arka tekeri arasındaki mesafeyi temsil eder ve bu da Tablo 3.1’den $l_{b1} + l_{b2} + l_{w1} + l_{w2} = 20$ m olarak hesap edilir [150].

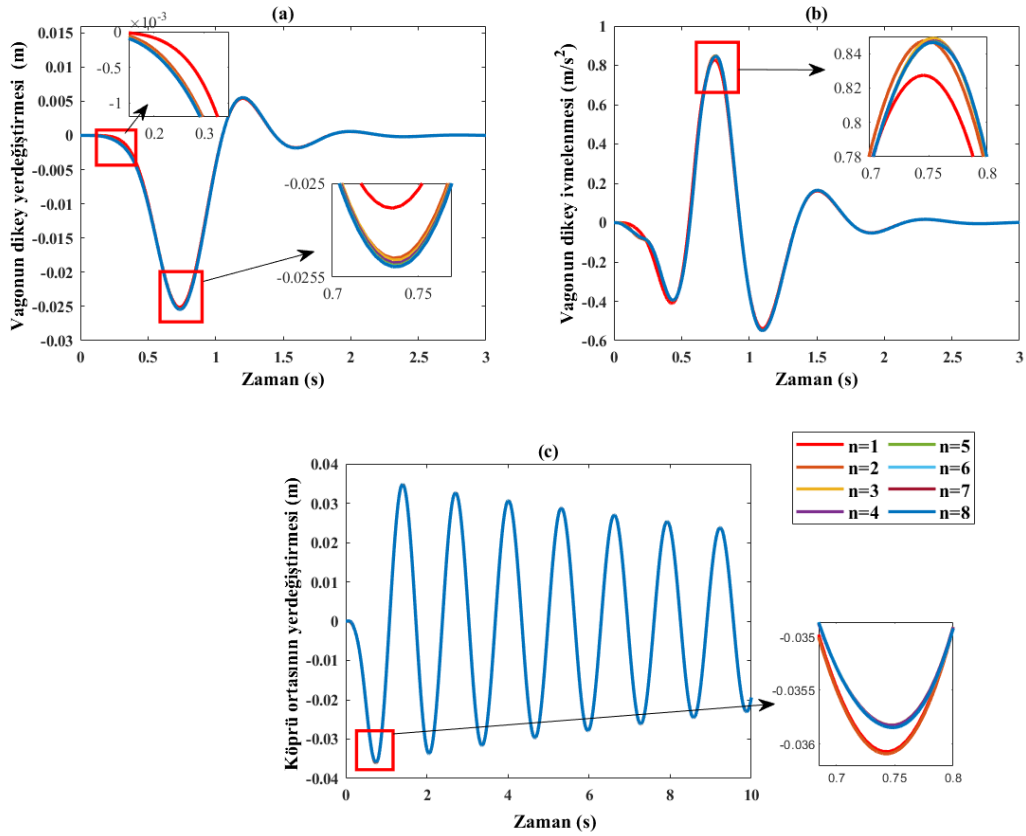
Tablo 5.1. Sağ ve sol köprü kirişinin titreşim mod frekansı ve kritik hızları.

Mod Sayısı	1	2	3	4
Sağ köprü kirişi				
$f_{b,j}$ (Hz)	0.905	3.616	8.136	14.464
$v_{cr,j}$ (m/s)	18.079	72.319	162.719	289.277
Sol köprü kirişi				
$f_{b,j}$ (Hz)	0.937	3.747	8.430	14.986
$v_{cr,j}$ (m/s)	18.733	74.931	168.595	299.745

Köprüler gibi esnek yapıların belirli frekanslarda veya doğal frekanslarda titreşim tepkisi, zorlanmış titreşimlerin incelenmesinde çok önemlidir. Bu nedenle, bu bölümde, basit mesnetli köprü kirişinin ilk sekiz titreşim modu dikkate alınarak hem köprü hem de tren dinamiği incelenmiştir.



Şekil 5.2. Kiriş titreşim modları.



Şekil 5.3. Köprü titreşim mod sayısının TKE sistemine etkisi.

Şekil 5.3'te, vagonun düşey yer değiştirmesi ve ivmesi ile köprü orta noktasının sapsması farklı mod numaralarına ($n=1-8$) göre verilmiştir. Şekil 5.3'te verilen grafiklerin her mod numarasına göre ortalama karekök (RMS) değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi tren ve köprünün tepkileri tüm modlar için hemen hemen aynıdır.

Köprü kirişinin sadece bir titreşim modu ve ilk iki titreşim modu dikkate alındığında, trenin düşey yer değiştirme değerindeki bağıl hata değeri %1.2'dir. İlk üç mod dahil edilirse, ilk iki modu içeren sonuçlara kıyasla yalnızca %0.1024'lük bir bağıl hata değeri vardır. Köprü kirişinin ilk dört titreşim frekansının dahil edilmesiyle, bağıl hatanın değeri ihmal edilebilecek kadar düşüktür ve sonraki titreşim modlarının dahil edilmesiyle sonuçların çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada incelenen köprü kirişinin ilk dört titreşim modunun çalışmanın doğruluğu için oldukça yeterli olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2. Kiriş mod sayısının tren ve köprü dinamiği üzerine etkisinin karşılaştırılması.

Mod sayısı (n)	Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (m)		Vagonun dikey ivmelenmesi (m/s ²)		Köprü ortasının yerdeğiştirmesi (m)	
	RMS	Bağıl fark (%)	RMS	Bağıl fark (%)	RMS	Bağıl fark (%)
n=1	0.437270x10 ⁻²	-	0.14908931	-	0.02057272	-
n=2	0.442626x10 ⁻²	1.201	0.14969764	0.4064	0.02058368	0.0533
n=3	0.443080x10 ⁻²	0.1024	0.14979015	0.0618	0.02058028	0.0165
n=4	0.443432x10 ⁻²	0.0795	0.14983530	0.0301	0.02058146	0.0057
n=5	0.443702x10 ⁻²	0.0609	0.14987143	0.0241	0.02058232	0.0042
n=6	0.443836x10 ⁻²	0.0300	0.14988726	0.0106	0.02058239	0.0003
n=7	0.443875x10 ⁻²	0.0089	0.14989070	0.0023	0.02058227	0.0006
n=8	0.443882x10 ⁻²	0.0015	0.14989051	0.0001	0.02058224	0.0001

5.1.2. Çözme adımının etkisi

Bu çalışmada denklem (3.7-25)'de verilen tren-köprü sisteminin hareket denklemleri Runge-Kutta yöntemi ile kesin ve hassas bir şekilde çözülmüştür. Bu bağlamda zaman adımının seçimi önemli bir kavramdır. Bazı çalışmalarda, köprü ve tren hareket denklemlerinin çözümünde farklı zaman adımlarının kullanılması tercih edilmiştir. Örneğin, Zhu ve ark. yüksek frekanslı tekerlek-ray teması nedeniyle tren alt sistemi ve ray alt sistemi için küçük bir zaman adımı benimsemiştir ve düşük frekanslı titreşim nedeniyle köprü alt sistemi için daha kaba bir zaman adımı benimsemiştir [47]. Froio ve diğerleri, maksimum kiriş yer değiştirmelerinin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, her simülasyon için zaman adımını değerlendirmek için otomatik bir hesaplama yöntemi uygulamışlardır [151]. Ayrıca başlangıç değeri probleminin sayısal çözümünü elde etmek için HHT- α uygulama yöntemini [152] kullandılar. Bu yöntem için formülasyon aşağıdaki gibi verilmiştir:

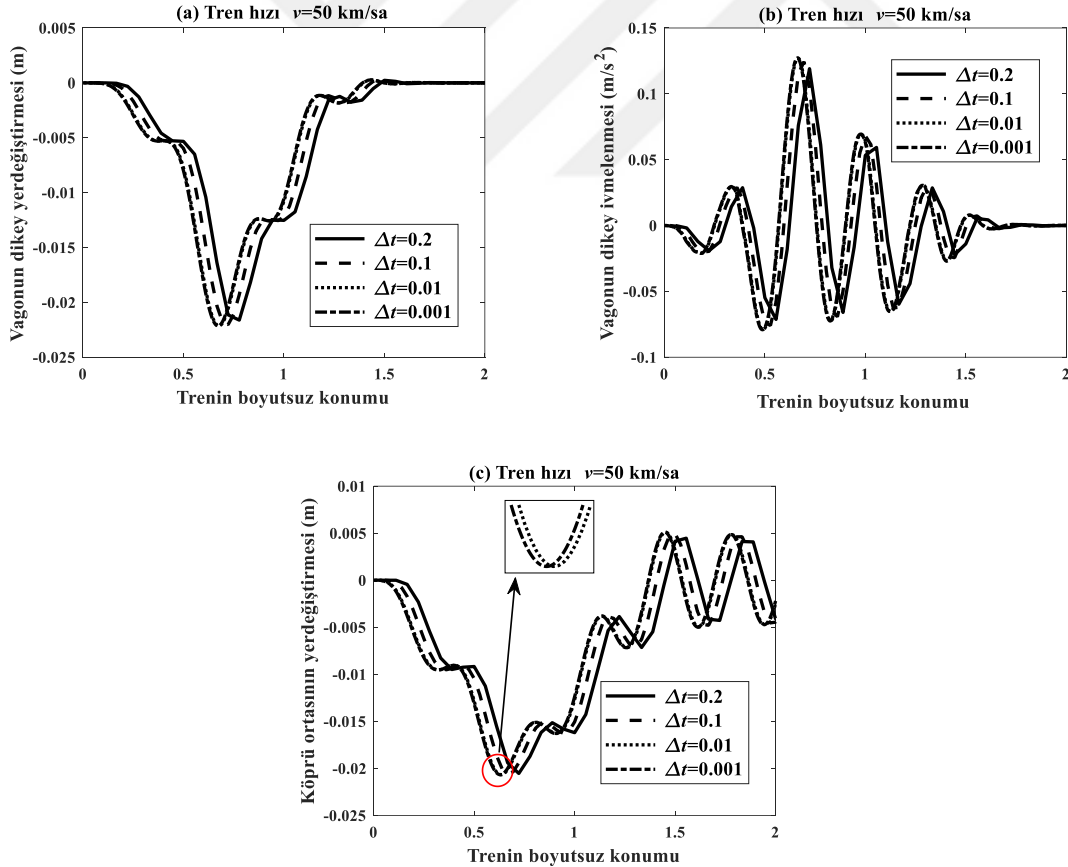
$$\begin{aligned}
 m\ddot{r}_{k+1} + (1 + \alpha)c\dot{r}_{k+1} - \alpha c\dot{r}_k + (1 + \alpha)r_{k+1} - \alpha r_k \\
 = (1 + \alpha)F_{k+1} - \alpha F_k \quad k = 0, 1, \dots, N - 1
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

$$r_{k+1} = r_k + \Delta t \dot{r}_k + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{r}_k + \beta \ddot{r}_{k+1} \right] \quad (5.5)$$

$$\dot{r}_{k+1} = \dot{r}_k + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{r}_k + \gamma \ddot{r}_{k+1}] \quad (5.6)$$

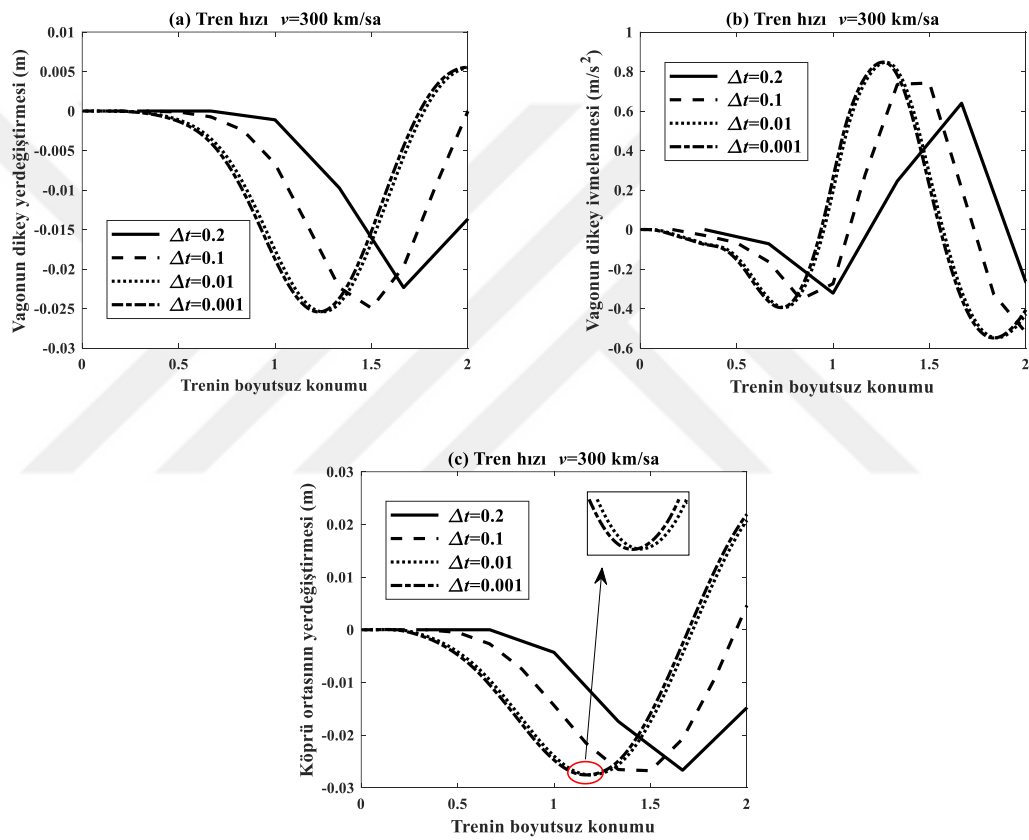
Burada verilen m ve c sırasıyla kütle ve sönüm katsayılarıdır. r_k , $\dot{r}_k$ ve $\ddot{r}_k$ k-ncı zaman adımıdaki yerdeğiştirme, hız ve ivme cevabını vermektedir. F ise sisteme dışarıdan uygulanan kuvvetini, N toplam zaman adımı sayısını temsil etmektedir. Dolayısıyla zaman adımı da denklem 5.7’de ki gibi elde edilir. Burada τ trenin köprüden tamamen ayrılması için gereken süreyi belirtmektedir. α , β ve γ algoritmanın parametreleridir. Hilbert ve arkadaşlarına [152] göre verilen yöntemin kararlılığı ve doğruluğu için verilen parametreler $-1/3 \leq \alpha \leq 0$, $\gamma > 0.5$ ve $\beta \geq 0.25(\gamma + 0.5)^2$ aralığında seçilmelidir.

$$\Delta t = \frac{\tau}{N} \quad (5.7)$$



Şekil 5.4. Tren hızı=50 km/sa olması durumunda zaman adımı boyutunun (Δt) vagon ve köprünün dinamik tepkileri üzerindeki etkisi a-) Vagonun dikey yer değiştirmesi b-) Vagonun dikey ivmelenmesi c-) Köprü ortasının yer değiştirmesi.

Hilbert ve arkadaşlarının [152] zaman adımı boyutunu belirlemede sunduğu HHT- α yöntemi yukarıda kısaca tanıtılmıştır. Bu çalışmada analize başlamadan önce çözüm adım zamanı Δt olarak belirlenmiştir. Analizde $\Delta t=10^{-2}$ s olması yeterlidir. Çözüm adımı süresinin daha hassas seçilmesi, elde edilen sonuçları değiştirmez ve analiz süresini önemli ölçüde artırır. Tüm tekerlek takımlarının köprüye temas etmesi için $(l_{b1}+l_{b2}+l_{w1}+l_{w4})/v=0.24$ s zaman gereklidir. Trenin köprüyü tamamen terk etmesi için gereken süre $(L+l_{b1}+l_{b2}+l_{w1}+l_{w4})/v=0.84$ s'dir. Toplam analiz süresi, tüm trenin köprüyü terk etmesi için gereken sürenin beş katı olarak alınmış ve trenin köprüden ayrılmasından sonra köprünün dinamik tepkisi incelenmiştir.



Şekil 5.5. Tren hızı=300 km/sa olması durumunda zaman adımı boyutunun (Δt) vagon ve köprünün dinamik tepkileri üzerindeki etkisi a-) Vagonun dikey yer değiştirmesi b-) Vagonun dikey ivmelenmesi c-) Köprü ortasının yer değiştirmesi.

Bu kapsamda Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te vagonun yer değiştirme ve ivmelenme değerleri ile köprü ortasının trenin köprü üzerinden geçerken ki konumuna göre 4 farklı zaman adımında ($\Delta t=0.2, 0.1, 0.01, 0.001$ s) ve iki farklı tren hızında ($v=50$ km/sa, $v=300$ km/sa) dinamik tepkisi incelenmiştir. Köprü ortasının yer değiştirmesi ve vagonun yer değiştirmesinin RMS değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir. Tablo 5.3'e göre, zaman adımı

boyutu 0.001 iken tren hızı 300 km/sa ise köprü ortasının yer değiştirme değerinin RMS'si 0.01699 m olmaktadır. Zaman adımı boyutu 0.01 s olduğunda bu değer 0.01693 m'dir ve bağıl fark sadece %0.35'tir. Ancak her iki adım zamanı için bilgisayar yazılım programının çözüm için harcadığı süre düşünüldüğünde 6 kat fark vardır. Verilen iki şekle göre trenin hızlı veya yavaş hareket etmesi göz önüne alındığında, belirlenen zaman adımı boyutunun en uygun olduğu belirtilmektedir. Sonuç olarak, çözüm adım süresinin daha küçük seçilmesi, elde edilen sonuçları değiştirmemekte ve analiz süresini önemli ölçüde artırmaktadır. Benzer şekilde, tren gövdesinin yer değiştirmesi için de sonuçlar aynıdır.

Tablo 5.3. Köprü ortasının yer değiştirmesi ve vagon yer değiştirmesi için zaman adımı boyutunun (Δt) çözüm doğruluğu üzerindeki etkisi.

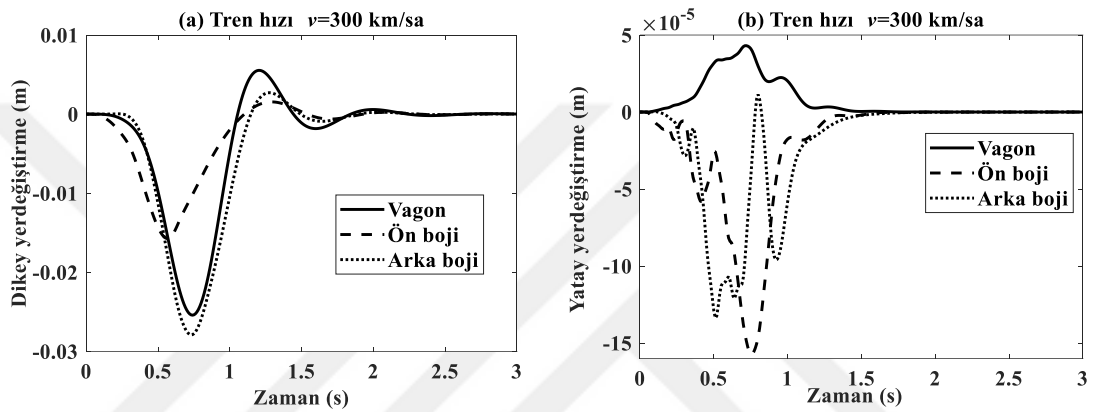
Köprü ortasının yerdeğiştirmesi								
Δt (s)	Çözüm zamanı (s)		RMS (m)		Bağıl fark (%)		Zamana göre artış oranı (%)	
	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$
0.2	12.70	3.55	0.009362	0.01399	0.7106	17.657	-	-
0.1	12.74	4.22	0.009372	0.01605	0.5409	5.5327	0.31	18.87
0.01	19.61	4.81	0.009423	0.01693	0.0636	0.3531	54.41	35.49
0.001	156.18	28.50	0.009429	0.01699	-	-	1129.76	702.82

Vagonun yerdeğiştirmesi								
Δt (s)	Çözüm zamanı (s)		RMS (m)		Bağıl fark (%)		Zamana göre artış oranı (%)	
	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$	$50 \frac{km}{sa}$	$300 \frac{km}{sa}$
0.2	12.70	3.55	0.007913	0.010629	0.8023	12.698	-	-
0.1	12.74	4.22	0.007931	0.011665	0.5767	4.1971	0.31	18.87
0.01	19.61	4.81	0.007973	0.012130	0.0576	0.3696	54.41	35.49
0.001	156.18	28.50	0.007977	0.012175	-	-	1129.76	702.82

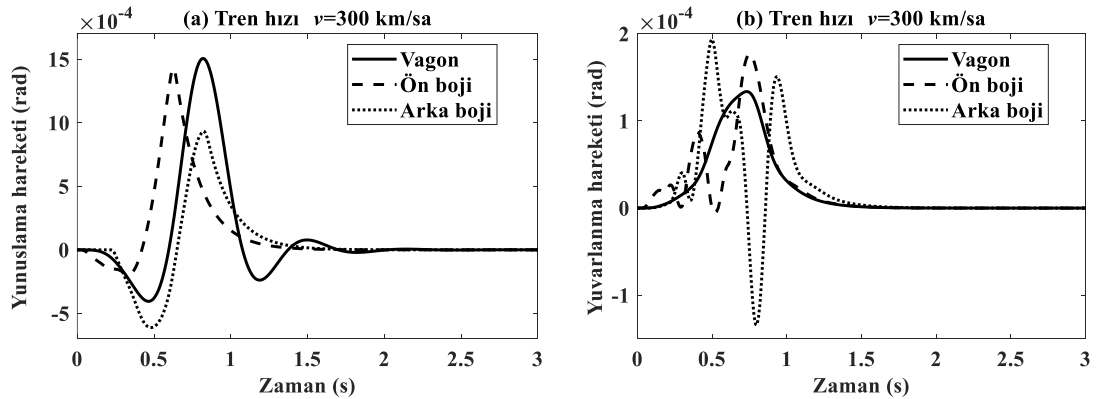
5.1.3. Sabit tren hızının etkisi

Bu bölümde TKE analizi kapsamında trenin sabit 300 km/sa hızda gitmesi durumunda vagonun, bojilerin ve köprü kirişinin dinamik cevapları verilmiştir. Analizde köprü uzunluğu 50 m olarak alınmış olup trenin köprüyü geçme süresi 0.6 s olmaktadır. Toplam analiz süresi ise trenin köprüyü geçme süresinin 5 katı alınmıştır. Analizde köprü üzerinden sadece bir vagon geçmektedir. Şekil 5.6a incelendiğinde, arka boji ve vagonun maksimum yer değiştirmesi 0.73 s'de gerçekleşirken, ön bojinin maksimum yer değiştirmesi ise arka bojiden 0.18 s önce olan 0.55 s'de gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, ön bojideki tekerlek ile arka bojideki tekerlek arasındaki mesafedir. Şekil 5.6b'de vagon, ön boji ve arka boji için yanal yer değiştirmeler gösterilmektedir. Vagonun ve ön bojinin maksimum yer değiştirmesi, tren köprüye girdikten 0.76 s sonra ve 53.3 m'de meydana gelmektedir. Arka bojinin maksimum yer değiştirmesi

ise tren köprüye girdikten 0.5 s sonra ve 31.67 m'de oluşmaktadır. Şekil 5.7'de vagonun ve bojilerin yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Grafiğe göre vagonun ve ön bojinin maksimum yunuslama hareketi ortalama 1.5×10^{-3} rad olurken, arka bojinin maksimum yunuslama hareketi yaklaşık 0.93×10^{-3} rad olduğu görülmüştür. Fakat maksimum yuvarlanma hareketi incelendiğinde ise arka bojinin dönme açısı daha fazla olurken vagonun yuvarlanma açısı diğerlerinden daha az olduğu belirlenmiştir. Vagonun ve bojilerin yuvarlanma hareketi yapmasının sebebi ise Şekil 5.9'da görülen, sağ köprü kirişi ile sol köprü kirişi arasındaki dinamik tepki farkından kaynaklanmaktadır.



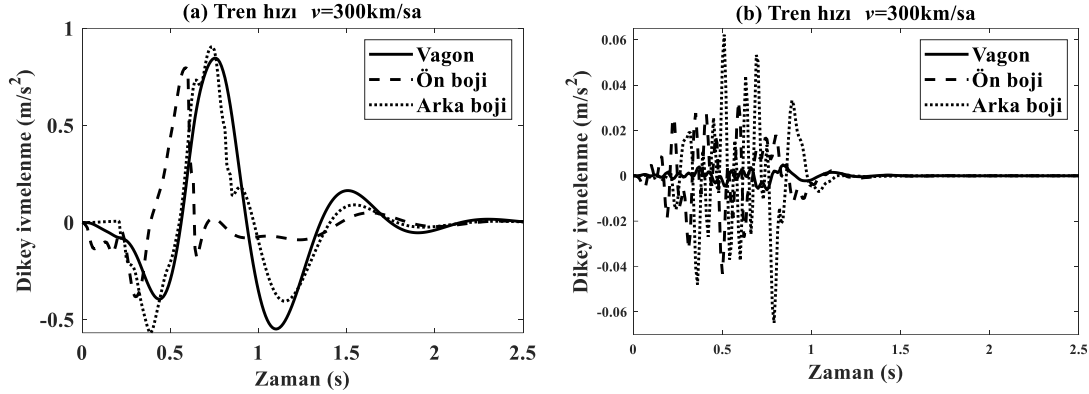
Şekil 5.6. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Dikey yerdeğiştirme b) Yatay yerdeğiştirme.



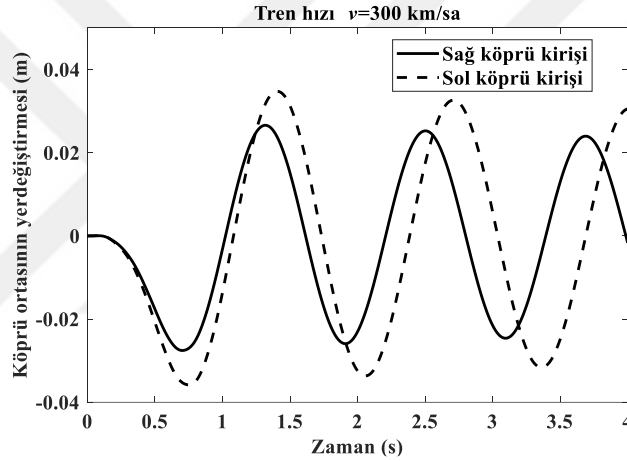
Şekil 5.7. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Yunuslama hareketi b) Yuvarlanma hareketi.

Vagon, ön boji ve arka bojinin dikey ve yanal ivmeleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi, tren köprüye girdikten 52.5 m sonra ve 0.84 m/s^2 olarak bulunurken, maksimum yanal ivme ise tren köprüye girdikten 60 m sonra ve 0.0048 m/s^2 olarak bulunmuştur. Vagonun maksimum dikey yer değıştirmesi ve maksimum ivmesi, köprünün hemen hemen aynı konumunda meydana gelmiştir. Ön

ve arka bojinin maksimum yanal ivmelenmesi sırasıyla 0.032 m/s^2 ve 0.06 m/s^2 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.8. Vagonun ve bojilerin dinamik cevabı a) Dikey ivmelenme b) Yatay ivmelenme.



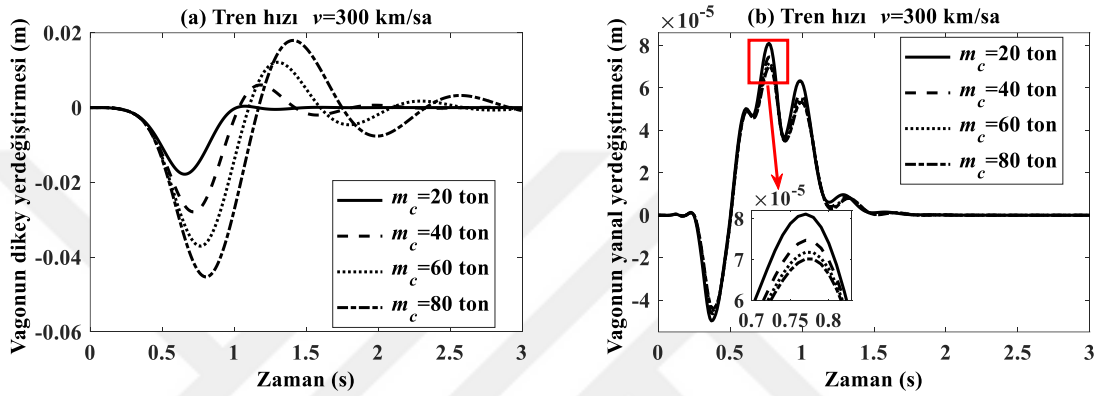
Şekil 5.9. Köprünün dinamik cevapları.

5.1.4. Vagon kütlesinin etkisi

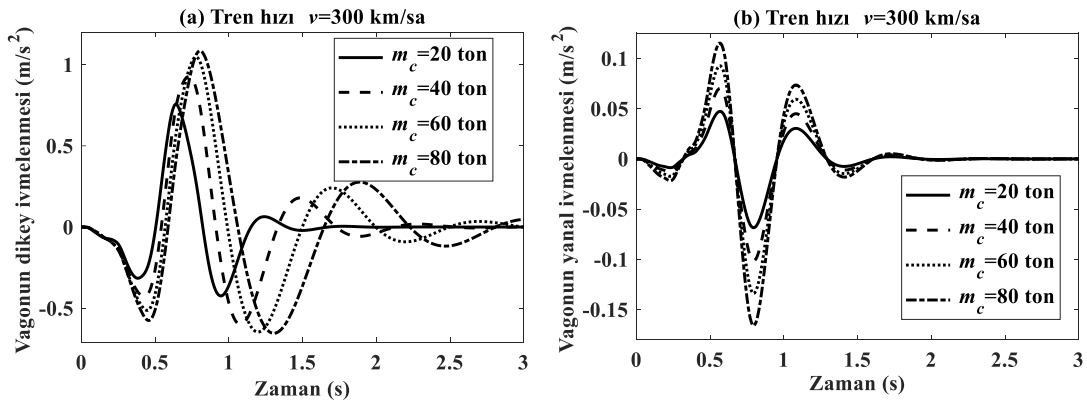
Demiryolu araçlarında artan hızlarla birlikte taşınan yüklerin miktarı da artmaktadır. Yolcu trenlerinde vagonlarında boş veya dolu olması sonucunda trenin toplam kütlesi değişmektedir ve dolayısıyla artan bu kütle ve artan tren hızları sonucunda titreşim sorunları oluşmaktadır. Bundan dolayı yüksek hızlı trenlerin köprü gibi esnek zeminlerin üzerinden geçişi durumunda meydana gelebilecek dinamik davranışların incelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma da vagon kütlesi 20 ton, 40 ton, 60 ton ve 80 ton olacak şekilde 4 farklı kütlede ele alınarak incelenmiştir. Yine tren hızı sabit ve 300 km/sa olarak ele alınmış ve sadece bir vagon köprüden geçmektedir.

Şekil 5.10a incelendiğinde, vagon kütlesi arttıkça dikey yer değiştirmelerin oldukça arttığı fark edilmektedir. Ancak Şekil 5.10b incelendiğinde vagon kütlesinin

artmasıyla birlikte vagonun yanal yer değiştirmeleri hemen hemen hiç değişmemekle birlikte vagon kütlesi arttıkça yanal yerdeğiştirmeler kısmen azalmıştır. Ayrıca, Şekil 5.10 'da görülen ayrı bir detay, vagon kütlesi arttıkça maksimum yer değiştirme süresinin sağa kaymasıdır. Bu, tren köprü sisteminin doğal frekansının vagon kütlesi ile ilgili olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin $m_c=20-40-60-80$ ton olduğunda vagonun maksimum dikey yer değiştirme süreleri sırasıyla 0.64 s, 0.71 s, 0.76 s ve 0.8 s olarak belirlenmiştir. Buna karşılık maksimum dikey yerdeğiştirme miktarları 0.018 m, 0.028 m, 0.037 m ve 0.045 m olmaktadır.



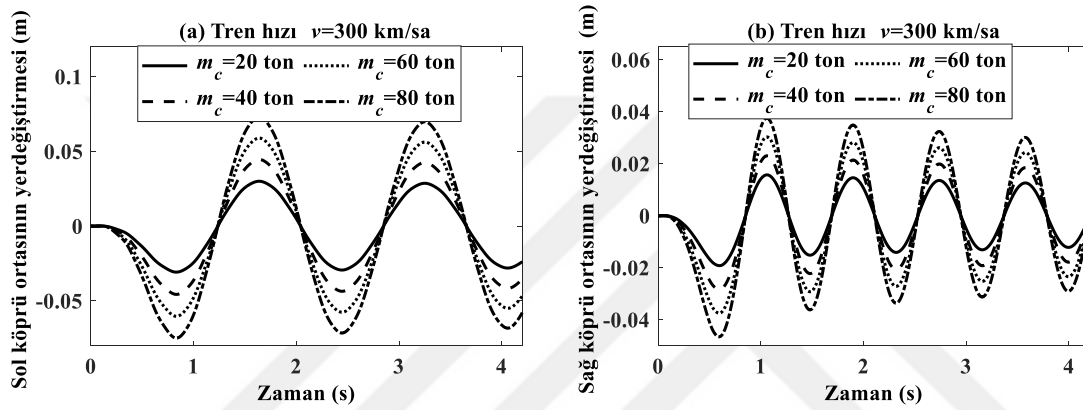
Şekil 5.10. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Dikey yerdeğiştirme (b) Yanal yerdeğiştirme.



Şekil 5.11. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Dikey ivmelenme (b) Yanal ivmelenme.

Şekil 5.11'de, vagon kütlesine göre vagonun dikey ve yanal yöndeki ivmelenme grafikleri verilmiştir. Şekil 5.11a'da dikey yöndeki ivmelenme grafiği Şekil 5.10a'daki dikey yerdeğiştirme grafiğine oldukça benzemektedir. Her ikisinde de vagon kütlesi arttıkça maksimum değerler ve bu maksimum değerlerin oluştuğu zamanlar artmaktadır. Örneğin Şekil 5.11a incelendiğinde maksimum dikey ivmelenme değerleri $m_c=20$ ton olduğunda $0.75 m/s^2$, $m_c=40$ ton olduğunda $0.93 m/s^2$, $m_c=60$ ton

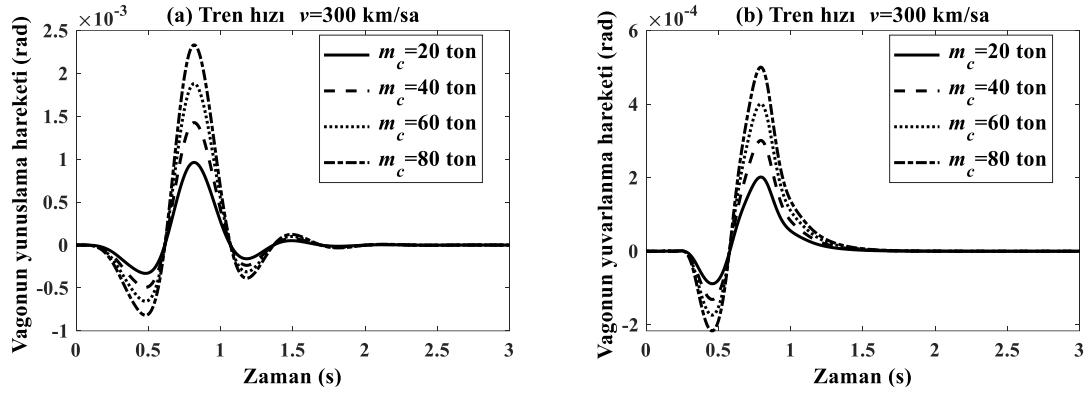
olduğunda 1.05 m/s^2 ve $m_c=80$ ton olduğunda 1.085 m/s^2 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık maksimum dikey ivmelenmelerin meydana geldiği zamanlar sırasıyla 0.64 s , 0.73 s , 0.78 s ve 0.8 s olmaktadır. Şekil 5.11b incelendiğinde vagonun yanal ivmelenmesi vagonun kütlesine göre değişmektedir. Oysaki bir önceki grafikte yanal yer değiştirmelerinin vagon kütlesine göre nerdeyse hiç değişmediği görülmüştü. Grafik incelendiğinde vagon kütlesi arttıkça maksimum yanal ivmelenme değerleri kütlenin artış sırasına göre sırasıyla 0.069 m/s^2 , 0.101 m/s^2 , 0.133 m/s^2 ve 0.165 m/s^2 olarak belirlenirken bu maksimum değerlerin meydana geldiği süreler hemen hemen aynı olmaktadır.



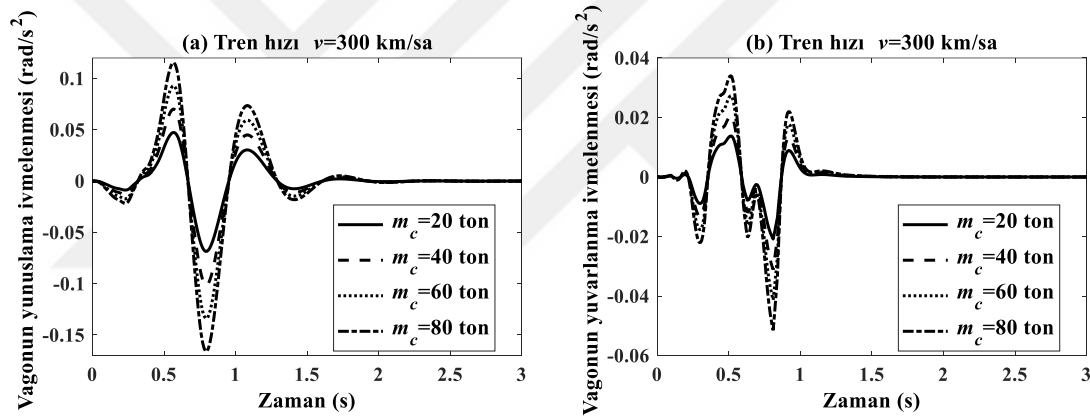
Şekil 5.12. Vagon kütlesinin köprü kirişinin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Sol köprü ortasının yerdeğiştirmesi (b) Sağ köprü ortasının değiştirmesi.

Titreşen köprü kiriş, üzerinden geçen aracın dinamik davranışlarını oldukça etkilemektedir. Yani köprünün hareketleri tren dinamiği açısından oldukça önem arz etmektedir. Köprünün dinamik cevaplarını köprünün esnekliği, köprü kirişinin sönümü, köprü geometrisi ve köprü uzunluğu gibi faktörler etkilemektedir. Bunların dışında köprüye etki eden tren yükü de önemlidir yani vagonun kütlesi arttıkça kiriş uygulanan kuvvet artmakta ve dolayısıyla köprü kirişinin sehimi de artmaktadır. Şekil 5.12'de sağ ve sol köprü kiriş ortasının yer değiştirmesi zamana göre verilmiştir. Grafiğe göre açıkça görülmektedir ki vagon kütlesinin artmasıyla birlikte köprü ortasının yerdeğiştirmeleri de oldukça artmaktadır. Örneğin Şekil 5.12a'da sol köprü ortasının maksimum yerdeğiştirmesi kütlenin artma sırasına göre 0.0307 m , 0.045 m , 0.06 m ve 0.075 m olmaktadır. Diğer grafik incelendiğinde ise sağ köprü ortasının maksimum yerdeğiştirmesi kütlenin artma sırasına göre 0.019 m , 0.028 m , 0.037 m ve 0.046 m olduğu görülmektedir. Sol köprünün maksimum genliklerinin olduğu süre 0.84 s olurken, sağ köprünün maksimum yer değiştirmelerinin olduğu süre ise 0.6 s

olmaktadır. Her iki köprünün farklı dinamik cevapları vermesinin sebebi ise Tablo 3.2 'ye göre köprülerin elastikiyet modülü ve birim uzunluğunun kütleleri birbirinden farklı olmasından dolayıdır.



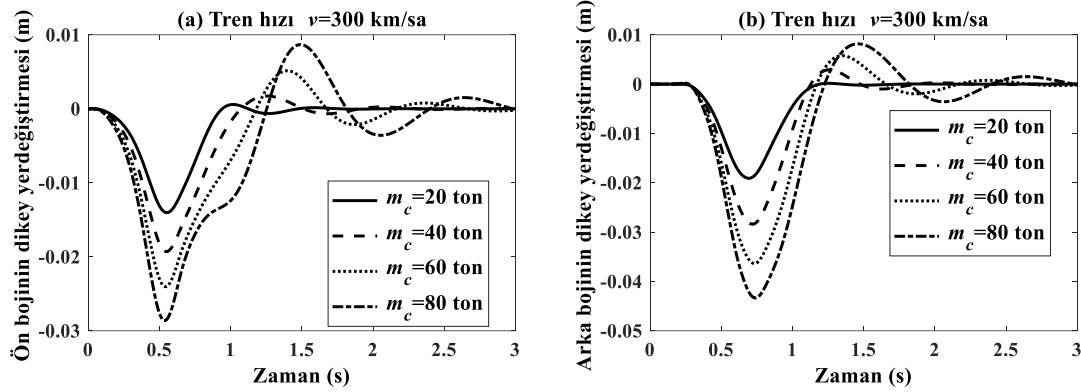
Şekil 5.13. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Yunuslama hareketi (b) Yuvarlanma hareketi.



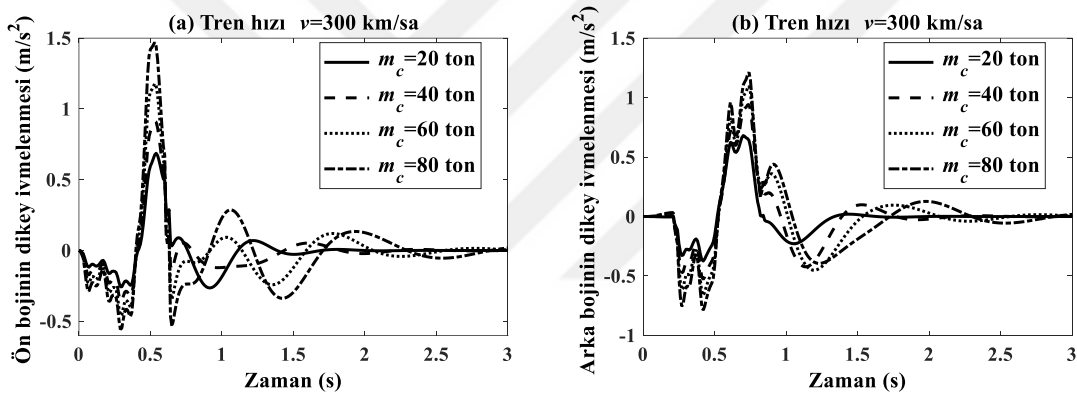
Şekil 5.14. Vagon kütlesinin vagonun dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Yunuslama ivmelenmesi (b) Yuvarlanma ivmelenmesi.

Her iki köprünün parametreleri birbirinden farklı olduğu için vagonun dönme hareketleri de meydana gelmektedir. Şekil 5.13'te vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri vagonun dört farklı kütlede olması durumunda verilmiştir. Grafiğe göre vagon kütlesinin sırasıyla 20 ton, 40 ton, 60 ton ve 80 ton olması durumunda vagonun maksimum yunuslama hareketi sırasıyla 0.96×10^{-3} rad, 1.43×10^{-3} rad, 1.88×10^{-3} rad ve 2.33×10^{-3} rad olurken, vagonun maksimum yuvarlanma hareketi ise sırasıyla 2.01×10^{-4} rad, 3.01×10^{-4} rad, 4.01×10^{-4} rad ve 5.01×10^{-4} rad olmaktadır. Şekil 5.14'te ise vagonun dönme ivmelenmesi grafikleri verilmiştir. İvmelenme grafikleri incelendiğinde bir önceki grafiğe benzer şekilde vagon kütlesi arttıkça ivmelenme değerleri oldukça artmaktadır. Bu her iki grafik incelendiğinde görülmektedir ki

vagonun yunuslama hareketi yuvarlanma hareketine göre 2-4 kat daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15. Vagon kütlesinin bojilerin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Ön bojinin yerdeğiştirmesi (b) Arka bojinin yerdeğiştirmesi.



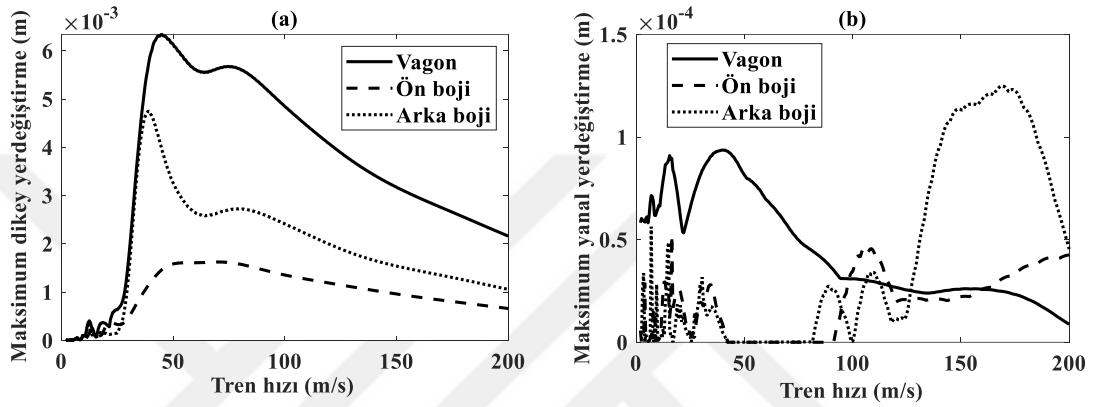
Şekil 5.16. Vagon kütlesinin bojilerin dinamik tepkileri üzerindeki etkisinin karşılaştırılması (a) Ön bojinin ivmelenmesi (b) Arka bojinin ivmelenmesi.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da ön ve arka bojinin dikey yöndeki yerdeğiştirmesi ve ivmelenme grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde neredeyse tüm grafiklerde olduğu gibi vagon kütlesinin artmasıyla bojilerin maksimum yerdeğiştirmeleri artmıştır. Burada ön bojinin maksimum yerdeğiştirme zaman yaklaşık 0.53 s’de olurken, arka bojinin maksimum yerdeğiştirme süresi ise 0.21 s sonra yani 0.74 s’de olmaktadır. Bu zaman farkı ise iki boji arasındaki mesafeden kaynaklanmaktadır. Tablo 3.1’e göre bojilerin vagon merkezine uzaklığı 8.75 m’dir. Tren hızı 300 km/sa olduğundan dolayı bu mesafeyi alması gereken süre yaklaşık 0.21 s olmaktadır.

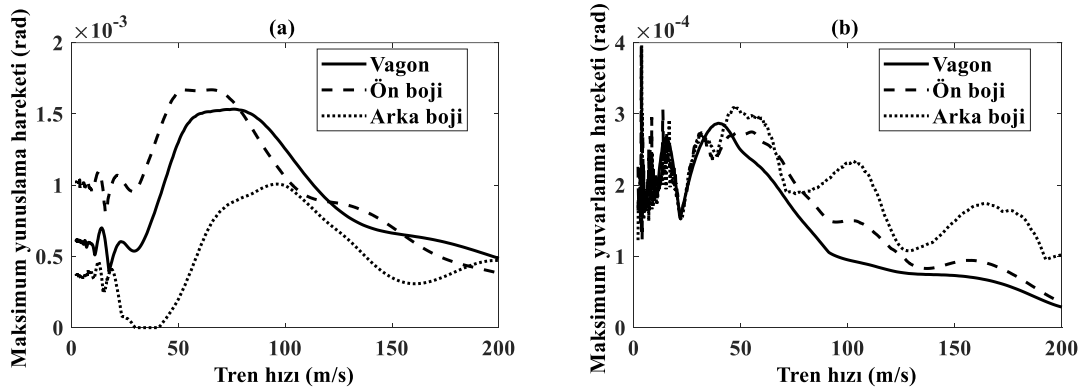
5.1.5. Tren hızının TTKE sisteminin dinamik cevaplarına etkisi

Şekil 5.17-19’da vagon, ön ve arka bojinin yerdeğiştirmesi, yunuslama ve yuvarlanma hareketleri ve ivmelenme değerleri tren hızının 2 m/s’den 200 m/s’ye 0.5 m/s

aralıklarla değişmesi durumunda verilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde maksimum yerdeğiştirme iki yerde yüksek değerini almıştır bunlardan ilki tren hızının 18 m/s de diğeri ise tren hızının 45 m/s olması durumunda meydana gelmiştir. Tablo 5.1'e bakılırsa eğer, 18 m/s değeri trenin birinci kritik hızına oldukça yakındır. Benzer şekilde Şekil 5.18'de vagonun maksimum yunuslama hareketi tren hızının 65 m/s olduğu zamanda meydana gelirken, Şekil 5.19'da vagonun maksimum dikey ivmelenmesi ise 69 m/s'de meydana gelmiştir. Ki bu hızlarda köprü-tren sisteminin ikinci kritik hızına yakındır.



Şekil 5.17. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum dikey yerdeğiştirme (b) Maksimum yanal yerdeğiştirme.

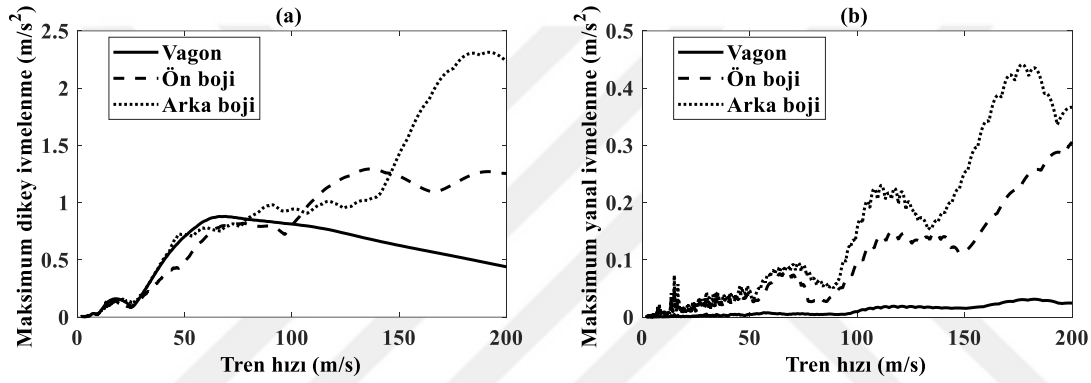


Şekil 5.18. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum yunuslama hareketi (b) Maksimum yuvarlanma hareketi.

Şekil 5.17 incelendiğinde vagonun maksimum yerdeğiştirmesi tren hızı 45 m/s olduğu zamanda ve 6.32×10^{-3} m olurken, ön bojinin maksimum yerdeğiştirmesi tren hızının 39 m/s olduğu zamanda ve 4.75×10^{-3} m olmaktadır. Arka bojinin maksimum yerdeğiştirmesi ise tren hızı 55 m/s olduğu zamanda ve 1.6×10^{-3} m olduğu görülmektedir. Şekil 5.17b'de ise vagonun ve bojilerin yanal yerdeğiştirmeleri verilmiştir. Buna göre arka bojinin maksimum yatay yedeğiştirmesi tren hızının 168.5

m/s olduğu anda olmaktadır ve Tablo 5.1'e göre trenin üçüncü kritik hızına oldukça yakın olduğu bilinmektedir.

Şekil 5.18'de vagon ve bojilerin yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Şekil 5.18a'da ön bojinin maksimum yunuslama hareketi tren hızının 50 m/s olduğu zamanda 1.65×10^{-3} rad olurken, vagonun ve arka bojinin sırasıyla tren hızının 80 m/s, 95 m/s olduğu zamanda ve 1.5×10^{-3} rad ve 1×10^{-3} rad olmuştur. Tren gövdesinin maksimum yunuslama hareketi ise trenin ikinci kritik hızına yakın olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.18b'de yuvarlanma hareketleri incelendiğinde maksimum yuvarlanma hareketi tren hızının ortalama 50 m/s olduğu zamanlara tekabül ederken en fazla değeri sırasıyla arka boji, ön boji ve vagonun aldığı görülmektedir.

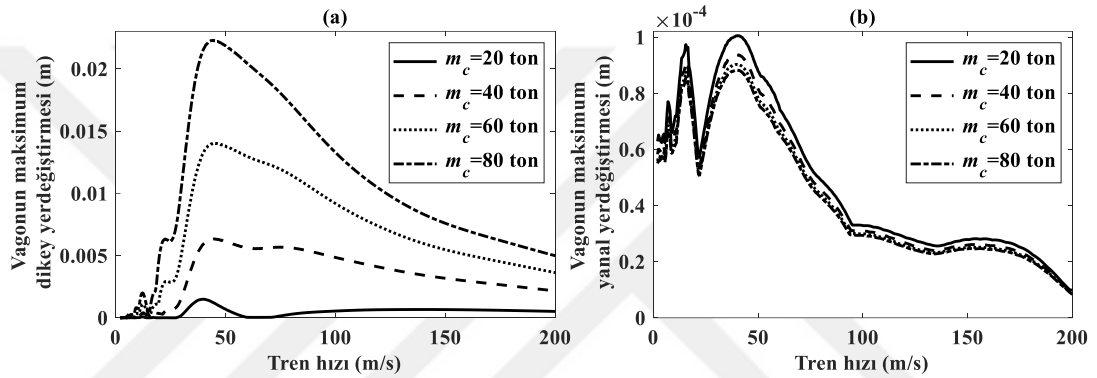


Şekil 5.19. Tren hızının dinamik cevaplara etkisi (a) Maksimum dikey ivmelenme (b) Maksimum yanal ivmelenme.

Şekil 5.19'da vagon ve bojilerin değişken tren hızına göre dikey ve yanal ivmelenmeleri verilmiştir. Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi 0.85 m/s^2 ve tren hızı 69 m/s'de iken olmaktadır ve bu hız değeri de trenin ikinci kritik hızına tekabül etmektedir. Trenin bu hızından sonraki hızlarda vagonun dikey ivmelenmesi azalırken bojilerin dikey ivmelenmeleri artmaktadır. Ayrıca bu ivmelenme değerleri de yolcu olumsuz etkileyen konfor sınırını geçmektedir. France-SNCF'ye göre düşük konforlu ivmelenme değeri maksimum 0.49 m/s^2 olarak belirlenmiştir [153]. Şekil 5.19b'de yanal ivmelenmelere bakıldığında vagonun yanal ivmeleri bojilere göre oldukça az olduğu görülmektedir.

Önceki bölümde vagon kütlelerinin etkisi zamana bağlı olarak verilmişti. Bu kısımda ise Şekil 5.20-22'de vagon kütlelerinin değişken tren hızına göre incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.20'de artan tren hızı ve farklı vagon kütlesi için vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirme hareketleri verilmiştir. Şekil 5.20a incelendiğinde tren hızı yaklaşık 45

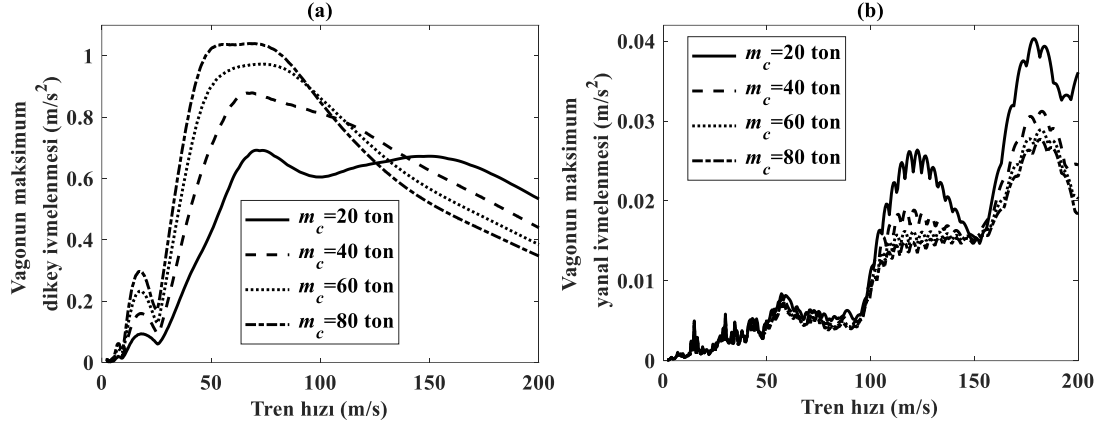
m/s olduğu zamanda vagonun dikey yerdeğiştirmesi tüm vagon kütlesi için maksimum olmaktadır. Vagon kütlesinin sırasıyla 20, 40, 60 ve 80 ton olduğu durumlarda vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi 1.5×10^{-3} , 6.3×10^{-3} , 14×10^{-3} ve 1.5×10^{-3} , 22.4×10^{-3} m olarak belirlenmiştir. Yani bu durumda vagon kütlesinin 20 ton'dan 80 ton'a çıkması durumunda vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi yaklaşık 15 kat artmıştır. Ayrıca şekilden görölmektedir ki trenin hızı 45 m/s olana kadar dikey yerdeğiştirme değerleri artarken trenin bu hızından sonraki hızlarında azalmaktadır. Şekil 20b incelendiğinde vagonun maksimum yatay yerdeğiştirmesi trenin ilk iki kritik hızına oldukça yakın olan 15.5 m/s'de ve 45 m/s'de olmaktadır ve bu hızdan sonra tren hızı arttıkça yatay yerdeğiştirme azalmaktadır.



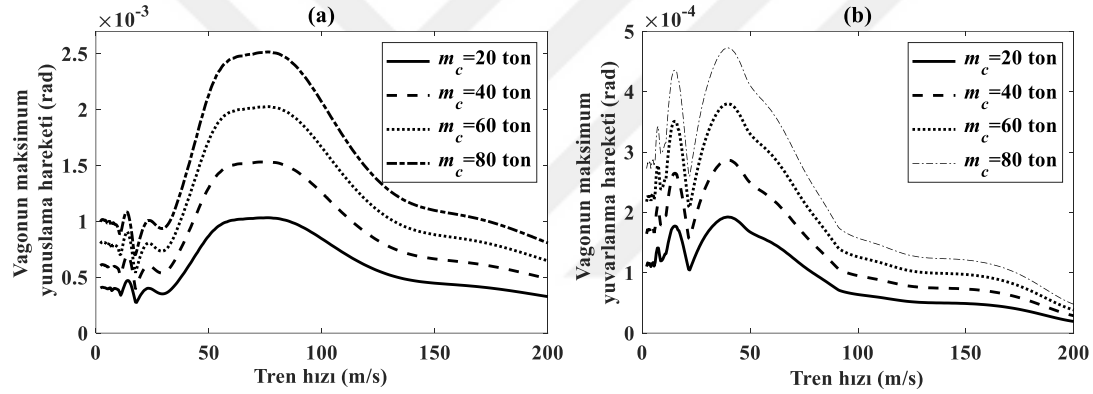
Şekil 5.20. Artan tren hızı ve farklı vagon kütlesi için vagonun yer değiştirmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi.

Şekil 5.21'de değişken tren hızının ve farklı vagon kütlesinin vagonun dikey ve yanal ivmelenmesini nasıl etkilediği görölmektedir ve buna göre kütlenin artmasıyla dikey ivmelenme tren hızı yaklaşık 120 m/s olana kadar artmaktadır. Fakat bu hızdan sonrası için kütlenin etkisi tersine dönmekte ve kütlenin artmasıyla dikey ivmelenme azalmaktadır. Ayrıca tüm vagon kütlelerinde tren hızı yaklaşık 70 m/s olduğu durumda maksimum dikey ivmelenmeler oluşmaktadır. Yani tren-köprü sisteminin ikinci kritik hız olan 74.9 m/s hız ile gittiği durumda vagonun dikey ivmelenmesi France-SNCF standartlarına göre düşük konforlu sayılan 0.49 m/s^2 değerini aşmaktadır [153]. Şekil 5.21b'de vagonun yanal ivmelenmesi tren hızının 100 m/s'den düşük olması durumunda kütleden bağımsız olarak hemen hemen aynı değere sahip olurken, tren hızı 100 m/s ve daha yüksek olması halinde vagon kütlesi arttıkça yanal ivmelenmeler azalmaktadır. Ayrıca şekil 5.21b'de maksimum yatay ivmelenme Tablo 5.1'e göre 178.5 m/s yani trenin üçüncü kritik hızına oldukça yakındır. Hızın yaklaşık 150 m/s

olması durumunda ise yatay ivmelenme vagon kütlesi ne olursa olsun 0.015 m/s^2 olmaktadır.



Şekil 5.21. Artan hız ve farklı vagon kütlesi için vagonun ivmelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (b) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.



Şekil 5.22. Artan hız ve farklı vagon kütlesi için vagonun dinamik davranışları (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi.

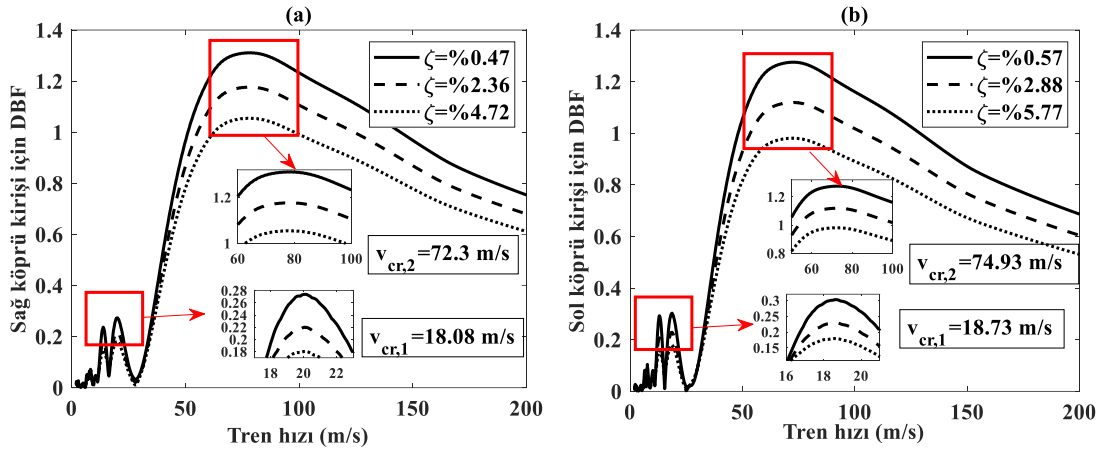
Şekil 5.22’de vagon gövdesinin dönme hareketleri verilmiştir. Her iki grafiğe göre vagon kütlesinin artmasıyla vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri artmaktadır. Şekil 5.22a’ya göre vagonun maksimum yunuslama hareketi, tren hızı yaklaşık 75 m/s olduğu zamanda ve vagon kütlesinin 20, 40, 60 ve 80 ton olmasına göre sırasıyla 2.5×10^{-3} , 2.02×10^{-3} , 1.53×10^{-3} , ve 1.02×10^{-3} m olduğu görülmektedir. Vagonun maksimum yunuslama hareketi trenin ikinci kritik hızı olan 76 m/s’ye oldukça yakındır. Şekil 5.22b’de vagonun yuvarlanma hareketleri tren hızının 18 m/s ve 40 m/s olduğunda maksimum değerlerini almıştır. Bu değerlerden sonraki hızlarda ise vagonun yuvarlanma hareketi azalmaktadır.

5.1.6. Köprü sönümünün etkisi

Bu bölümde yüksek hızlı trenlerin geçtiği köprünün sönüm etkisi incelenecektir. Şekil 5.23’de kiriş orta noktasının dinamik büyütme faktörü (DBF) verilmiştir. DBF trenin köprüden geçmesi halinde köprü kiriş orta noktasının maksimum çökme miktarının trenin kütesinden dolayı köprü kiriş orta noktasının çökmesine oranıdır ve $DBF=R_d(x)/R_s(x)$ ifadesiyle bulunur. Köprü orta noktasının maksimum çökme hesabı ise $R_s=FL^3/48EI$ formülü ile bulunur burada F trenin toplam ağırlığıdır. r_d ise köprü üzerinden trenin geçmesi durumunda köprü orta noktasının yapmış olduğu sehimdir. Şekil 5.23 incelendiğinde köprü kirişinin 3 farklı sönüm oranı verilmiştir. Bunlar sağ köprü kirişi için $\zeta = \%0.47, \%2.36, \%4.72$ sol köprü kirişi için ise $\zeta = \%0.57, \%2.88, \%5.77$ olarak belirlenmiştir. Grafikler incelendiğinde sağ köprü kirişi için öncelikle tren hızı yaklaşık 20 m/s olduğu zamanda DBF yükselerek 0.27 değerini almaktadır ve daha sonra tren hızı arttıkça 0.02’lere kadar DBF azalmaktadır. Ardından DBF hızla artarak tren hızı 75 m/s olduğunda 1.3 değerini almaktadır. Köprü sönümü arttıkça DBF’nin maksimum değeri $\zeta=\%2.36$ olduğunda 1.17, $\zeta=\%4.72$ olduğunda 1.05 olmaktadır. Yani sönüm oranı arttıkça DBF sırasıyla %10 ve %19.2 azaldığı görülmektedir. Benzer bir durum sol köprü kirişi içinde geçerli olmaktadır. Her iki grafikte de iki farklı yerde DBF’nin artması o hızlarda tren-köprü sisteminin kritik hızından dolayı meydana gelmektedir.

5.1.7. Köprü uzunluğunun tren dinamiğine etkisi

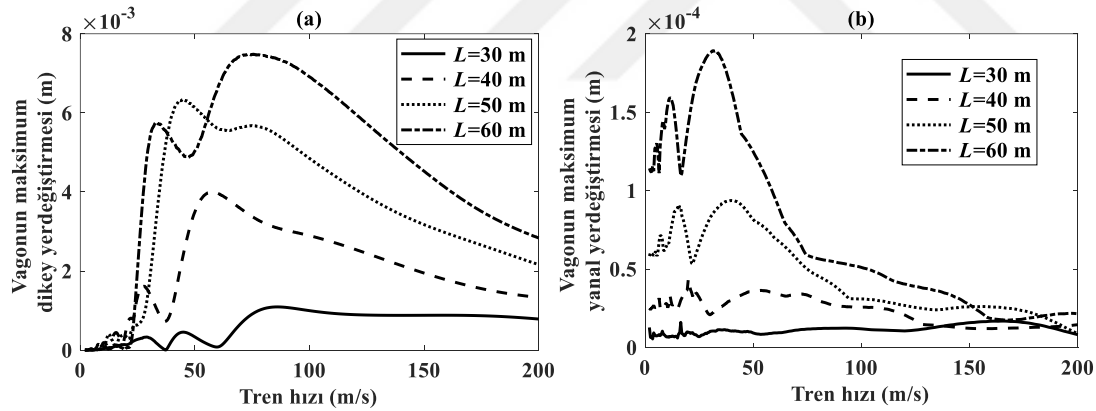
Demiryolu köprüleri köprü mühendisliği açısından oldukça önemli bir parametredir. Demiryolu köprülerinin literatürde kiriş olarak modellenebileceği daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Kirişlerin titreşim frekansları denklem 5.1’e göre birden fazla parametreye bağlı olmaktadır. Bu parametrelerden en önemlisi de köprünün uzunluğudur. Denklem 5.2’e göre kirişin titreşim frekansı köprü uzunluğunun karesiyle ters orantılı olduğundan köprü uzunluğunun artması frekansları oldukça etkileyecektir. Bundan dolayı bu bölümde vagonun ve köprü kirişinin dinamik cevabı köprü kirişinin farklı uzunluklarda olması durumunda incelenmiştir. Bundan dolayı, uzunluğu 30, 40, 50 ve 60 m olmak üzere dört farklı kiriş uzunluğu incelenmiştir. Köprünün bu uzunluklarda olması durumunda ise denklem 5.2 kullanılarak tüm köprü uzunlukları için tren-köprü sisteminin ilk dört kritik hızı Tablo 5.4’te ki gibi belirlenmiştir.



Şekil 5.23. Köprü sönümünün dinamik büyütme faktörü üzerine etkisinin kıyaslanması (a) Sağ köprü kirişi (b) Sol köprü kirişi.

Tablo 5.4. Farklı köprü uzunlukları için köprü-kiriş sisteminin ilk dört kritik hızları.

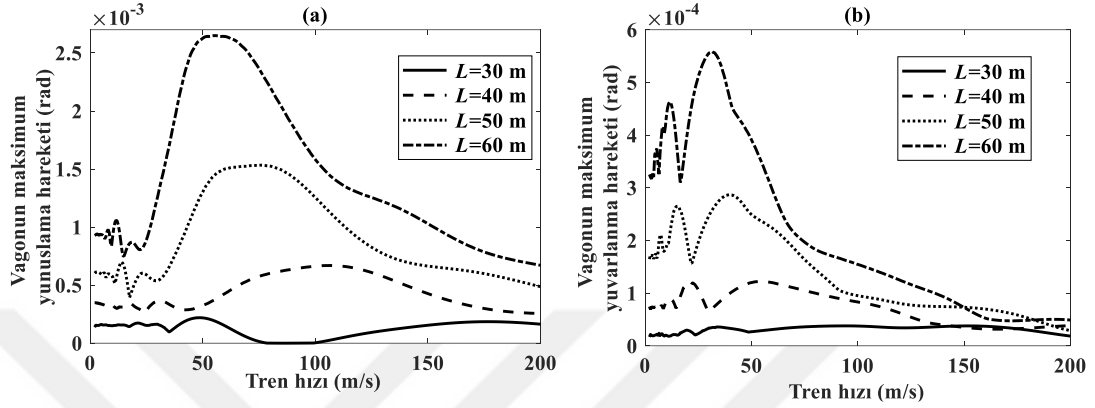
Sol köprü kirişi için	$L=30\text{m}$	$L=40\text{m}$	$L=50\text{m}$	$L=60\text{m}$
v_{cr1} (m/s)	52.03	29.27	18.73	13.01
v_{cr2} (m/s)	208.14	117.08	74.93	52.03
v_{cr3} (m/s)	468.32	263.43	168.59	117.08
v_{cr4} (m/s)	832.57	468.32	299.72	208.14



Şekil 5.24. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun yerdeğiştirmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi.

Şekil 5.24'te vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmeleri 0 ile 200 m/s arasında 0.5 m/s aralıklarda değişen tren hızına göre ve dört farklı köprü uzunluğuna göre verilmiştir. Her iki grafiğe göre köprü uzunluğunun artmasıyla dikey ve yanal yerdeğiştirmeler oldukça artmaktadır. Örneğin, vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi $L=30$ m olması durumunda 1.1×10^{-3} m, $L=40$ m olması durumunda 4×10^{-3} m, $L=50$ m olması durumunda 6.34×10^{-3} m ve $L=60$ m olması durumunda 7.48×10^{-3} m olmuştur. Yani köprü uzunluğunun $L=30$ m'den $L=40$ m'ye çıkması halinde maksimum dikey

yerdeşiftirmeler 3.6 kat, $L=50$ m'ye çıkması durumunda 5.76 kat ve $L=50$ m'ye çıkması durumunda ise 6.8 kat artmıştır. şekil 5.24b'de ise vagonun maksimum yanal yerdeşiftirmeleri verilmiştir. Bu grafikte de köprü uzunluğu yanal yerdeşiftirmeleri artırmaktadır. Ayrıca her iki grafiğe göre tren hızının artmasıyla birlikte vagonun yerdeşiftirmeleri belli bir hıza kadar artarken daha sonra azalmaktadır.

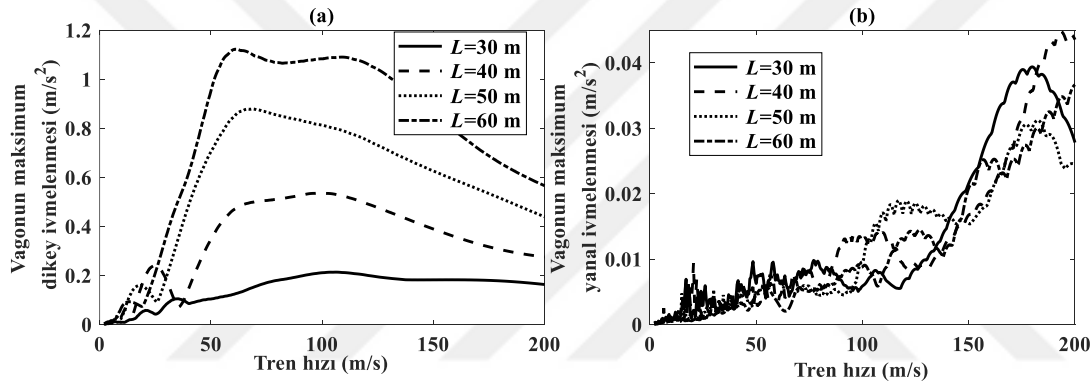


şekil 5.25. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun dinamik davranışları
(a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi.

şekil 5.25 vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketini gösterir. Bu grafiğe göre köprü uzunluğunun artmasıyla birlikte dönme açıları da artmaktadır. Grafikler incelendiğinde belirli tren hızında dönme açıları bir hayli fazla olmaktadır. Örneğin Tablo 5.4'e göre köprü uzunluğunun 30 m olması durumunda maksimum yunuslama hareketi tren-köprü sisteminin ilk kritik hızına oldukça yakındır. Benzer olarak köprü uzunluğunun 40-50-60 m olması durumunda maksimum yunuslama hareketi tren-köprü sisteminin birinci ve ikinci kritik hızlarına yakın hızlarda olmaktadır. şekil 5.25b'de vagonun yuvarlanma hareketine bakıldığında düşük tren hızlarında ($v < 50$ m/s) yuvarlanma hareketi köprü uzunluğu arttıkça artarken yüksek hızlarda nerdeyse köprü uzunluğundan bağımsız olarak sürekli azalmaktadır.

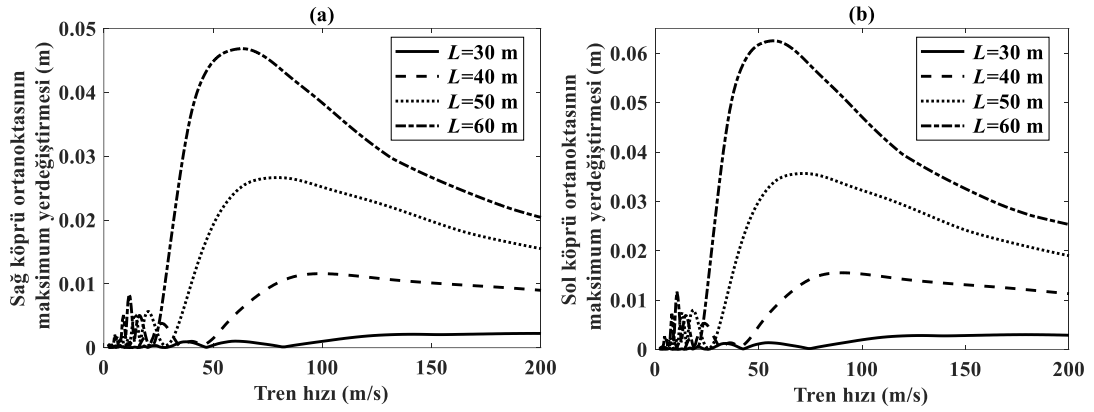
şekil 5.26 değişken tren hızı ve dört farklı köprü uzunluğu olması durumuna göre vagon gövdesinin maksimum dikey ve yanal ivmelenmeleri verilmiştir. şekil 5.26a'ya göre köprü uzunluğunun vagonun dikey ivmelenmelerini oldukça etkilediğini syleyebilirken, şekil 5.26b'ye göre vagonun yanal ivmelenmelerini pek etkilemediği gözlemlenmektedir. Dikey ivmelenme değerlerine dikkatle bakıldığı zaman grlmektedir ki bazı tren hızlarında vagonun dikey ivmelenmeleri maksimum değerini almaktadır. Örneğin köprü uzunluğu $L=60$ m olduğunda öncelikle tren hızı

13 m/s olduğu zamanda 0.09 m/s^2 değeri alırken trenin bu hızında sonra dikey ivmelenme kısmen azalmaya başlamıştır ve daha sonra aniden artarak tren hızı 59 m/s olduğunda 1.12 m/s^2 değerine yükselmektedir. Bu iki hızlara dikkat edecek olursak Tablo 5.4'e göre tren-köprü sisteminin ilk iki kritik hızlarına oldukça yakındır. Köprü uzunluğu $L=50 \text{ m}$ olması halinde ise tren hızı 69 m/s olduğu zamanda vagonun maksimum dikey ivmelenmesi 0.88 m/s^2 ile en yüksek değerini almıştır. Bu hızda Tablo 5.4'e göre tren-köprü sisteminin ikinci kritik hızına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca bahsedilen bu maksimum dikey ivmelenme değerleri France-SNCF standartlarına göre insanı rahatsız etmektedir. Şekil 5.26b'ye göre vagonun yanal ivmelenmeleri köprü uzunluğuna göre neredeyse değişmemektedir ve tren hızı arttıkça vagonun yanal ivmelenmeleri artmaktadır.



Şekil 5.26. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için vagonun ivmelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (b) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.

Şekil 5.27'de sağ ve sol köprü kirişinin orta noktasının köprü uzunluğuna ve değişken tren hızına göre maksimum yerdeğiştirmesi verilmiştir. Buna göre köprü kiriş uzunluğu arttıkça köprü orta noktasının maksimum çökme miktarı da artmaktadır ve köprü orta noktasının maksimum yerdeğiştirme değeri köprü uzunluğu arttıkça daha düşük hızlarda meydana gelmektedir. Örneğin $L=40 \text{ m}$ iken köprü orta noktasının maksimum yerdeğiştirmesi $v=100 \text{ m/s}$ 'de olurken, $L=50$ olduğu zamanda $v=79 \text{ m/s}$ 'de ve $L=60 \text{ m}$ olduğu zamanda ise $v=63 \text{ m/s}$ 'de olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi denklem 5.1'de de görüldüğü gibi köprü'nün doğal frekansının köprü uzunluğuna bağlı olmasıdır.



Şekil 5.27. Artan hız ve farklı köprü kiriş uzunluğu için köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi (a) Sağ köprü kirişi (b) Sol köprü kirişi.

5.1.8. Temas kuvvetlerinin analizi

Bu bölümde yüksek hızlı trenlerin köprü geçişi sırasında tren-köprü etkileşimi nedeniyle oluşan titreşimlerden dolayı meydana gelen dikey yöndeki temas kuvvetleri incelenecektir. Yüksek hızlı tren köprüden geçerken trenin kütlesinden dolayı temas bölgesinde statik kuvvetler oluşurken, hareket eden trenden ve tren parçalarının aniden değişen ivmelenmelerinden dolayı da dinamik kuvvetler meydana gelmektedir. Bundan dolayı temas kuvvetleri tayin edilirken statik kuvvetlere dinamik kuvvetler eklenerek tayin edilmektedir.

Tekerlekler, bojiler ve vagon üzerine etkiyen statik kuvvetler sırasıyla denklem (5.8-10)'da verilmiştir. Burada w_h ile temsil edilen değer köprü kirişi üzerinde hareket eden teker sayısını göstermektedir.

$$f_g = \frac{(m_c + \sum_{i=1}^2 m_{b,i} + \sum_{i=1}^8 m_{w,i}) g}{w_h} \quad (5.8)$$

$$f_b = \frac{(m_c + \sum_{i=1}^2 m_{b,i}) g}{2} \quad (5.9)$$

$$f_t = m_c g \quad (5.10)$$

Toplam temas kuvvetleri, aşağıdaki gibi 31 serbestlik dereceli tam demiryolu araç modeli ve köprü kirişinin hareket denklemi kullanılarak elde edilmiştir:

Tekerlek takımının temas kuvveti denklem 5.11'de verilirken, tekerlek takımının merkezinin torku denklem. 5.12'deki gibi verilmiştir.

$$\begin{aligned} F_{wk} &= \dot{r}_{wky}m_w - 2c_{wky}(\dot{r}_{bjy} - \dot{r}_{wky} + \dot{\theta}_{bjz}l_{wk}) \\ &\quad - 2k_{wky}(r_{bjy} - r_{wky} + \theta_{bjz}l_{wk}) \quad k = 1,2-3,4 \quad j = 1,2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \tau_{wk} &= \ddot{\theta}_{wkk}I_{wkk} - c_{wky}d(2\dot{\theta}_{bjx}d - \varphi_i(\xi_{kL},t)\dot{q}_i + \varphi_i(\xi_{kR},t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{wkk}d) \\ &\quad - k_{wky}d(2\theta_{bjx}d - \varphi_i(\xi_{kL},t)q_i + \varphi_i(\xi_{kR},t)q_i \\ &\quad - 2\theta_{wkk}d) \quad k = 1,2-3,4 \quad j = 1,2 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Sağ ve sol tekerleklerin temas noktalarındaki kuvvetler aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_{rwk} = f_g + F_{wk} + \frac{\tau_{wk}}{l_r} \quad k = 1, \dots, 4. \quad (5.13)$$

$$F_{lwk} = f_g + F_{wk} - \frac{\tau_{wk}}{l_r} \quad k = 1, \dots, 4. \quad (5.14)$$

Ön ve arka bojilerin temas kuvvetleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

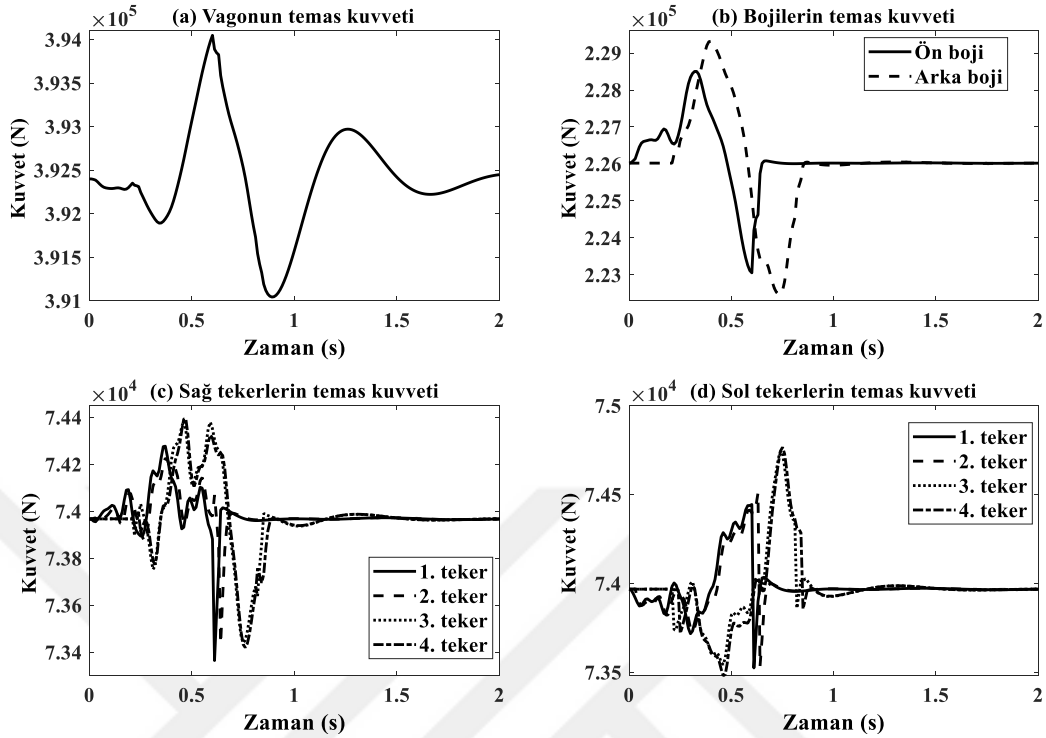
$$\begin{aligned} F_{fb} &= f_b + \ddot{r}_{b1y}m_{b1} - 2c_{b1y}(\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz}l_{b1}) \\ &\quad + c_{w1y}(2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R},t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{1L},t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w1})\dots \\ &\quad + c_{w2y}(2\dot{r}_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R},t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{2L},t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b1z}l_{w2}) \\ &\quad - 2k_{b1y}(r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz}l_{b1})\dots \\ &\quad + k_{w1y}(2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{1R},t)q_i - \varphi_i(\xi_{1L},t)q_i + 2\theta_{b1z}l_{w1})\dots \\ &\quad + k_{w2y}(2r_{b1y} - \varphi_i(\xi_{2R},t)q_i - \varphi_i(\xi_{2L},t)q_i - 2\theta_{b1z}l_{w2}) \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} F_{rb} &= f_b + \ddot{r}_{b2y}m_{b2} - 2c_{b2y}(\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz}l_{b2}) \\ &\quad + c_{w3y}(2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R},t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{3L},t)\dot{q}_i + 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w3})\dots \\ &\quad + c_{w4y}(2\dot{r}_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R},t)\dot{q}_i - \varphi_i(\xi_{4L},t)\dot{q}_i - 2\dot{\theta}_{b2z}l_{w4}) \\ &\quad - 2k_{b2y}(r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz}l_{b2})\dots \\ &\quad + k_{w3y}(2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{3R},t)q_i - \varphi_i(\xi_{3L},t)q_i + 2\theta_{b2z}l_{w3})\dots \\ &\quad + k_{w4y}(2r_{b2y} - \varphi_i(\xi_{4R},t)q_i - \varphi_i(\xi_{4L},t)q_i - 2\theta_{b2z}l_{w4}) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Benzer şekilde, vagona etki eden temas kuvveti aşağıdaki gibi verilir:

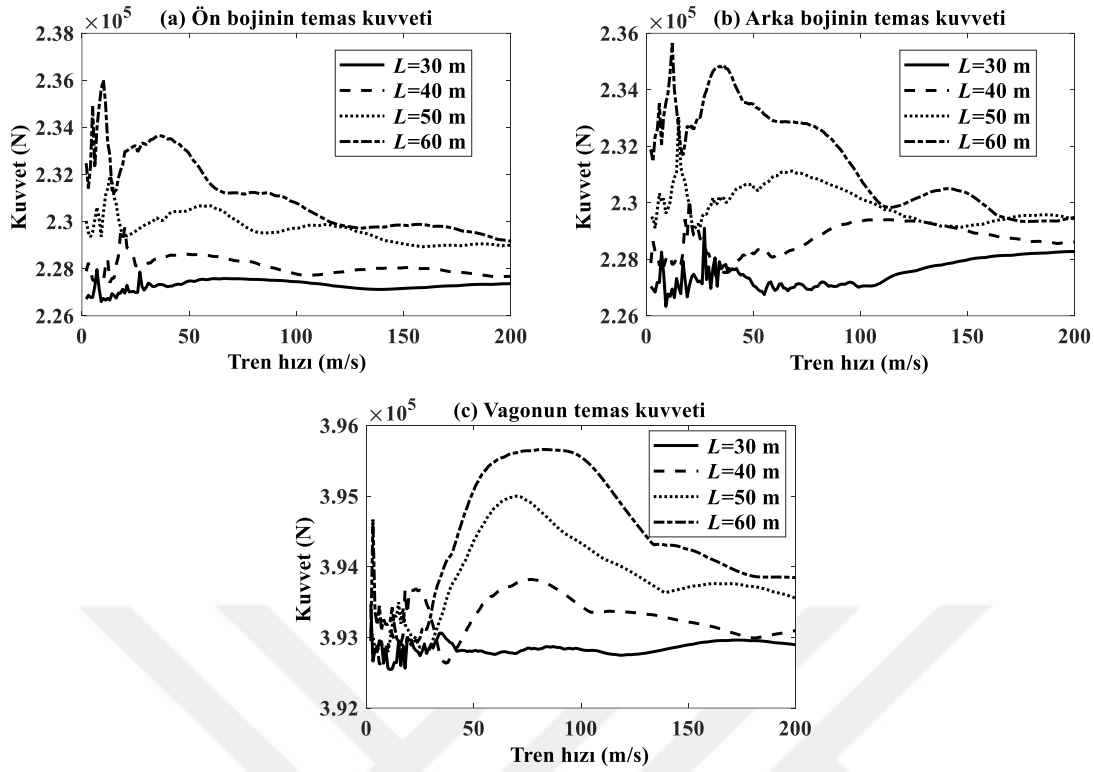
$$\begin{aligned} F_{tb} &= f_t + \ddot{r}_{cy}m_c + 2c_{b1y}(\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b1y} + \dot{\theta}_{cz}l_{b1}) \\ &\quad + 2c_{b2y}(\dot{r}_{cy} - \dot{r}_{b2y} - \dot{\theta}_{cz}l_{b2})\dots \\ &\quad + 2k_{b1y}(r_{cy} - r_{b1y} + \theta_{cz}l_{b1}) + 2k_{b2y}(r_{cy} - r_{b2y} - \theta_{cz}l_{b2}) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Yukarıda verilen denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımı Bölüm 3'te anlatılmıştır.

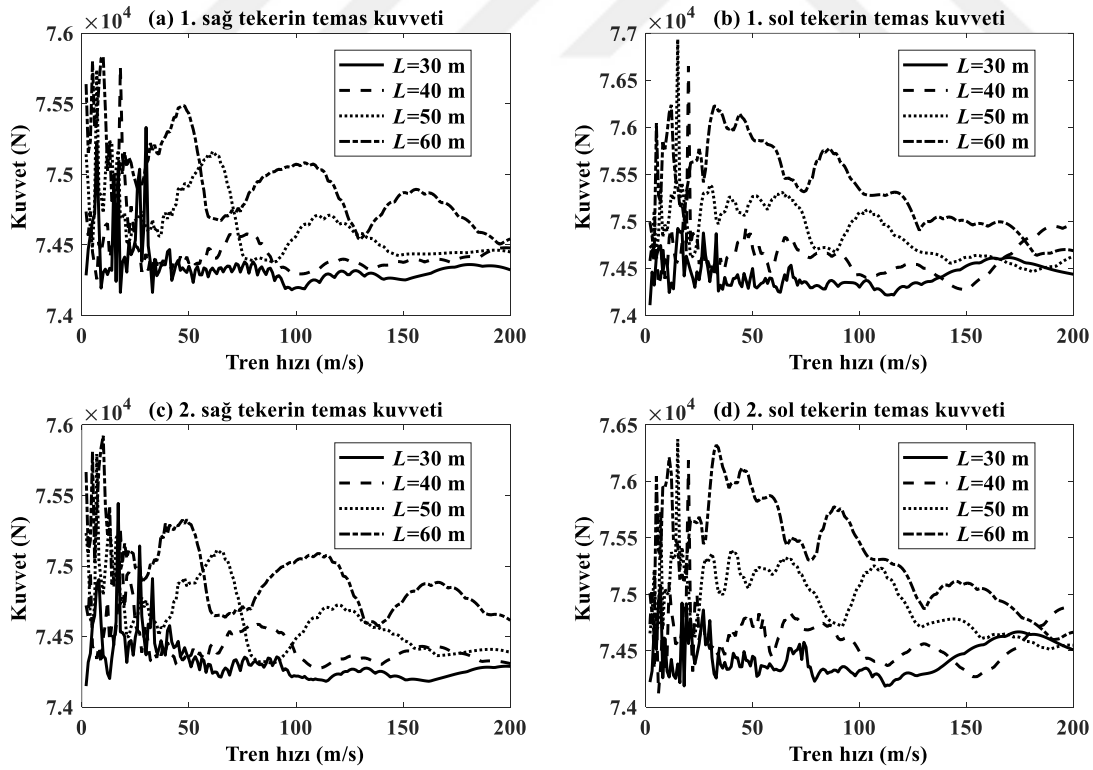


Şekil 5.28. Temas kuvvetlerinin analizi (a) Vagonun temas kuvveti (b) Bojilerin temas kuvveti (c) Sağ tekerlerin temas kuvveti (d) Sol tekerlerin temas kuvveti.

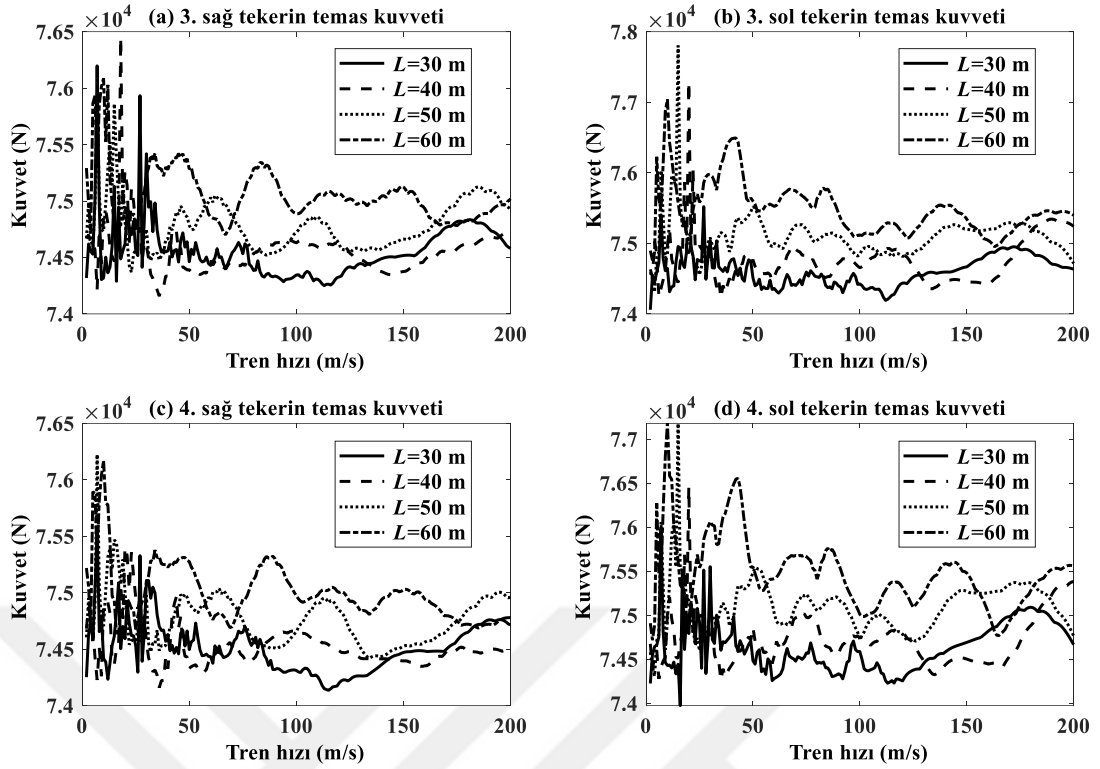
Şekil 5.28'de tren hızının sabit ve 300 km/sa olması durumunda vagon, bojiler ve ray-tekerlek temas kuvvetleri zamana göre verilmiştir. Şekil 5.28a incelendiğinde vagona etki eden maksimum temas kuvveti 0.6 s'de 3.94×10^5 N, minimum temas kuvveti ise 0.89 s'de 3.91×10^5 N olmuştur. Tespit edilen bu değerler Şekil 5.8'de verilen vagonun dikey ivme grafiğine oldukça benzerdir. Buradan kütlenin neden olduğu statik kuvvetlere ek olarak TKE'den kaynaklanan düşey ivmelerin dinamik kuvvetlerinin de toplam temas kuvvetine eklendiği anlaşılmaktadır. Yine aynı durum ön ve arka bojilerin dikey temas kuvveti değerleri için aynıdır. Şekil 5.28b'ye göre ön bojinin maksimum temas kuvveti 2.285×10^5 N olurken, arka bojinin temas kuvveti ise 2.293×10^5 N olduğu görülmektedir. Ayrıca ön boji köprüye daha önce girdiği için maksimum temas kuvvetinin oluşma zamanı arka bojiye göre daha önce olmaktadır. Şekil 5.28c ve d'de ise sağ ve sol tekerlerin temas kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 5.29. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) Ön bojinin temas kuvveti (b) Arka bojinin temas kuvveti (c) Vagonun temas kuvveti.



Şekil 5.30. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) 1. sağ tekerin temas kuvveti (b) 1. sol tekerin temas kuvveti (c) 2. sağ tekerin temas kuvveti (d) 2. sol tekerin temas kuvveti.



Şekil 5.31. Tren hızının ve köprü uzunluğunun temas kuvvetine etkisi (a) 3. sağ tekerin temas kuvveti (b) 3. sol tekerin temas kuvveti (c) 4. sağ tekerin temas kuvveti (d) 4. sol tekerin temas kuvveti.

Şekil 5.29-31'de trenin temas kuvvetleri dört farklı köprü uzunluğuna göre ($L=30, 40, 50$ ve 60 m) ve tren hızı $2-200$ m/s aralığında olmak üzere incelenmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere köprü uzunluğunun artmasıyla temas kuvvetleri artmaktadır. Ancak bazı grafiklerde temas kuvvetleri belirli hızlarda maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Örneğin, Şekil 29a-b'de bojilerin maksimum temas kuvveti trenin düşük hızlarında ($v < 30$ m/s) meydana gelirken, Şekil 29c'de tren gövdesinin maksimum temas kuvveti trenin orta hızlarında ($40 \text{ m/s} < v < 100 \text{ m/s}$) meydana gelir. Şekil 5.29a incelendiğinde ön bojiye etki eden temas kuvvetleri köprü uzunluğu $L=30$ m olması durumunda ortalama 2.271×10^5 N olurken, $L=40$ m olması durumunda ortalama 2.284×10^5 N, $L=40$ m olması durumunda ortalama 2.305×10^5 N ve $L=50$ m olması durumunda ortalama 2.335×10^5 N olmaktadır. Şekil 5.29b'de arka bojiye etki eden temas kuvvetleri de ön bojidekine hemen hemen benzemektedir. Şekil 5.29c'de vagona etki eden temas kuvvetleri tren hızının 50 m/s ile 100 m/s arasındaki hızlarında meydana geldiği görülmektedir ve köprü uzunluğunun artmasıyla temas kuvvetleri fark edilebilir şekilde artmaktadır. Örneğin 70 m/s tren hızında iken vagona etkiyen temas kuvveti köprü uzunluğu $L=30$ m olduğu zaman 3.928×10^5 N olurken, $L=40$ m

olduğu zaman 3.938×10^5 N, $L=50$ m olduğu zaman 3.950×10^5 N ve $L=60$ m olduğu zaman 3.956×10^5 N olmaktadır. Bu grafiklere göre, köprü uzunluğu değiştikçe tren gövdesine maksimum temas kuvvetlerinin meydana geldiği tren hızları değişmektedir. Diğer bir deyişle, bu durumda, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, kiriş-tren sisteminin kritik hız kavramı esastır. Dolayısıyla bu kritik hızlarda düşey ivmeler arttığı gibi düşey temas kuvvetleri de artmaktadır.

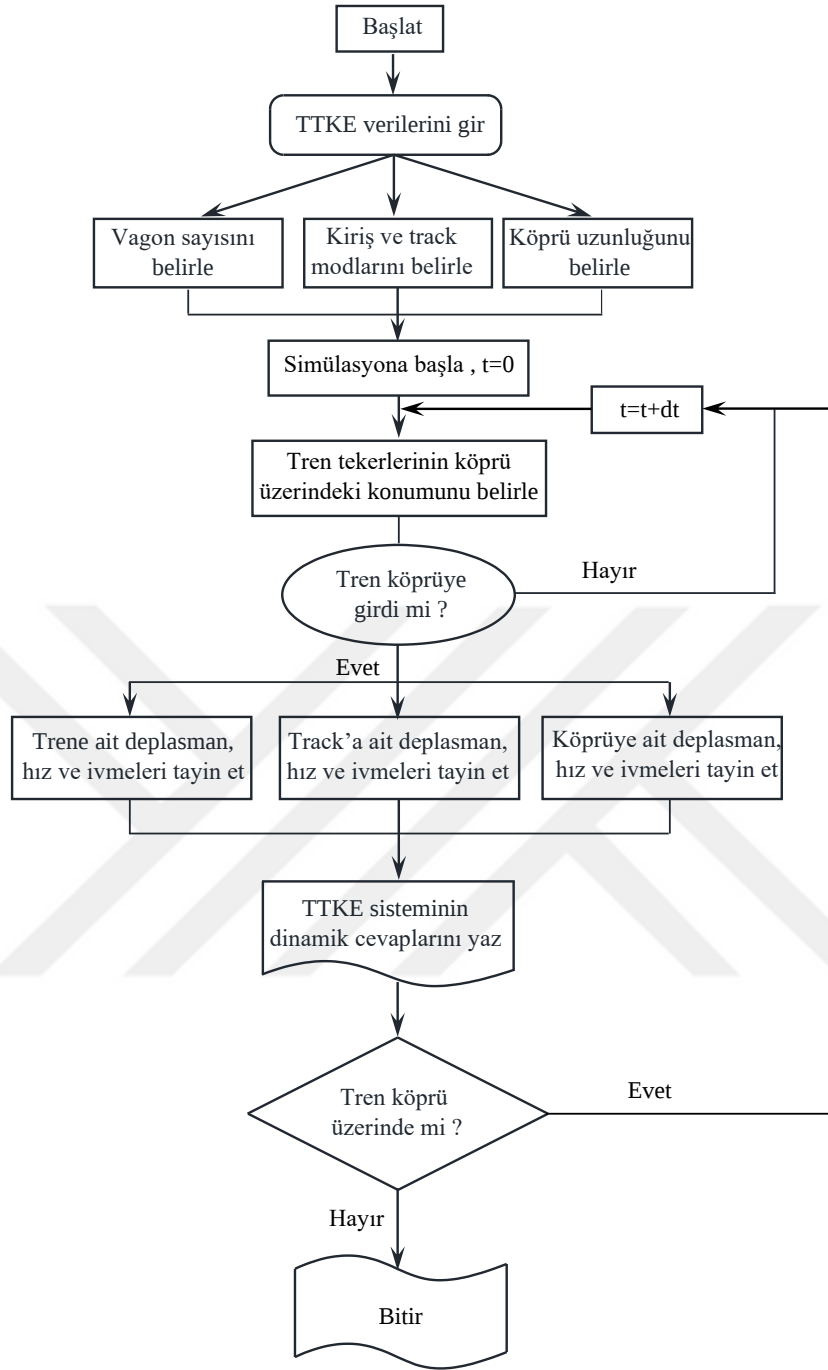
Şekil 5.30-31'de tüm sağ ve sol tekerlek-ray temas kuvvetleri verilmiştir. Her iki grafiklere göre köprü uzunluğu arttıkça temas kuvvetleri artmaktadır. Ayrıca tren hızı 40 m/s veya daha az ise temas kuvvetleri oldukça yüksekken, tren hızı arttıkça temas kuvvetleri nispeten azalmaktadır.

5.2. TTKE Sisteminin Analizi

Bölüm 5.1'de tren-köprü etkileşim analizi gerçekleştirilmiş olup analiz kapsamında sadece bu iki parametrenin etkileşimi incelenmiş ve tren ile köprü arasında bulunan track dikkate alınmamıştır. Daha önceki bölümde bir vagon, iki boji ve tekerlek takımından oluşan tren sistemleri köprü kirişi ile birlikte modellendiğinde bu modele literatürde tren-köprü etkileşimi (TKE) modelleri adı verilmektedir. Ancak uygulamada demiryolu hattı üzerinde traversler, elastik pedler ve balasttan oluşan bir track sistemi mevcuttur. Aslında tren, track ve köprü, tren-track ve track-köprü ile birleştirilmiş temel bir dinamik sistemdir. Diğer bir deyişle raylı sistem, köprü ile tren arasında bir bağlantı oluşturmaktadır [42]. Bu çalışmada TTKE sistemi modelinin dinamik denklemleri literatürde yaygın olarak kullanılan Matlab yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Tren, bojiler ve tekerlekler çok gövdeli dinamiklere dayalı olarak oluşturulurken, köprü ve ray ise literatürde basitleştirilmiş Euler-Bernoulli veya Timoshenko kirişleri olarak modellenirler. Bu çalışmada, tren-track-köprü etkileşim (TTKE) sistemi olarak adlandırılan track sistemi ile birlikte tren ve köprünün dinamik tepkilerini belirlemek için simülasyon yazılımı tasarlanmıştır.

5.2.1. TTKE sisteminin akış şeması

Önerilen tren-track-köprü etkileşim modeli için geniş kullanım olanakları sunan TTKE sistemi olarak bir Matlab yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım sadece 31 serbestlik dereceli tam tren modellerini, ray, travers ve balasttan oluşan bir modeli ve Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenebilen basit mesnetli bir kiriş modelini içerir. Diğer bir deyişle, tüm sistem beş ayrı alt sistemden oluşur: tren, ray, köprü, tren-track



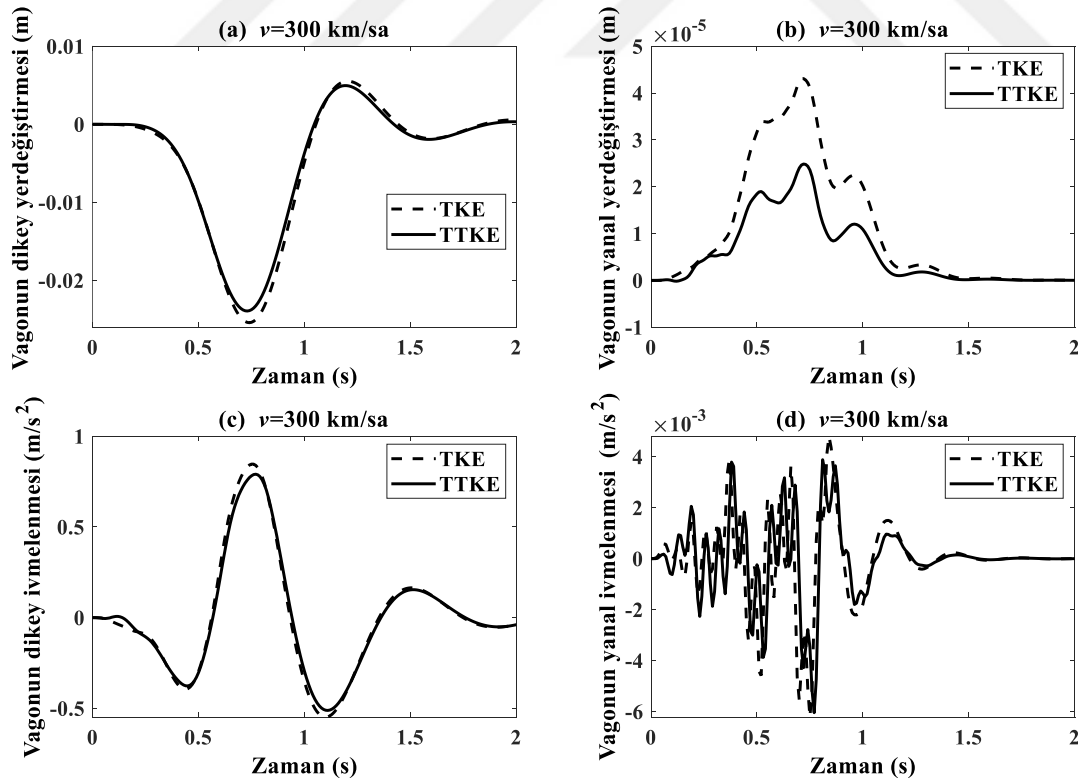
Şekil 5.32. TTKE sisteminin akış şeması.

çifti ve track-köprü çifti. Yazılım programında durum uzayı formu kullanılarak tüm model için hareket denklemleri birinci dereceden diferansiyel denklemlere indirgenir. Her bir serbestlik derecesi için yer değiştirme ve hız tepkileri, küçük bir zaman adımında hesaplanır. Her bir serbestlik derecesinin ivme değerleri, minimum zaman aralıklarında değişken hız tepkileri ile belirlenebilir. Şekil 5.32'de TTKE sistemine ait yazılım programının akış şeması verilmiştir. Geliştirilen bu yazılım simülasyonu sayesinde trenin tüm kısımlarının dikey, yanal ve dönme hareketleri ile track ve

köprünün tüm dikey hareketleri belirlenebilmektedir. Bu yazılımda trenin hızı, trenin parametreleri, trenin geçtiği köprünün uzunluğu, kiriş olarak modellenen ray ve köprü ve rayın titreşim mod sayısı istenilen değerlerde belirlenebilmektedir. Ayrıca bu TTKE yazılımında her biri 31 serbestlik dereceli tam tren modeli olan birden fazla vagon ve Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenebilen birden fazla sayıda köprü incelenebilmektedir.

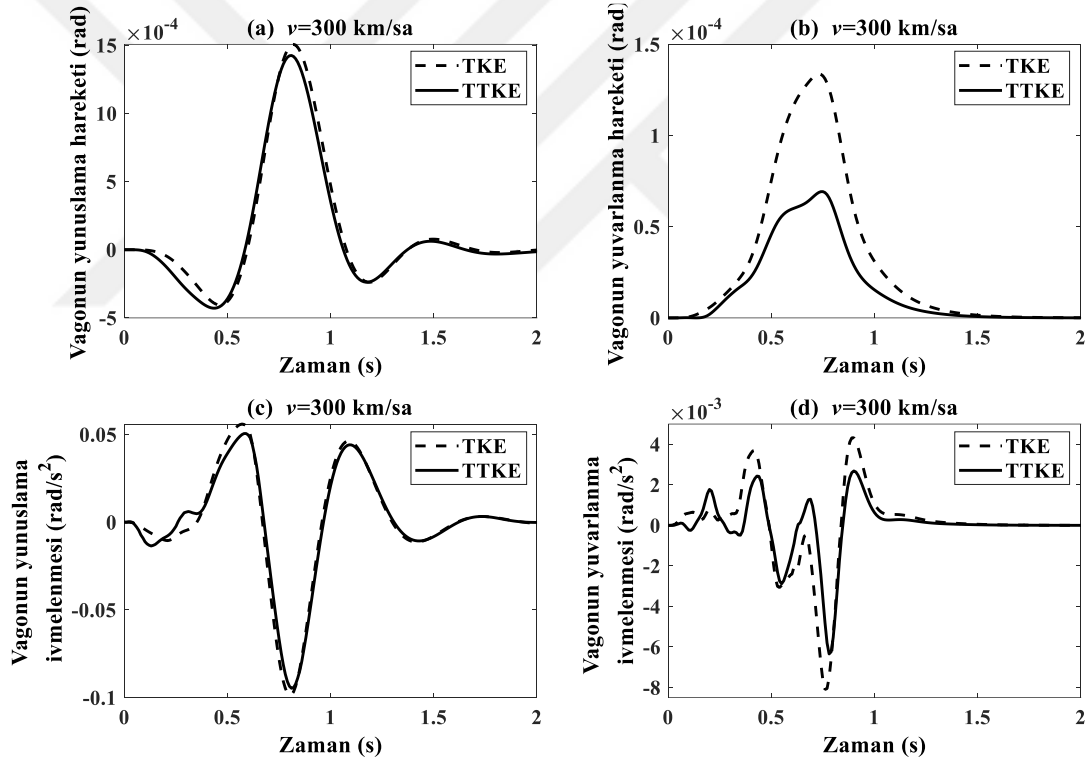
5.2.2. TKE ve TTKE modellerinin karşılaştırılması

Bu kısımda, 3. Bölümde tanıtımı yapılan track-köprü sisteminin üzerinden geçen yüksek hızlı trenin dinamik davranışları incelenecektir. Analizde kullanılan tren ve köprü parametreleri literatürden alınmış olup Tablo 3.1 ve 3.2’de de verilmiştir [27,36]. Bu kısımda yapılan analizlerde hızı sabit olan yalnızca bir vagon esnek zemin üzerinden geçmektedir. TTKE sisteminin benzetim analizine başlanmadan önce kiriş olarak modellenen ray ve köprünün mod sayısına karar verilmiştir. Bu çalışmada, ray ve köprü kirişinin ilk dört titreşim modu ele alınmıştır. Ayrıca analizde tracksız model (TKE) ile tracklı model (TTKE) analizi tren dinamiği açısından kıyaslamalı olarak verilecektir.



Şekil 5.33. Vagonun yerdeğiştirme ve ivmesinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Dikey yerdeğiştirme (b) Yanal yerdeğiştirme (c) Dikey ivmelenme (d) Yanal ivmelenme.

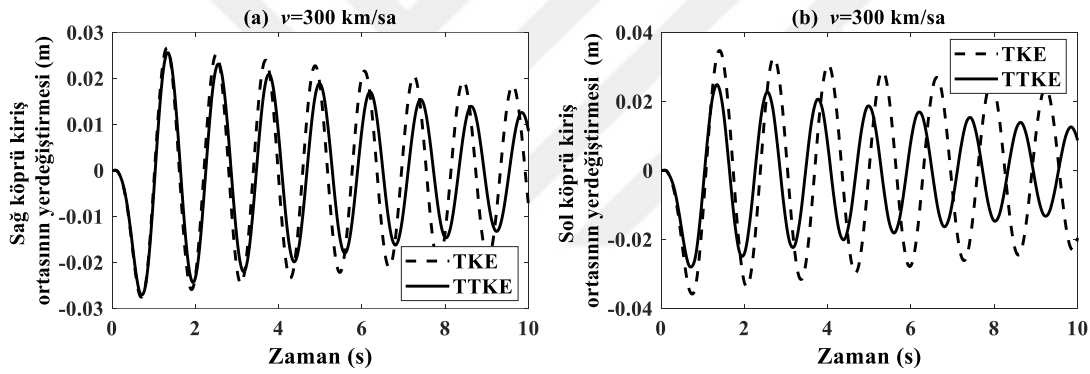
Şekiller 5.33-34'de demiryolu hattının tracklı (TTKE) veya tracksız (TKE) olmasına bağlı olarak vagonun dinamik tepkileri, tren hızı 300 km/sa, köprü uzunluğu 50 m olması halinde incelenmiştir. Şekil 5.33a incelendiğinde vagonun maksimum dikey deplasmanı TKE için 0.025 m olurken, TTKE için 0.024 m olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5.33c'de vagonun dikey ivmesi TKE için 0.84 m/s^2 iken TTKE için 0.79 m/s^2 olduğu görülmektedir. Buradan track yapısının dikey tren dinamik tepkilerini %4 ile %6 oranında iyileştirdiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.33b'deki vagonun maksimum yanal deplasmanı TKE için $4.31 \times 10^{-5} \text{ m}$ olurken, TTKE için $2.48 \times 10^{-5} \text{ m}$ olduğu görülmektedir. Yani track yapısının bulunmasıyla vagonun yanal yerdeğiştirmeleri %42.5 azalmaktadır. Ancak Şekil 5.33d'ye göre vagonun maksimum yanal ivmelenme değerlerinin TTKE modelinde nispeten azalma da olsa birbirine oldukça benzediği görülmektedir.



Şekil 5.34. Vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketlerinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Yunuslama hareketi (b) Yuvarlanma hareketi (c) Yunuslama ivmelenmesi (d) Yuvarlanma ivmelenmesi.

Şekil 5.34'te trenin köprüden geçerken köprü ve rayın yer değiştirmesinden kaynaklanan vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Şekil 5.34 incelendiğinde, vagonun yunuslama hareketi Şekil 5.33'te belirtilen vagonun dikey hareketine oldukça benzerdir. Şekil 5.34a ve c'de vagonun maksimum yunuslama

hareketi TTKE modelinde TKE modeline göre biraz daha düşük olduğu belirlenirken, Şekil 5.34b ve d'de TTKE modeli için maksimum yuvarlanma hareketi TBI modelinden oldukça farklıdır. Örneğin Şekil 5.34a'ya göre vagonun maksimum yunuslama hareketi TKE için 1.51×10^{-3} rad olurken, TTKE için 1.42×10^{-3} rad olmaktadır. Şekil 5.34c'de vagonun yunuslama ivmelenmesi incelenmiş olup maksimum ivmelenme değeri TKE için 0.056 rad/s^2 olurken, TTKE için 0.050 rad/s^2 olmaktadır. Yani her iki model incelendiğinde track yapısı sayesinde vagonun yunuslama hareketinde %6 ile %10 oranında iyileşme olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.34b incelendiğinde vagonun maksimum yuvarlanma hareketi TKE için 1.3×10^{-4} rad olurken, TTKE için 0.7×10^{-4} rad olduğu görülmektedir. Yani track yapısı sayesinde vagonun yuvarlanma hareketi %46 oranında azalmaktadır. Şekil 5.34d'de ise vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenmesi TKE için $8.1 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ olurken, TTKE için yaklaşık %22 azalarak $6.34 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ olduğu görülmektedir.

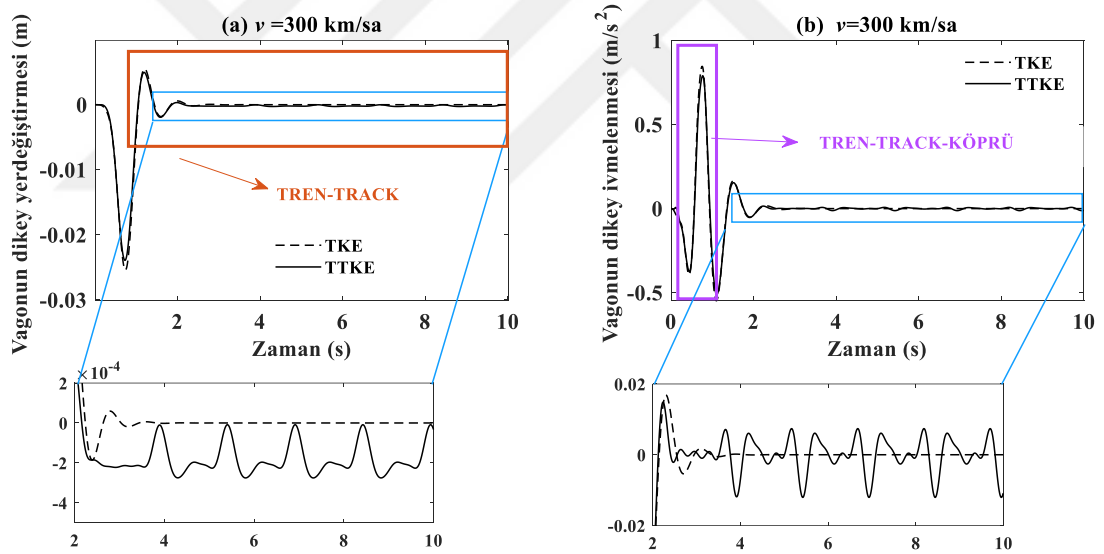


Şekil 5.35. Köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesinin iki farklı modele (TTKE, TKE) göre kıyaslamalı zaman analizleri (a) Sağ köprü kirişi (b) Sol köprü kirişi.

Şekil 5.35'te her iki köprü kirişinin orta noktasının yer değiştirmesi her iki modele göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.35a ve b'de TTKE modelinde köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmelerinin bir miktar daha az olduğu görülmektedir. Fakat Şekil 5.35b incelendiğinde TTKE modelinde köprü ortasının yerdeğiştirmesi TKE modeline kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Örneğin sol köprü kiriş orta noktasının maksimum yerdeğiştirmesi TTKE modeli için 0.0347 m iken, TKE modeli için 0.0248 olmaktadır. Yani sol köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmesinin track olması durumunda %28.5 azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.36'da tren hızının 300 km/sa ve sabit olması durumuna göre vagonun ivmesi ve yer değiştirmesi verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi trenin köprüyü tamamen geçmesi için gereken süre 0.84 s olarak hesaplanmıştır. Bu durumda tren

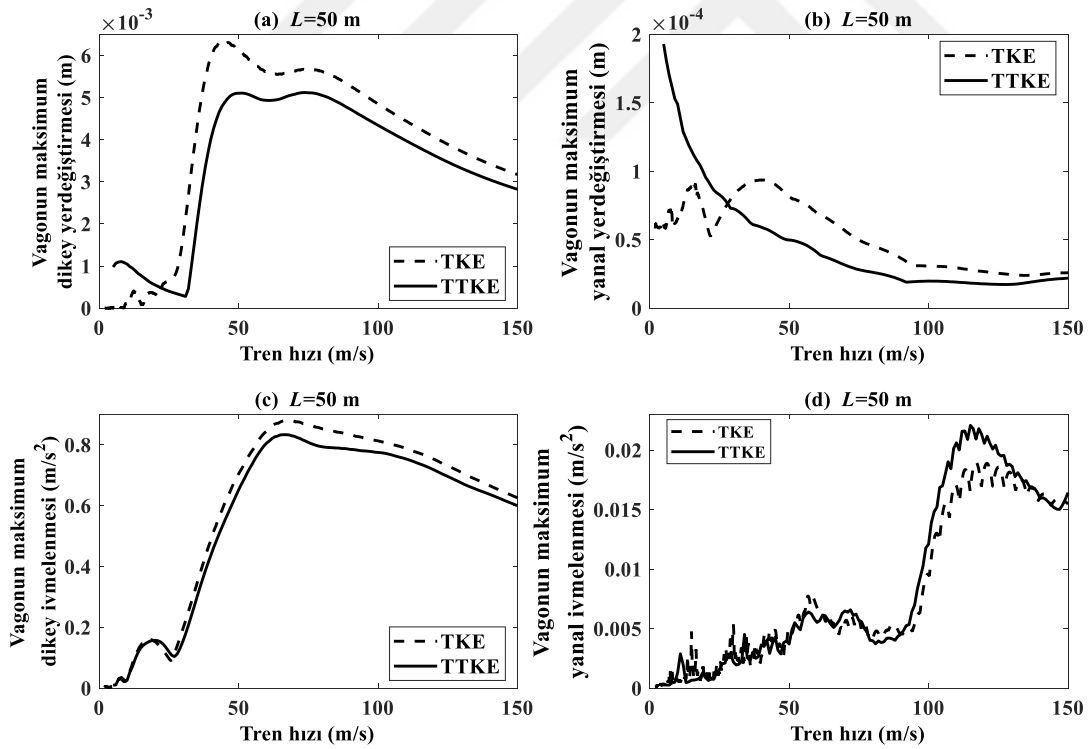
köprüden çıkmadan önce yani analizin ilk 0.84 s'sinde incelenen model TTKE olurken, bu süreden sonra tren köprüden çıktığı için sadece tren-track etkileşimi incelenmiş olur. Bundan dolayı incelenen modelde track bulunmazsa bu süreden sonra sadece tren-zemin arası etkileşim incelenmiş olur. Fakat bu çalışma da zemin dinamiği dikkate alınmadığı için tren dinamiğini olumsuz etkileyecek bir girdi bulunmamaktadır. Bundan dolayı, Şekil 5.36'da TKE modeli incelendiğinde, tren köprüden çıktıktan sonra vagonun dikey dinamik tepkileri hemen sönümlenirken, TTKE analizinde track sistemi tıpkı köprü gibi esnek bir yapıdan oluştuğu için minimal salınımların devam ettiği görülmektedir. Örneğin Şekil 5.36a'da trenin köprüden çıkması durumu dikkate alındığında vagonun dikey yerdeğiştirmeleri TKE analizi için sıfırlanırken, TTKE analizinde 2×10^{-4} m değerlerinde olduğu görülmüştür. Şekil 5.36b'de ise tren köprüden çıktıktan sonraki durum için TTKE analizi kapsamında vagonun maksimum dikey ivmelenme değerleri de 0.01 m/s^2 olduğu görülmektedir.



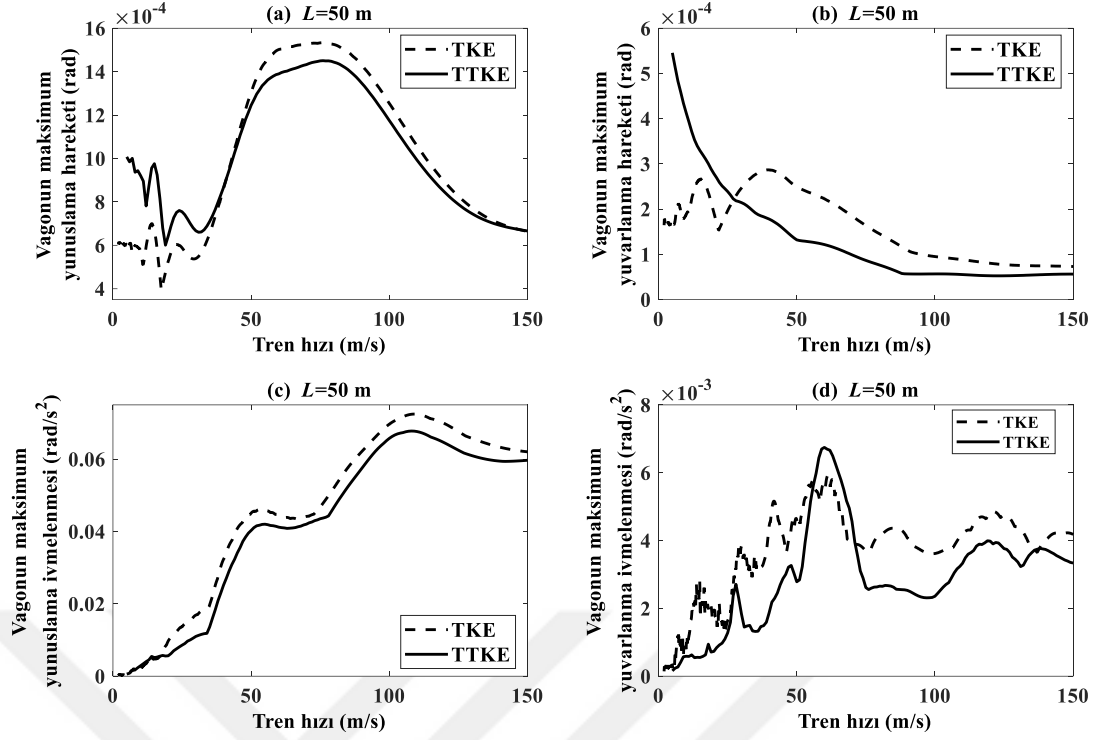
Şekil 5.36. Track yapısının vagon dinamiğine etkisi (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi.

Şekil 5.37-39'da tren hızı 2 m/s'den 150 m/s'ye 1 m/s aralığında değiştiğinde vagonun yerdeğiştirmesi ve ivmelenmesi, dönme hareketleri ve köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi verilmiştir. Şekil 5.37a incelendiğinde, vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi TKE için 6.3×10^{-3} m, TTKE için 5.12×10^{-3} m olmaktadır ve bu değerler her iki model için tren hızının yaklaşık 45 m/s olduğunda meydana gelmiştir. Şekil 5.37b'de vagonun yanal yerdeğiştirmesi trenin düşük hızlarında ($v < 30 \text{ m/s}$) TTKE modelinde daha fazla çıkarken, diğer tren hızlarında ise TTKE modelinde

vagonun yanal yerdeşistirmeleri TKE modeline göre daha az olduğu grlmektedir. Ayrıca tren hızı $v=28$ m/s olduğu zaman vagonun yanal yerdeşistirmeleri her iki modelde de 7.6×10^{-5} m olmaktadır. şekil 5.37c'deki vagonun dikey ivmelenmesine göre, her iki modelin sonuçları tren hızına göre iki yerde maksimumdur. Birincisi TKE için 18 m/s ve TTKE için 20 m/s'dir. Diğer maksimum değerler TKE için 69 m/s ve TTKE için 66 m/s'dir. Tablo 5.1'den bu iki hızın tren-köprü sistemlerinin ilk iki kritik hızına oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca vagonun maksimum dikey ivmelenmesi TKE modeli için 0.87 m/s^2 olurken, TTKE modeli için 0.083 m/s^2 olmaktadır. Bu durumda track alt sisteminin bulunması halinde maksimum dikey ivmelenme değeri yaklaşık %4.6 azalmaktadır. Bu ivmelenme değerleri de insanı olumsuz etkileyen konfor değerlerinden fazla olduğu önceki bölümlerde de anlatılmıştı. şekil 5.37d'ye göre, vagonun yanal ivmelenmesi tren hızının 90 m/s'den düşük olması halinde her iki model için hemen hemen aynı değerlerde olurken, bu hızdan yüksek hızlar için TTKE modelinde yanal ivmelenme değerlerinin daha yüksek olduğu grlmektedir.

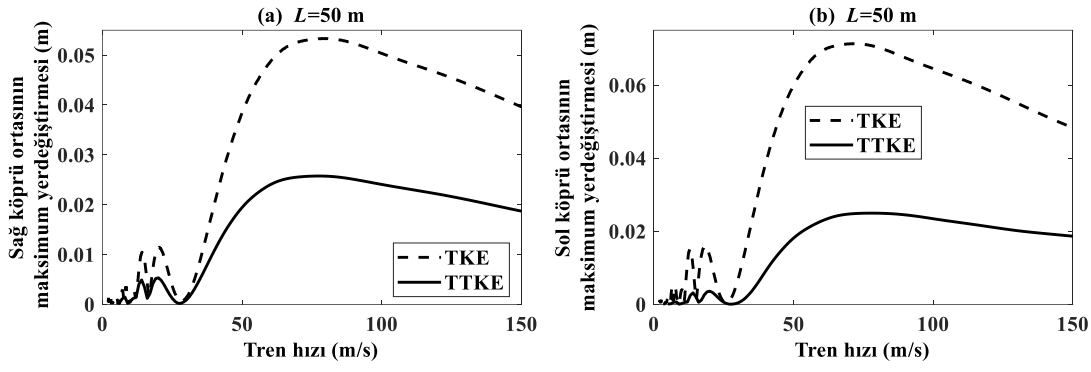


şekil 5.37. Vagon dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Vagonun maksimum dikey yerdeşistirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeşistirmesi (c) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.

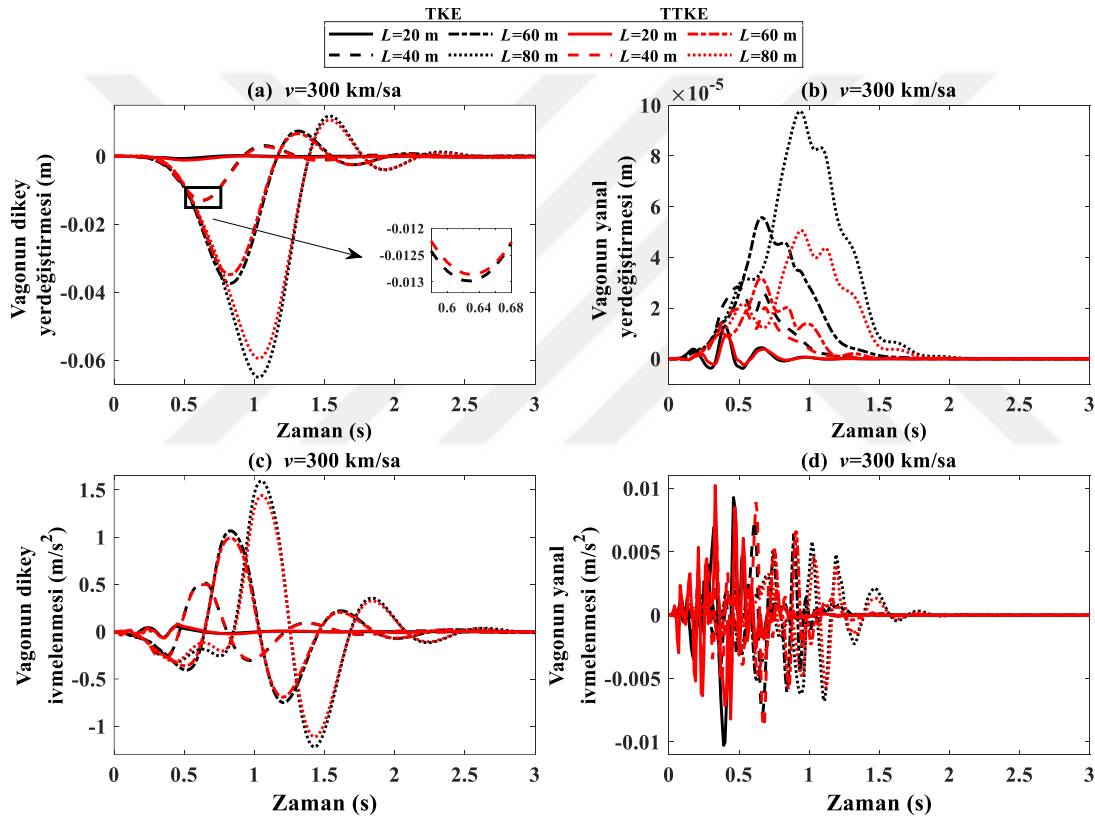


Şekil 5.38. Vagon dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi (c) Vagonun maksimum yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenmesi.

Şekil 5.38'de vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Şekil 5.38a incelendiğinde, tren hızı yaklaşık 50 m/s'den az olduğunda TTKE modelinin yunuslama hareketinin daha yüksek olduğu, tren hızı yaklaşık 50 m/s'den fazla olduğunda TKE modelinin yunuslama hareketinin daha fazla olduğu görülmüştür. Vagonun maksimum yunuslama hareketinin TKE için 1.53×10^{-3} rad olurken TTKE için 1.45×10^{-3} rad olmaktadır. Yani track sistemi olması durumunda vagonun yunuslama hareketi %5.2 azalmıştır. Benzer bir durum Şekil 5.38b'de de görülmektedir. Trenin düşük hızlarında vagonun yuvarlanma hareketi TTKE modelinde daha yüksek olurken, yüksek hızlarda TKE modelinde daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5.38c'de vagonun yunuslama ivmelenmesi incelendiğinde neredeyse trenin tüm hızlarında TKE modelindeki değerler TTKE modeline göre yaklaşık %7 daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5.38d'de yuvarlanma ivmelenmeleri de tıpkı yunuslama ivmelenmesi gibi sonuçlar vermiştir. Genel olarak TKE modelindeki maksimum değerler TTKE modeline göre daha fazla çıkmıştır. Fakat sadece tren hızının ortalama 60 m/s olması durumunda TTKE modelinde vagonun yuvarlanma ivmelenmesi TKE'ye göre daha fazla çıkmıştır.



Şekil 5.39. Köprü dinamik cevaplarına tren hızı etkisinin iki farklı model için incelenmesi (a) Sağ köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmesi (b) Sol köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmesi.

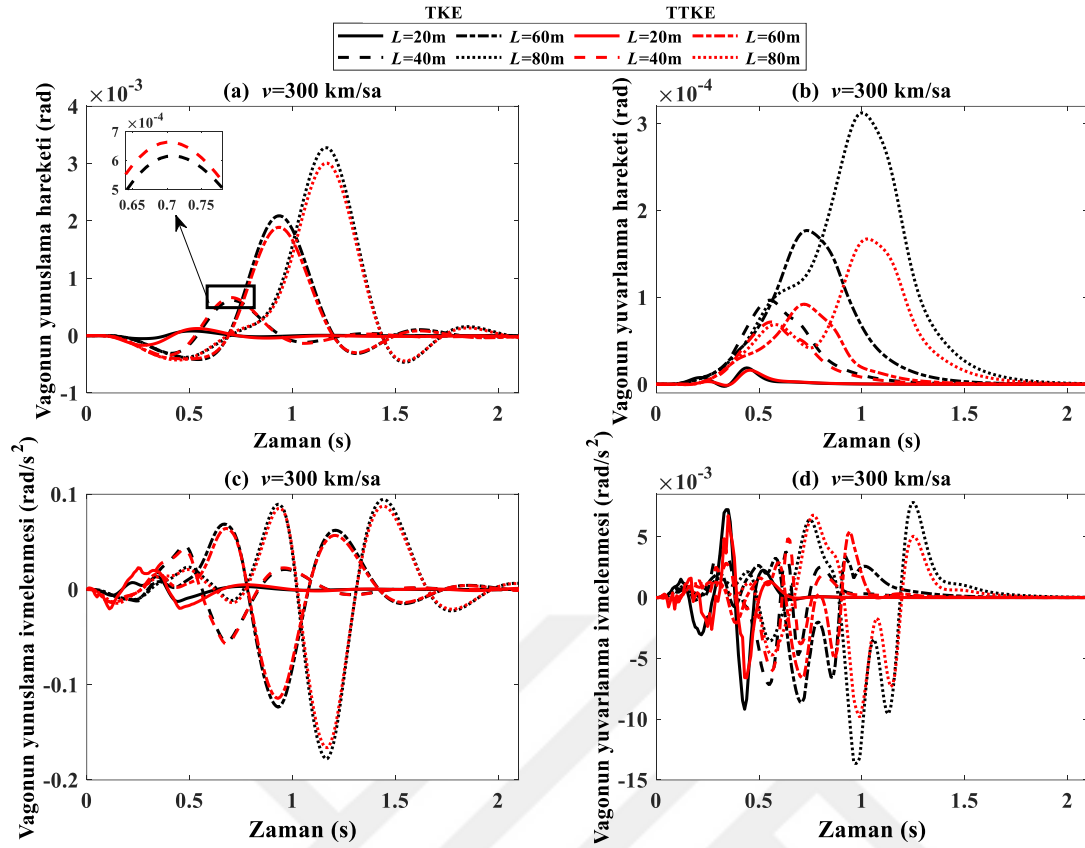


Şekil 5.40. Köprü uzunluğu dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 5.39'da köprü kirişlerinin orta noktasının yerdeğiştirme grafikleri verilmiştir. Şekil 5.39'a'da her iki model için köprü'nün maksimum yer değiştirmesinin yaklaşık 20 m/s ve 75 m/s tren hızlarında olduğu görölmektedir. Bu iki hız değeri, tren-köprü sisteminin ilk iki kritik hızına oldukça yakındır. Ayrıca grafik incelendiğinde sağ köprü kiriş ortasının maksimum yer değiştirmesi TTKE modelinde 0.0257 m iken

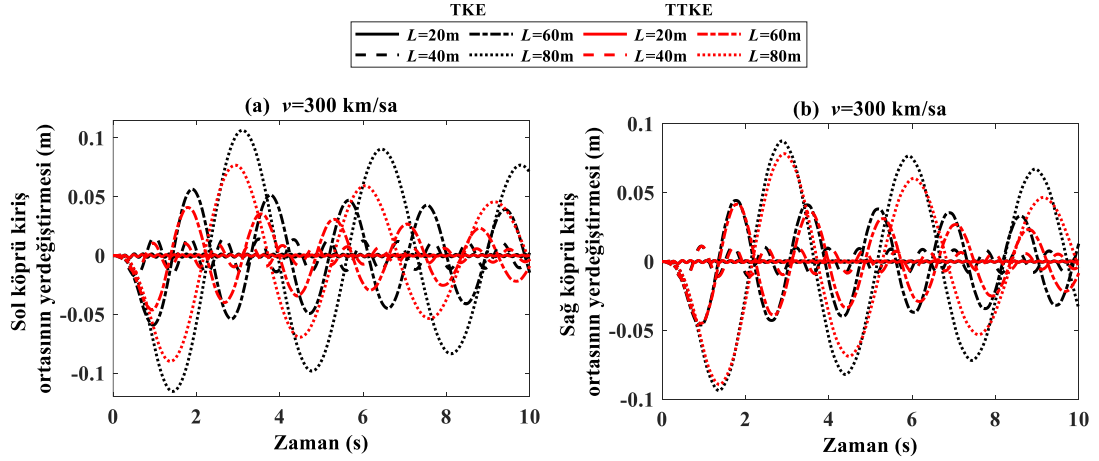
TKE modelinde 0.0533 m olarak bulunmuştur. Sol köprü kiriş ortasının maksimum yerdeğiştirmesi ise TTKE modelinde 0.0249 m iken TKE modelinde 0.0713 m olduğu görölmektedir. Track yapısının köprünün dinamik davranışlarını oldukça etkilediği buradan anlaşılmaktadır.

Şekil 5.40-42'da $L=20$ m, $L=40$ m, $L=60$ m ve $L=80$ m olmak üzere dört farklı köprü uzunluğunun vagonun yerdeğiştirmesi ve ivmelenmeleri, dönme hareketleri ve köprü ortasının yerdeğiştirmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Vagonun dikey ve yanal yer değiştirmelerinin maksimum olduğu zamanlar her iki grafikte de hemen hemen aynı iken, köprü uzunlukları arttıkça bu yer değiştirme değerlerinin maksimum olduğu zamanlar değişmektedir. Şekil 5.40a'da, dört farklı köprü uzunlukları durumunda her iki model karşılaştırılarak vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri incelendiğinde vagonun maksimum dikey yer değiştirmesi sırasıyla 0.5 s, 0.63 s, 0.82 s ve 1.03 s zamanlarında sırasıyla TKE için 0.00065 m, 0.013 m, 0.0373 m ve 0.065 m olurken, TTKE için 0.0011 m, 0.0128 m, 0.0347 m ve 0.059 m olduğu görölmektedir. Benzer şekilde vagonun farklı köprü uzunluklarına göre yanal yerdeğiştirmesi Şekil 5.40b'de verilmiştir. Bu grafikte de köprü uzunluğu vagonun yanal yerdeğiştirmesini oldukça etkilemektedir. burada fark edilebilecek bir diğer ayrıntı ise track yapısının yanal yerdeğiştirmeleri oldukça azaltmasıdır. Örneğin köprü uzunluğunun $L=80$ m olması durumunda vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi TKE için 9.75×10^{-5} m olurken, TTKE için 5.06×10^{-5} m olmaktadır. Yani track yapısı sayesinde vagonun yanal yerdeğiştirmeleri neredeyse yarı yarıya azalmıştır. Vagonun dikey ve yanal ivmelenmesi Şekil 5.40c-d'de verilmiştir. Şekil 5.40c incelendiğinde tıpkı dikey yerdeğiştirmeler gibi köprü uzunluğu arttıkça dikey yerdeğiştirmelerin miktarı ve oluşma zamanları artmaktadır. Buna göre vagonun maksimum dikey ivmelenmeleri köprü uzunluğunun $L=20-40-60-80$ m olması durumuna göre sırasıyla 0.043 s, 0.64 s, 0.83 s ve 1.05 s'de meydana gelirken ve bu değerler TKE için 0.055 m/s^2 , 0.515 m/s^2 , 1.068 m/s^2 ve 1.59 m/s^2 , TTKE için 0.083 m/s^2 , 0.5 m/s^2 , 0.0992 m/s^2 ve 1.44 m/s^2 olduğu görölmektedir. Şekil 5.40d'de vagonun yanal ivmelenme değerleri incelendiğinde köprü uzunluğu ve track yapısı diğer grafiklerde olduğu gibi çok ayırt edici farklar oluşturmamaktadır. Buradan anlaşılmaktadır ki köprü uzunluğu dinamik davranışları oldukça etkilemektedir. Çünkü köprü uzunluğu parametresi direkt olarak kirişin titreşim frekansları ile bağlantılıdır ve köprü ortasının sehimi de köprü uzunluğu ile ilişkilidir.



Şekil 5.41. Köprü uzunluğu dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi.

Şekil 5.41'de, bu çalışmada incelenen her iki model kullanılarak vagonun dönme hareketleri ve ivmelenme grafikleri karşılaştırılmıştır. İncelenen sonuçlara göre köprü uzunluğu arttıkça vagonun yunuslama hareketleri ve yuvarlanma davranışları artmaktadır. Ayrıca köprü uzunluğu $L=60$ m ve $L=80$ m olması durumunda vagonun yunuslama ve yuvarlanma davranışları TKE modelinde daha fazla çıkarken, köprü uzunluğu $L=20$ ve $L=40$ m olması halinde bu değerler TTKE modelinde daha fazla çıktığı görülmektedir. Örneğin $L=80$ m olduğu zaman vagonun maksimum yunuslama hareketi TKE için 3.27×10^{-3} rad olurken, TTKE için 3×10^{-3} rad olmaktadır. $L=40$ m olduğunda için TKE için 0.62×10^{-3} rad olurken, TTKE için 0.63×10^{-3} rad olduğu görülmektedir. Vagonun yuvarlanma hareketi incelendiğinde bir önceki grafiğe benzer bir durum ile karşılaşılmaktadır. Şekil 5.41 c-d'de yunuslama ve yuvarlanma ivmelenme grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de köprü uzunluğu ve track yapısı dinamik davranışları etkilemektedir.

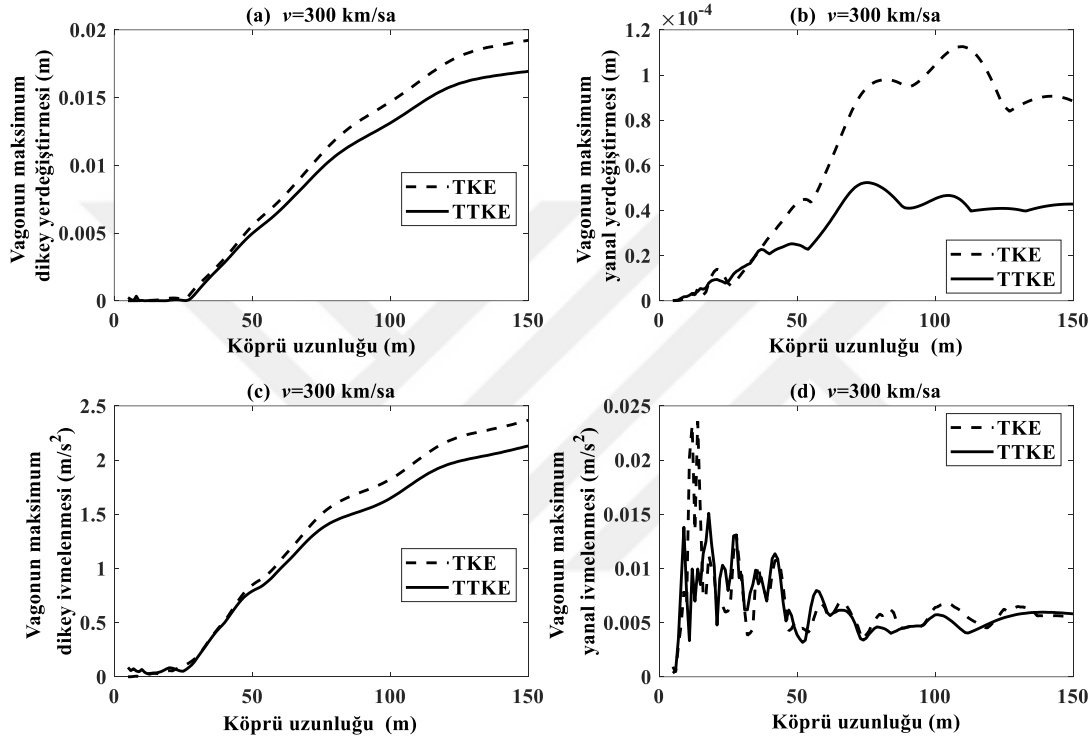


Şekil 5.42. Köprü uzunluğu dikkate alınarak köprünün dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli sonuçlarının karşılaştırılması (a) Sol köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi (b) Sağ köprü kiriş ortasının yerdeğiştirmesi.

Ayrıca Şekil 5.42'de TKE ve TTKE modelleri için Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenen köprü kiriş ortasının yer değiştirmesi grafikleri verilmiştir. Önceki grafiklerde olduğu gibi köprü uzunluğu ve track yapısı köprü ortasının dinamik davranışlarını önemli derecede etkilemektedir. Ayrıca köprü kirişinin dinamik davranışları bu sistemin bozucu girdisi olduğundan dolayı köprü kirişinin salınımları ne kadar fazla olursa tren dinamiğinde o kadar etkilenecektir. Sonuç olarak, TTKE modelinde uzun açıklıklı köprülerde trene etki eden dinamik tepkilerin TKE modelinden farklı olduğu bu grafiklerden anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle, kısa açıklıklı köprülerden geçen trenlerin üzerindeki etkiler hem TKE hem de TTKE modellerinde hemen hemen aynıdır. Bu sonuçlara göre, kısa açıklıklı köprülerin olduğu yerlerde track yapısının kullanımı ihmal edilebilir.

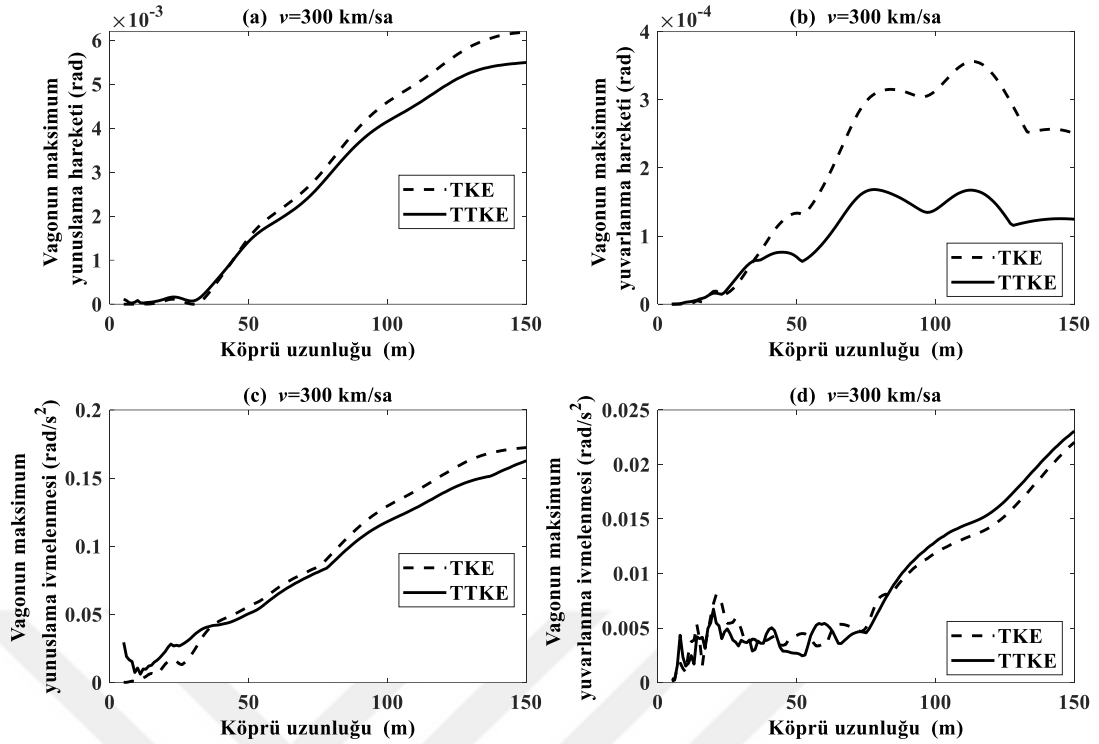
Şekil 5.43-44'te 1 m aralıklarla 5 m ile 150 m arasında değişen köprünün uzunluğuna göre vagonun dinamik tepkileri incelenmiştir. Şekil 5.43a-c'de vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi ve ivmelenmesi köprü uzunluğunun yaklaşık 26 m ve daha uzun olması durumunda arttığı görülürken, Şekil 5.43b'de yanal yer değiştirme değerleri köprü uzunluğu 75 m olana kadar sürekli artmakta ve bu değerden sonra hemen hemen aynı kalmaktadır. Şekil 5.43a'da köprü uzunluğu arttıkça TKE ve TTKE modeli arasındaki fark gittikçe artmaktadır. Örneğin vagonun dikey yerdeğiştirmesi köprü uzunluğu $L=80$ olması halinde TKE için 0.0118 m, TTKE için 0.0108 m olurken, $L=140$ olması halinde ise TKE için 0.0189 m, TTKE için 0.166 m olduğu görülmektedir. Yani köprü uzunluğu $L=80$ iken vagonun dikey yerdeğiştirmesi %8.47 azalırken köprü uzunluğu $L=140$ m olduğunda vagonun dikey yerdeğiştirmesi %12.17

azalmıştır. Şekil 5.43b’de köprü uzunluğu $L=80$ m olduğu zaman vagonun yanal yerdeğiştirmeleri TKE için 9.75×10^{-5} m iken, TTKE için 5.06×10^{-5} m olmaktadır. Yani vagonun yanal yerdeğiştirmeleri tracklı yapı olması halinde neredeyse yarı yarıya düştüğü görülmektedir. Şekil 5.43c’de vagonun dikey ivmelenme değerleri şekil 5.43a’dakine benzer özellik göstermiştir. Şekil 5.43d’de kısa açıklıklı köprülerde tren gövdesinin yanal ivme değerleri daha yüksek olup, köprü uzunluğu arttıkça yanal ivme değerleri kademeli olarak azalmaktadır.



Şekil 5.43. Değişen köprü uzunluğuna karşı vagon dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli için karşılaştırılması (a) Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun maksimum dikey ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yanal ivmelenmesi.

Şekil 5.44’te, vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri Şekil 5.43’teki grafiklere oldukça benzemektedir. Ancak köprü uzunluğu 75 m ve daha uzun olduğunda yalnızca vagonun yuvarlanma ivmelenmesi artmaktadır. Ayrıca Şekil 5.44c’de köprü uzunluğu $L=37$ m olması halinde vagonun yunuslama ivmelenmesi her iki model için 0.042 rad/s^2 olurken, köprü’nün daha kısa olması halinde TTKE modelinde bu ivmelenme değerlerinin TKE’den daha fazla olduğu görülmektedir.



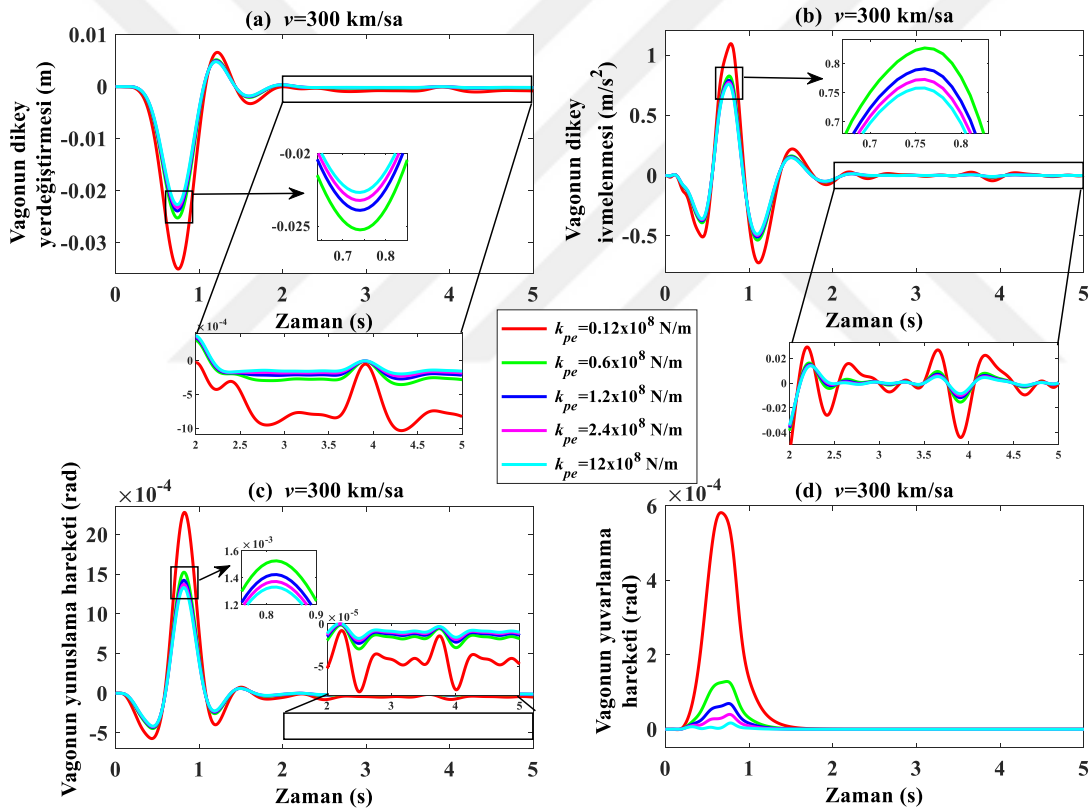
Şekil 5.44. Değişen köprü uzunluğuna karşı vagon dinamik tepkilerinin TKE ve TTKE modeli için karşılaştırılması (a) Vagonun maksimum yunuslama hareketi (b) Vagonun maksimum yuvarlanma hareketi (c) Vagonun maksimum yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenmesi.

5.2.3. Track parametrelerinin TTKE modelinin dinamik cevaplarına etkisi

TTKE ve TKE modellerinin karşılaştırmalı grafikleri bu çalışmanın önceki bölümlerinde verilmiştir. Grafiklerden elde edilen sonuçlar, track yapısının genel olarak vagon üzerindeki yerdeğiştirme ve ivmelenme değerlerini azalttığını göstermektedir. Bu bölümde TTKE modelindeki track parametrelerinin vagonun dinamik tepkilerine etkisi incelenecektir.

Şekil 5.45'te, ray ile travers arasındaki elastik pedin farklı rijitlik katsayıları için vagonun dikey ve dönme hareketleri zaman alanında incelenmiştir. Burada elastik pedin rijitlik katsayısı Tablo 3.2'de verilen $k_{pe}=1.2 \times 10^8$ N/m değerinin sırasıyla 0.1, 0.5, 1, 2 ve 10 katı olarak alınır ve toplamda 5 farklı k_{pe} değeri tanımlandı ve analiz edildi. Şekil 5.45a incelendiğinde k_{pe} değeri arttıkça vagonun dikey yerdeğiştirmelerinin azaldığı görülmektedir. Vagonun maksimum dikey yerdeğiştirme değeri $0.1k_{pe}$ olması halinde 0.035 m iken, diğer rijitlik katsayılarına sahip elastik pedlerde yaklaşık 0.024 m olmaktadır. Benzer bir durum Şekil 5.45b ve c'de de görülmektedir. Şekil 5.45b incelendiğinde vagonun beş farklı elastik ped rijitliği için dikey ivmelenme değerleri verilmiştir. Elastik pedin rijitlik katsayısı $0.1k_{pe}$

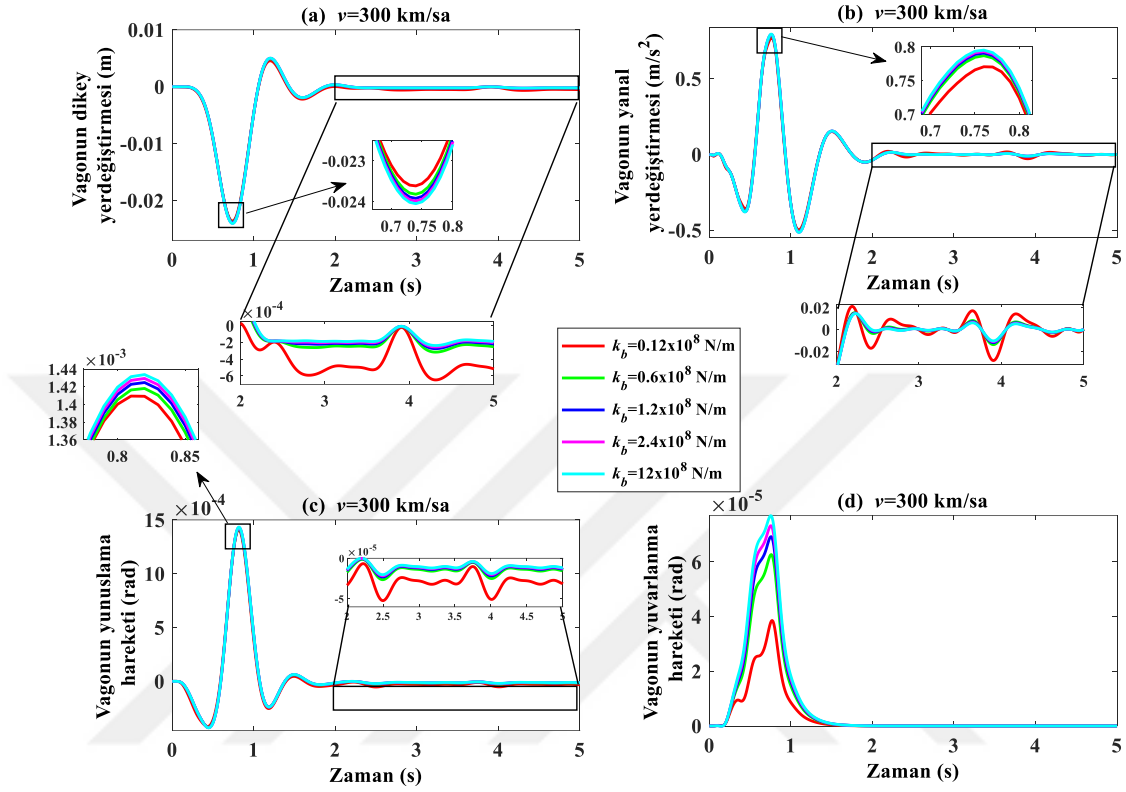
olduğunda maksimum vagon dikey ivmesi 1.1 m/s^2 iken, diğer rijitlik katsayılarında yaklaşık 0.8 m/s^2 olmaktadır. Şekil 5.45c’de vagonun beş farklı elastik ped rijitliği için yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde yunuslama ve yuvarlanma hareketinin maksimum değerinin yumuşak elastik ped olması durumunda diğerlerine göre daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Şekil 5.45d’de yumuşak rijitlik katsayısı olması durumunda vagonun yuvarlanma hareketinin diğer k_{pe} değerlerinden 5-6 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tren track üzerinden geçtiği zaman yumuşak track yapısı daha fazla sapma değerlerine neden olmaktadır. Örneğin, analiz süresinde 2 s sonrası için tren sadece track üzerinde hareket ettiğinden, yumuşak bir elastik ped olması durumunda dikey yerdeğiştirmelerin tam olarak sönümlenemeyeceği de görülmektedir.



Şekil 5.45. Elastik pedin farklı rijitlik katsayıları dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi (c) Vagonun yunuslama hareketi (d) Vagonun yuvarlanma hareketi.

Şekil 5.46’da track yapısının bir parçası olan balastın rijitlik katsayısının farklı değerlerde alınması durumunda vagonun dinamik tepkisi incelenmektedir. Tablo 3.2’de balastın rijitlik katsayısı $k_b=2.4 \times 10^8 \text{ N/m}$ değerinin sırasıyla 0.1, 0.5, 1, 2 ve 10 katı olup, toplam 5 farklı k_b değeri tanımlanmış ve analiz edilmiştir. Şekil 5.23a-b-c

incelendiğinde, balastın herhangi bir değerinde trenin maksimum dikey ivmelenme ve yerdeğiştirme değerinin hemen hemen aynı değerde olduğu görülmektedir. Şekil 5.46d dikkatli incelendiğinde, Şekil 5.45d 'den farklı olarak yumuşak balast değerinde vagonun yuvarlanma hareketinin daha az olduğu gösterilmiştir.

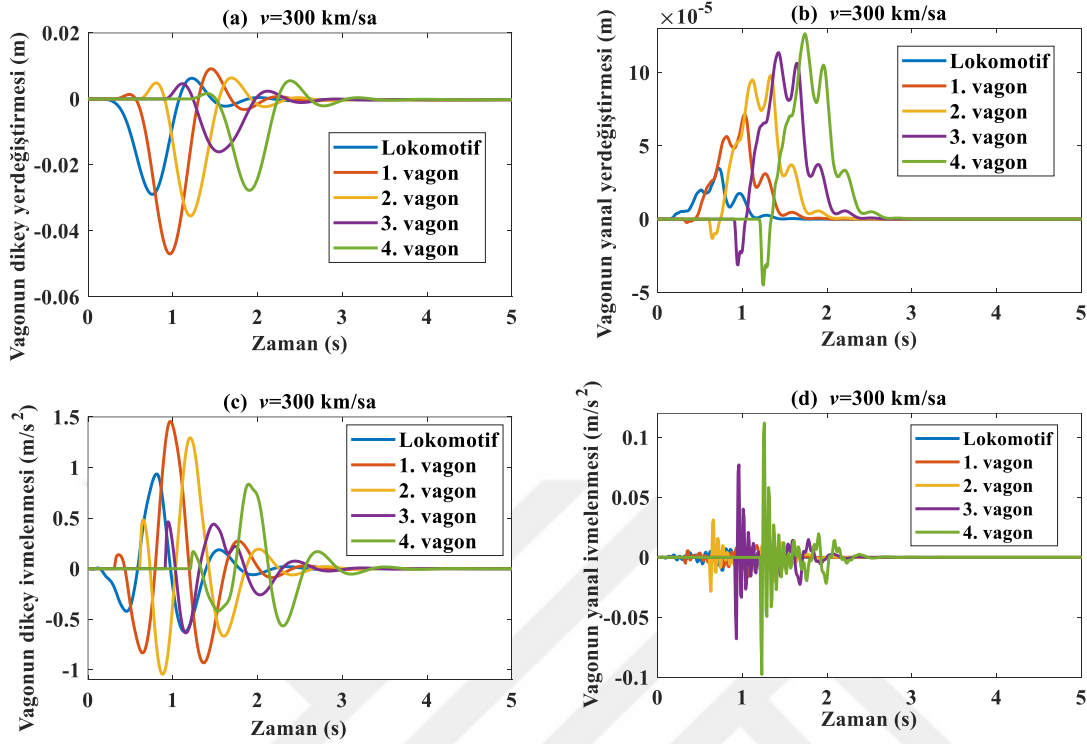


Şekil 5.46. Balastın farklı rijitlik katsayıları dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun dikey ivmelenmesi (c) Vagonun yunuslama hareketi (d) Vagonun yuvarlanma hareketi.

5.2.4. Çoklu vagon geçişlerinin TTKE modeline etkisinin incelenmesi

Bundan önceki bölümlerde track-köprü sistemi üzerinden geçen tren sadece tek bir vagonun oluştuğu kabul edilmiş ve ona göre analizleri gerçekleştirilmiştir. Fakat gerçekte birde fazla sayıda vagon bulunmaktadır. Bu durumdan dolayı bu bölümde ele alınan TTKE modelinde lokomotifle beraber birden fazla vagon olması durumunda köprü girişinin dinamik tepkileri ve bu dinamik tepkilerin her bir vagona etkisi incelenmiştir. Çoklu vagon geçişleri ise Şekil 3.2'de örneklenmiştir. TTKE analizi kapsamında her biri aynı olan birden fazla vagonun etkisi farklı grafiklerle verilmiştir. Tüm sistemin serbestlik derecesi, track-köprü alt sisteminden geçen vagon sayısına göre değişmekte ve her vagon sisteme fazladan 31 tane serbestlik derecesi eklemektedir. Her bir tren modelinin 31 serbestlik derecesinden oluştuğu 3. Bölümde

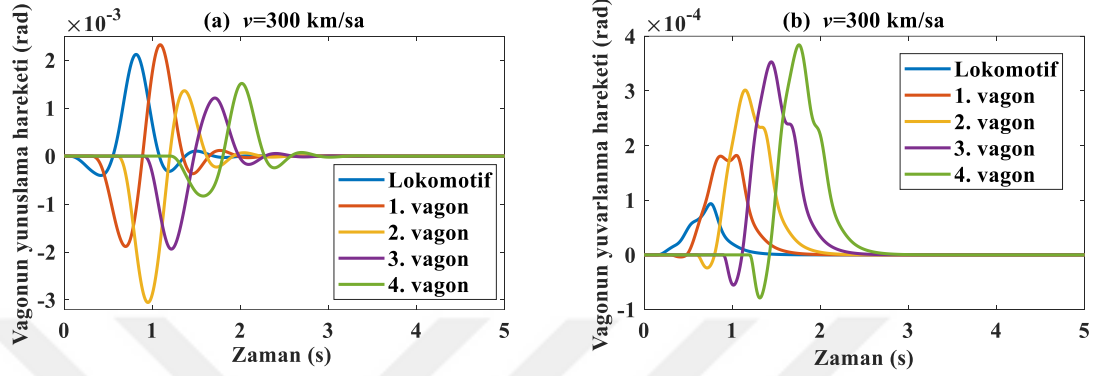
anlatılmıştı. Ayrıca her bir vagonun parametreleri Tablo 3.1'deki gibi alınmış olup, birbirini takip eden vagonların tekerlekleri arasındaki mesafe ise 5.16 m'dir.



Şekil 5.47. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.

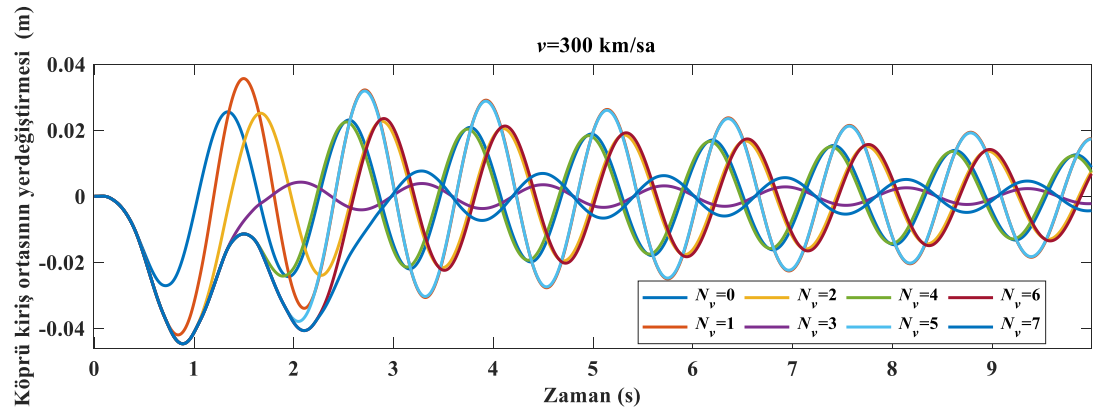
Şekil 5.47 incelendiğinde lokomotif ile birlikte dört vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirme ve ivmelenme değerleri verilmiştir. Şekil 5.47a incelendiğinde lokomotifin maksimum dikey yerdeğiştirmesi 0.75 s'de 0.029 m olarak bulunmuştur. Ayrıca ilk dört vagonun maksimum yerdeğiştirmeleri sırasıyla 0.97 s, 1.21 s, 1.55 s ve 1.9 s'de ve 0.047 m, 0.035 m, 0.016 m ve 0.028 m'de olduğu görülmektedir. Ardışık vagonların orta noktaları arasındaki yanal mesafe $(l_{b1}+l_{b2}+2l_w+5.16)=25.16$ m olup, vagonların maksimum dikey yerdeğiştirme sürelerindeki fark bu mesafeden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.47a'da dikkat çeken bir diğer durum ise üçüncü vagonun dikey yerdeğiştirme değerinin diğerlerine göre daha düşük olmasıdır. Şekil 5.47b'de vagonun yanal yerdeğiştirme grafiklerine bakıldığında artarda gelen vagonların sürekli yanal yerdeğiştirme değerleri artmaktadır. Örneğin vagonların sırasıyla maksimum yanal yerdeğiştirmeleri 3.44×10^{-5} m, 7.12×10^{-5} m, 9.8×10^{-5} m, 11.45×10^{-5} m ve 12.65×10^{-5} m olmaktadır. Şekil 5.47c'de vagonun dikey ivmelenme grafiği yerdeğiştirme grafiğine benzer bir durum görülmektedir. Yani lokomotiften sonra

gelen ilk vagonun dikey ivmelenme grafiği diğerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Burada lokomotifin maksimum dikey ivmelenme değeri 0.94 m/s^2 olurken, diğer vagonlar sırasıyla 1.46 m/s^2 , 1.29 m/s^2 , 0.44 m/s^2 ve 0.83 m/s^2 olduğu görülmektedir. Şekil 5.47d’de vagon sayısının arttıkça vagonun yanal ivmelenmesi artmaktadır.



Şekil 5.48. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi.

Şekil 5.48'de, lokomotif ile dört özdeş vagonun bulunması durumunda tüm vagonların tren-track yapısı üzerinden geçmesi halinde yunuslama ve yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Şekil 5.48a'da görülmektedir ki lokomotiften sonraki ilk iki vagonun maksimum yunuslama hareketi diğerlerinden daha fazla olmaktadır. Şekil 5.48b'de vagonun yuvarlanma hareketleri verilmiştir. Önceki grafiklerde verilen yanal yerdeğiştirme ve ivmelenme grafiklerindeki gibi bu grafikte de artarda gelen vagonların maksimum yuvarlanma hareketleri artmaktadır.



Şekil 5.49. Köprüden birden fazla vagon geçişi dikkate alınarak köprünün dinamik tepkilerinin kıyaslanması.

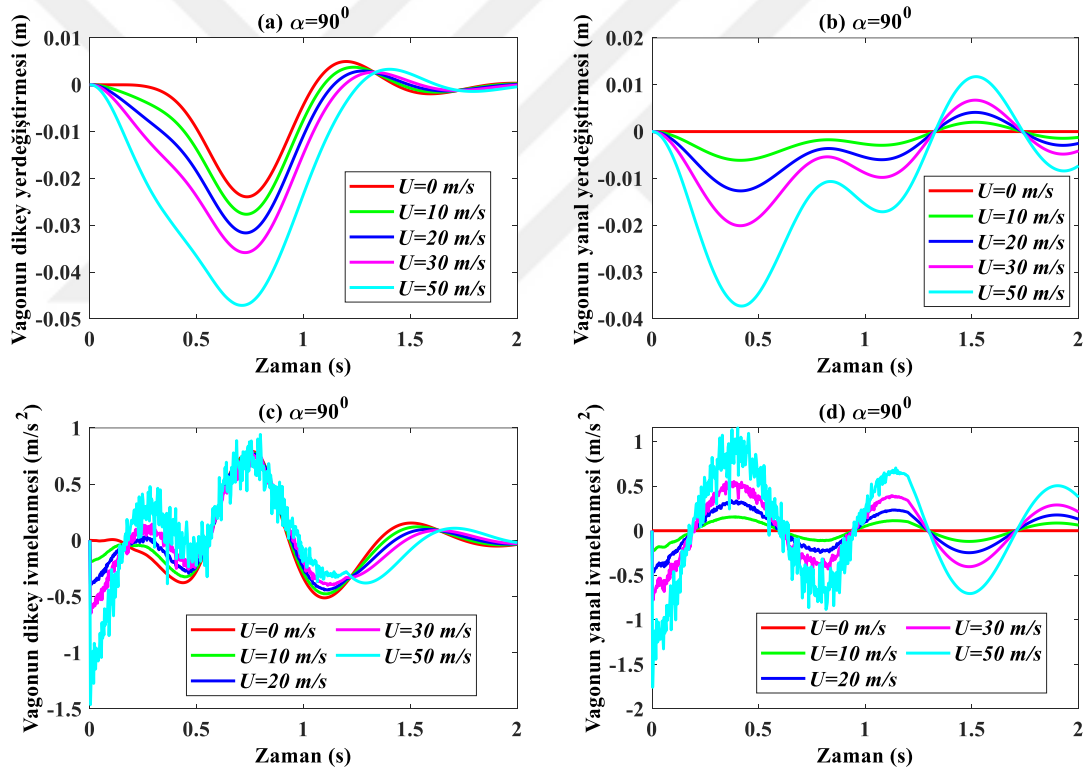
Önceki grafiklerde lokomotifle beraber toplamda 5 vagonun dinamik cevapları incelenmiştir. Şekil 5.49'da ise köprü üzerinden toplamda 7'si vagon 1'i lokomotif olmak üzere 8 adet vagonun geçmesi durumu incelenmiştir. Burada N_v vagon sayısını göstermektedir. $N_v=0$ olması demek track-köprü sistemi üzerinden sadece lokomotifin geçtiği durumdur. Şekil 5.49'da vagon sayısına göre ($N_v=0-7$) köprü orta noktasının zamana göre yerdeğiştirmesi verilmiştir. Grafik dikkatlice incelendiğinde köprü orta noktasının minimum yerdeğiştirme değeri vagon sayısı üç ve yedi olduğunda ortaya çıkmaktadır. Yani lokomotif bir vagon olarak kabul edilirse her dört vagona bir köprünün salınımları minimum düzeydedir. Ayrıca bu durumun vagona etkisi Şekil 5.47'te görülmektedir. Şekil 5.47'de hatırlanacağı gibi lokomotifle beraber 4. vagonun dinamik cevaplarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki köprü salınımları ile köprü üzerinden geçen vagon sayısı arasında bir ilişki bulunmaktadır ve dolayısıyla köprüden geçen hareketli vagon yükü doğrudan köprü rezonansı ile ilgilidir.

5.3. Rüzgâr Analizi Sonuçları

Bu bölümde tren-track-köprü modelinde trenin köprü üzerinden geçerken rüzgâra maruz kalması halinde ne tür dinamik tepkiler vereceği üzerine çalışılmıştır. Tren-track-köprü dinamik modeline rüzgârın matematik modeli ve literatürde bulunan çalışmaları daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Rüzgârlar tren gibi hareket eden araçlara belli hızlarda ve belli açılarla etki etmektedir. Bundan dolayı bu bölümde beş farklı rüzgâr hızı ve açısı incelenecektir. Bilgisayar simülasyon analizi yapılırken trenin köprü geçişi anında rüzgâr etki ettirilirken tren köprüden çıktıktan sonra rüzgârın etkisi kademeli bir şekilde azaltılarak sıfırlanmaktadır.

Şekil 5.50'de $U=0, 10, 20, 30$ ve 50 m/s olmak üzere beş farklı rüzgâr hızının vagonun dinamik cevaplarına etkisi incelenmiştir. Burada rüzgâr hızı değişken uygulanırken rüzgârın trene etki etme açısı ise $\alpha=90^\circ$ olarak alınmıştır. Şekil 5.50a'da vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri rüzgâr hızı arttıkça artmaktadır. Örneğin $U=0$ m/s olduğunda yani rüzgârsız durumda vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri 0.0239 m olurken, rüzgâr hızının $U=10, 20, 30$ ve 50 m/s olması halinde ise sırasıyla 0.0277 m, 0.0316 m, 0.0358 m ve 0.0471 m olmaktadır. Yani rüzgâr hızının artmasıyla birlikte rüzgâr hızının $U=0$ m/s olmasına göre vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri sırasıyla %15.9, %32.2 %49.8 ve %97 oranında arttığı

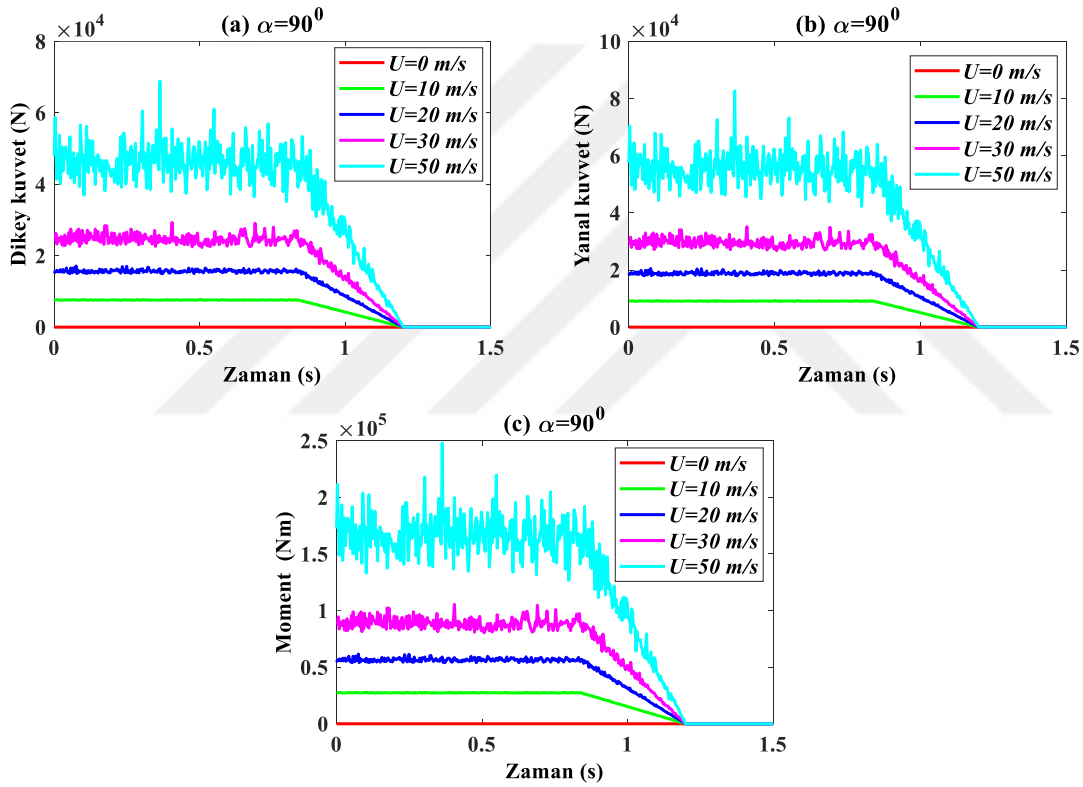
görülmektedir. Rüzgâr hızının $U=50$ m/s olması halinde vagonun dikey yöndeki maksimum yerdeğiştirmesi rüzgâr nedeniyle nerdeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Şekil 5.50b'de rüzgârın vagonun yanal yerdeğiştirmelerini oldukça fazla etkilediğı görülmektedir. Trene etkiyen rüzgâr hızı $U=0$ m/s olduğunda vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmesi sadece 6×10^{-7} m olurken, rüzgâr hızı $U=10$ m/s olduğunda 0.0061 m, $U=20$ m/s olduğunda 0.0126 m, $U=30$ m/s olduğunda 0.02 m ve $U=50$ m/s olduğunda 0.037 m olduğu görülmektedir. Dolayısıyla rüzgâr hızının trenin yanal yerdeğiştirmeleri açısından oldukça önem arz ettiğı anlaşılmaktadır. Şekil 5.50c-d'de vagonun dikey ve yanal ivmelenme grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de rüzgâr hızı arttıkça ivmelenme değerleri artmaktadır. İvmelenme grafiklerinde önemli bir ayrıntı ise rüzgâr hızının artmasıyla birlikte vagonun dikey ve yanal ivmelenme değerlerinde çok fazla sallantı olmaktadır.



Şekil 5.50. Vagona farklı hızlarda ve dik açıyla etki eden rüzgâr dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 5.51'de trene dik açıyla gelen beş farklı rüzgâr hızından dolayı vagona etkiyen dikey ve yanal kuvvetler ve moment grafikleri verilmiştir. Şekilde anlaşılmaktadır ki hem kuvvet hem de moment grafiklerine göre rüzgâr hızı arttıkça bu değerler

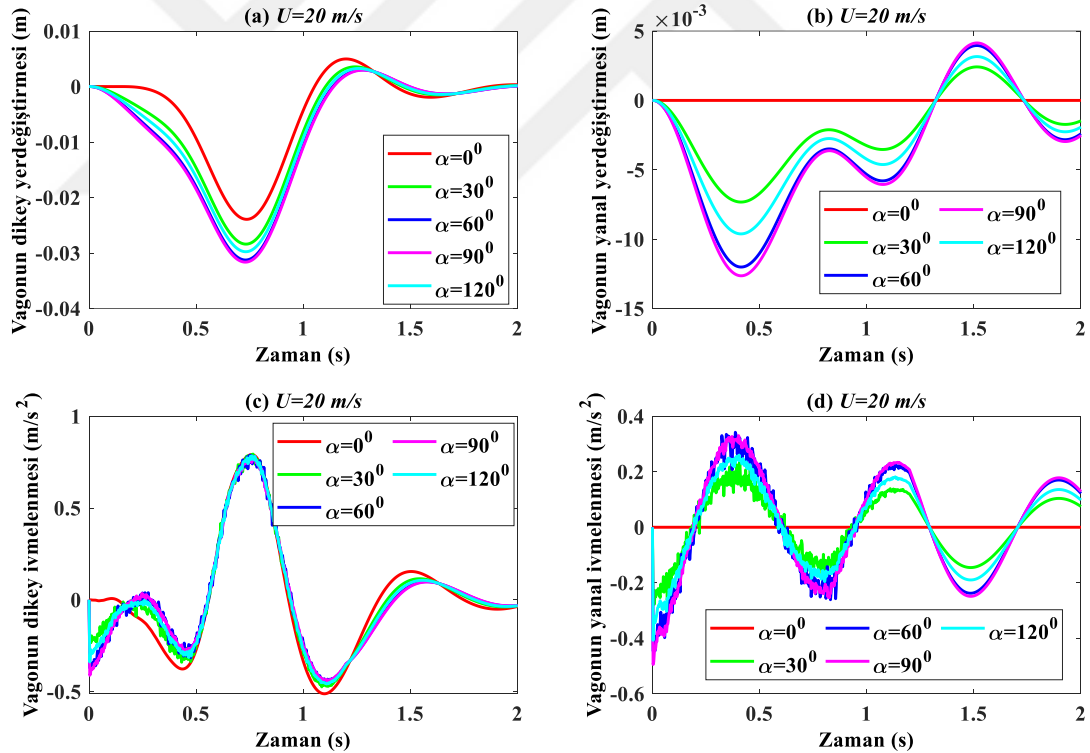
artmaktadır. Ayrıca rüzgâr tren köprüden geçerken sürekli uygulanırken köprüden çıkınca rüzgâr hızı azalmıştır. Yani 0.84 s'den sonra rüzgârın etkisi azalmaya başlıyor 1.2 s olduğunda ise rüzgâr etkisini tamamen yok oluyor. Şekil 5.51a'da vagona etkiyen dikey kuvvetler incelenmiştir. Rüzgâr hızı $U=10$ m/s olduğunda vagona etkiyen maksimum dikey kuvvet yaklaşık olarak 7600 N olurken, $U=20$ m/s olduğunda yaklaşık 15500 N, $U=30$ m/s olduğunda yaklaşık 25500 N ve $U=50$ m/s olduğunda ise yaklaşık 46500 N olmaktadır. Benzer bir durum yanal kuvvet ve moment grafiğinde de görülmektedir. Burada tüm grafiklerden anlaşılmaktadır ki rüzgâr hızı arttıkça kuvvet ve moment değerleri değişkenlik göstermektedir ve bu daha önceki bölümlerde anlatılan rüzgârın türbülanslı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.51. Vagona farklı hızlarda ve dik açıyla etki eden rüzgârın tren üzerinde oluşturduğu kuvvet ve moment grafikleri (a) Dikey kuvvet (b) Yanal kuvvet (c) Moment.

Şekil 5.52'de sabit rüzgâr hızı $U=20$ m/s ve $\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$, $\alpha=90^\circ$ ve $\alpha=120^\circ$ olmak üzere beş farklı rüzgâr açısı olması durumuna göre vagona etkiyen dinamik tepkiler incelenmiştir. Burada α açısı rüzgârın trenin yan yüzeyine etki etme açısıdır. Yani $\alpha=0^\circ$ olması rüzgârın trenin hareket doğrultusunda trene doğru olması anlamına gelmekte, $\alpha=90^\circ$ olması ise rüzgârın trene tamamen yanal yönden ve maksimum etki edecek şekilde gelmesi anlamını ifade etmektedir. Şekil 5.52a'da vagonun dikey

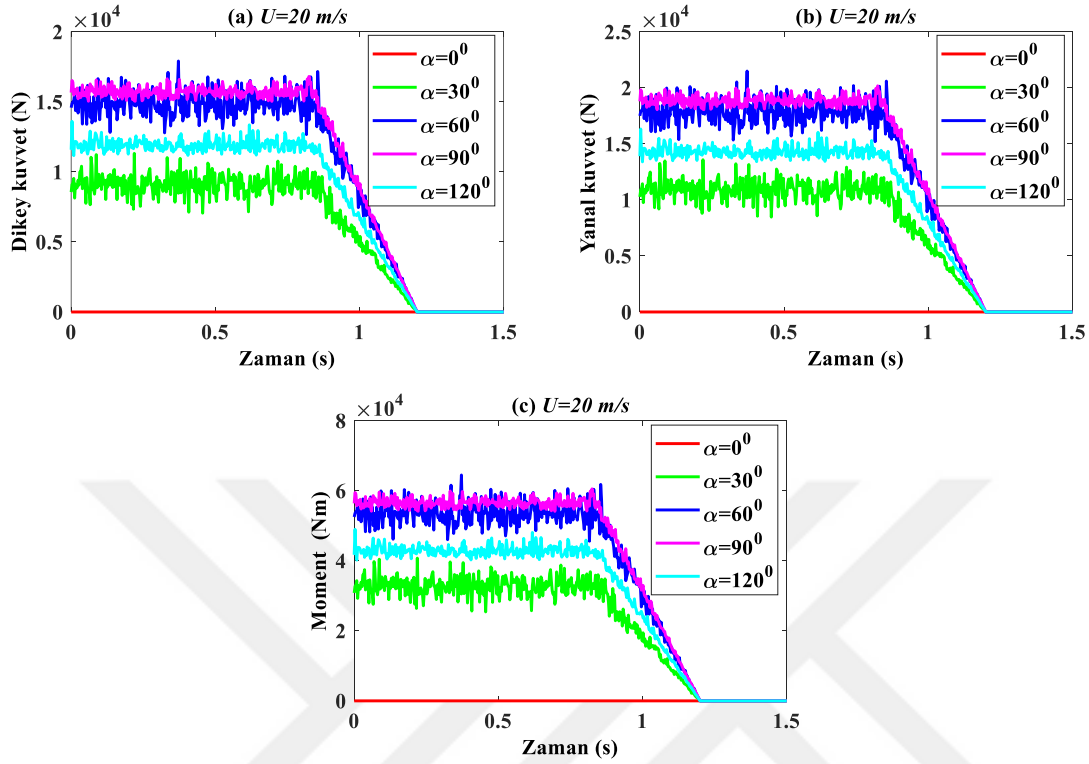
yöndeki maksimum yerdeğiştirmeleri incelendiğinde rüzgârın trenin yan duvarına göre olan açısı arttıkça maksimum dikey yerdeğiştirmeler artmaktadır. Yani $\alpha=0^\circ$ olması halinde vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi 0.0239 m olurken, rüzgâr açısının $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° olması halinde sırasıyla 0.0284 m, 0.0312 m ve 0.0316 m olmaktadır. Rüzgârın trene dik etki etmesi halinde vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi %32.2 oranında artmaktadır. Rüzgâr açısının $\alpha=120^\circ$ olması halinde ise maksimum dikey yerdeğiştirme değerinin 0.0297 m olduğu görölmektedir. Bu durumda rüzgâr açısının $\alpha=30^\circ$ ve $\alpha=120^\circ$ olması halinde vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri birbirine yakın olmaktadır. Çünkü bu iki aç trenin hemen hemen aynı oranda etki etmektedir. Benzer bir durum Şekil 5.52b’de vagonun yanal yerdeğiştirme grafiklerinde de görölmektedir. Burada rüzgâr açısı $\alpha=0^\circ$ olduğunda yanal yerdeğiştirmeler nerdeyse olmamaktayken, rüzgâr açısı $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° ve 120° olduğunda vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmeleri sırasıyla 0.007 m, 0.012 m, 0.0126 ve 0.0096 m olmaktadır.



Şekil 5.52. Vagona farklı açılarda ve sabit hızda etki eden rüzgâr dikkate alınarak vagonun dinamik tepkilerinin kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (d) Vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 5.53’te beş farklı rüzgâr açısının vagon üzerinde oluşturduğu kuvvet ve moment grafikleri verilmiştir. Burada da rüzgâr trene köprüdeyken tesir ediyor ve köprüden

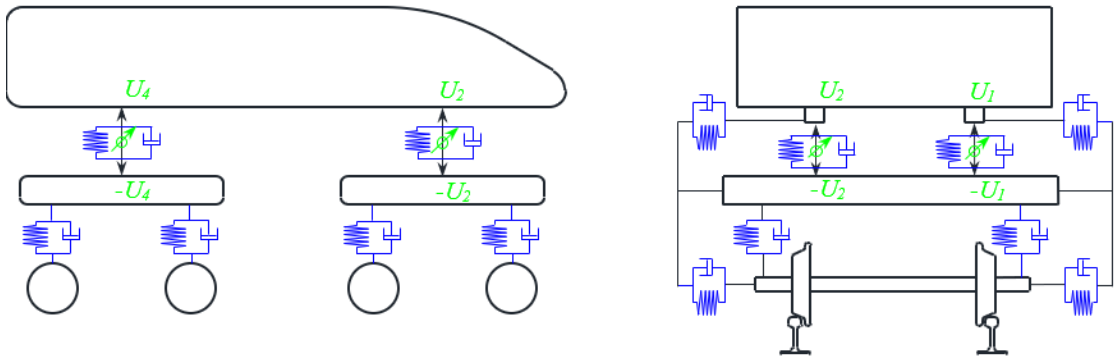
çıktıktan sonra kademeli olarak azalmaktadır. incelenen grafiklere göre rüzgâr açısının trene dik uygulandığı durumda kuvvet ve moment değerleri maksimum olmaktadır.



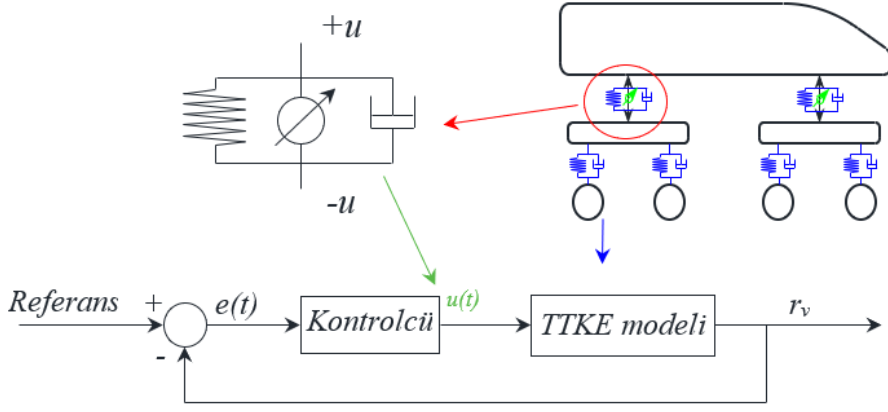
Şekil 5.53. Vagona farklı açılarda ve sabit hızda etki eden rüzgârın tren üzerinde oluşturduğu kuvvet ve moment grafikleri (a) Dikey kuvvet (b) Yanal kuvvet (c) Moment.

6. YAPAY ZEKÂ ALGORİTMALARI İLE AKTİF KONTROL UYGULAMASI

Bu tez çalışmasının buraya kadar olan bölümünde yüksek hızlı trenlerin esnek zemin olarak modellenen köprülerden geçişi modellenmiş ve çeşitli durumlar için analizleri yapılmıştır. Ayrıca esnek zemin çalışmasının yanı sıra trene etkiyen rüzgâr yükü de ele alınmıştır. Tüm bu çalışmalar yapılırken sistemde titreşimleri engelleyecek veya azaltacak herhangi bir kontrolcü kullanılmamıştı yani bu bölüme kadar ki olan tüm çalışmalar pasif kontrol içermekteyken bu bölümde tren titreşimlerinin azaltılması amacıyla aktif kontrol uygulaması yapılacaktır. Pasif kontrolde sistemi titreşmeye zorlayan kuvvete karşı sadece yay ve sönüm elemanı kullanılır. Bu durumda pasif süspansiyon sistemlerinin başarısı sınırlı kalmaktadır ve aktif süspansiyon kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif titreşim kontrolünde en önemli unsur pasif süspansiyon sistemlerine ek olarak eyleyicilerin bulunmasıdır. Bu durumu açıklayan grafik Şekil 6.1’de belirtilmiştir. Bu grafiğin detaylı anlatımı Bölüm 3’te verildiği için sadece aktif kontrolcü elemanı gösterilmiştir. Şekil 6.1’de de görüldüğü gibi eyleyiciler vagon ile boji arasına yerleştirilmiştir. Eyleyiciler vagonun dikey hareketlerini ve dönme hareketlerini kontrol edebilmesi amacıyla ön bojide ve arka bojide 2’şer tane bulunmak üzere toplamda 4 adet eyleyici bulunmaktadır. Bu eyleyiciler sisteme eklenen sensörlerden gelen veriyi işleyerek titreşimin en aza indirgenmesi amacıyla üretilmesi gereken dikey yöndeki kontrolcü kuvvetini tayin ederek uygulamaktadır. Bu kontrolcü kuvvetlerinin belirlenmesinde yapay zekâ algoritmaları kullanılabilir. Bu çalışmada da sırasıyla PID, bulanık mantık, kendinden uyarlamalı bulanık mantık ve kayan kipli kontrol gibi kontrolcüler tercih edilmiştir ve aşağıdaki gibi sunulmuştur



Şekil 6.1. Aktif kontrolcülerin TTKE modeline eklenmesi.



Şekil 6.2. Aktif kontrolcünün yapısı.

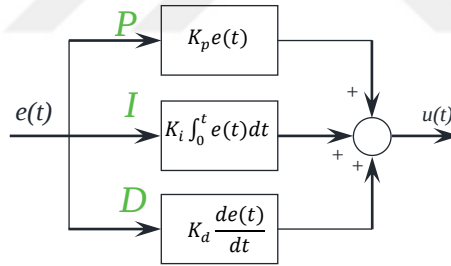
6.1. PID Kontrolcü

Literatürde en çok bilinen ve en çok tercih edilen kontrolcü orantı (Proportional), türev (Derivative) ve integral (Integral) olmak üzere üç farklı parametrenin bir araya gelerek oluşturduğu PID kontroldür. Öncelikle bu kontrolcü de temel mantık kontrol edilmek istenen sistemin nihai değeri ile referans olarak istenen değerin arasındaki farkı hata sinyali $e(t)$ olarak tanımlamaktır. Daha sonra belirlenen hata sinyalini orantı kazancı k_p olan bir katsayısı ile çarpıp P tipi kontrolcüyü, hata sinyalinin zamana göre integralini alıp integral kazancı k_i olan bir katsayı ile çarpıp I tipi kontrolcüyü ve hata sinyalinin zamana göre türevini alarak türev kazancı k_d olan bir katsayı ile çarpıp D tipi kontrolcü oluşturulmaktadır. En son belirlenen bu üç farklı kontrolcü sinyalinin toplanması ile denklem 6.1'deki gibi PID kontrolcü elde edilmektedir. Ayrıca bu kontrolcüler tek başlarına kullanılabileceği gibi genel olarak sistem kararlılığını artırmak amacıyla birlikte kullanılmaktadır. Burada u elde edilen toplam kontrolcü kuvvetini temsil ederken, r_r ve r_v sırasıyla referans değeri ve vagonun t zamanındaki yerdeğiştirme değerini vermektedir. Denklem 6.1'de verilen kontrolcü sinyali 4 farklı eyleyici için ayrı ayrı yapılmaktadır ve dolayısıyla her birinin hata sinyali farklı olacağından oluşacak kontrolcü kuvveti de farklı olacaktır.

PID kontrol denetleyicisinin çalışmasından önce, kontrol edilecek işlemin dinamiğine uygun şekilde ayarlanmalıdır. Tasarımcılar P, I ve D terimleri için varsayılan değerleri verir ve bu değerler istenen performansı veremez ve bazen kararsızlık ve yavaş kontrol performanslarına yol açar. PID kontrolörlerini ayarlamak ve operatörün oransal, integral ve türev kazançlarının en iyi değerlerini seçmek için çok dikkat gerektirmesi için farklı ayar yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Deneme ve Hata Yöntemi: Bu, PID denetleyici ayarının basit bir yöntemidir. Sistem veya denetleyici çalışırken, denetleyiciyi ayarlayabiliriz. Bu yöntemde, önce k_i ve k_d değerlerini sıfırlamak ve sistem salınım davranışına ulaşana kadar orantılı terimi k_p arttırılır. Daha sonra salınımların durması ve hızlı yanıt almak için k_d ve k_i kazancı ayarlanır. Proses reaksiyon eğrisi tekniği: Açık döngü ayar tekniğidir. Sisteme bir adım girişi uygulandığında yanıt üretir. Öncelikle, sisteme bazı kontrol çıkışlarını elle uygulamak ve yanıt eğrisini belirlemek gereklidir. Daha sonra eğim, eğrinin yükselme zamanı hesaplanarak PID kazanç değerleri elde edilir. Zeigler-Nichols yöntemi: Ziegler ve Nichols, verilen bir sistemin geçici cevap karakteristiklerine dayalı olarak oransal kazanç k_p , integral kazancı k_i ve türev kazancı k_d nin değerlerinin belirlenmesi için kurallar önermiştir. Bu çalışmada kullanılan PID parametreleri ise deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiş olup şu şekilde alınmıştır; $k_p=2 \times 10^6$, $k_i=7 \times 10^5$, $k_d=4 \times 10^5$.

$$u = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad e(t) = r_r(t) - r_v(t) \quad (6.1)$$



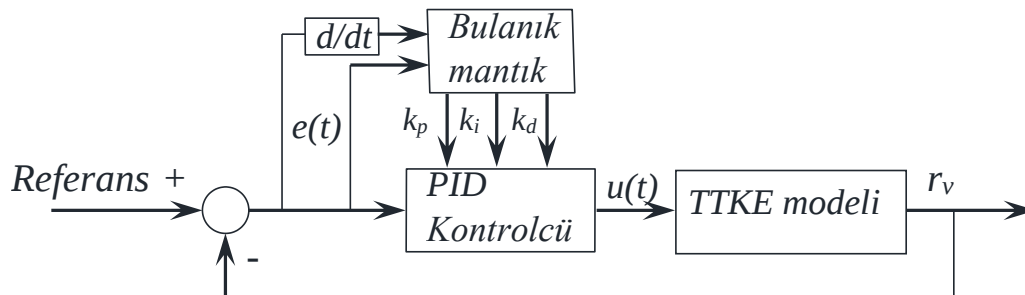
Şekil 6.3. PID kontrolcünün yapısı.

6.2. Kendinden Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolcü

Yapay zekâ algoritmaları denince akla ilk gelen yöntemlerden birisi muhakkak bulanık mantık olmuştur. Bir sistemin nasıl kontrol edileceğini insanların sezgisel bilgisi ile belirlenen bulanık mantık kavramı ilk olarak 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [154]. Bulanık mantık bulanıklaştırma, kural tabanı ve durulaştırma olmak üzere 3 farklı tasarım aşamasından meydana gelmektedir. Bulanıklaştırma aşamasında incelenen sistem girdileri uygun değişkenler tanımlanır. Kural tabanı aşamasında uzman tecrübelerinden faydalanılarak oluşturulur. Durulaştırma aşamasında ilk iki aşama kullanılarak aktif kontrolcüye net bir kontrol girdisi sağlanır.

Bir önceki bölümde PID kontrol tanıtılmıştı ve PID katsayıları sabit olarak en başında belirlenip uygulandığından dolayı değiştirilemezler. Fakat bazı durumlarda bu PID katsayılarının belirlenenden daha fazla veya daha az olması istenmektedir. Bu durumda bulanık mantık kullanılarak PID katsayıları istenilen değerlere getirilebilmektedir. Dolayısıyla bu kısımda kontrolcü kuvvetini belirleyen PID kazançlarının sistemin ihtiyacı kapsamında güncellenmesini sağlayan kendinden uyarlamalı bulanık PID (KUBPID) kontrolcü incelenecektir. Klasik PID kontrolünde belirlenen kontrol kazançları çalışma esnasında istenilen performansı bazen sağlayamamaktadır. Bunun için çalışma esnasında istenilen kazançları sağlamak amacıyla bulanık mantık kullanılmıştır. Bu çalışmada çeyrek araç modeli ile köprü arasındaki etkileşimden doğan titreşimi kontrol etmek için tasarlanan KUBPID kontrolcüsü Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Şekil 6.4'te görülen bulanık girdi olarak vagon gövdesinin dikey yerdeğiştirmesini ($e = r_r - r_v$) ve bunun türevini ($\dot{e} = \dot{r}_r - \dot{r}_v$) kullanırken çıktı olarak ise PID parametrelerini vermektedir. Burada referans değerlerinin (r_r , $\dot{r}_r$) sıfır olması istenmektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan KUBPID kontrolcü için oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi girdi değerleri NB (Negatif büyük), NK(Negatif küçük), S(Sıfır), PK(Positif küçük) ve PB(Positif büyük) olmak üzere 5 üyelik fonksiyonundan oluşturulurken, çıktı değerleri ÇK (Çok küçük), K (Küçük), OK (Orta küçük), O (Orta) OB (Orta büyük), B (Büyük) ve ÇB (Çok büyük) olmak üzere 7 üyelik fonksiyonlarından oluşturulmuştur. Tüm üyelik fonksiyonları üçgen şekilli geometride seçilmiştir.



Şekil 6.4. KUBPID kontrolcünün çalışma yapısı.



Şekil 6.5. TTKE kontrol sisteminin girdi ve çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonları.

Tablo 6.1. k_p katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.

k_p		$\frac{de(t)}{dt}$				
		NB	NK	S	PK	PB
$e(t)$	NB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB
	NK	ÇB	ÇB	O	ÇK	ÇK
	S	ÇB	OB	O	OB	ÇB
	PK	OK	O	ÇB	ÇB	ÇB
	PB	OB	B	ÇB	ÇB	ÇB

Tablo 6.2. k_i katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.

k_i		$\frac{de(t)}{dt}$				
		NB	NK	S	PK	PB
$e(t)$	NB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB
	NK	ÇB	ÇB	OB	ÇK	ÇK
	S	ÇB	OB	O	OB	ÇB
	PK	OK	O	ÇB	ÇB	ÇB
	PB	OB	B	ÇB	ÇB	ÇB

Şekil 6.5'te verilen girdi değişkenlerinden hatanın üyelik fonksiyonu $[-0.03, 0.03]$ aralıklarında seçilirken, hatanın değişimi için üyelik fonksiyonu $[-0.2, 0.2]$

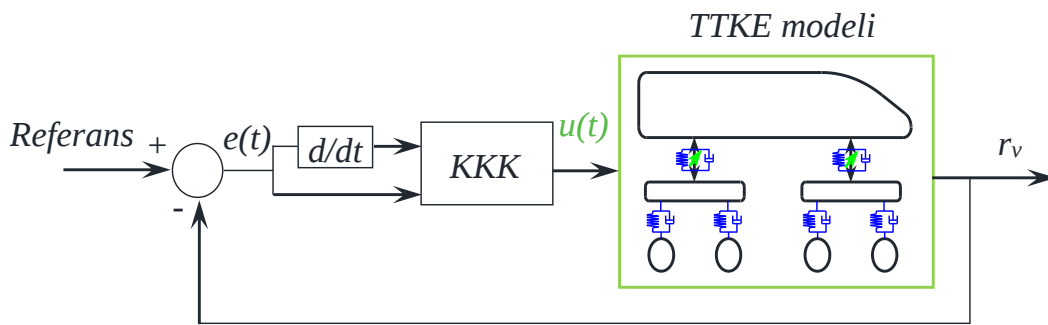
aralıklarında seçilmiştir. Bir diğer taraftan çıktı değişkenlerinden k_p , k_i ve k_d sırasıyla $[0.4 \times 10^6]$, $[0.10 \times 10^5]$ ve $[0.7 \times 10^5]$ aralıklarında belirlenmiştir. Belirlenen bu üyelik fonksiyonlarının girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi tanımlayan kural tabanı ise Tablo 6.1-3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. k_p katsayısının belirlenmesi için kullanılan kurallar.

		$\frac{de(t)}{dt}$				
		NB	NK	S	PK	PB
$e(t)$	NB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB
	NK	ÇB	ÇB	OB	K	ÇK
	S	ÇB	B	B	B	ÇB
	PK	K	O	ÇB	ÇB	ÇB
	PB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB	ÇB

6.3. Kayan Kipli Kontrol

Bu kısımda Şekil 6.2'de görülen doğrusal eyleyicinin kontrolü kayan kipli kontrol (KKK) kullanılarak yapılmıştır. Kayan kipli kontrolde Şekil 6.6'da belirtildiği gibi bir takım karar kuralı geri besleme sayesinde elde edilen değişken yapılı bir kontrol sistemidir. Burada başlıca amaç sistemin asıl değeri ile istenen değer arasındaki fark ile bu farkın türevi alınarak bir kayma manifoldu oluşturulmasıdır. Ardından sistemin durum değişkenleri kayma manifoldu üzerine getirilir ve burada tutulur. Bahsedilen bu ifadeler KKK'nın eşdeğer ve anahtarlama kontrol sinyali olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 6.6. KKK kontrolcünün çalışma yapısı.

KKK'de eşdeğer ve anahtarlama kontrolcü sinyalinin toplamı genel kontrolcü kuvvetini aşağıdaki gibi vermektedir. Burada u toplam kontrolcü sinyalini verirken, u_{eq} eşdeğer kontrolcü sinyalini u_{sw} ise anahtarlama kontrolcü sinyalini temsil etmektedir.

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (6.2)$$

Kayma manifoldu oluşturulması için hata sinyali ve bunun değişiminin kullanılması gerekmektedir. Hata ve hatanın türevleri denklem 6.3'te verilmiştir. Burada r_v aracın dikey yer değiştirmesini, r_d ise istenilen değeri temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} e &= r_d - r_v \\ \dot{e} &= \dot{r}_d - \dot{r}_v \\ \ddot{e} &= \ddot{r}_d - \ddot{r}_v \end{aligned} \quad (6.3)$$

s olarak tanımlanan kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Burada α_k kayma yüzeyi katsayıdır.

$$s = e \left(\alpha_k + \frac{d}{dt} \right), \quad s = \alpha_k e + \dot{e}, \quad \dot{s} = \alpha_k \dot{e} + \ddot{e} \quad (6.4)$$

Kayan kipli kontrolde yukarıda verilen kayma yüzeyi kullanılarak durum değişkenleri kayma yüzeyi üzerine getirilerek kontrol yapılır. Burda $\ddot{r}_v$ ile belirtilen değer eyleyicinin bulunduğu yerdeki vagonun ivmelenme değeridir. İkinci dereceden olarak Bölüm 3'te verilen bu denklem içerisinde bulunacak kontrolcü kuvvetleri tayin edilerek titreşim kontrolü yapılmaktadır. Boji ve vagon arasında toplamda 4 adet eyleyici bulunduğu için birbirinden farklı 4 tane kontrolcü kuvveti belirlenmiştir. Belirlenen bu kontrolcü kuvvetleri denklem 6.2'de verilen eşdeğer kontrolcü sinyalini oluşturmaktadır. Anahtarları kontrol sinyali ise aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$u_{sw} = k \operatorname{sgn}(s) \quad (6.5)$$

Burda anahtarlama kontrol sinyali içerisinde bulunan k değeri anahtarlama sinyal katsayısını temsil etmektedir. Lyapunov fonksiyonu ve türevi aşağıda verilmiştir. Verilen fonksiyon pozitif tanımlı olmalı ve zamana göre türevinin negatif yarı tanımlı olması gerekmektedir [155].

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (6.6)$$

6.4. Yapay Zekâ Destekli Aktif Titreşim Kontrolcü Sonuçları

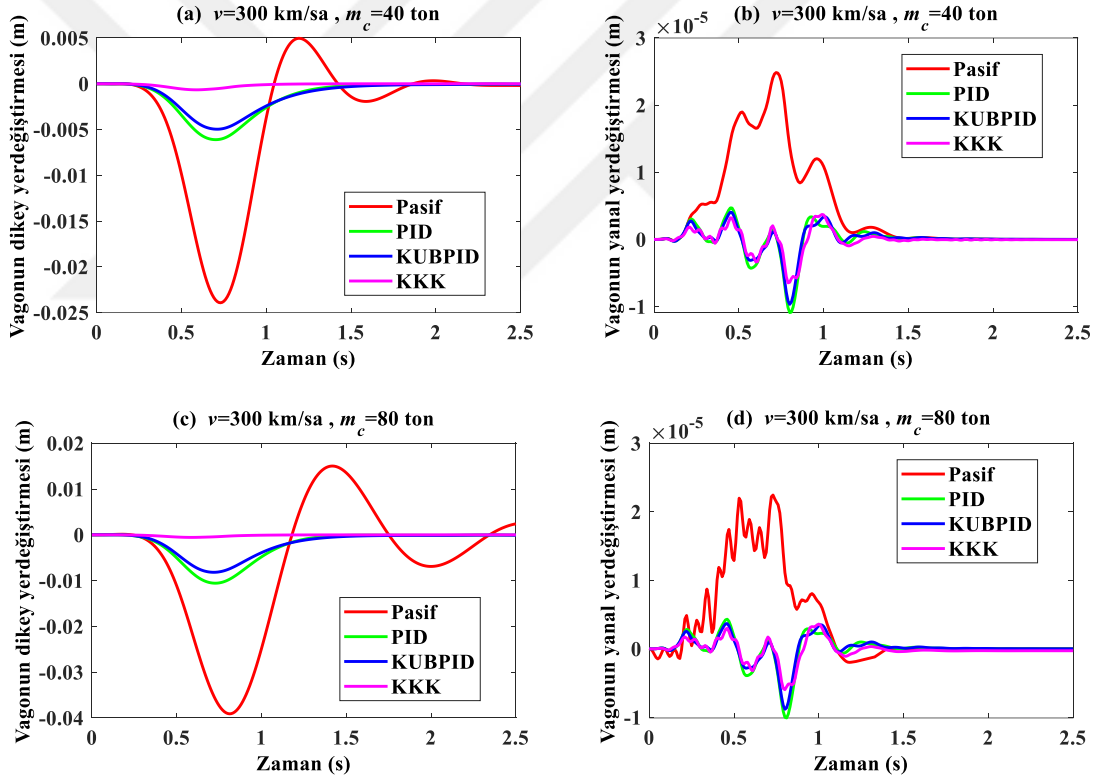
Bu çalışma da modellenen TTKE sistemi önceki bölümlerde pasif kontrol olarak ele alınmış ve sonuçları verilmiştir. Bu bölümde yukarıda verilen yapay zekâ algoritmaları ile ele alınan aktif kontrolcüler kullanılarak tren gövdesinin dikey yöndeki titreşimlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Modelde toplamda 4 adet eyleyici kullanılmış olup bunlar boji ve vagon arasında yer almaktadır. Ön boji ve arka bojide ayrı ayrı bulunan eyleyiciler vagonun yunuslama hareketini kontrol edebilirken, bojilerde sağlı ve sollu olarak verilen eyleyiciler sayesinde ise vagonun yuvarlanma hareketleri kontrol edilebilmektedir. Ayrıca dikey yöndeki kontrolü ise tüm eyleyiciler gerçekleştirebilirler. Bu bölümde yukarıda verilen kontrolcüler kullanılarak özellikle vagona ait olmak üzere trenin dinamik davranışları detaylı grafiklerle aşağıda verilecektir. Burada dikkate alınacak unsurlar tren hızı, köprü uzunluğu, vagon kütlesi, çoklu vagon geçişleri gibi değişkenler ele alınacaktır.

6.4.1. Sabit tren hızı ve değişken vagon kütlesinin zaman analizleri

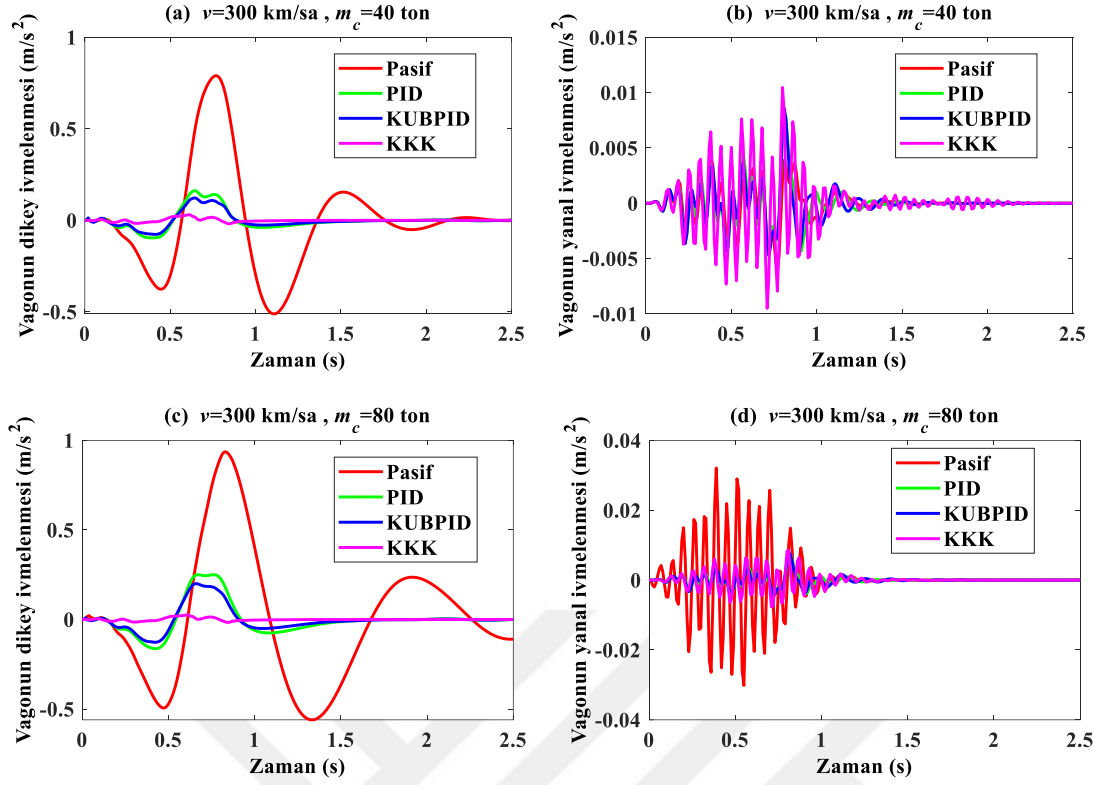
Bu bölümde aktif kontrolcülerin uygulandığı TTKE modelinin zaman alanında çözümü gerçekleştirilerek kıyaslamalı bir şekilde verilmiştir. Burada tren vagonunun $m_c=40$ ton ve $m_c=80$ ton olmak üzere iki farklı kütleye sahip olması durumu dikkate alınmıştır. Tüm analizlerde diğer tüm parametreler sabit olarak kabul edilmiş ve tren hızı 300 km/sa olarak alınmıştır.

Şekil 6.7’de vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmeleri sabit tren hızı $v=300$ km/sa ve iki farklı vagon kütlesine göre zaman alanında verilmiştir. Burada vagonun dinamik cevapları pasif, PID, kendinden uyarlamalı bulanık PID (KUBPID) ve kayan kipli kontrol (KKK) kullanılarak kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7’a incelendiğinde yapay zekâ destekli aktif titreşim kontrolü uygulandığında vagonun dikey yerdeğiştirmeleri oldukça azalmıştır. Vagonun maksimum dinamik yerdeğiştirmesi ortalama 0.73 s’de gerçekleşmiş ve pasif kontrolde bu değer 23.9 mm olurken, PID kontrolde 6.11 mm, KUBPID kontrolde 4.96 mm ve KKK’de 0.66 mm olmaktadır. Vagonun maksimum yanal yerdeğiştirmeleri incelendiğinde ise pasif kontrolde 0.025 mm olurken, PID kontrol uygulanması halinde 0.011 mm, KUBPID kontrol olması durumunda 0.0096 mm ve KKK olduğunda ise 0.0065 mm olduğu görülmektedir. Yapılan bu analizler vagon kütlesinin 40 ton olması halinde yapılmıştır. Şekil 6.7 c ve d’de vagon kütlesinin 80 ton olması durumunda vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmeleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde vagonun dinamik

davranışları doğal olarak artacaktır. Örneğin $m_c=40$ ton olduğunda vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi 23.9 mm iken $m_c=80$ ton olduğunda ise 39.1 mm'ye yükselmektedir. Ayrıca yapay zekâ destekli aktif kontrolör uygulanması halinde bu değęer oldukça düşmektedir. PID kontrol uygulandığında bu değęer 10.57 mm, KUBPID ile kontrol sağlandığı zaman 8.18 mm ve KKK'de ise 0.56 mm olmaktadır. Şekil 6.7 d'de vagon kütlelerinin $m_c=80$ ton olması halinde vagonun yanal yerdeğiştirmeleri verilmiştir. Vagon kütlelerinin artmasıyla yanal yerdeğiştirmelerin değęeri pek değışmediğı görölmektedir. Burada vagonun dikey yerdeğiştirmelerinin kontrolü yapay zekâ destekli yöntemlerle oldukça azaltılmaktadır. Vagonun kütlesi arttığında maksimum yerdeğiştirmelerin arttığı gözlemlenmektedir. Fakat KKK'de bu değęer tam tersi etki göstermiştir. Vagon kütlesi arttığı zaman KKK kullanılarak dikey yerdeğiştirmeler çok daha az olmaktadır.

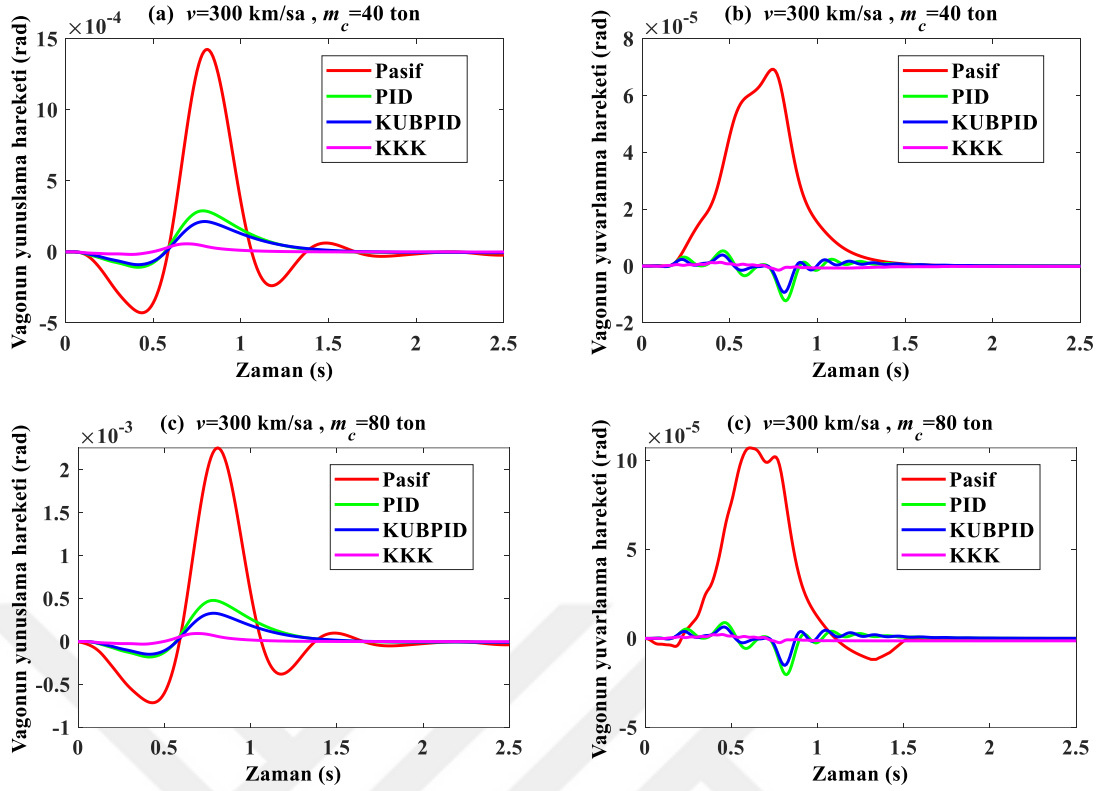


Şekil 6.7. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmesine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) $m_c=80$ ton için vagonun dikey yerdeğiştirmesi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yanal yerdeğiştirmesi.



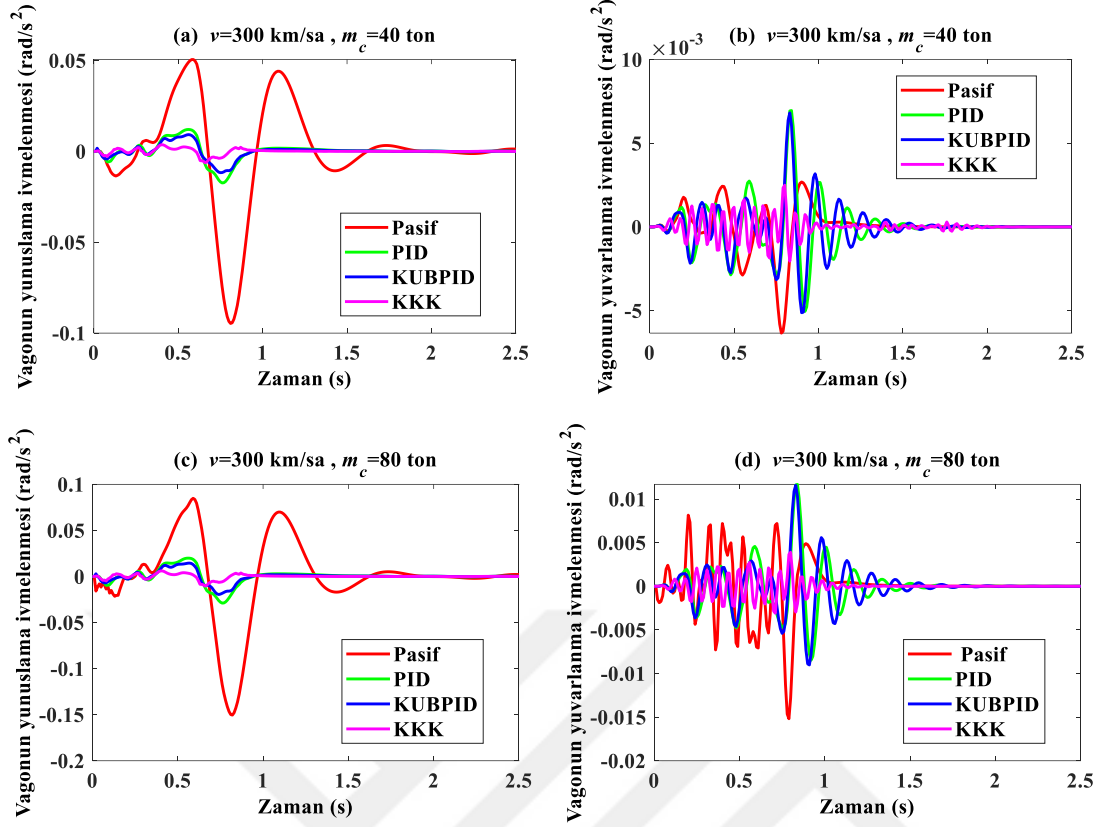
Şekil 6.8. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun dikey ve yanal ivmelenmesine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun dikey ivmelenmesi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yanal ivmelenmesi (c) $m_c=80$ ton için vagonun dikey ivmelenmesi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 6.8’de vagonun dikey ve yanal ivmelenme değerleri iki farklı vagon kütlesi ve 4 farklı kontrolcü ile incelenmiş ve kıyaslamalı grafikleri verilmiştir. Bir önceki grafikteki gibi burada da yapay zekâ destekli kontrolcüler oldukça başarılı olmuştur. Örneğin Şekil 6.8a’da pasif kontrol uygulanması durumunda maksimum dikey ivmelenme değeri 0.8 m/s^2 olurken, PID, KUBPID ve KKK uygulanması halinde sırasıyla 0.16 m/s^2 , 0.12 m/s^2 ve 0.03 m/s^2 olmaktadır. İnsanı etkileyen konforsuz ivmelenme değerinin 0.49 m/s^2 olduğu düşünüldüğünde yapay zekâ destekli kontrolcüler sayesinde vagonun ivmelenme değerleri konforsuz seviyeden konforlu seviyeye gelmektedir. Şekil 6.8b incelendiğinde vagonun yanal ivmelenmelerinin azaltılmasında aktif kontrolcülerin pek de başarılı olduğunu söylenemez hatta KKK’de elde edilen sonuçlar pasif kontroldekinden bile daha kötü olmaktadır. Fakat Şekil 6.8d’de vagon kütlesinin 80 ton olması halinde aktif kontrolcüler yanal ivmelenmeleri düşürmekte oldukça başarılı olmaktadır. Şekil 6.8c’de $m_c=80$ ton olması halinde vagonun maksimum dikey ivmelenme değerleri pasif, PID, KUBPID ve KKK için sırasıyla 0.93 m/s^2 , 0.25 m/s^2 , 0.2 m/s^2 ve 0.026 m/s^2 olmaktadır.



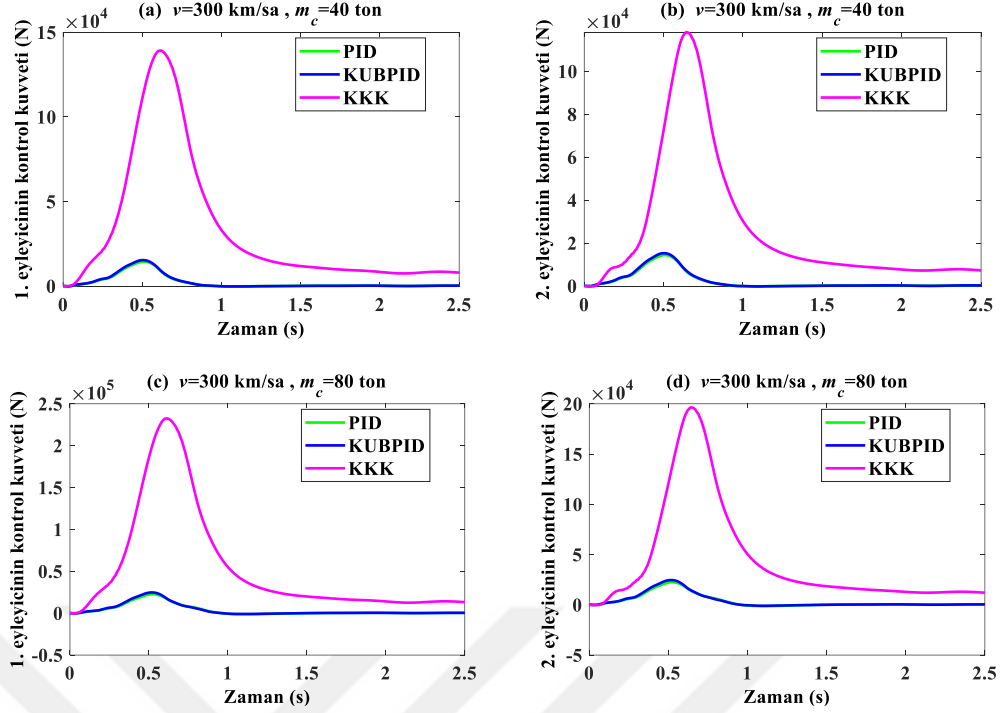
Şekil 6.9. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketine etkisi (a) $m_c=40$ ton için vagonun yunuslama hareketi (b) $m_c=40$ ton için vagonun yuvarlanma hareketi (c) $m_c=80$ ton için vagonun yunuslama hareketi (d) $m_c=80$ ton için vagonun yuvarlanma hareketi.

Şekil 6.9’da vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketleri aktif kontrolcüler kullanılarak azaltılmıştır. Burada bir önceki grafiklerde olduğu gibi iki farklı vagon kütlesi incelenmiş olup tren hızı sabit $v=300$ km/sa alınmıştır. Vagonun yunuslama hareketi pasif kontrol olması durumunda oldukça yüksek değerleri alıyorken aktif kontrol kullanıldığında oldukça düştüğü görülmektedir. Şekil 6.9a’da vagonun maksimum yunuslama hareketi pasif kontrolde 1.4×10^{-3} rad olurken, PID, KUBPID ve KKK’de sırasıyla 0.29×10^{-3} rad, 0.21×10^{-3} rad ve 0.05×10^{-3} rad olurken, Şekil 6.9c’de vagon kütlesinin 80 ton olması durumunda ise bu değerler sırasıyla 2.25×10^{-3} rad, 0.48×10^{-3} rad, 0.33×10^{-3} rad ve 0.093×10^{-3} rad olduğu görülmektedir. Benzer bir şekilde Şekil 6.9b ve d’de vagonun maksimum yuvarlanma hareketleri de yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde oldukça azaltılabilmektedir. Ayrıca, vagon kütlesinin artması vagonun yunuslama hareketlerinin bir miktar artmasına sebep olmaktadır.

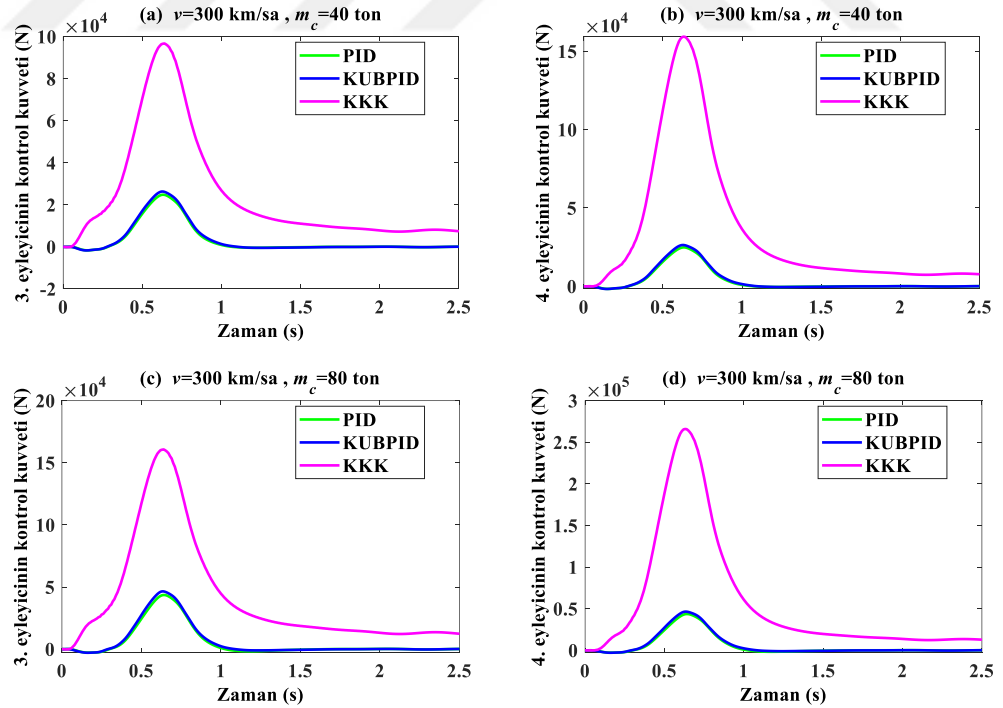


Şekil 6.10. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonun yunuslama ve yuvarlanma ivmelenmesine etkisi (a) $m_c=40 \text{ ton}$ için vagonun yunuslama ivmelenmesi (b) $m_c=40 \text{ ton}$ için vagonun yuvarlanma ivmelenmesi (c) $m_c=80 \text{ ton}$ için vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) $m_c=80 \text{ ton}$ için vagonun yuvarlanma ivmelenmesi.

Şekil 6.10 iki farklı vagon kütlesi ve dört farklı kontrolcü kullanılması durumunda vagonun yunuslama ve yuvarlanma ivmelenmesini kıyaslamalı olarak vermektedir. Şekil 6.10a ve c’de yunuslama ivmelenmesi aktif kontrolcüler sayesinde oldukça azaltılabilmektedirken, Şekil 6.10b ve d’de yuvarlanma ivmelenmesi grafiklerinde aktif kontrolcünün etkisi oldukça kısıtlı olmuştur. Grafikler incelendiğinde KKK’ün oldukça başarılı olmasının sebebi gerektiği zamanda gerektiği kontrol kuvvetini sağlayabilmesidir. Örneğin Şekil 6.11a 1. eyleyicinin ürettiği maksimum kontrol kuvveti KKK için $13.9 \times 10^4 \text{ N}$ olurken, KUBPID ve PID için sırasıyla $1.53 \times 10^4 \text{ N}$ ve $1.45 \times 10^4 \text{ N}$ olmaktadır. Şekil 6.11b’de ise $m_c=80 \text{ ton}$ olması halinde 1. eyleyicinin ürettiği kontrol sinyali aynı sıra ile $23.3 \times 10^4 \text{ N}$, $2.48 \times 10^4 \text{ N}$ ve $2.26 \times 10^4 \text{ N}$ olmaktadır.



Şekil 6.11. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonların titreşim kontrolünü sağlamak için ürettikleri kontrolcü sinyalleri (a) $m_c=40$ ton için 1. eyleyicinin kontrol kuvveti (b) $m_c=40$ ton için 2. eyleyicinin kontrol kuvveti (c) $m_c=80$ ton için 1. eyleyicinin kontrol kuvveti (d) $m_c=80$ ton için 2. eyleyicinin kontrol kuvveti.

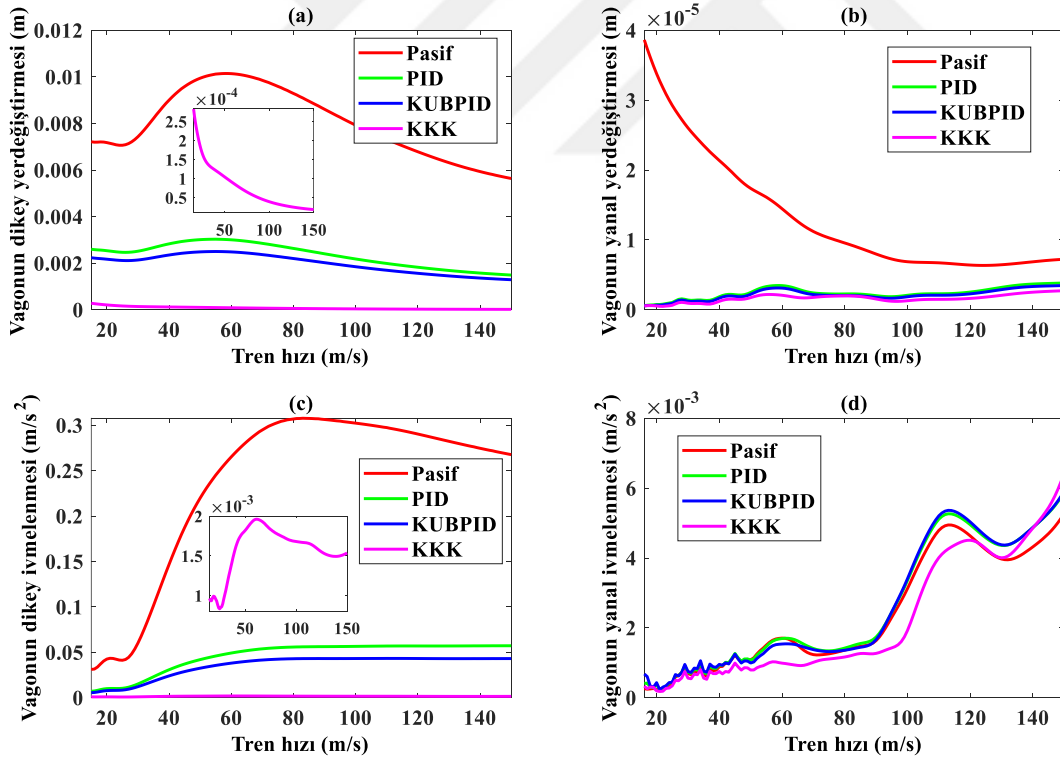


Şekil 6.12. Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin farklı kütledeki vagonların titreşim kontrolünü sağlamak için ürettikleri kontrolcü sinyalleri (a) $m_c=40$ ton için 3. eyleyicinin kontrol kuvveti (b) $m_c=40$ ton için 4. eyleyicinin kontrol kuvveti (c) $m_c=80$ ton için 3. eyleyicinin kontrol kuvveti (d) $m_c=80$ ton için 4. eyleyicinin kontrol kuvveti.

Yani sonuç olarak KKK'nın ürettiği maksimum kontrol kuvveti diğer kontrolcülerin ürettiği maksimum kontrol sinyalinden yaklaşık 10 kat fazla olmaktadır. Ayrıca vagon kütlelerinin artmasıyla vagonun dinamik cevaplarının arttığı ve dolayısıyla eyleyicilerin ürettiği kontrol kuvveti de artmaktadır. Şekil 6.12 de ise 3. ve 4. aktif kontrolcülerin ürettiği kontrol kuvvetlerini her bir kontrolcü için vermektedir.

6.4.2. Tren hızının etkisinin incelenmesi

Bu bölümde yüksek hızlı trenlere etkiyen dinamik cevapların yapay zekâ algoritmaları ile sönümlenmesi değişken tren hızı dikkate alınarak detaylıca incelenmiştir. Tren hızı 15 m/s'den 150 m/s'ye 1 m/s aralıklarında değişmesi durumu ele alınarak hassas çözüm yapılması amaçlanmıştır. Bu aralıklardaki tüm hızlarda hareket eden yüksek hızlı trenin köprüden geçirilerek aktif kontrolcülerin kontrolüne maruz bırakılmış olup vagonun dinamik davranışlarının RMS (root means square) değeri alınmıştır. Bu analizlerde tren parametreleri Bölüm 3'teki verilen Tablo 3.1'deki gibi ele alınırken, track ve köprüye ait parametreler ise Tablo 3.2'deki alınmıştır.

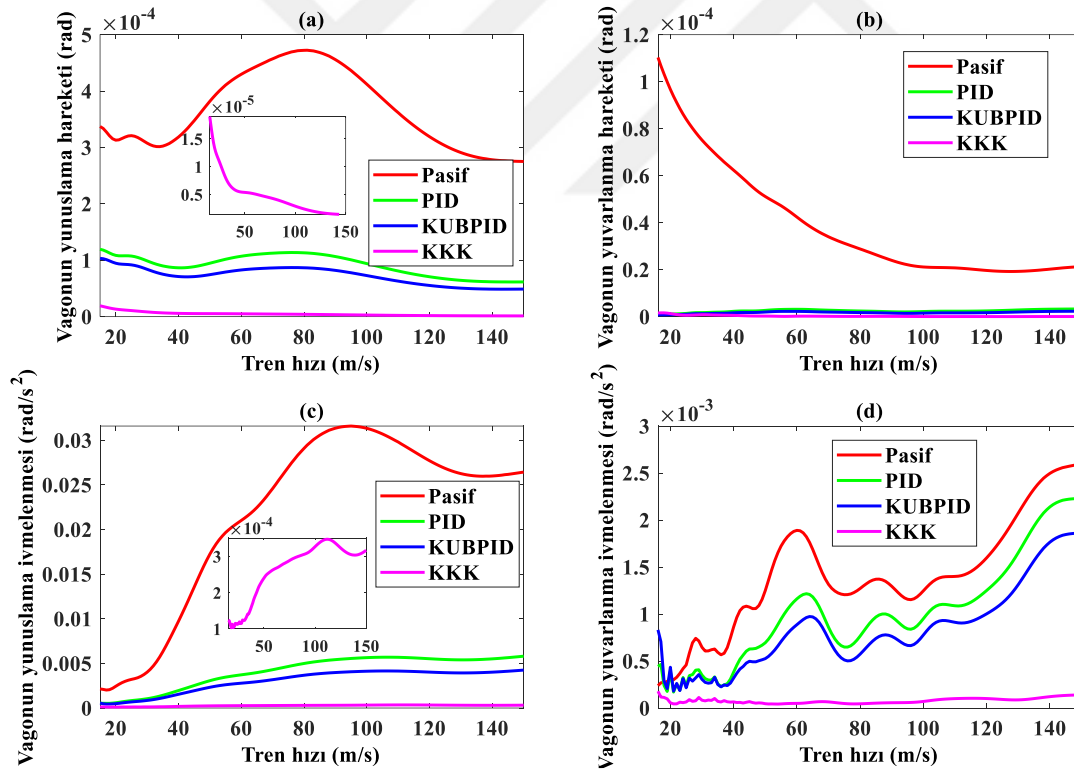


Şekil 6.13. Tren hızının vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 6.13'te değişken tren hızının vagonun dikey ve yanal dinamik cevaplarına olan etkisi incelenmiş olup pasif, PID, kendinden uyarlamalı bulanık mantık PID (KUBPID) ve KKK kullanılarak bu dinamik tepkilerin sönümlenmesi kıyaslanmıştır. Grafikte dikey ve yanal dinamik davranışlara bakıldığında yapay zekâ destekli kontrolcülerin üstün performans gösterdikleri görülmüştür. Örneğin Şekil 6.13'a incelendiğinde vagonun dikey yerdeğiştirmelerinin maksimum değeri pasif kontrolcü olması halinde 0.01 m olurken, PID kontrolcünde 0.003 m, KUBPID kontrolcünde 0.0025 m ve KKK olması halinde ise 0.00028 m olduğu görülmektedir. Burada vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmeleri tüm kontrolcülerde tren hızının ortalama 58 m/s'sinde meydana gelirken, KKK'de tren hızının 15 m/s olması halinde maksimum değerini almıştır. Yani yapay zekâ kontrolcülerini sayesinde PID ve KUBPID pasif kontrole göre RMS değerlerinde yaklaşık %75-80 oranında iyileşme sağlarken, bu değer KKK kontrolde yaklaşık %97 lere kadar çıkmaktadır. Şekil 6.13b'ye göre pasif kontrolde yanal yerdeğiştirmeler oldukça yüksek iken yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde vagonun yanal yerdeğiştirmeler oldukça sönümlenebildiği görülmektedir. Şekil 6.13c'de vagonun dikey ivmelenmeleri görülmektedir. Bu grafiğe göre yapay zekâ destekli algoritmalar sayesinde dikey ivmelenme değerleri minimuma indirilmesi mümkün hale gelmektedir. Şekil 6.13c incelendiğinde pasif kontrolcü bulunması halinde maksimum dikey ivmelenme değeri 0.31 m/s^2 iken, PID, KUBPID ve KKK olması halinde sırasıyla 0.56 m/s^2 , 0.044 m/s^2 ve 0.002 m/s^2 olduğu görülmektedir. Buradan görülmektedir ki aktif kontrolcüler ki özellikle KKK vagonun dikey ivmelenmesini ciddi oranda azaltmaktadır. Vagonun yanal ivmelenme değerleri ise Şekil 6.13d'de verilmiştir. Burada yanal ivmelenme değerleri tüm kontrolcülerde ve herhangi tren hızında hemen hemen benzer sonuçları verirken burada da KKK'nın sonuçları diğerlerine göre kısmen daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 6.13'ten anlaşılmaktadır ki vagonun maksimum dikey dinamik cevapları tren hızının yaklaşık 80 m/s olduğu zamanlarda meydana gelmektedir. Bu durum daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi tren-köprü sisteminin kritik hızlarından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu kritik hızlarda maksimum deplasman ve ivmelenme değerleri oluşmaktadır. Fakat bu hızlarda hareket eden trene yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler eklenmesi ile ciddi oranda azaltılabildiği anlaşılmaktadır.

Şekil 6.14'te 15 m/s'den 150 m/s'ye 1 m/s aralıklarla değişmesi durumunda vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketlerinin RMS değerleri verilmiştir. Bu grafikte de

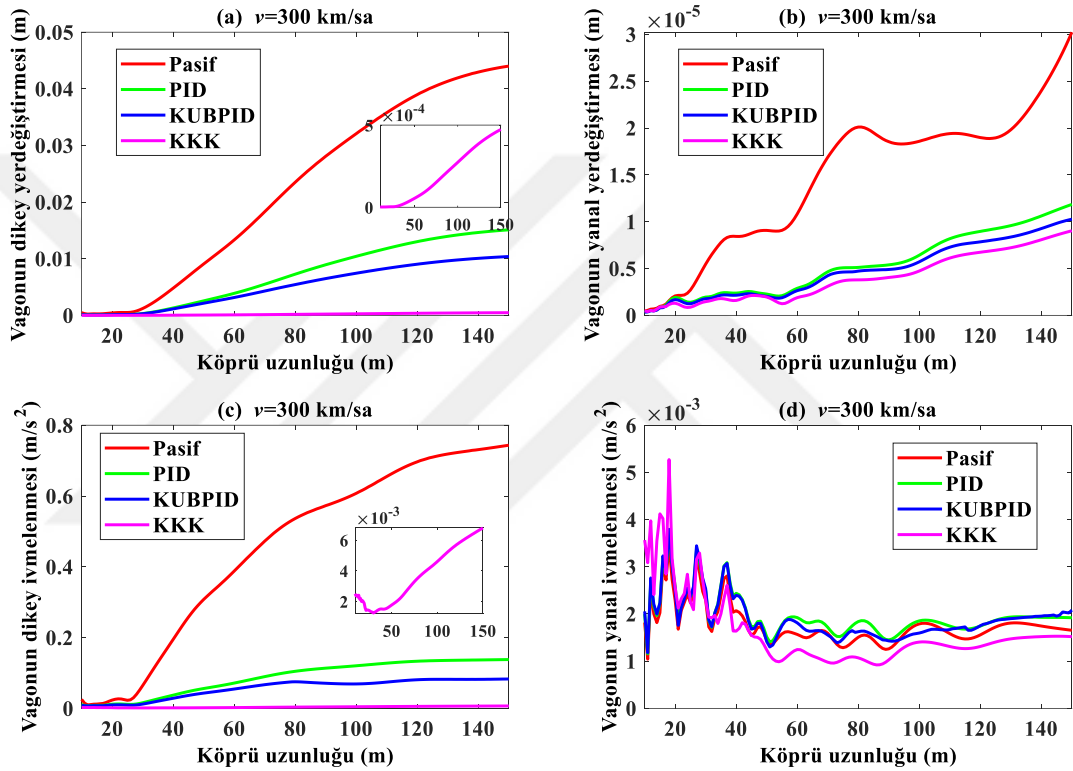
yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde dinamik cevapların maksimum değerleri oldukça azaltılabilmektedir. Örneğin tren hızının bir önceki grafikteki gibi ortalama 80 m/s olması halinde pasif kontrolde vagonun maksimum yunuslama hareketi 4.72×10^{-4} rad olurken aktif kontrolcülerin kullanılması halinde bu değer 1×10^{-4} rad'a kadar düşmektedir. KKK kullanılması durumunda ise vagonun yunuslama hareketi 0.15×10^{-4} rad olmaktadır. Benzer bir durum Şekil 6.14c'de vagonun yunuslama ivmelenmesi değerlerinde de görülmektedir. Şekil 6.14b vagonun değişken tren hızına göre maksimum yuvarlanma hareketinin RMS değerlerini göstermektedir. Bu grafiğe göre pasif durumda bir hayli fazla olan yuvarlanma hareketi değerleri aktif kontrolcüler sayesinde neredeyse tamamen sönmülenebilmektedir. Fakat Şekil 6.14d'ye göre vagonun yuvarlanma ivmelenme değerleri aktif kontrolcüler kullanıldığında tamamen sönmülemez ama pasif duruma göre oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca bu grafikte tren hızı arttıkça vagonun maksimum yuvarlanma ivmelenme değerlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 6.14. Tren hızının vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi.

6.4.3. Köprü uzunluğunun etkisi

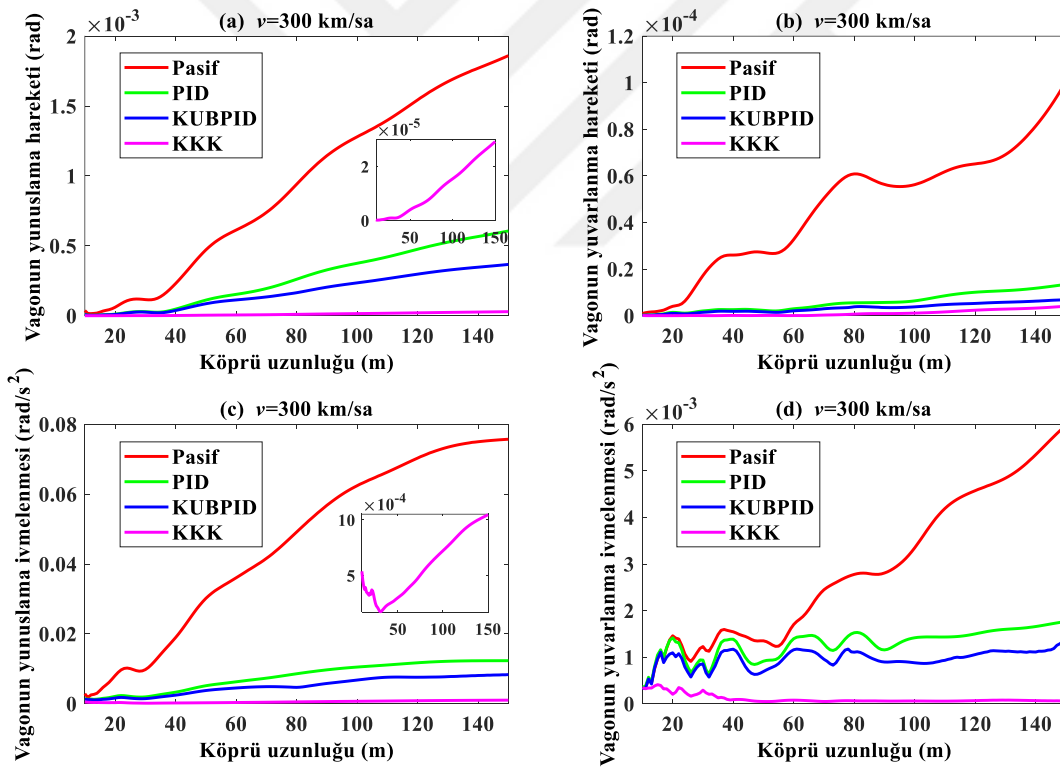
Bu bölümde 10 m ile 150 m arasında 1 m aralıklarla değişen köprü uzunluğu dikkate alınarak 4 farklı kontrolcünün vagonun dinamik cevapları üzerindeki etkisi incelenecektir. Burada her bir köprü uzunluğunda ayrı ayrı analizler yapılmış olup vagona etkiyen dinamik etkilerin RMS değerleri dikkate alınmıştır. Köprü uzunluğunun önemi önceki bölümlerde detaylıca anlatılmıştı. Yüksek hızlı trenlerin geçtiği köprülerin uzunluğu arttığı zaman köprü kirişinin titreşim davranışları değişmektedir. Bu durumda Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da görülmektedir.



Şekil 6.15. Köprü uzunluğunun vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun dikey yerdeğiştirmesi (b) Vagonun yanal yerdeğiştirmesi (c) Vagonun dikey ivmelenmesi (b) Vagonun yanal ivmelenmesi.

Şekil 6.15’te vagonun dikey ve yanal dinamik davranışları değişken köprü uzunluğu ve dört farklı kontrolcü olması durumuna göre incelendiğinde görülmektedir ki köprü uzunluğu arttıkça bu değerler artmaktadır. Fakat sadece vagonun yanal ivmelenme değerleri köprü uzunluğu arttıkça kısmen azalmaktadır. Kontrolcülerin performansları incelendiğinde en iyi kontrol KKK ile yapılmış olup daha sonra KUBPID ve PID kontrolcülerini pasife göre performanslı olmaktadır. Ayrıca grafikler dikkatli incelendiğinde köprü uzunluğunun 30 m ve daha kısa olması halinde tüm kontrolcülerin performansları hemen hemen aynı olduğu görülürken köprü uzunluğu

arttıkça özellikle pasif kontrolcü olması halinde vagonun dinamik yerdeğiştirmeleri oldukça artmaktadır. Örneğın Şekil 6.15a'ya göre köprü uzunluğu 80 m iken vagonun dikey yerdeğiştirme değeriinin RMS değeri pasif, PID, KUBPID ve KKK için sırasıyla 0.0235 m, 0.0073 m, 0.0054 m ve 0.00017 m olmakta iken, köprü uzunluğu 120 m olduğu zaman ise bu değeri sırasıyla 0.039 m, 0.013 m, 0.009 m ve 0.00035 m olmaktadır. Yani köprü uzunluğunun 80 m'de 120 m'ye çıkması halinde vagonun maksimum dikey yerdeğiştirme değeriinin RMS değeri neredeyse 2 katına çıkmaktadır. Benzer bir durum Şekil 6.15c'de vagonun dikey ivmelenme değeriinde de görölmektedir. Şekil 6.15b'de pasif kontrolde köprü uzunluğu arttıkça vagonun yanal yerdeğiştirmesi oldukça artmaktadır iken yapay zekâ destekli kontrolcülerin bulunması halinde bu değeri azaldığı görölmektedir. Şekil 6.15d'ye göre vagonun yanal ivmelenme değeri tüm kontrolcülerde hemen hemen aynı sonuçları verirken burada da KKK daha performanslı olmaktadır.



Şekil 6.16. Köprü uzunluğunun vagonun dinamik cevaplarına etkisinin incelenmesi ve yapay zekâ destekli kontrolcülerin performanslarının kıyaslanması (a) Vagonun yunuslama hareketi (b) Vagonun yuvarlanma hareketi (c) Vagonun yunuslama ivmelenmesi (d) Vagonun yuvarlanma ivmelenmesi.

Şekil 6.16'da vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketlerinin değışken köprü uzunluğuna göre RMS değeri verilmıştir. Bir önceki grafikte olduğu gibi bu grafikte de köprü uzunluğu arttıkça vagonun yunuslama ve yuvarlanma değeri oldukça

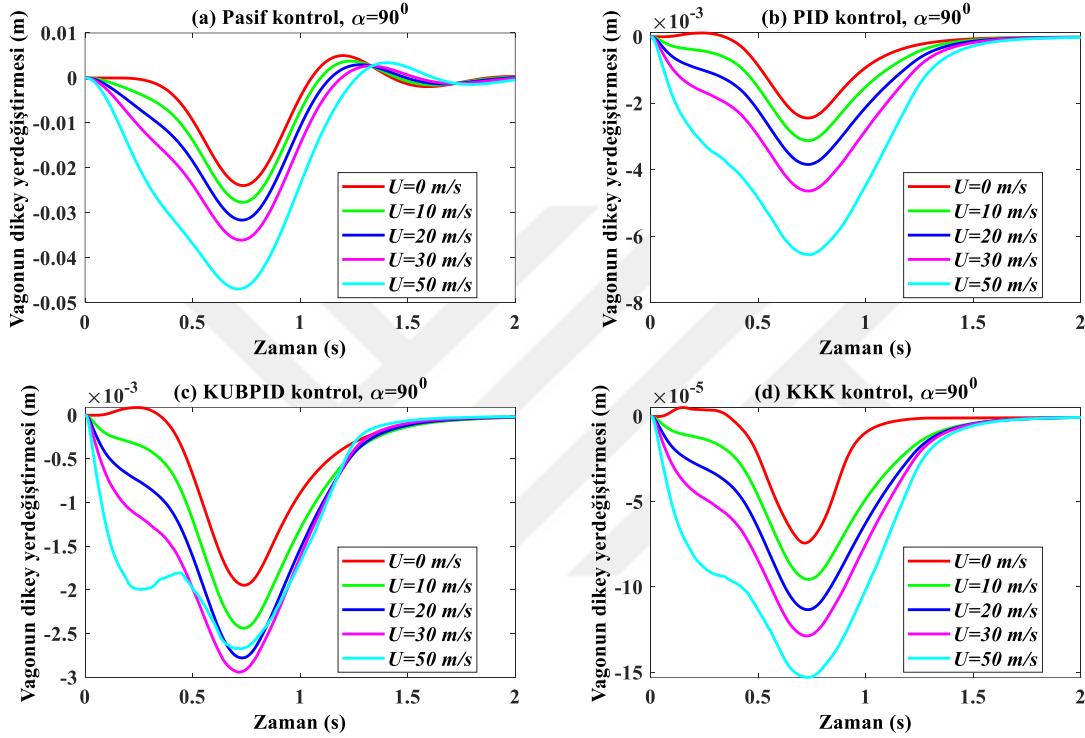
arttığı görülmektedir. Bu grafikte de görüldüğü gibi yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde maksimum değerler oldukça azalmaktadır. Örneğin Şekil 6.16a da köprü uzunluğu 100 m iken vagonun yunuslama hareketi 1.28×10^{-3} rad iken, PID kullanılması halinde %70 oranında iyileşerek 0.375×10^{-3} rad değerini, KUBPID kullanılması halinde %81 oranında iyileşerek 0.234×10^{-3} rad değerini ve KKK kullanılması halinde ise %98 oranında iyileşerek 0.0015×10^{-3} rad değerini almıştır. Bu minvalde pasif kontrole göre benzer iyileşmeler Şekil 6.16c’de vagonun yunuslama ivmelenmesinde de meydana gelmiştir. Şekil 6.16b’de pasif kontrol kullanılması halinde vagonun yuvarlanma hareketi köprü uzunluğunun artmasıyla birlikte ciddi oranda artarken, yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin kullanılması durumunda yuvarlanma hareketi oldukça sönümlenebilmektedir. Şekil 6.16d’de vagonun yuvarlanma ivmelenmesi grafiklerine göre KKK kontrolcünün diğer kontrolcülere göre üstün performansı görülmektedir ve ayrıca yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin kullanılması durumunda köprü uzunluğunun artmasıyla birlikte vagonun yuvarlanma ivmelenmesinin artmadığı görülmektedir.

6.4.4. Rüzgâr ve aktif kontrolcü sonuçları

Yüksek hızlı trenler köprü gibi esnek yapılar üzerinden geçerken çapraz rüzgâra maruz kalabilmektedirler. Bu durumda trene yanal yönde etki eden güçlü rüzgâr yükleri trenin sürüş dinamiklerini olumsuz etkilemektedir. trenlere etkileyen rüzgârlar genelde köprü veya viyadüklerden geçerken olmaktadır. Bu bölümde de köprü üzerinden geçen trene belirli bir hız ve açıda rüzgâr etki ettirilerek dinamik davranışlarının simülasyonları yapılmıştır. Ayrıca pasif, PID, KUBPID ve KKK kullanılarak bu dinamik davranışların sönümlenmesi amaçlanmıştır. Trene 5 farklı rüzgâr hızı ve rüzgâr açıları uygulanmıştır. Bunlar rüzgâr hızı olarak $U=0$ m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s ve 50 m/s ve rüzgâr açısı olarak da $\alpha=0^\circ$, 30° , 60° , 90° ve 120° dir.

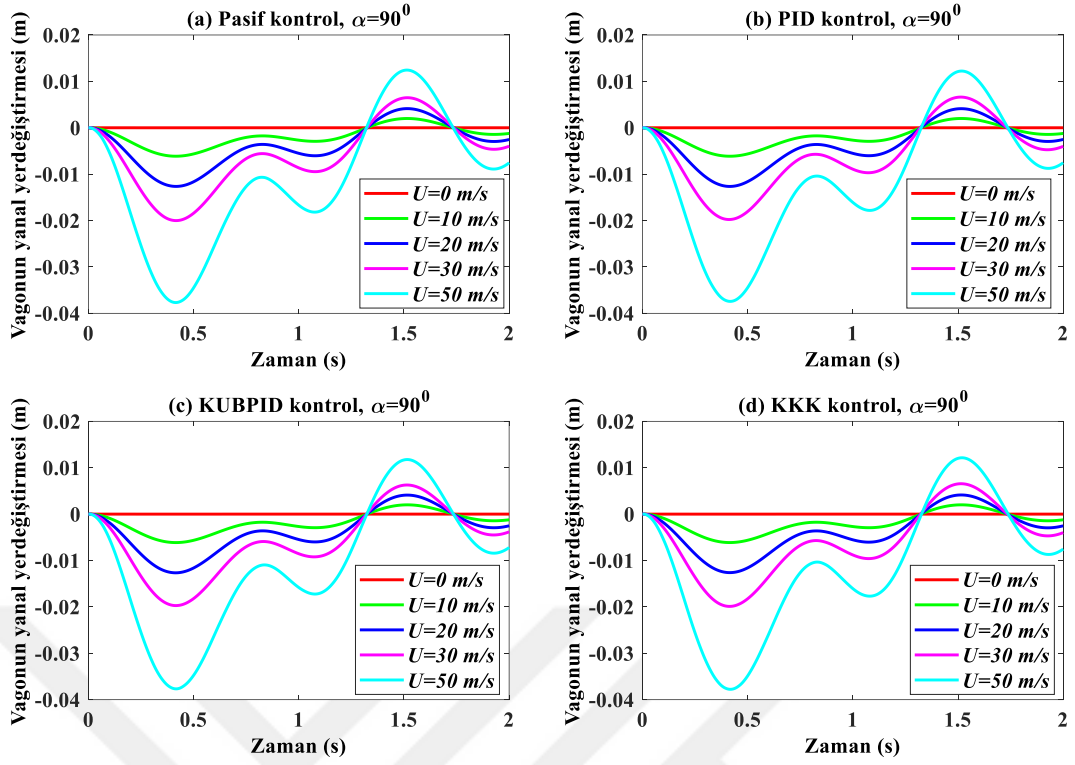
Şekil 6.17’de beş farklı rüzgâr hızına maruz $\alpha=90^\circ$ açıyla maruz kalan yüksek hızlı trenin vagonunun dikey yerdeğiştirmeleri dört farklı kontrolcü durumuna göre verilmiştir. Grafikler incelendiğinde rüzgâr hızı arttıkça dikey yerdeğiştirme değerleri de artmaktadır. Çünkü rüzgâr hızının artmasıyla birlikte ortalama bağıl hız da artmakta ve trene etkileyen aerodinamik kuvvetler artmaktadır. Örneğin Şekil 6.17a’daki grafik daha önce Şekil 5.50’de de verilmiştir. Fakat burada farklı kontrolcülerle birlikte kıyaslama yapılabilmesi amacıyla tekrar gösterilmiştir. Bu grafiğe göre rüzgâr hızı arttıkça pasif kontrolde trenin dikey yerdeğiştirmeleri %16 ile %97 arasında arttığı

görülmektedir. Şekil 6.17b’de PID kontrol uygulanması halinde ise rüzgâr hızı arttıkça trenin maksimum dikey yerdeğiştirmesi sırasıyla 2.45×10^{-3} m, 3.122×10^{-3} m, 3.84×10^{-3} m, 4.64×10^{-3} m ve 6.55×10^{-3} m olmaktadır. Yani PID kontrol kullanılarak trenin maksimum dikey yerdeğiştirmeleri tüm rüzgâr hızları da dikkate alındığında yaklaşık 7-8 kat azaltılırken, KUBPID kullanılması halinde ise 11-12 kat ve KKK kullanılması durumunda ise ortalama 300 kat iyileştiği görülmüştür. Yani KKK kontrol bu durumda diğer kontrolcülere göre oldukça gürbüz bir kontrol olduğunu göstermektedir.

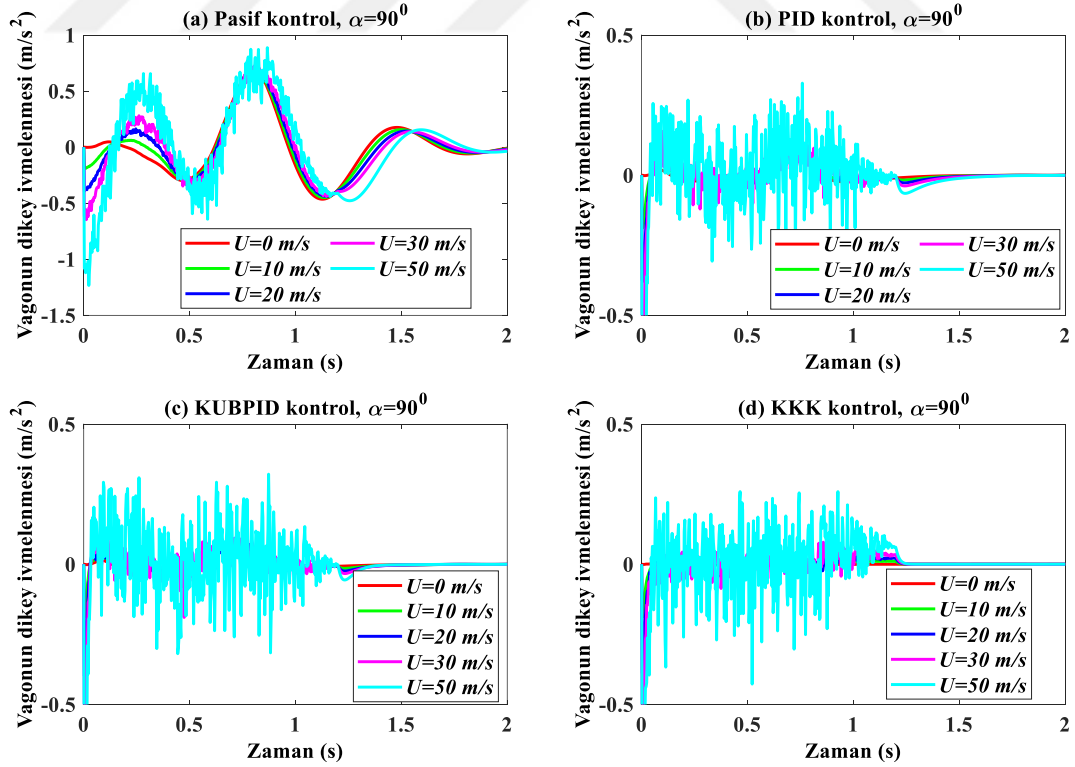


Şekil 6.17. Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Şekil 6.18’de vagonun yanal yöndeki yerdeğiştirme grafikleri beş farklı rüzgâr hızına göre ve dört farklı kontrolcü dikkate alınarak verilmiştir. Bu grafiğe göre rüzgâr hızı arttıkça maksimum yanal yerdeğiştirmelerinin arttığı görülmektedir fakat aktif kontrolcülerin kullanılmasıyla çok küçük farkların haricinde herhangi bir iyileşme olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise yüksek hızlı trenlerde bulunan yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin sadece dikey yönde bulunması ve kontrolcü girdilerinin sadece dikey yöndeki yerdeğiştirmeleri baz almasıdır.

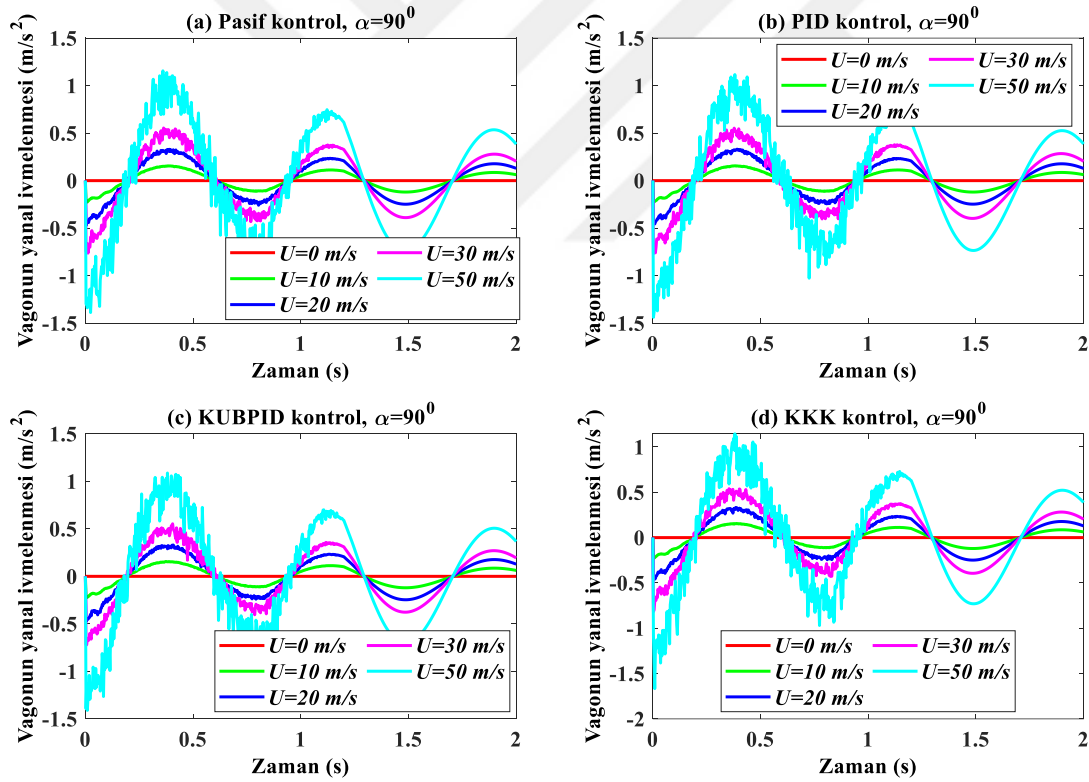


Şekil 6.18. Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.



Şekil 6.19. Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Rüzgâr hızının artmasıyla vagonun dikey yöndeki ivmelenme grafikleri de artmaktadır. Vagonun dikey yöndeki grafikleri yüksek hızlı trenlerin taşıdığı yolcuların konforu açısından önemli bir göstergedir. Örneğin Şekil 6.19a'daki pasif kontrol durumu incelendiğinde rüzgâr hızının artmasıyla birlikte France-SNCF standartlarına göre konforsuz ivmelenme değeri yer yer aşılıyor konforsuz bölgeye girmektedir. Ayrıca rüzgâr hızının artmasıyla birlikte zamanla değişen türbülanslı rüzgâr modelinden dolayı vagonun yerdeğiştirmeleri dalgalı olabilmektedir. Burada sağlıklı bir kıyaslama yapabilmek için bu grafiklerin her bir kontrolcü ve rüzgâr hızı için RMS değerleri verilmelidir. Şekil 6.19'da rüzgâr hızının artmasıyla birlikte vagonun dikey ivmelenmelerinin RMS değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Burada görülmektedir ki rüzgâr hızı düşük olduğu zamanda yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler dikey ivmelenmeleri yaklaşık 10 kat azaltırken, rüzgâr hızı arttıkça dikey ivmelenme değerlerinin azalma oranı 3'lere kadar düşmektedir.



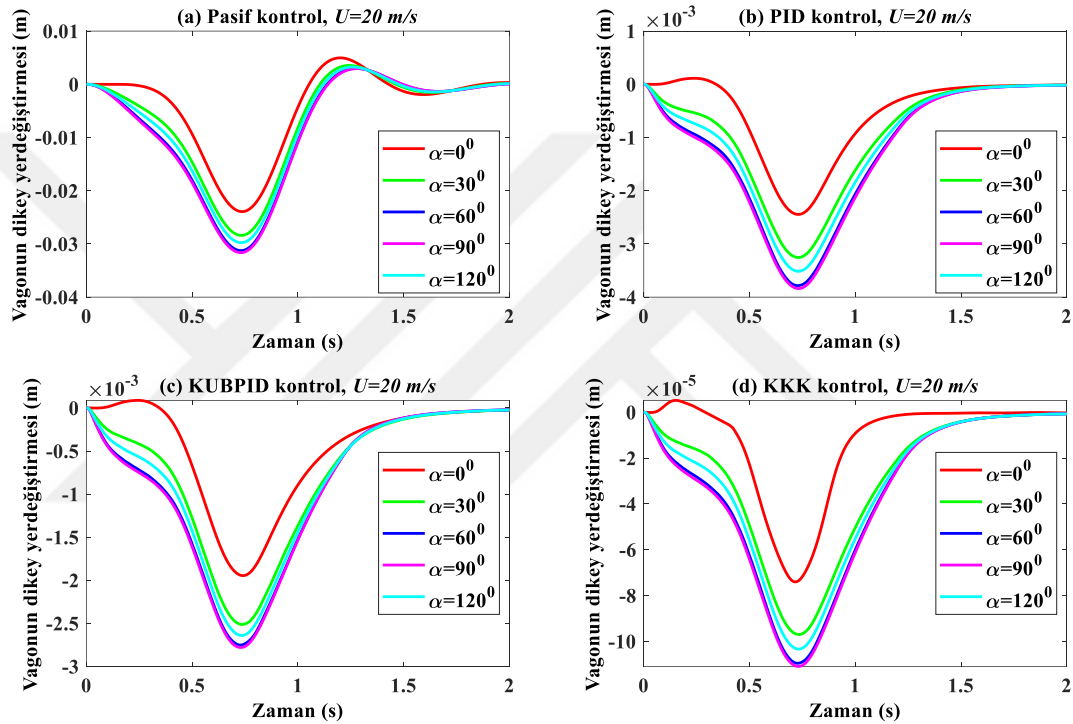
Şekil 6.20. Beş farklı rüzgâr hızının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Şekil 6.20 vagonun yanal ivmelenme grafiğini farklı rüzgâr hızı ve aktif kontrolcüler dikkate alınarak vermiştir. Bu grafik tıpkı vagonun yerdeğiştirme grafiği gibi

birbirlerine çok benzemektedir. Çünkü yanal yönde aktif kontrolcüler bulunmadığı için vagonun yanal yöndeki ivmelenmelerinin azaltılması beklenmemektedir.

Tablo 6.4. Rüzgâr hızının artmasıyla birlikte sırasıyla vagonun dikey ivmelenmelerinin RMS değerleri.

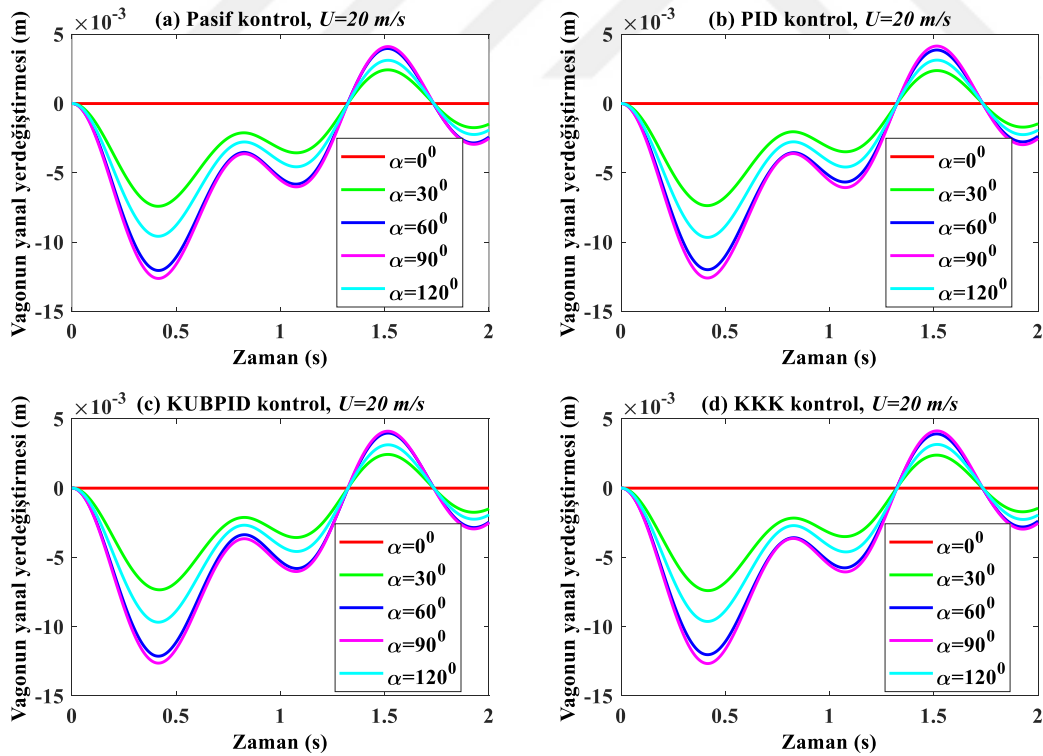
	$U=0$ m/s	$U=10$ m/s	$U=20$ m/s	$U=30$ m/s	$U=50$ m/s
Pasif	0.2137	0.2146	0.2188	0.2353	0.3112
PID	0.0236	0.0269	0.0365	0.0536	0.1059
KUBPID	0.0176	0.021	0.0308	0.0454	0.1013
KKK	0.0011	0.0127	0.0267	0.0453	0.1030



Şekil 6.21. Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Şekil 6.21 yüksek hızlı trene etki eden ve hızı sabit $U=20$ m/s olan çapraz rüzgârın beş farklı açıda olması durumu dikkate alınarak ve dört farklı kontrolcüye göre analizlerini göstermektedir. Burada açının $\alpha=90^\circ$ olması rüzgârın trene dik bir şekilde uygulandığı anlamına gelirken, $\alpha=0^\circ$ olması ise rüzgârın trenin hareket doğrultusunda ve trene doğru uygulandığı anlamına gelmektedir. Grafikler incelendiğinde rüzgâr açısı arttıkça vagonun dikey yöndeki yerdeğiştirmeleri artmaktadır. Fakat rüzgâr açısı $\alpha=120^\circ$ olması durumunda dikey yerdeğiştirmeleri bir miktar azalmaktadır. Çünkü rüzgâr açısı $\alpha=90^\circ$ 'yi geçmesi durumunda rüzgârın bir bileşeninin trenin hareket doğrultusu ile aynı yönde olduğundan dolayı etkisi bir miktar azalmaktadır. Şekil 6.21a

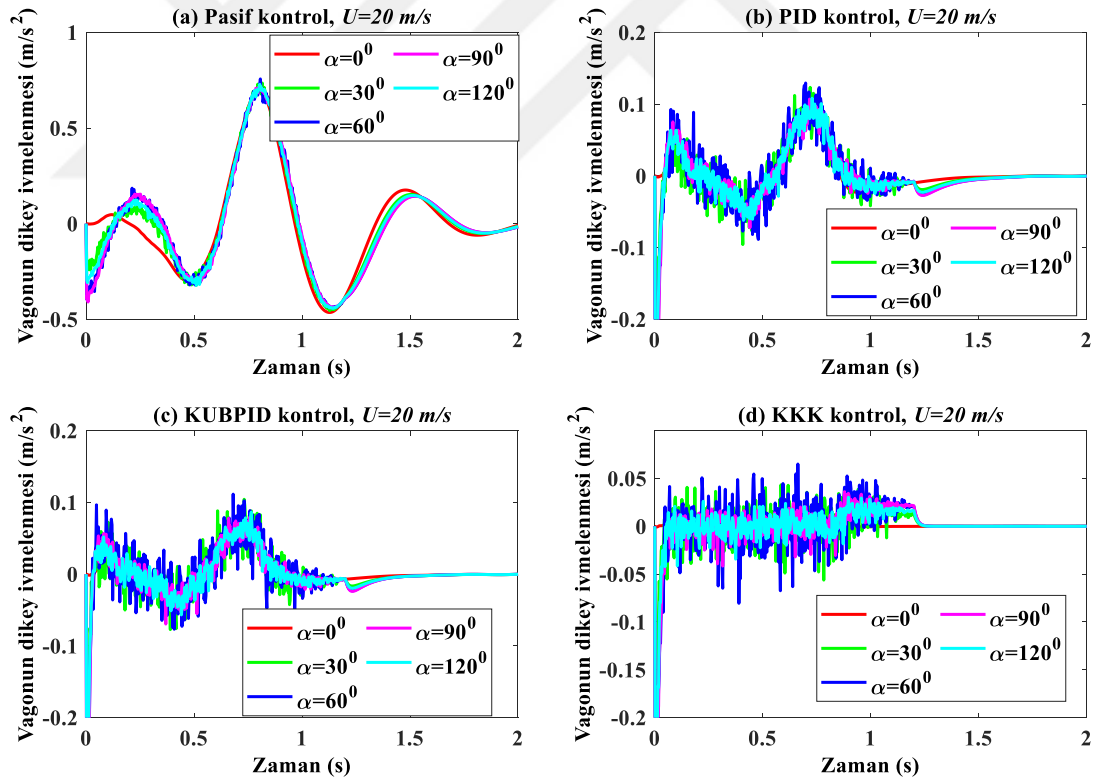
incelendiğinde vagonun maksimum yerdeğiştirmesi rüzgâr açısının artmasına göre sırasıyla 0.0239 m, 0.0285 m, 0.0312 m, 0.0316 m ve 0.0297 m olmaktadır. Şekil 6.21b’de ise PID kontrol uygulanması halinde vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi sırasıyla 0.00244 m, 0.00325 m, 0.00375 m, 0.00384 m ve 0.00351 m olmaktadır. Şekil 6.21c’de KUBPID kontrol uygulanması durumunda rüzgâr açısının artmasıyla vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi sırasıyla 0.00195m, 0.00251m, 0.00275 m, 0.00278 m ve 0.00264 m olmaktadır. Şekil 6.21d ise KKK uygulanan durum gösterilmiştir. Bu grafiğe göre rüzgâr açısının artmasıyla birlikte vagonun maksimum dikey yerdeğiştirmesi sırasıyla 0.000074 m, 0.000097 m, 0.000109 m, 0.000111 m ve 0.000103 m olmaktadır. Yani sonuç olarak rüzgâr açısı $\alpha=0^\circ$ ’den $\alpha=30^\circ$ ’ye çıkması durumunda vagonun maksimum yerdeğiştirme değeri yaklaşık %30 oranında artmaktayken, $\alpha=60^\circ$ ’ye çıkması durumunda yaklaşık %47, $\alpha=90^\circ$ ’ye çıkması durumunda yaklaşık %50 ve 120° ’ye çıkması durumunda yaklaşık %40 arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin kullanılması halinde pasif kontrole göre PID kontrolcü yaklaşık 8 kat daha iyi sonuç verirken KUBPID kontrolcü 12 kat, KKK ise yaklaşık 300 kat daha iyi sonuçlar verdiği de görülmektedir.



Şekil 6.22. Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal yerdeğiştirmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Şekil 6.22 yüksek hızlı trene beş farklı rüzgâr açısının uygulanması durumunda vagonun yanal yerdeğiştirmeleri üzerine etkisi incelemiştir. Bu grafikte de yanal yerdeğiştirmeleri rüzgâr açısının $\alpha=90^\circ$ olana kadar arttığı gözlemlenmekte ve $\alpha=120^\circ$ olduğunda ise vagonun yanal yerdeğiştirmeleri azalmaktadır. Aktif kontrolcülerin vagonun yanal yerdeğiştirmeleri azaltmadaki etkisi incelendiğinde ise bir önceki grafiklerdeki gibi yanal yönde herhangi bir iyileşme olmadığını göstermektedir.

Şekil 6.23 yüksek hızlı trenin köprü geçişi sırasında beş farklı açıda rüzgâra maruz kalması durumunda vagonun dikey ivmelenme grafiklerini dört farklı kontrolcü dikkate alınarak vermektedir. Bu analizde bir önceki analizlerde olduğu gibi rüzgâr hızı sabit $U=20$ m/s olmaktadır. Bu grafikler incelendiğinde genel olarak rüzgâr açısı arttıkça vagonun dikey ivmelenmesinin RMS değerleri artmaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler kullanılması durumunda da vagonun dikey ivmelenme değerlerini oldukça azaltılabildiği görülmektedir. Verilen bu grafiklerin RMS değerleri Tablo 6.5’te verilmiştir.



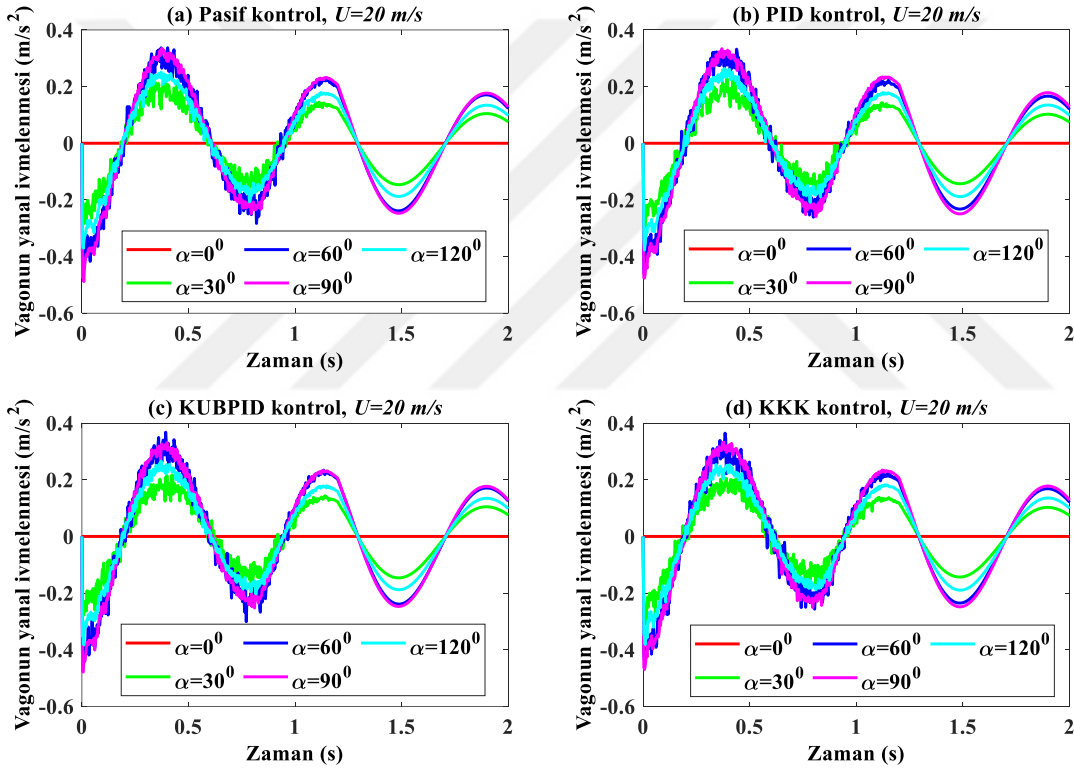
Şekil 6.23. Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun dikey ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

Şekil 6.24’te verilen vagonun yanal ivmelenme grafiklerine göre rüzgâr açısı yanal ivmelenmeleri oldukça etkilemekteyken, aktif kontrolcülerin buraya herhangi bir

katkısının bulunmadığı anlaşılmaktadır. Yanal ivmelenmeler rüzgâr açısının $\alpha=90^\circ$ olana kadar artması durumu burada da gözlemlenmektedir. Fakat ayrı bir husus şu ki, rüzgâr açısı $\alpha=60^\circ$ olduğunda yanal ivmelenme değerlerinin dalgalı bir grafik sergilediği de görülmektedir.

Tablo 6.5. Farklı kontrolcülerin uygulanması durumunda vagonun dikey ivmelenme değerlerinin RMS değeri.

	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=90^\circ$	$\alpha=120^\circ$
Pasif	0.2137 m/s ²	0.2139 m/s ²	0.2187 m/s ²	0.2195 m/s ²	0.2157 m/s ²
PID	0.0236 m/s ²	0.0302 m/s ²	0.0371 m/s ²	0.0368 m/s ²	0.032 m/s ²
KUBPID	0.0176 m/s ²	0.0248 m/s ²	0.0323 m/s ²	0.0306 m/s ²	0.0261 m/s ²
KKK	0.0011 m/s ²	0.019 m/s ²	0.028 m/s ²	0.027 m/s ²	0.021 m/s ²



Şekil 6.24. Beş farklı rüzgâr açısının ve yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin vagonun yanal ivmelenmesine olan etkisi (a) Pasif kontrol (b) PID kontrol (c) KUBPID kontrol (d) KKK kontrol.

7. SONUÇLAR, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması yüksek hızlı trenlerin köprü ve viyadük gibi esnek zemin geçişleri ve güçlü çapraz rüzgârların sebep olacağı titreşimlerin yapay zekâ destekli aktif kontrolörler kullanılarak azaltılmasını amaçlamıştır. Bu kapsamda esnek zemin modelleri olarak köprü ele alınmış olup bu çalışmada köprü Euler-Bernoulli kiriş teoremine göre modellenmiştir. Trene etkiyen rüzgâr ise ayrık rüzgâr modeli ve türbülanslı rüzgâr modelinin bir bileşeni olmak üzere modellenmiştir. Ve en önemlisi ise çalışma da kullanılan yüksek hızlı tren modelinin geliştirilmesidir. Bundan dolayı literatürdeki tüm modeller incelenmiş olup trenin tüm parametrelerinin cevabını verebilecek olan 31 serbestlik dereceli tam tren modeli tercih edilmiştir. Bu durumda bir trende bulunan vagon, boji ve tekersetlerinin her birinin dikey ve yanal yöndeki hareketlerini tayin edebilmenin yanı sıra bu eksenler etrafındaki dönme hareketleri de incelenebilmektedir. Bu tez çalışması sadece yüksek hızlı treni tam olarak modellemekle kalmayıp tren ile köprü arasında bulunan travers ve balasttan oluşan track yapısını da modelleyerek gerçeğe oldukça yakın bir çalışmayı gerçekleştirmiştir. Sonuç itibariye bu çalışma aslında bir tren-track-köprü etkileşim modeli olarak geniş kapsamda ele alınmış bir modelden oluşmaktadır. çalışmada köprü ve ray kiriş olarak modellenmiş olup bu köprü kirişinin ilk dört titreşim modu dikkate alınmıştır. Sonuç olarak tüm model toplamda 63 serbestlik derecesine sahiptir ve her birinin ayrı ayrı ikinci dereceden diferansiyel denklemi Lagrange yöntemi ile elde edilmiştir. Yüksek hızlı trenin dinamik cevaplarını tayin edebilmek amacıyla bu denklemler 126 adet birinci dereceden denkleme durum-uzay yöntemi sayesinde indirgenmiştir. Daha sonra bu denklemler Matlab yazılımı sayesinde dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir ve kullanılan bu yöntemi doğruluğu literatür ile kıyaslanıp doğrulanmıştır. Ayrıca yüksek hızlı trene, track yapısına ve köprüye ait parametreler literatürden elde edilmiş olup bu çalışma da kullanılmıştır. Parametreleri ayrı ayrı değiştirilebilen bu Matlab simülasyon programında trenin hızı, trenin geçtiği köprünün uzunluğu ve parametreleri, track yapısının parametreleri ve track yapısının etkisi, tren kütlesi, çoklu vagon geçişleri gibi birçok durum detaylıca incelenebilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında vagon ile boji arasında bulunan ve

dikey yönde kuvvet uygulayabilen eyleyiciler sayesinde yüksek hızlı treni olumsuz etkileyebilecek titreşimlerin azaltılabilmesi de sağlanmaktadır. Vagon ile boji arasında dört adet bulunan bu eyleyiciler yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler ile kontrol edilebilmektedir. Bu kontrolcüler ise literatürde genel olarak tercih edilen PID kontrol, Bulanık mantık ve Kayan kipli kontroldür. Bu kontrolcüler sistemin ihtiyacı olan dikey kuvveti tayin ederek sisteme uygulama görevi üstlenirler. Sonuç itibariyle bu tez çalışmasında geniş kapsamlı bir analiz sonuçları sunulmuştur ve bunlar genel itibariyle aşağıda madde madde verilmiştir.

- Öncelikle bu çalışmada sunulan çözüm yönteminin doğruluğunu ispatlamak amacıyla literatürde daha önce çalışılmış olan 2 serbestlik dereceli ve 4 serbestlik dereceli model oluşturulup birebir aynı parametreler kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırılarak çalışma doğrulanmıştır.
- Bu çalışmanın başlıca konularından biri olan ve esnek zemin olarak adlandırılan köprüler kiriş olarak modellenmiş olup bu kirişlerin ilk dört titreşim modunun yeterli olduğu gösterilmiştir.
- Çalışmanın zaman alanında çözümlenmesinde kullanılan çözüm adımının $\Delta t=10^{-2}$ s olmasının yeterlidir. Eğer çözüme adımının $\Delta t=10^{-3}$ s alınırsa elde sonuçlar sadece %0.3 oranında değişirken analiz süresini %1129 artırmaktadır. Çözme adımı $\Delta t=10^{-1}$ s alındığında ise sonuçlar %5 oranında değişirken analiz süresi sadece %18 oranında iyileşmektedir. Dolayısıyla çözüm süresi ve sonuçların daha hassas olması amacıyla seçilen çözüm adımının $\Delta t=10^{-2}$ s olması uygun ve yeterlidir.
- Tren hızının sabit $v=300$ km/sa olması dikkate alınarak tracksız yapılan analiz sonuçlarında vagonun ve bojilerin dikey ve yanal yerdeğiştirmeleri ile ivmelenmeleri zamana göre verilmiş olup dikey ivmelenme sonuçlarına göre konforsuz ivme değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Tren hızının $v=300$ km/sa ve köprü uzunluğunun $L=50$ m olması durumunda sağ ve sol köprü kirişlerinin orta noktasının yerdeğiştirme grafikleri kiriş parametrelerinin birbirlerinden farklı olmasından dolayı vagonun yunuslama ve yuvarlanma hareketlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Vagon kütlelerinin değişken olması durumuna göre yüksek hızlı trene etki eden dinamik cevaplar da incelenmiştir. Vagon kütlelerinin artması vagonun dikey yerdeğiştirmesini artırırken yanal yerdeğiştirmesini azalttığı görülmekteyken, dikey ve yanal ivmelenmeler artmaktadır.

- Tren hızının önemli ölçüde belirleyici bir faktör olduğu görülmektedir. Nitekim bazı tren hızlarında trenin maksimum dinamik yerdeğiştirme ve ivmelenmelerinin olduğu belirlenmiştir. Bunun başlıca sebebi ise tren hızının tren-köprü sisteminin kritik hızlarına denk gelmesidir. Çünkü, bu kritik hızlarda hareket eden tren köprüyü maksimum genliklerle titreşmeye zorlamaktadır. Ayrıca kritik hızlarda hareket eden trenden dolayı France-SNCF standartlarına göre yolcuları olumsuz etkileyecek ivmelenme değerlerinin meydana geldiği de görülmektedir.
- Yüksek hızlı trenlerin geçtiği köprünün sönüm oranı arttıkça köprü kirişinin maksimum yerdeğiştirmeleri azalmaktadır ve dolayısıyla trene etki dinamik etkilerde %10 ile %20 arasında iyileşmektedir.
- Demiryolu köprülerinin uzunluğu köprünün titreşim frekanslarını doğrudan etkilediğinden dolayı köprü uzunluğu arttıkça köprü ortasının yerdeğiştirmesi artmakta ve dolayısıyla trenin dinamik yerdeğiştirmeleri artmaktadır. Ayrıca köprü uzunluğunun artması tren-köprü sisteminin kritik hızlarını azaltmaktadır daha düşük tren hızlarında maksimum titreşim genlikleri meydana gelmektedir.
- Yüksek hızlı trenlerin köprü geçişi esnasında vagona ve bojilere etkiyen temas kuvvetleri köprü uzunluğunun artmasıyla birlikte artmaktadır.

Buraya kadar yapılan analizlerde track yapısı ihmal edilmiş ve nitekim tren-köprü analizi gerçekleştirilmiş oldu ve sonuçları verilmiştir. Tren-track-köprü modeli ile tren-köprü modelinin kıyaslanması sonuçları da aşağıda verilmiştir.

- Demiryolu hatlarında balast yapısının bulunması durumu yani tracklı model olması halinde vagonun dikey yöndeki tepkileri %4-6 arasında iyileşmekteyken, vagonun yanal yöndeki yerdeğiştirmesi %42 oranında iyileşmektedir.
- Vagonun yunuslama hareketi kısmen iyileşirken, yuvarlanma hareketleri track sayesinde yarı yarıya azalmıştır.
- Ayrıca tracklı yapı köprü titreşimlerini %28 oranında azaltmaktadır.
- Tracksız modelde tren köprüden çıktığında sisteme etkiyen bozucu bir yol girdisi olmadığından dolayı tren titreşimleri sıfırlanırken, tracklı model olması halinde tren köprüden çıktığında hala dikey yönde az da olsa titreşimlerin devam ettiği görülmüştür.

- Kısa köprü açıklıklarının bulunması halinde tracklı model ile tracksız modelin sonuçları birbirlerine oldukça yakinken, uzun aralıklı köprülerde track bulunması halinde dikey ve yanal yerdeğiştirmeler oldukça azalmaktadır.
- Track altyapısında bulunan elastik pedin ve balastın rijitlik katsayısı da dinamik davranışları oldukça etkilemektedir. Elastik pedin rijitlik katsayısı arttıkça vagonun dikey ve yanal yerdeğiştirmeleri azalmaktayken, balastın rijitlik katsayısı arttıkça bu değerler nispeten artmaktadır.
- Köprüden birden fazla vagon geçmesi halinde her bir vagonun dinamik cevapları birbirinden farklı olmaktadır. Bu tez çalışmasında verilen tren ve köprü parametrelerinin dikkate alındığında köprüden 4 veya 8 vagon geçmesi durumunda köprü ortasının yer değiştirmesinin minimum olduğu belirlenmiştir.
- Yüksek hızlı trenin köprü geçişi esnasında rüzgâra maruz kalması durumunda trene etkileyen dinamik etkiler rüzgâr hızının ve rüzgârın trenin yan yüzeyine etki eden açısının artmasıyla birlikte artmaktadır.
- Yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin kullanılması yüksek hızlı tren vagonunun dikey ve yanal yöndeki titreşimlerini önemli ölçüde azalmaktadır.
- Vagonun hafif veya ağır olması durumunda da uygulanan PID, KUBPID ve KKK vagonun yerdeğiştirme ve ivmelenme değerlerini France-SNCF standartlarına göre konforlu düzeye indirebilmektedir.
- Sabit hızda $v=300$ km/sa hareket eden trenin dinamik davranışlarının azaltılmasında en üstün performansları gösteren kontrolcüler sırasıyla KKK, KUBPID, PID kontrolüdür.
- Kritik hızda hareket eden trenlerde maksimum dinamik yerdeğiştirmeler meydana gelirken, yapay zekâ destekli aktif kontrolcülerin kullanılması durumunda bu değerler oldukça azaltılabilmektedir.
- Tren kritik hızlarda hareket etse bile aktif kontrolcüler sayesinde pasif kontrole göre PID ve KUBPID kullanılması durumunda ortalama %75-80 iyileşme meydana gelirken, KKK kullanılması durumunda yaklaşık %97 oranında iyileşme sağlamıştır.
- Aktif kontrolcüler köprü uzunluğunun artması durumunda bile en optimum kontrolü sağlayabilmektedir. Köprü uzunluğunun artmasıyla trenin dikey ivmelenme

değerleri yolcuları rahatsız edecek seviyeye ulaşırken, yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde bu değerler konforlu bölgelerde kalabilmektedir.

- Yüksek hızlı trenin köprü geçişlerinde çapraz rüzgâra maruz kalması durumunda vagonun dikey hareketleri rüzgâr hızının artmasıyla birlikte artarken, aktif kontrolcüler sayesinde bu değerler PID kontrolde 7 kat, KUBPID kontrolde 12 kat ve KKK kullanılması durumunda yaklaşık 300 kat daha azaltılmaktadır. Fakat yanıl yöndeki yerdeğıştirmeler bu yönde kuvvet uygulayabilen aktüatörler bulunmadığından dolayı azaltılamamıştır.
- Rüzgâr hızının artmasıyla dikey ivmelenme değerlerini oldukça dalgalı hale gelmektedir.
- Rüzgâr açısının artmasıyla dikey ve yanıl dinamik davranışlarda artmaktadır. Maksimum dinamik yerdeğıştirme rüzgâr açısının trene $\alpha=90^\circ$ olması durumunda meydana gelmiştir. Rüzgâr açısının $\alpha=90^\circ$ 'yi geçmesi halinde dinamik etkileri azalmaktadır. çünkü bu durumda rüzgârın bir bileşeni trenin hareket doğrultusunda olduğundan bağıl etkisi azalmaktadır.
- Ayrıca yapay zekâ destekli aktif kontrolcüler sayesinde değışken açılarda gelen rüzgârın etkileri de ciddi oranda azaltılabilmektedir.

Bu tez çalışması sonucunda gerçeğe çok yakın olarak modellenen tren-track-köprü etkileşim sisteminin simülasyon yazılımı yapılmıştır. Simülasyon yazılımı sayesinde 3 ayrı alt sistemin parametrelerinin her biri ayrı ayrı değıerlendirilerek kapsamlı bir analiz yapılması mümkün hale gelmiştir. Yüksek hızlı trenlerin yolcu konforu ve sürüş güvenliğinin gerçek, deneysel ve pahalı bir yöntem uygulanarak belirlenmesine gerek kalmadan hassas bir şekilde kısa sürede bu bilgisayar simülasyon yazılımı kullanılarak tespit edilebilmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında köprü iki farklı kiriş olarak modellenmiş ve tren parçaları rijit olarak kabul edilmiştir. Eğer gerçek bir sistemi tamamen modellemek gerekirse köprü bir plaka olarak modellenip titreşimleri ona göre hesap edilebilir ve ayrıca vagon, bojiler gibi parçalar rijit cisim yerine esneyen ve kendine özgü titreşim frekansları dikkate alınarak daha detaylı bir çalışma gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Xia H, Zhang N, Guo W. Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54871-4>.
- [2] Sayeed MA, Shahin MA. Three-dimensional numerical modelling of ballasted railway track foundations for high-speed trains with special reference to critical speed. *Transp Geotech* 2016;6:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.01.003>.
- [3] Wanming Z, Zhenxing H, Xiaolin S. Prediction of high-speed train induced ground vibration based on train-track-ground system model. *Earthq Eng Eng Vib* 2010;9:545–54. <https://doi.org/10.1007/s11803-010-0036-y>.
- [4] Xu L, Zhai W. Stochastic analysis model for vehicle-track coupled systems subject to earthquakes and track random irregularities. *J Sound Vib* 2017;407:209–25. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.06.030>.
- [5] Bian X, Jiang H, Chang C, Hu J, Chen Y. Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities. *Soil Dyn Earthq Eng* 2015;76:29–43. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.02.009>.
- [6] Xia H, Guo WW, Zhang N, Sun GJ. Dynamic analysis of a train-bridge system under wind action. *Comput Struct* 2008;86:1845–55. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2008.04.007>.
- [7] Zhang T, Guo WW, Du F. Effect of windproof barrier on aerodynamic performance of vehicle-bridge system. *Procedia Eng* 2017;199:3083–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.426>.
- [8] Mohebbi M, Rezvani MA. Analysis of the effects of lateral wind on a high speed train on a double routed railway track with porous shelters. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2019;184:116–27. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.11.011>.
- [9] Yang YB, Wu YS. Dynamic stability of trains moving over bridges shaken by earthquakes. *J Sound Vib* 2002;258:65–94. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5089>.
- [10] Ju SH, Hung SJ. Derailment of a train moving on bridge during earthquake considering soil liquefaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 2019;123:185–92. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.04.019>.
- [11] Koloušek V, McLean RF FJ. Dynamics in engineering structures. London: Butterworths; 1973.
- [12] Yang YB, Yau JD, Wu YS. Vehicle–Bridge Interaction Dynamics: with Applications to High-Speed Railways. 2004. <https://doi.org/10.1142/5541>.
- [13] Frýba L. Vibration of Solids and Structures under Moving Loads. Thomas Telford House 1999. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-9685-7>.

- [14] Wu J, Dai C. Dynamic Responses of Multispan Nonuniform Beam Due to Moving Loads. *J Struct Eng* 1987;113:458–74. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1987\)113:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1987)113:3(458)).
- [15] Dugush YA, Eisenberger M. Vibrations of non-uniform continuous beams under moving loads. *J Sound Vib* 2002;254:911–26. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4135>.
- [16] Timoshenko S. On the forced vibration of bridges. *Philos Mag Ser* 1921;80. <https://doi.org/10.1080/14786442208633953>.
- [17] Stanišić MM, Hardin JC. On the response of beams to an arbitrary number of concentrated moving masses. *J Franklin Inst* 1969;287:115–23. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(69\)90120-3](https://doi.org/10.1016/0016-0032(69)90120-3).
- [18] Ting EC, Genin J, Ginsberg JH. A general algorithm for moving mass problems. *J Sound Vib* 1974;33:49–58. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(74\)80072-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80072-6).
- [19] Akin JE, Mofid M. Numerical Solution for Response of Beams with Moving Mass. *Manager* 1989;115:1–2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:1\(120\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:1(120)).
- [20] Biggs JM. *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw- Hill 1964.
- [21] Wen RK. Dynamic response of beams traversed by two-axle loads. *J Eng Mech Div* 1960;86.
- [22] Yang YB, Wu YS. A versatile element for analyzing vehicle-bridge interaction response. *Eng Struct* 2001;23:452–69. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00065-1).
- [23] Mizrak C, Esen I. Determining Effects of Wagon Mass and Vehicle Velocity on Vertical Vibrations of a Rail Vehicle Moving with a Constant Acceleration on a Bridge Using Experimental and Numerical Methods. *Shock Vib* 2015;2015. <https://doi.org/10.1155/2015/183450>.
- [24] Metin M, Güçlü R. Vibrations control of light rail transportation vehicle via PID type fuzzy controller using parameters adaptive method. *Turkish J Electr Eng Comput Sci* 2011;19:807–16. <https://doi.org/10.3906/elk-1001-394>.
- [25] Wang L, Zhu Z, Bai Y, Li Q, Costa PA, Yu Z. A fast random method for three-dimensional analysis of train-track-soil dynamic interaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;115:252–62. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.021>.
- [26] Yu C, Xiang J, Mao J, Gong K, He S. Influence of slab arch imperfection of double-block ballastless track system on vibration response of high-speed train. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2018;40:1–14. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-0972-4>.
- [27] Zhu Q, Li L, Chen CJ, Liu CZ, Hu G Di. A Low-Cost Lateral Active Suspension System of the High-Speed Train for Ride Quality Based on the Resonant Control Method. *IEEE Trans Ind Electron* 2018;65:4187–96. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2767547>.
- [28] Zhang Z, Zhang Y, Lin J, Zhao Y, Howson WP, Williams FW. Random vibration of a train traversing a bridge subjected to traveling seismic waves. *Eng Struct* 2011;33:3546–58. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.018>.

- [29] Jiang L, Liu X, Xiang P, Zhou W. Train-bridge system dynamics analysis with uncertain parameters based on new point estimate method. *Eng Struct* 2019;199:109454. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109454>.
- [30] Bhatti MH. Vertical and lateral dynamic response of railway bridges due to nonlinear vehicles and track irregularities. *Chicago Illinois Inst Technol* 1982;130:556.
- [31] Green MF, Cebon D. Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle loads: Theory and experimental validation. *J Sound Vib* 1994;170:51–78. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1046>.
- [32] Yang YB, Lin BH. Vehicle-Bridge Interaction Analysis by Dynamic Condensation Method. *J Struct Eng* 1995;121:1636–43. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1995\)121:11\(1636\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:11(1636)).
- [33] Xia H, Han Y, Zhang N, Guo W. Dynamic analysis of train–bridge system subjected to non-uniform seismic excitations. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006;35:1563–79. <https://doi.org/10.1002/eqe>.
- [34] Wang M, Li XZ, Xiao J, Zou QY, Sha HQ. An experimental analysis of the aerodynamic characteristics of a high-speed train on a bridge under crosswinds. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2018;177:92–100. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.021>.
- [35] Zhang N, Tian Y, Xia H. A Train-Bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation. *Engineering* 2016;2:528–36. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.012>.
- [36] Koç MA, Esen İ, Eroğlu M, Çay Y. A new numerical method for analysing the interaction of a bridge structure and travelling cars due to multiple high-speed trains. *Int J Heavy Veh Syst* 2021;28. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2021.114415>.
- [37] Yang JP, Sun JY. Pitching effect of a three-mass vehicle model for analyzing vehicle-bridge interaction. *Eng Struct* 2020;224:111248. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111248>.
- [38] Guo W, Zeng C, Gou H, Gu Q, Wang T, Zhou H, et al. Real-time hybrid simulation of high-speed train-track-bridge interactions using the moving load convolution integral method. *Eng Struct* 2021;228:111537. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111537>.
- [39] Wu B, Zeng Y, Zhou Z, Wu G, Lu H. Vibration prediction based on the coupling method of half-train model and 3D refined finite element ground model. *Comput Geotech* 2021;134:104133. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104133>.
- [40] Koç MA. Finite Element and Numerical Vibration analysis of a Timoshenko and Euler-Bernoulli beams traversed by a moving high-speed train. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2021;7. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02835-7>.
- [41] Chen Z, Fang H. An Alternative Solution of Train-Track Dynamic Interaction. *Shock Vib* 2019;2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1859261>.
- [42] Zhai W, Han Z, Chen Z, Ling L, Zhu S. Train–track–bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review. *Veh Syst Dyn* 2019;57:984–1027. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605085>.

- [43] Grossoni I, Powrie W, Zervos A, Bezin Y, Le L. Transportation Geotechnics Modelling railway ballasted track settlement in vehicle-track interaction analysis. *Transp Geotech* 2021;26:100433. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100433>.
- [44] Zhai W, Xia H, Cai C, Gao M, Li X, Guo X, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions – Part I: theoretical model and numerical simulation. *Int J Rail Transp* 2013;1:3–24. <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.791498>.
- [45] Zhai W, Wang S, Zhang N, Gao M, Xia H, Cai C, et al. High-speed train-track-bridge dynamic interactions – Part II: experimental validation and engineering application. *Int J Rail Transp* 2013;1:25–41. <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.791497>.
- [46] Zhu Z, Gong W, Wang L, Li Q, Bai Y, Yu Z, et al. An efficient multi-time-step method for train-track-bridge interaction. *Comput Struct* 2018;196:36–48. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.11.004>.
- [47] Zhu Z, Gong W, Wang L, Bai Y, Yu Z, Zhang L. Efficient assessment of 3D train-track-bridge interaction combining multi-time-step method and moving track technique. *Eng Struct* 2019;183:290–302. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.036>.
- [48] Chen Y, Jiang L, Li C, Liu X, Li J. An efficient computing strategy based on the unconditionally stable explicit algorithm for the nonlinear train-track-bridge system under an earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng* 2021;145:106718. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106718>.
- [49] Khasawneh FA, Segalman D. Exact and numerically stable expressions for Euler-Bernoulli and Timoshenko beam modes. *Appl Acoust* 2019;151:215–28. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.015>.
- [50] Demirtaş S, Ozturk H. Effects of the crack location on the dynamic response of multi-storey frame subjected to the passage of a high-speed train. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2021;43:1–13. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02794-5>.
- [51] Karkon M. An efficient finite element formulation for bending, free vibration and stability analysis of Timoshenko beams. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2018;40:1–16. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1413-0>.
- [52] Pala Y, Beycimen S, Kahya C. Damped vibration analysis of cracked Timoshenko beams with restrained end conditions. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2020;42:1–16. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02558-1>.
- [53] Paul A, Das D. Free vibration analysis of pre-stressed FGM Timoshenko beams under large transverse deflection by a variational method. *Eng Sci Technol an Int J* 2016;19:1003–17. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.12.012>.
- [54] Biondi B, Muscolino G, Sofi A. A substructure approach for the dynamic analysis of train-track-bridge system. *Comput Struct* 2005;83:2271–81. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.03.036>.
- [55] Cheung YK, Au FTK, Zheng DY, Cheng YS. Vibration of multi-span non-uniform bridges under moving vehicles and trains by using modified beam vibration functions. *J Sound Vib* 1999;228:611–28. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2423>.

- [56] Hirzinger B, Adam C, Salcher P. Dynamic response of a non-classically damped beam with general boundary conditions subjected to a moving mass-spring-damper system. *Int J Mech Sci* 2020;185. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105877>.
- [57] König P, Salcher P, Adam C, Hirzinger B. Dynamic analysis of railway bridges exposed to high-speed trains considering the vehicle-track-bridge-soil interaction. *Acta Mech* 2021. <https://doi.org/10.1007/s00707-021-03079-1>.
- [58] Lou P, Yu ZW, Au FTK. Rail-bridge coupling element of unequal lengths for analysing train-track-bridge interaction systems. *Appl Math Model* 2012;36:1395–414. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.08.041>.
- [59] Gu G. Resonance in long-span railway bridges carrying TGV trains. *Comput Struct* 2015;152:185–99. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.02.002>.
- [60] Yau JD, Martínez-Rodrigo MD, Doménech A. An equivalent additional damping approach to assess vehicle-bridge interaction for train-induced vibration of short-span railway bridges. *Eng Struct* 2019;188:469–79. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.144>.
- [61] Ju S-H. Vibration Analysis of 3D Timoshenko Beams Subjected to Moving Vehicles. *J Eng Mech* 2011;137:713–21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0000276](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0000276).
- [62] Zhang X, Thompson D, Sheng X. Differences between Euler-Bernoulli and Timoshenko beam formulations for calculating the effects of moving loads on a periodically supported beam. *J Sound Vib* 2020;481:115432. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115432>.
- [63] Hoang T, Duhamel D, Foret G. Dynamical response of a Timoshenko beams on periodical nonlinear supports subjected to moving forces. *Eng Struct* 2018;176:673–80. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.028>.
- [64] Esen I. Dynamic response of a functionally graded Timoshenko beam on two-parameter elastic foundations due to a variable velocity moving mass. *Int J Mech Sci* 2019;153–154:21–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.033>.
- [65] Chen Z, Yang Z, Guo N, Zhang G. An energy finite element method for high frequency vibration analysis of beams with axial force. *Appl Math Model* 2018;61:521–39. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.04.016>.
- [66] Zhu K, Chung J. International Journal of Mechanical Sciences Nonlinear lateral vibrations of a deploying Euler – Bernoulli beam with a spinning motion. *Int J Mech Sci* 2015;90:200–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.11.009>.
- [67] Yu H, Yang Y, Yuan Y. Analytical solution for a finite Euler – Bernoulli beam with single discontinuity in section under arbitrary dynamic loads. *Appl Math Model* 2018;60:571–80. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.046>.
- [68] Nguyen V, Do V, Hai T, Thai CH. Dynamic responses of Euler – Bernoulli beam subjected to moving vehicles using isogeometric approach. *Appl Math Model* 2017;51:405–28. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.06.037>.
- [69] Dixit A. Single-beam analysis of damaged beams : Comparison using Euler – Bernoulli and Timoshenko beam theory. *J Sound Vib* 2014;333:4341–53. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.04.034>.

- [70] Heydari M, Ebrahimi A, Behzad M. Engineering Science and Technology , an International Journal Forced vibration analysis of a Timoshenko cracked beam using a continuous model for the crack. Eng Sci Technol an Int J 2014;17:194–204. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.05.003>.
- [71] Geweda AE, El-Gohary MA, El-Nabawy AM, Awad T. Improvement of vehicle ride comfort using genetic algorithm optimization and PI controller. Alexandria Eng J 2017;56:405–14. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.014>.
- [72] Yildirim E, Esen I. Dynamic Behavior and Force Analysis of the Full Vehicle Model using Newmark Average Acceleration Method. Eng Technol Appl Sci Res 2020;10:5330–9. <https://doi.org/10.48084/etasr.3335>.
- [73] Wu Y, Yang Y, Yau J. Three-Dimensional Analysis of Train-Rail-Bridge Interaction Problems Three-Dimensional Analysis of Train-Rail-Bridge 2010;3114. <https://doi.org/10.1076/vesd.36.1.1.3567>.
- [74] Garg VK, Dukkipati R V. Dynamics of railway vehicle systems. Acad Press Canada 1984;14:245–7. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(87\)90070-2](https://doi.org/10.1016/0378-3804(87)90070-2).
- [75] Lou P. A vehicle-track-bridge interaction element considering vehicle's pitching effect. Finite Elem Anal Des 2005;41:397–427. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2004.07.004>.
- [76] Zhai W. Vehicle–Track Coupled Dynamics Theory and Applications. 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9283-3_4.
- [77] Yau JD, Frýba L. Response of suspended beams due to moving loads and vertical seismic ground excitations. Eng Struct 2007;29:3255–62. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.10.001>.
- [78] Johansson C, Pacoste C, Karoumi R. Closed-form solution for the mode superposition analysis of the vibration in multi-span beam bridges caused by concentrated moving loads. Comput Struct 2013;119:85–94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.01.003>.
- [79] Yang SC, Hwang SH. Train-Track-Bridge Interaction by Coupling Direct Stiffness Method and Mode Superposition Method. J Bridg Eng 2016;21:04016058. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000852](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000852).
- [80] Xu YL, Li Q, Wu DJ, Chen ZW. Stress and acceleration analysis of coupled vehicle and long-span bridge systems using the mode superposition method. Eng Struct 2010;32:1356–68. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.013>.
- [81] Liu K, De Roeck G, Lombaert G. The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage. J Sound Vib 2009;325:240–51. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.03.021>.
- [82] Koç MA, Esen İ, Çay Y, Çerlek Ö, Asım M, Dal H, et al. Vibration Suppression of Vehicle-Bridge-Interaction System using Multiple Tuned Mass Dampers 2017;2:1–8.
- [83] Passino K, Yurkovich S. Fuzzy Control: The Basics. 1998. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5332539>.
- [84] Bathe KJ, Wilson EL. Numerical Method in Finite Element Analysis. John Wiley Sons, Ltd 1976. <https://doi.org/10.1002/nme.1620110913>.

- [85] Newmark NM. A method of computation for structural dynamics. J Eng Mech Div ASCE 1959;85:69–94. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000098>.
- [86] Lou P, Au FTK. Finite element formulae for internal forces of Bernoulli-Euler beams under moving vehicles. J Sound Vib 2013;332:1533–52. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.11.011>.
- [87] Güçlü R. Active control of seat vibrations of a vehicle model using various suspension alternatives. Turkish J Eng Environ Sci 2003;27:361–73. <https://doi.org/10.3906/sag-1204-7>.
- [88] Hanafi D. PID controller design for semi-active car suspension based on model from intelligent system identification. 2010 2nd Int Conf Comput Eng Appl ICCEA 2010 2010;2:60–3. <https://doi.org/10.1109/ICCEA.2010.168>.
- [89] Rao KD. Modeling, simulation and control of semi active suspension system for automobiles under MATLAB Simulink using PID controller. vol. 3. IFAC; 2014. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00094>.
- [90] Gandhi P, Adarsh S, Ramachandran KI. Performance Analysis of Half Car Suspension Model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS Controllers. Procedia Comput Sci 2017;115:2–13. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.070>.
- [91] Thenozhi S, Yu W. Stability analysis of active vibration control of building structures using PD/PID control. Eng Struct 2014;81:208–18. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.042>.
- [92] Adar NG, Eroğlu M, Kozan R. PI and Self-Tuning PI Controller Design and Comparison for Speed Control of DC Motor. Int Conf Adv Technol Comput Eng Sci 18) 2018.
- [93] Khodadadi H, Ghadiri H. Self-tuning PID controller design using fuzzy logic for half car active suspension system. Int J Dyn Control 2018;6:224–32. <https://doi.org/10.1007/s40435-016-0291-5>.
- [94] Metin M. Hafif raylı sistemlerin titreşimleri ve kontrolü. [Doktora Tezi] Yıldız Tek Üniversitesi 2013.
- [95] Atalay AE. E43000 lokomotifinin dinamik modelinin oluşturulması ve titreşim kontrolü. [Yüksek Lisans Tezi] Yıldız Tek Üniversitesi 2009.
- [96] Ören A. Raylı Bir Taşıtın Dinamik Modelinin Oluşturulması Ve Titreşim Kontrolü. [Yüksek Lisans Tezi] Yıldız Tek Üniversitesi 2011.
- [97] Metin M, Guclu R. Active vibration control with comparative algorithms of half rail vehicle model under various track irregularities. JVC/Journal Vib Control 2011;17:1525–39. <https://doi.org/10.1177/1077546310381099>.
- [98] Paksoy M, Guclu R, Cetin S. Semiactive self-tuning fuzzy logic control of full vehicle model with MR damper. Adv Mech Eng 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/816813>.
- [99] Özmen İ, Közkurt C. Design of Fuzzy Logic Supported Car Driver Control System. Int J Automot Sci Technol 2021;5:228–38. <https://doi.org/10.30939/ijastech..902139>.

- [100] Doğan H, Kaplan K, Kuncan M, Ertunç HM, Üniversitesi K. Araç Süspansiyon Sistemi Kontrolüne PID ve Bulanık Mantık Yaklaşımları PID and Fuzzy Logic Approach to Vehicle Suspension System Control Mekatronik Mühendisliği Bölümü 2015;10–2.
- [101] Emam AS. Fuzzy Self Tuning of PID Controller for Active Suspension System. Adv Powertrains Automotives 2015. <https://doi.org/10.12691/apa-1-1-4>.
- [102] Eroğlu M, Koç MA, Kozan R, Esen İ. Self-tuning fuzzy logic control of quarter car and bridge interaction model. Sak Univ J Sci 2021;25:1197–209. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.863063>.
- [103] Zhang YQ, Zhao YS, Yang J, Chen LP. A dynamic sliding-mode controller with fuzzy adaptive tuning for an active suspension system. Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng 2007;221:417–28. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO379>.
- [104] Bai R, Guo D. Sliding-mode control of the active suspension system with the dynamics of a hydraulic actuator. Complexity 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5907208>.
- [105] Du M, Zhao D, Yang B, Wang L. Terminal sliding mode control for full vehicle active suspension systems. J Mech Sci Technol 2018;32:2851–66. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0541-x>.
- [106] Singh D. Passenger body vibration control in active quarter car model using ANFIS based super twisting sliding mode controller. Simul Model Pract Theory 2018;89:100–18. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.09.010>.
- [107] Yağız N, Yüksek İ. Robust Control of Active Suspensions Using Sliding Modes. Env Sci 2001;25:79–87.
- [108] Devdutt, Aggarwal ML. Fuzzy control of passenger ride performance using MR shock absorber suspension in quarter car model. Int J Dyn Control 2015;3:463–9. <https://doi.org/10.1007/s40435-014-0128-z>.
- [109] Khan L, Qamar S, Khan MU. Comparative analysis of adaptive neurofuzzy control techniques for full car active suspension system. Arab J Sci Eng 2012;39:2045–69. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0729-4>.
- [110] Konoiko A, Kadhem A, Saiful I, Ghorbanian N, Zweiri Y, Sahinkaya MN. Deep learning framework for controlling an active suspension system. JVC/Journal Vib Control 2019;25:2316–29. <https://doi.org/10.1177/1077546319853070>.
- [111] Ben LZ, Hasbullah F, Faris FW. A comparative ride performance of passive, semi-active and active suspension systems for off-road vehicles using half car model. Int J Heavy Veh Syst 2014;21:26–41. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2014.057827>.
- [112] Agharkakli A, Sabet GS, Barouz A. Simulation and Analysis of Passive and Active Suspension System Using Quarter Car Model for Different Road Profile. Int J Eng Trends Technol 2012;3:636–44.
- [113] Sever M, Şendur HS, Yazıcı H, Arslan MS. Biodinamik sürücü modeli içeren bir taşıt süspansiyon sisteminin durum türevi geri beslemeli LQR ile aktif titreşim kontrolü. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg 2019;3:1573–1572. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.570732>.

- [114] Cakir MF, Bayraktar M. Modelling of main battle tank and designing LQR controller to decrease weapon oscillations. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 2020;35:1861–76. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.660584>.
- [115] Aktas KG, Esen I. State-Space Modeling and Active Vibration Control of Smart Flexible Cantilever Beam with the Use of Finite Element Method. *Eng Technol Appl Sci Res* 2020;10:6549–56. <https://doi.org/10.48084/etasr.3949>.
- [116] Fujii T, Maeda T, Ishida H, Imai T, Tanemoto K, Suzuki M. Wind-induced accidents of train/vehicles and their measures in Japan. *Q Rep RTRI (Railw Tech Res Institute)* 1999;40:50–5. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.40.50>.
- [117] Baker CJ. Ground vehicles in high cross winds part I: Steady aerodynamic forces. *J Fluids Struct* 1991;5:69–90. [https://doi.org/10.1016/0889-9746\(91\)80012-3](https://doi.org/10.1016/0889-9746(91)80012-3).
- [118] Baker CJ. Ground vehicles in high cross winds part II: Unsteady aerodynamic forces. *J Fluids Struct* 1991;5:91–111. [https://doi.org/10.1016/0889-9746\(91\)80013-4](https://doi.org/10.1016/0889-9746(91)80013-4).
- [119] Baker CJ. Ground vehicles in high cross winds part III: The interaction of aerodynamic forces and the vehicle system. *J Fluids Struct* 1991;5:221–41. [https://doi.org/10.1016/0889-9746\(91\)90478-8](https://doi.org/10.1016/0889-9746(91)90478-8).
- [120] Baker CJ. The effect of unsteady crosswind forces on train dynamic behaviour. *5th Eur African Conf Wind Eng EACWE 5, Proc* 2009.
- [121] Baker C, Cheli F, Orellano A, Paradot N, Proppe C, Rocchi D. Cross-wind effects on road and rail vehicles. *Veh Syst Dyn* 2009;47:983–1022. <https://doi.org/10.1080/00423110903078794>.
- [122] Heleno R, Montenegro PA, Carvalho H, Ribeiro D, Calçada R, Baker CJ. Influence of the railway vehicle properties in the running safety against crosswinds. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2021;217:104732. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104732>.
- [123] Guo W, Xia H, Xu YL. Dynamic response of a long span suspension bridge and running safety of a train under wind action. *Front Archit Civ Eng China* 2007;1:71–9. <https://doi.org/10.1007/s11709-007-0007-1>.
- [124] Montenegro PA, Carvalho H, Ortega M, Millanes F, Goicolea JM, Zhai W. Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds - Part I: Running safety. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2022;224:104974. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104974>.
- [125] Montenegro PA, Heleno R, Carvalho H, Calçada R, Baker CJ. A comparative study on the running safety of trains subjected to crosswinds simulated with different wind models. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2020;207:104398. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104398>.
- [126] Xu YL, Zhang N, Xia H. Vibration of coupled train and cable-stayed bridge systems in cross winds. *Eng Struct* 2004;26:1389–406. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.005>.
- [127] Deng E, Yang W, He X, Zhu Z, Wang H, Wang Y, et al. Aerodynamic response of high-speed trains under crosswind in a bridge-tunnel section with or without a wind barrier. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2021;210:104502. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104502>.

- [128] Niu J, Zhang Y, Li R, Chen Z, Yao H, Wang Y. Aerodynamic simulation of effects of one- and two-side windbreak walls on a moving train running on a double track railway line subjected to strong crosswind. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2022;221:104912. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104912>.
- [129] Wang M, Wang Z, Qiu X, Li X, Li X. Windproof performance of wind barrier on the aerodynamic characteristics of high-speed train running on a simple supported bridge. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2022;223:104950. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104950>.
- [130] Yang W, Deng E, Zhu Z, He X, Wang Y. Deterioration of dynamic response during high-speed train travelling in tunnel–bridge–tunnel scenario under crosswinds. *Tunn Undergr Sp Technol* 2020;106:103627. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103627>.
- [131] Gao H, Liu T, Gu H, Jiang Z, Huo X, Xia Y, et al. Full-scale tests of unsteady aerodynamic loads and pressure distribution on fast trains in crosswinds. *Meas J Int Meas Confed* 2021;186:110152. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110152>.
- [132] Willis R. Preliminary essay to the Appendix B: Experiments for determining the effects produced by causing weights to travel over bars with different velocities 1849.
- [133] Stokes S. Discussion of a differential equation relating to the breaking of railway bridges. *Print Pitt Press by JohnW* 1849;8:707–35.
- [134] Yu Z wu., Mao J feng. Probability analysis of train-track-bridge interactions using a random wheel/rail contact model. *Eng Struct* 2017;144:120–38. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.038>.
- [135] Xu L, Zhai W. A three-dimensional dynamic model for train-track interactions. *Appl Math Model* 2019;76:443–65. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.04.037>.
- [136] Youcef K, Sabiha T, El Mostafa D, Ali D, Bachir M. Dynamic analysis of train-bridge system and riding comfort of trains with rail irregularities. *J Mech Sci Technol* 2013;27:951–62. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0206-8>.
- [137] Koç MA. Analytic Method for Vibration Analysis of Track Structure Induced by High-Speed Train. *Sak Univ J Sci* 2021;25:146–55. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.823255>.
- [138] Yau J, Yang Y, Kuo S. Impact response of high speed rail bridges and riding comfort of rail cars. *Eng Struct* 1999;21:836–44. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00037-6).
- [139] Esen İ. Hareketli Yükler Altındaki KöprülÜ Kren Kirişlerinin Dinamik (Mukavemet) Analizi. [Doktora Tezi] İstanbul Tek Üniversitesi 2009.
- [140] Bilik F. Euler-Bernoulli Kirişİ Olarak Modellenmiş Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Köprüsünün Dinamik Davranışının Adomian Ayrıştırma Metoduyla İncelenmesi. [Doktora Tezi] Gazi Üniversitesi 2015.
- [141] Eroğlu M. Yük Trenlerinde Dikey Yöndeki Ray/Teker Etkileşiminin Modellenmesi Ve Analizi 2017.
- [142] Iwnicki S. Handbook of railway vehicle dynamics. 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420004892>.

- [143] Yang JN. Simulation of random envelope processes. *J Sound Vib* 1972;21:73–85. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90207-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90207-6).
- [144] Cao Y, Xiang H, Zhou Y. Simulation of Stochastic Wind Velocity Field on Long-Span Bridges. *J Eng Mech* 2000;126:1–6. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2001\)127:4\(408\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2001)127:4(408)).
- [145] J. C. Kaimal, J. C. Wyngaard, Y. Izumi ORC. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q J R Meteorol Soc* 1972;98:563–589.
- [146] Lumley J, A. PH. The structure of atmospheric turbulence. *Intersci Publ* 1964.
- [147] Koc MA. Araç Yol Etkileşiminin Modellenmesi ve Araca Etki Eden Dinamik Kuvvetlerin Analizi. 2017:125.
- [148] Frýba L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains. *Eng Struct* 2001;23:548–56. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00057-2).
- [149] Majka M, Hartnett M. Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles. *Comput Struct* 2008;86:556–72. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.05.002>.
- [150] Yau JD, Yang YB. Vertical accelerations of simple beams due to successive loads traveling at resonant speeds. *J Sound Vib* 2006;289:210–28. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.02.037>.
- [151] Froio D, Rizzi E, Simões FMF, Pinto Da Costa A. Dynamics of a beam on a bilinear elastic foundation under harmonic moving load. *Acta Mech* 2018;229:4141–65. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2213-4>.
- [152] Hilber HM, Hughes TJR, Taylor RL. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthq Eng Struct Dyn* 1977;5:283–92. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290050306>.
- [153] J. Grandi and P. Ramondenc. The dynamic behavior of railways on high speed lines. *SNCF, Fr* 1990.
- [154] Zadeh LA. Fuzzy Sets. *Inf Control* 1965;8:338–53.
- [155] Altun Y. Çeyrek Taşıt Aktif Süspansiyon Sistemi için LQR ve LQI Denetleyicilerinin Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol* 2017;5:61–70.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa EROĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2017, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2016 yılından beri Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak görev almaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Eroğlu, M., Koç, M. A., Esen, İ. ve Kozan, R. 2022. Train-structure interaction for high-speed trains using a full 3D train model, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44.1, 48.
- Eroğlu, M., Koç, M. A., Kozan, R. ve Esen, İ. 2022. Active control of quarter-car and bridge vibrations using the sliding mode control, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37.4, (1957-1970).
- Eroğlu, M., Koç, M. A., Kozan, R. ve Esen, İ. 2022. Comparative analysis of full car model with driver using PID and LQR controllers, *International Journal of Automotive Science And Technology*, 6.2, (178-188).
- Eroğlu, M., Koç, M. A., Esen, İ. ve Kozan, R. 2023. Realistic modelling for analysis of train-structure and ballasted-track interaction for high-speed trains, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*.