T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM TAŞITLARIN YANAL VE BOYLAMSAL ENTEGRE KONTROLÜ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

İsmail Alperhan BAY

YÜKSEK LISANS TEZİ
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN

Mart, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM TAŞITLARIN YANAL VE BOYLAMSAL ENTEGRE KONTROLÜ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

İsmail Alperhan BAY tarafından hazırlanan tez çalışması 11.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LISANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga EMİRLER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Erkin DİNÇMEN, Üye
Işık Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan OTONOM TAŞITLARIN YANAL VE BOYLAMSAL ENTEGRE KONTROLÜ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

İsmail Alperhan BAY

İmza

Hep destekçim olan,
Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlama sürecinde bilgi birikimini ve rehberliğini esirgemeyen danışmanım Mehmet Selçuk Arslan'a gönülden teşekkür ederim. Aynı zamanda, süreç boyunca beni sürekli motive eden ve deneyimlerini paylaşan çalışma arkadaşlarım Zülfikar Ali Erbudak, Ferit Hacıoğlu, ve Ömer Şirin'e de minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Hayatımın her döneminde rehberim olan, sabır ve sevgiyle beni yetiştiren annem Songül Bay, varlığı ve anlayışıyla yollarımı aydınlatan babam Bünyamin Bay ve bana her konuda güven veren canım ablam Ulviye Bay; bu başarı, sizin sayenizde gerçekleşti. Teşekkürler.

İsmail Alperhan BAY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xi

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xviii

ÖZET xix

ABSTRACT xxi

1 GİRİŞ 1

1.1 Kavramsal Çerçeve ve Araştırma Motivasyonu 1
1.2 Problem Tanımı 7
1.3 Temel Sorun ve Zorluklar 8
1.3.1 Çoklu Dinamik Değişkenlerin Aynı Anda Yönetilmesi . . . 8
1.3.2 Doğrusal Olmayan Taşıt Dinamikleri 8
1.3.3 Geniş Çalışma Aralığı ve Belirsizlikler 8
1.4 Kısıtlar ve Kabuller 9
1.4.1 Yol Geometrisi 9
1.4.2 Konfor Kriterine Dayalı Yanal İvme Sınırlaması 9
1.4.3 Taşıt Dinamiği ile İlgili Sadeleştirmeler veya İhmal Edilen Etkiler 10
1.4.4 Sensör Verileri ve Gürültü Varsayımları 10
1.4.5 Diğer Operasyonel Koşullar ve Trafik Etkileşimi 10
1.4.6 Değerlendirme 11
1.5 Literatür Taraması 11
1.6 Mevcut Yöntemler 12
1.6.1 Yanal Kontrol (Steering) Yaklaşımları 12
1.6.2 Yalnızca Boylamsal Kontrol (Hız/Hızlanma) Yaklaşımları . 13
1.6.3 Yanal ve Boylamsal Kontrolün Entegre Edildiği Yaklaşımlar 13
1.7 Literatürden Çıkarımlar 15

1.8 Tezin Anahatları 16

2 TAŞIT MODELLEMESİ 18

2.1 Giriş 18
2.2 Modellemeye Giriş 19
2.2.1 Dinamik ve Kinematik Temeller 20
2.3 Lastik Kuvveti Modeli 22
2.3.1 Lastik Kuvvetleri 22
2.3.2 Sonuç ve Değerlendirme 26
2.4 Taşıt Boylamsal Dinamiği 26
2.5 Taşıt Yanal Dinamiği 28
2.5.1 Tek İzli Taşıt Modeli 28
2.5.2 Geliştirilmiş Tek İzli Yanal Model 29
2.5.3 İstenen Yanal Sapma Hızı 30
2.5.4 İstenen Yanal Kayma Açısı 31
2.6 Özet 32

3 YÖRÜNGE TAKİP KONTROLÜ 33

3.1 Giriş 33
3.2 Hata Hesaplama 33
3.2.1 Hata Tanımları ve Yaklaşımlar 33
3.2.2 Yanal Hata, Yönelim Hatası ve Eğrilik Hesaplaması 34
3.3 Referans Yol ve Hız Profili 34
3.3.1 Virajın Hesaplanması 36
3.4 Önerilen Kontrolcü Tasarımı: Doğrusal Olmayan Öngörülü Kontrol 36
3.4.1 Durum Denklemleri 36
3.5 Kontrolcü Tasarımı 39
3.5.1 Maliyet Fonksiyonunun Oluşturulması 40
3.5.2 Optimal Denetim Yasası 41
3.5.3 Ağırlıklandırma Matrisleri 42
3.6 Karşılaştırma için Seçilen Kontrolcüler 45
3.6.1 Geometrik Yöntemler: Stanley ve Pure Pursuit 46
3.7 Hata Tabanlı Yol Takibi ve LQR Yaklaşımı 48
3.7.1 Temel Model ve Hata Tanımları 48
3.7.2 LQR İle Yol Takibi Denetimi 49
3.7.3 Genelleştirilmiş Durum-Uzay Denklemleri 49
3.8 Yörünge Hesaplama 51
3.8.1 Gövdeden Küresele Hız Dönüşümü 51

4 SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI 53

4.1 Giriş 53
4.2 Simülasyon Ortamı 53
4.3 Simülasyon Senaryoları 54
4.3.1 Yol Eğriliği Senaryoları 54
4.3.2 Hız Senaryoları ve Bozucu Etkenler 57
4.4 Simülasyon Sonuçları 57
4.4.1 Senaryo 1 Sonuçları 57
4.4.2 Senaryo 2 Sonuçları 74
4.4.3 Senaryo 3 Sonuçları 90
4.4.4 Senaryo 4 Sonuçları 108
4.5 Özet 135

5 SONUÇ **137**

KAYNAKÇA **140**

A EK BÖLÜMÜ BAŞLIĞI **143**
A.1 Teker Kuvvetleri ve Yanal Hız Çıktıları 143

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **157**

SİMGE LİSTESİ

α	Kayma açısı (lastik slip açısı)
β	Yanal kayma açısı (side-slip).
δ	Direksiyon açısı (genel).
η	Taşıtın hızı V ile belirli bir ilerleme hattı arasındaki açı.
η_{motor}	Motor verimliliği.
μ_{lat}	Yanal sürtünme katsayısı (lastik-yol arası).
μ_x	Genel bir değişken x'in ortalama değeri.
ω_{wheel}	Tekerleğin açısal hızı.
ψ	Aracın yönelimi (yanal sapma açısı).
ρ	Yolun eğriliği ($\rho = 1/R$).
τ	Performans indeksi J için kullanılan zaman değişkeni.
A, B, C, D	Doğrusal bir modelin durum-uzay matrisleri.
I	Birim matris.
P, P_0	LQR kontrolcüsü için Riccati denklemi çözümleri.
Q, R	LQR ve PC kontrolü için ağırlıklandırma matrisleri.
Q_0, R_0	Öngörülü kontrolcü performans indeksleri matrisleri.
R_ψ	ψ açısında, z ekseni etrafındaki 2B döndürme matrisi.
c	Kontrol edilebilirlik matrisi.
O	Gözlenebilirlik matrisi.
e	Referans r ile durum x arasındaki hata vektörü.
r	Aracın yanal sapma hızı veya referans vektörü (bağlama göre).
u	Giriş vektörü
x	Durum vektörü.

y	Çıkış vektörü.
A_F	Aracın ön yüzey alanı.
B_{tire}	Lastiğin sertlik katsayısı.
C_d	Aerodinamik sürüklenme katsayısı.
c_{roll}	Yuvarlanma direnci katsayısı.
c_{tire}	Lastiğin şekil (shape) faktörü.
$D_{y,\text{tire}}$	Yanal lastik kuvveti için tepe (peak) değeri.
F_{tire}	Lastik üzerinde oluşan kuvvet.
F_{aero}	Aerodinamik sürüklenme kuvveti.
F_{prop}	İtme (çekiş) kuvveti.
F_r	Yuvarlanma direnci kuvveti.
F_{xf}, F_{xr}	Ön ve arka tekerlere etkiyen boylamsal kuvvet.
F_{yf}, F_{yr}	Ön ve arka tekerlere etkiyen yanal kuvvet.
F_T	Tahrik (çekiş) kuvveti.
$F_{x,f}, F_{x,r}$	Ön ve arka boylamsal lastik kuvvetleri (detay ayrımı).
GR	Şanzıman dişli oranı.
I_z	Aracın z ekseni etrafındaki atalet momenti.
J	LQR vb. yöntemlerde kullanılan performans indeksi.
k	Yol eğriliği katsayısı / Stanley kazancı (bağlama göre).
$k(\lambda)$	Yol eğriliği fonksiyonu (örneğin $\kappa(\lambda)$).
L	Aracın dingil mesafesi.
L_F	Ağırlık merkezinin ön aksa uzaklığı.
L_R	Ağırlık merkezinin arka aksa uzaklığı.
L_w	Aracın iz genişliği.
m	Aracın kütlesi.
p, q, r	Gövde dönüş hızları; özellikle r: yanal sapma açısal hızı (z ekseni).
R	Viraj yarıçapı (yol eğriliğinin tersi).
r_{wheel}	Tekerleğin dış yarıçapı.
T_s	Örnekleme zamanı.

a_{lat}	Yanal ivme.
a_x, a_y	Aracın boylamsal ve yanal ivmeleri.
e_ψ	Yönelme (heading) hatası.
e_y	Yol/şerit merkezine göre yanal konum hatası.
$\hat{x}$	Gözlemci tarafından tahmin edilen durum.
$\tilde{x}$	Denge durumundan (x_{eq}) sapma.
V_x, V_y	Aracın boylamsal ve yanal hız bileşenleri.
e_{fa}	Ön aks merkezi yanal hatası (Stanley yönteminde).
e_{cg}	Araç ağırlık merkezi (CG) referans alınarak tanımlanan yanal hata.
$\Delta\psi_p$	Yol yönelimine göre yanal sapma farkı (heading error).
θ_e	Yönelim (yön) hatası (LQR'de farklı gösterimle).
θ	Aracın mutlak yönelimi (Stanley / Pure Pursuit).
ℓ_d	Look-Ahead (ileri bakma) mesafesi (Pure Pursuit).
ρ_{ref}	Referans yol eğriliği (kappa).
r_d	Arzu edilen (desired) yanal sapma oranı.
β_{des}	Arzu edilen yan kayma açısı.
$\beta_{\text{des}}^{\max}$	İzin verilen maksimum yan kayma açısı.
B, C, D, E	Pacejka (Magic Formula) katsayıları (lastik modeli).
κ	Boylamsal kayma oranı (slip ratio).
$s_{viraj_bas}, s_{viraj_son}$	Virajın başlangıç / bitiş konumu (m).
κ_{path}	Yol boyunca eğrilik değeri.
$\dot{\psi}, \ddot{\psi}$	Yanal sapma açısı birinci ve ikinci türevi (zaman).
$x_{\text{veh}}, y_{\text{veh}}$	Aracın küresel koordinatlardaki konumu.
$x_{\text{yol}}, y_{\text{yol}}$	Yolun referans koordinatları (global).
$\Delta X, \Delta Y$	Aracın konum değişimi (integral form).
RMSE	Root Mean Square Error (kök ortalama kare hatası).
CTE	Crosstrack Error.
CPU	Central Processing Unit (işlemci).
ms	Milisaniye (1e-3 s).

KISALTMA LİSTESİ

ACC	Adaptive Cruise Control (Uyarlanabilir Hız Sabitleme)
AEB	Automatic Emergency Braking (Otomatik Acil Frenleme)
ADAS	Advanced Driver Assistance System (İleri Sürücü Destek Sistemi)
ADS	Automated Driving System (Otomatik Sürüş Sistemi)
ALC	Automatic Lane Centering (Otomatik Şerit Ortalama)
CAN	Controller Area Network
DDT	Dynamic Driving Task (Dinamik Sürüş Görevi)
EU	European Union (Avrupa Birliği)
GPS	Global Positioning System
H∞	H-Infinity (Gürbüz Kontrol Yöntemi)
IMU	Inertial Measurement Unit
L0–L5	SAE J3016 Standardına Göre Sürüş Otomasyonu Seviyeleri
LDW	Lane Departure Warning (Şerit Terk Uyarısı)
LQR	Linear Quadratic Regulator (Doğrusal Kuadratik Regülatör)
MIMO	Multi-Input Multi-Output (Çok Girişli-Çıkışlı)
MITRE	The MITRE Corporation (kâr amacı gütmeyen araştırma kurumu)
MPC	Model Predictive Control (Model Öngörülü Kontrol)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (ABD)
ODD	Operational Design Domain (Tasarım Operasyon Alanı)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Orijinal Ekipman Üreticisi)
PARTS	Partnership for Analytics Research in Traffic Safety
PD	Proportional-Derivative (Oransal-Türevsellik) Kontrol
PID	Proportional-Integral-Derivative (Oransal-Tümleç-Türevsellik) Kontrol

SAE	Society of Automotive Engineers
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
USDOT	United States Department of Transportation (ABD Ulaştırma Bakanlığı)
3-DoF	Three Degrees of Freedom (Üç Serbestlik Derecesi)
CG	Center of Gravity (Ağırlık Merkezi)
CTE	Crosstrack Error (yörünge/şerit hatası)
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
MATLAB	Matrix Laboratory (MathWorks yazılımı)
PP	Pure Pursuit (Geometrik Yol Takip Yöntemi)
RMSE	Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hatası)
SAE J670	SAE J670 (Araç Dinamiği Terminolojisi Standardı)
Simulink	MATLAB Simulink Ortamı
Stanley	Stanley Yöntemi (Geometrik Yol Takibi, DARPA Grand Challenge)
Windows	Microsoft Windows İşletim Sistemi
AI	Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)
ECU	Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)
HIL	Hardware-in-the-Loop (Donanım-döngülü test)
ML	Machine Learning (Makine Öğrenmesi)
Platooning	Araç konvoyu (otonom/filo düzenlemesi)
SIL	Software-in-the-Loop (Yazılım-döngülü test)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 SAE J670 Koordinat Sistemi 20
Şekil 2.2 Sabit ve taşıt koordinat sistemlerinin şematik gösterimi [34]. . . . 20
Şekil 2.3 SAE J670 Koordinat Sistemi Göre Lastik Kuvvet ve Momentlerinin şematik gösterimi [34]. 21
Şekil 2.4 SAE lastik eksenleri ve temel kuvvet-moment bileşenleri [34]. . . 22
Şekil 2.5 Farklı F_z değerleri için yanal kuvvet-slip açısı ilişkisi [35]. 24
Şekil 2.6 Farklı F_z değerleri için boylamsal kuvvet-slip oranı ilişkisi [35]. . 25
Şekil 2.7 Taşıt hareketine etki eden boylamsal kuvvetler 26
Şekil 2.8 Üç serbestlik dereceli tek izli taşıt modeli 28
Şekil 2.9 Taşıt hareketine etki eden boylamsal kuvvetler [36] 29
Şekil 3.1 Öngörülü Kontrol Blok Diyagramı 43
Şekil 3.2 Geometrik bisiklet modeli 46
Şekil 3.3 Pure Pursuit Yöntemi Gösterimi 47
Şekil 3.4 Stanley Yöntemi Gösterimi 48
Şekil 3.5 Dinamik Bisiklet modeli gösterimi ve yörünge koordinatları . . . 49
Şekil 4.1 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R=100). 55
Şekil 4.2 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R=50). 55
Şekil 4.3 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R = Değişken). 56
Şekil 4.4 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R = Spiral). . . 57
Şekil 4.5 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme 58
Şekil 4.6 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme 59
Şekil 4.7 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği 59
Şekil 4.8 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı 60
Şekil 4.9 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası 61
Şekil 4.10 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet 62
Şekil 4.11 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız 63
Şekil 4.12 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 20 m/s). 64
Şekil 4.13 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 25 m/s). 65
Şekil 4.14 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 30 m/s). 66

Şekil 4.15 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 35 m/s). 67
Şekil 4.16 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 67
Şekil 4.17 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 68
Şekil 4.18 30 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 68
Şekil 4.19 35 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 68
Şekil 4.20 20 m/s için yanal ivme sonuçları 69
Şekil 4.21 25 m/s için yanal ivme sonuçları 69
Şekil 4.22 30 m/s için yanal ivme sonuçları 70
Şekil 4.23 35 m/s için yanal ivme sonuçları 70
Şekil 4.24 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 70
Şekil 4.25 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 71
Şekil 4.26 30 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 71
Şekil 4.27 35 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 72
Şekil 4.28 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 72
Şekil 4.29 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 72
Şekil 4.30 30 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 73
Şekil 4.31 35 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 73
Şekil 4.32 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal İvme 75
Şekil 4.33 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal İvme 75
Şekil 4.34 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı 76
Şekil 4.35 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal hata 77
Şekil 4.36 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal Lastik Kuvvetleri 78
Şekil 4.37 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal sapma hızı 79
Şekil 4.38 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 15 m/s) 79
Şekil 4.39 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 20 m/s) 80
Şekil 4.40 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 25 m/s) 81
Şekil 4.41 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 15 m/s). 82
Şekil 4.42 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 20 m/s). 83
Şekil 4.43 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 25 m/s). 84
Şekil 4.44 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız (Vx) (R=50). 84
Şekil 4.45 15 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 85
Şekil 4.46 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 85

Şekil 4.47 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 86
Şekil 4.48 15 m/s için yanal ivme sonuçları 86
Şekil 4.49 20 m/s için yanal ivme sonuçları 86
Şekil 4.50 25 m/s için yanal ivme sonuçları 87
Şekil 4.51 15 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 87
Şekil 4.52 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 88
Şekil 4.53 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 88
Şekil 4.54 15 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 89
Şekil 4.55 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 89
Şekil 4.56 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 89
Şekil 4.57 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme 91
Şekil 4.58 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme 92
Şekil 4.59 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği 92
Şekil 4.60 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı 93
Şekil 4.61 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Y konum hatası (Değişken ρ). 94
Şekil 4.62 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal kuvveti 94
Şekil 4.63 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (20 m/s). 95
Şekil 4.64 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (25 m/s). 96
Şekil 4.65 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (30 m/s). 96
Şekil 4.66 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (35 m/s). 97
Şekil 4.67 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s) 98
Şekil 4.68 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s) 98
Şekil 4.69 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s) 99
Şekil 4.70 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (35 m/s) 99
Şekil 4.71 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız 100
Şekil 4.72 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 100
Şekil 4.73 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 101
Şekil 4.74 30 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 101
Şekil 4.75 35 m/s için çapraz yol hatası sonuçları 102
Şekil 4.76 20 m/s için yanal ivme sonuçları 102
Şekil 4.77 25 m/s için yanal ivme sonuçları 103

Şekil 4.78 30 m/s için yanal ivme sonuçları 103
Şekil 4.79 35 m/s için yanal ivme sonuçları 104
Şekil 4.80 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 104
Şekil 4.81 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 104
Şekil 4.82 30 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 105
Şekil 4.83 35 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 105
Şekil 4.84 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 105
Şekil 4.85 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 106
Şekil 4.86 30 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 106
Şekil 4.87 35 m/s için yanal sapma hatası sonuçları 106
Şekil 4.88 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme 109
Şekil 4.89 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme 110
Şekil 4.90 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği 111
Şekil 4.91 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı 112
Şekil 4.92 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası 113
Şekil 4.93 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet 114
Şekil 4.94 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma (R=Spiral). 115
Şekil 4.95 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız 116
Şekil 4.96 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s) 117
Şekil 4.97 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s) 117
Şekil 4.98 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s) 118
Şekil 4.99 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme 119
Şekil 4.100 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme 120
Şekil 4.101 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği 121
Şekil 4.102 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı 122
Şekil 4.103 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası 123
Şekil 4.104 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet 124
Şekil 4.105 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal Kayma Açısı (R=Spiral). 125
Şekil 4.106 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız 126
Şekil 4.107 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s) 127
Şekil 4.108 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s) 127
Şekil 4.109 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s) 128

Şekil 4.110 μ = 1 için çapraz yol hatası sonuçları 129
Şekil 4.111 μ = 045 için çapraz yol hatası sonuçları 129
Şekil 4.112 μ = 1 için yanal ivme sonuçları 130
Şekil 4.113 μ = 045 için yanal ivme sonuçları 130
Şekil 4.114 μ = 1 için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 131
Şekil 4.115 μ = 045 için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları 131
Şekil 4.116 μ = 1 yanal sapma hatası sonuçları 132
Şekil 4.117 μ = 045 için yanal sapma hatası sonuçları 133
Şekil A.1 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Ön teker boylamsal kuvvet . 143
Şekil A.2 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Arka teker boylamsal kuvvet 144
Şekil A.3 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Ön teker yanal kuvvet . . . 144
Şekil A.4 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Arka teker yanal kuvvet . . 145
Şekil A.5 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Taşıt yanal hızı 145
Şekil A.6 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (R = 50 m) 146
Şekil A.7 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (R = 50 m) 146
Şekil A.8 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (R = 50 m) 147
Şekil A.9 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (R = 50 m) 147
Şekil A.10 Taşıt yanal hızı v_y (R = 50 m) 148
Şekil A.11 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (değişken ρ) 148
Şekil A.12 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (değişken ρ) 149
Şekil A.13 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (değişken ρ) 149
Şekil A.14 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (değişken ρ) 150
Şekil A.15 Taşıt yanal hızı v_y (değişken ρ) 150
Şekil A.16 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (spiral, $\mu = 1$) 151
Şekil A.17 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (spiral, $\mu = 1$) 152
Şekil A.18 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (spiral, $\mu = 1$) 152
Şekil A.19 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (spiral, $\mu = 1$) 153
Şekil A.20 Taşıt yanal hızı v_y (spiral, $\mu = 1$) 153
Şekil A.21 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (spiral, $\mu = 0.45$) 154
Şekil A.22 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (spiral, $\mu = 0.45$) 154
Şekil A.23 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (spiral, $\mu = 0.45$) 155
Şekil A.24 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (spiral, $\mu = 0.45$) 155
Şekil A.25 Taşıt yanal hızı v_y (spiral, $\mu = 0.45$) 156

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Sürüş Otomasyonu Seviyeleri ([10]) 4
Tablo 1.2 2015–2023 Model Yılları Arasında ADAS Özelliklerinin Penetrasyon Oranları 6
Tablo 1.3 ISO 2631-5 standardına göre konfor seviyeleri ve yanal ivme sınırları 9
Tablo 2.1 Boylamsal dinamik denkleminde kullanılan parametreler [35]. . . 27
Tablo 2.2 Taşıt modeline ait temel parametreler ve birimleri. 30
Tablo 4.1 Farklı Hız–Eğrilik Senaryolarında Kontrolcülerin RMSE Sonuçları ($R = 100\,\mathrm{m}$) 74
Tablo 4.2 Kontrolcülerin Senaryo 2 Altında RMSE Değerleri 90
Tablo 4.3 Değişken Yarıçap Senaryosu İçin Kontrolcülerin RMSE Sonuçları 107
Tablo 4.4 Spiral yol senaryosunda LQR ve Öngörülü kontrolcünün Kıyaslanması 133
Tablo 4.5 Dört senaryoda öngörülü kontrolcü için seçilen H ve $Q_{1\text{–}5}$ ağırlıkları 135

ÖZET

OTONOM TAŞITLARIN YANAL VE BOYLAMSAL ENTEGRE KONTROLÜ İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN ÖNGÖRÜLÜ KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

İsmail Alperhan BAY

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN

Bu çalışma, otonom taşıtların en kritik bileşenlerinden olan yanal (direksiyon) ve boylamsal (hız/ivme) dinamiklerini entegre şekilde kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Mevcut literatürde çoğunlukla ayrı ayrı ele alınan bu iki kontrol eyleminin tek bir çerçevede birleştirilmesi, özellikle yüksek hız veya keskin viraj gibi karmaşık sürüş koşullarında daha güvenli ve konforlu bir deneyim sunma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, doğrusal olmayan bir taşıt modeli kullanılarak öngörülü (predictive) bir kontrol yaklaşımı geliştirilmiş ve hem şerit takibi hem de uygun hız yönetimi aynı anda geliştirilen kontrolcü ile icra edilmiştir. Farklı yol eğrilikleri ve hız seviyelerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin klasik tekil yanal veya boylamsal kontrol yaklaşımlarına kıyasla daha düşük takip hatası sağladığını göstermektedir. Ayrıca, dengeli ivme değişimleri ile daha iyi bir sürüş konforu sunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu entegre yöntemin ileride gerçek zamanlı uygulamalara uyarlanarak karmaşık trafik koşullarında da başarılı olabileceğini işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: otonom taşıtlar, doğrusal olmayan kontrol, öngörülü kontrol, entegre yanal ve boylamsal kontrol, şerit takip, sürüş güvenliği

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF NONLINEAR PREDICTIVE CONTROL FOR AUTONOMOUS VEHICLES WITH INTEGRATED LATERAL AND LONGITUDINAL CONTROL

İsmail Alperhan BAY

Department of Mechatronics Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN

This study aims to achieve integrated control of one of the most critical components of autonomous vehicles: lateral (steering) and longitudinal (speed/acceleration) dynamics. While these two control actions are predominantly addressed separately in the existing literature, their unification within a single control framework has the potential to offer a safer and more comfortable driving experience, particularly under complex driving conditions such as high-speed travel or sharp turns. In this context, a predictive control approach was developed based on a nonlinear vehicle model, enabling simultaneous execution of both lane-keeping and appropriate speed regulation. Simulation results conducted across varying road curvatures and velocity levels demonstrate that the proposed method yields lower tracking errors compared to conventional, decoupled lateral or longitudinal control strategies. Moreover, it was observed that the method provides improved ride comfort through smoother acceleration transitions. These findings suggest that the proposed integrated control strategy can be adapted for real-time implementation and may perform effectively even under complex traffic scenarios.

Keywords: autonomous vehicles, nonlinear control, predictive control, integrated lateral and longitudinal control, lane keeping, driving safety.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1
GİRİŞ

1.1 Kavramsal Çerçeve ve Araştırma Motivasyonu

Otonom taşıt teknolojileri, son on yılda hem akademik çevrelerin hem de endüstriyel kuruluşların odak noktası hâline gelmiş ve ulaşım sektöründe köklü dönüşümlere zemin hazırlamıştır. Özellikle sürüş güvenliği, yolcu konforu ve enerji verimliliği gibi alanlarda vaat ettiği potansiyel iyileştirmeler, otonom sistemlerin yaygın olarak benimsenmesi için güçlü bir motivasyon oluşturmaktadır [1, 2]. Bu teknolojik gelişmelerin ardındaki temel gerekçe, insan kaynaklı hataların ve yorgunluk, dikkat dağınıklığı gibi risk faktörlerinin minimize edilmesiyle, trafik kazalarını ve can kayıplarını önemli ölçüde azaltmaktır. Ayrıca toplu taşımadan lojistik operasyonlara kadar geniş bir yelpazede verimlilik artışı sağlaması, otonom taşıtların endüstriyel uygulanabilirliğini daha da ön plana çıkarmaktadır [3].

Nitekim, 2023 yılına ait güncel veriler de bu durumu desteklemektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 16 Mayıs 2024 tarihinde yayımlanan rapora göre, ülke genelinde ölümlü yaralanmalı trafik kazasına neden olan toplam 281 bin 54 kusurun %88,9'u sürücülerden, %9,0'ı yayalardan, %1,1'i taşıtlardan, %0,6'sı yolculardan ve %0,3'ü yol kaynaklı faktörlerden kaynaklanmıştır [4]. Böylece, "Kazaya neden olan kusurlar içinde sürücü kusurları %88,9 ile ilk sıradadır." ifadesi, insan faktörünün kritik önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Buna ek olarak, toplu taşımadan lojistik operasyonlara kadar geniş bir yelpazede verimlilik artışı sağlaması, otonom taşıtların endüstriyel uygulanabilirliğini daha da ön plana çıkarmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği ülkelerinde taşımacılık sektörünün ekonomiye katkısı giderek artarken, yakıt tüketimi ve emisyon oranlarını azaltacak teknolojilere duyulan ihtiyaç ön plana çıkmıştır [5]. Otonom otobüs ve minibüs projeleri bu doğrultuda değerlendirilmeye alınırken, lojistik şirketleri de insansız veya yarı-otonom tır konvoyları (*platooning*) gibi yenilikçi çözümleri test etmektedir. Sonuç olarak, insan hatasını azaltmayı ve verimliliği artırmayı hedefleyen bu gelişmeler, ulaşım sektöründe hem kazaların azaltılması hem de operasyonel

maliyetlerin düşürülmesi açısından büyük potansiyel taşımaktadır.

Otonom taşıtların getirdiği yeniliklerin ilki, sürüş güvenliğini artırmak üzere geliştirilen sürücü destek sistemleri (ADAS, Advanced Driver Assistance Systems) vasıtasıyla ortaya çıkmıştır. Bu sistemler arasında şerit takip (Lane Keeping Assist), otomatik acil frenleme (AEB), adaptif hız kontrolü (ACC) ve kör nokta tespiti (Blind Spot Detection) gibi kısmi otomasyon unsurları sayılabilir [6, 7]. Zamanla bu sistemler gelişerek seviyeli (Level 2-3) ve tam otonom (Level 4-5) sürüş kabiliyetine evrilmiştir [2]. Dolayısıyla akademik dünyada, yol takibi ve sürüş kararlılığı gibi temeller üzerine kurulu disiplinler arası bir araştırma alanı oluşmuştur [8, 9]. Araştırmacılar, taşıt dinamiği, kontrol teorisi, makine öğrenmesi ve haberleşme teknolojileri gibi farklı alanlardan beslenen yöntemlerle otonom sürüş algoritmalarını sürekli iyileştirmektedir.

Otomatik Sürüş Sistemlerinin (ADS) karmaşıklığı ve çeşitliliğine göre, otomotiv mühendisleri topluluğu (SAE), SAE J3016 olarak bilinen sürüş otomasyonu sistemlerinin taksonomisi ve tanımlarını önermiştir [10]. Bu standart, sürüş otomasyonu sistemlerini sürüş otomasyonu olmayan (Seviye 0) sistemlerden tam sürüş otomasyonu (Seviye 5) sistemlerine kadar altı seviyede sınıflandırmaktadır. Bu seviyeler genellikle L0'dan L5'e kadar ifade edilmektedir.

L0'dan L5'e kadar olan sistemlerin tanımları şu şekildedir:

L0 Sürücüyü yalnızca uyarılar ve anlık müdahalelerle destekleyen sistemleri ifade eder. Şerit Terk Uyarısı (LDW) veya Otomatik Acil Frenleme (AEB) gibi örnekler bu kapsamdadır. Tüm dinamik sürüş görevleri (DDT) sürücünün sorumluluğundadır.

L1 Sürücüye direksiyon *veya* hızlanma/yavaşlama desteği sunan sistemlerdir. Otomatik Şerit Ortalama (ALC) veya Uyarlanabilir Hız Sabitleyici (ACC) bu seviyede yer alır.

L2 Aynı anda hem direksiyon kontrolü hem de hızlanma/yavaşlama işlevlerini gerçekleştirebilen sistemlerdir. Hem ALC hem de ACC özelliklerini desteklemek L2 sistemleri için tipiktir.

L3 Tasarım Operasyon Alanı (ODD) içindeki sürüş koşullarına yanıt verebilen, ancak beklenmedik durumlarda müdahale edebilecek bir "yedek" insan operatöre ihtiyaç duyan sistemleri kapsar. Trafik sıkışıklığı şoförü buna örnektir.

L4 Belirli bir ODD içinde tüm DDT ve yedekleme işlevlerini kendi başına yerine getirebilen yüksek otomasyon seviyesidir. Yerel sürücüsüz taksiler bu kategoriye girer.

L5 Herhangi bir ODD kısıtlaması olmaksızın tüm sürüş koşullarını yönetebilen tam sürüş otomasyonu seviyesidir. Tam otonom taşıtlar L5 olarak adlandırılır.

Tablo 1.1 bu seviyeleri detaylı bir şekilde göstermektedir.

Seviye 0'dan Seviye 2'ye (L0–L2) kadar olan sistemler genellikle İleri Sürücü Destek Sistemi (ADAS) olarak adlandırılır; çünkü bu seviyelerde taşıt, dinamik sürüş görevlerinin ancak bir kısmını (örn. sadece yanal kontrol *veya* yalnızca boylamsal kontrol) üstlenir ve sürücünün genel güvenlikten sorumlu olması beklenir. Buna karşılık, Seviye 3'ten Seviye 5'e (L3–L5) kadar olan sistemler sürüşü tamamen üstlenir ve arıza durumunda insan müdahalesine gerek duyulmasa da minimum düzeyde bir yedek operatör gereksinimi olabilir. Böylece, L3–L5 sistemleri gerçek anlamda "otomatik sürüş"ü gerçekleştirir.

Literatürde "otonom sürüş" veya "kendi kendine sürüş" gibi eş anlamlı terimler kullanılsa da bu metinde, SAE J3016 standardı doğrultusunda "ADS" (Otomatik Sürüş Sistemi) terimi benimsenmiştir [10]. Başka bir çalışmada, ADAS'ın genellikle L0–L2 aralığında, ADS'in ise L3–L5 aralığında olduğu ifade edilmektedir [11]. Ancak burada test teknikleri, sistemin otomasyon seviyesinden bağımsız incelendiğinden, ADS terimi bazen tüm seviyeleri kapsayacak şekilde de kullanılmaktadır.

Özellikle kentsel trafik yoğunluğunda taşıt sürüşünün karmaşıklığı, araştırmacıların ve mühendislerin yeni yaklaşımlara yönelmelerine sebep olmaktadır. Mevcut yaklaşımların çoğunda, taşıt dinamiğinin yanal (direksiyon kontrolü) ve boylamsal (hız veya hızlanma kontrolü) hareketlerinin bütünleşik olarak düzenlenmesi kritik bir ihtiyacı ifade etmektedir. Yanal kontrolün tek başına ele alındığı temel modeller, taşıt konumlandırması ve yönlendirme hususunda iyi sonuçlar verebilse de; yüksek hız, değişen yol koşulları ve beklenmedik trafik senaryolarında uzunlamasına (boylamsal) kontrolün de eşzamanlı düşünülmesi gerekliliği açıktır [7, 12]. Örneğin, keskin bir virajda taşıtın sadece direksiyon açısına müdahale edilmesi yeterli olmaz; taşıtın hızının da optimum seviyede tutulması veya düşürülmesi, yol tutuşunun ve stabilitenin korunması için zorunludur [13].

Bu gereksinim, ADS ve ADAS sistemlerinin tasarımında da yansımalarını bulur. L2 seviyesindeki bir sistemde bile hız ve şerit konumunun aynı anda yönetilmesi istenirken, daha üst seviyelerde (L3–L5) ise taşıtın tüm manevralarını kendi kendine

Tablo 1.1 Sürüş Otomasyonu Seviyeleri ([10])

Seviye	Adı	Açıklama	Örnek
0	Sürüş Otomasyonu Yok	Sürücüler tüm DDT'yi gerçekleştirir	Şerit Terk Uyarısı (LDW)
1	Sürücü Yardımı	Sistem DDT'nin bir kısmını gerçekleştirir: ya direksiyon ya da hızlanma/yavaşlama	Otomatik Şerit Ortalama (ALC) veya Uyarlanabilir Hız Sabitleyici (ACC)
2	Kısmi Sürüş Otomasyonu	Sistem DDT'nin bir kısmını gerçekleştirir: hem direksiyon hem de hızlanma/yavaşlama	ALC ve ACC
3	Koşullu Sürüş Otomasyonu	Sürücüler veya yedek kullanıcılar ADS'den gelen taleplere yanıt vermelidir	Trafik sıkışıklığı şoförü
4	Yüksek Sürüş Otomasyonu	Sistem, belirli bir ODD içinde tüm DDT'yi ve yedekleme işlevlerini yerine getirir	Yerel sürücüsüz taksiler
5	Tam Sürüş Otomasyonu	Sistem, ODD sınırlaması olmaksızın tüm DDT'yi ve yedeklemeyi gerçekleştirir	Tam otonom taşıtlar

idare etmesi gerekir. Dolayısıyla, sürüş otomasyon seviyeleri yükseldikçe, yanal ve boylamsal kontrolü entegre bir mimari altında tasarlamak ve farklı hız, yol koşulu ve trafik durumlarında taşıtı stabil tutabilmek kaçınılmaz bir hâl alır.

Bu noktada, hem akademik hem de endüstriyel açıdan önem arz eden konu, entegre kontrol stratejilerinin geliştirilmesidir. Özellikle Model Öngörülü Kontrol (MPC) temelli yöntemler, taşıt durumunun gelecekteki dinamiklerini öngörme ve buna göre direksiyon ile hız emirlerini optimize etme kabiliyetiyle ön plana çıkmaktadır [8, 14]. MPC yaklaşımları, taşıt sensörlerinden (lidar, radar, kamera vb.) elde edilen verileri kullanarak, kısa vadede oluşabilecek sapmaları minimize eder ve sürücünün veya otomasyonun konforlu bir sürüş deneyimi sunmasını sağlar. Ayrıca, yeni nesil otonom taşıtlarda hız, yön ve hatta güç aktarım organları (driveline) üzerinde gerçek zamanlı kararlar vererek hızlı tepki süreleriyle güvenliği korumak hedeflenmektedir [15].

Güvenlik faktörünün yanı sıra otonom sürüş sistemlerinin karbon salınımını azaltma ve enerji verimliliğini artırma konularında da büyük potansiyeli bulunmaktadır [16]. Örneğin, platooning (taşıt konvoyu) uygulamaları, özellikle ticari taşıtlar için yakıt tüketiminde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. taşıtlar arasındaki mesafe ve hız farkları hassas kontrol edilerek, rüzgâr direnci düşürülebilmekte ve toplamda daha az enerji kullanılmaktadır [17]. Bu tür uygulamalar, hem karayolu taşımacılığının maliyetini azaltma hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından küresel hedeflere katkı sağlamaktadır. Son yıllarda otomotiv endüstrisinin önde gelen şirketleri, otonom tır konvoyları ve filo yönetimi alanında pilot projeler gerçekleştirmekte, bu sayede

araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin sonuçlarını ticari ölçekte denemektedir [3].

Akademik anlamda, otonom taşıt kontrolü alanında yapılan çalışmalar sistematik olarak incelendiğinde görülebilir ki, birçok araştırma belirli alt problemlere odaklanmaktadır. Örneğin, sadece yanal kontrol için geliştirilen metotlar (ör. LQR, H∞ kontrol, kaymalı kontrol) taşıtın direksiyon dinamiklerini istikrarlı hâle getirmeye odaklanırken, boylamsal kontrol için geliştirilen çalışmalarda hızın sabit tutulması, takip mesafesinin korunması (Adaptif Seyir Kontrolü, ACC) veya hız optimizasyonu üzerinden yakıt verimliliğinin artırılması gibi amaçlar güdülmektedir [18, 19]. Ancak gerçek sürüş senaryolarında, taşıtın direksiyon açısı ile hız kontrolünün ayrıştırılamayacak kadar iç içe olduğu pek çok durum ortaya çıkar: Örneğin taşıt, düşük eğimli bir virajda normal hızını koruyabilirken; keskin eğimli bir virajda hızın derhal düşürülmesi, hem güvenlik hem de konfor açısından önemli olabilmektedir [20]. Dolayısıyla, hem yanal hem de boylamsal dinamiklerin aynı çerçevede ele alındığı bütünleşik veya entegre kontrol yaklaşımları, araştırma gündeminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır [15].

Endüstriyel açıdan bakıldığında, otomotiv üreticileri ve teknoloji şirketleri arasında otonom sürüşün ticarileştirilmesi yarışı sürmektedir. Yüksek seviye otonomi gerektiren robotaxi hizmetleri, son tüketiciye yönelik sürüş destek paketleri ve lojistik şirketlerinin filo yönetim sistemleri bu rekabetin temel uygulama alanlarıdır. Büyük veri (big data), bulut bilişim ve 5G/6G haberleşme altyapıları sayesinde taşıtlar arası etkileşim ve akıllı ulaşım sistemleri kavramsal olarak mümkün hâle gelmiştir. Özellikle yapay zekâ ve derin öğrenme tabanlı algoritmalar, çevresel algılamadan (görüntü işleme, obje takibi vb.) kontrol kararlarının verilmesine kadar geniş bir spektrumda kullanılmakta; bu durum ise farklı disiplinlerin (örneğin bilgisayar mühendisliği, mekatronik, elektrik-elektronik) ortak çalışma sahasını genişletmektedir [9].

Bu gelişmelerin bir yansıması olarak, ABD pazarında son yıllarda satılan yolcu taşıtlarındaki ADAS özelliklerinin penetrasyon oranı hızla artmaktadır. Kısa süre önce yayımlanan NHTSA/PARTS raporuna göre, 2015–2023 model yıllarını kapsayan ve 9 büyük otomotiv ekipmanı üreticileri (OEM) verilerinin incelendiği 98 milyon taşıt üzerinde yapılan analizde, 14 ADAS özelliğinden 10 tanesinin %50 seviyesini aştığı, bunlardan beşinin de %90 düzeyine ulaştığı belirlenmiştir [21]. Özellikle önden çarpışma uyarısı, otomatik acil frenleme, yaya algılama uyarısı, yaya otomatik acil frenleme ve şerit terk uyarısı gibi güvenlik odaklı teknolojilerin, %91–%94 aralığında yaygınlaşması dikkat çekicidir. Ayrıca otomatik uzun far, şerit takip asistanı, kör nokta uyarısı, uyarlanabilir hız sabitleyici ve şerit ortalama asistanı

da %50'nin üzerinde bir benimsenme oranına sahiptir.

Raporda, otomobil üreticilerinin bu teknolojileri yeni taşıtlara hızlı ve gönüllü bir şekilde entegre ettiği; böylece gerçek yol koşullarında çarpışmaları önleme, yaralanma ve can kaybını azaltma hedeflerine önemli ölçüde katkı sağlandığı ifade edilmektedir. Bu durumun, ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın (USDOT) ulusal karayolu güvenlik stratejisiyle de uyumlu olduğu; otomatik sürüşe giden yolda daha geniş bir sürücü destek ekosistemi yaratma potansiyeline sahip bulunduğu vurgulanmaktadır. Güncellenen pazar verilerine dair özet sonuçlar, Tablo 1.2'da gösterilmektedir.

ADAS Özelliği	**Penetrasyon Oranı (%)**
Önden Çarpışma Uyarısı (Forward Collision Warning)	94%
Otomatik Acil Frenleme (Automatic Emergency Braking)	94%
Şerit Terk Uyarısı (Lane Departure Warning)	92%
Yaya Algılama Uyarısı (Pedestrian Detection Warning)	92%
Yaya Otomatik Acil Frenleme (Pedestrian AEB)	92%
Otomatik Uzun Far (Automatic High Beam)	90%
Şerit Takip Asistanı (Lane Keeping Assistance)	86%
Kör Nokta Uyarısı (Blind Spot Warning)	73%
Uyarlanabilir Hız Sabitleyici (Adaptive Cruise Control)	68%
Şerit Ortalama Asistanı (Lane Centering Assistance)	54%
Kavşak Otomatik Acil Frenleme (Intersection AEB)	34%
Aktif Sürüş Asistanı (Active Driving Assistance)	34%
Kör Nokta Müdahalesi (Blind Spot Intervention)	26%
Viraj Hız Düzeltme (Curve Speed Correction)	22%

Tablo 1.2 2015–2023 Model Yılları Arasında ADAS Özelliklerinin Penetrasyon Oranları

Bu bulgular, kısa vadede tam otonom (**L5**) sürüşe geçilemese bile **L2** ve **L3** seviyelerindeki **ADAS** ve **ADS** çözümlerinin yaygınlaşarak daha güvenli ve konforlu bir sürüş deneyimi sunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, yanal ve boylamsal kontrollerin giderek entegre hâle gelmesi, yüksek hız ve değişken yol koşullarında dahi stabilize ve güvenilir taşıt dinamikleri sağlamaya yönelik tasarımların önemini vurgulamaktadır.

Bu tez çalışmasının akademik ve endüstriyel önemi, tam da bu bütünleşik yaklaşım ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Sadece yanal ya da sadece boylamsal kontrolün optimize edilmesi, bir noktaya kadar fayda sağlamaktadır; ancak gerçek sürüş senaryolarında, çevresel şartlar ve taşıt dinamikleri hızla değişebilmektedir. Dolayısıyla, eş zamanlı olarak taşıtın direksiyon açısını ve hızını, gelecek kısa zaman aralığı için öngörülü (predictive) şekilde düzenleyecek algoritmalara olan ihtiyaç, hem güvenlik hem de yüksek sürüş kalitesi hedefleri çerçevesinde artmıştır [22]. Bu doğrultuda, tezde ele alınan problem, çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) bir kontrol tasarımı gerektirmekte; doğrusal olmayan (nonlinear) taşıt

dinamiklerinin gözetilmesi gerektiğinden klasik doğrusal yaklaşımlar tek başlarına yeterli olmamaktadır.

Ayrıca, trafik ortamındaki dinamik değişimler (ani şerit değiştirmeler, yetersiz yol çizgileri, öngörülemeyen engeller vb.) ve sürücü müdahalesi gerektiren karmaşık senaryolar, araştırmacıları daha esnek ve uyarlanabilir (adaptive) metodolojiler geliştirmeye itmektedir [7]. Bu çalışmaların sonucunda, hem akademik dergilerde hem de uluslararası konferanslarda artan sayıda yayın görmek mümkündür. Benzer şekilde, otomotiv sanayii, üniversitelerle ve araştırma kuruluşlarıyla iş birliği içerisinde test pistlerinden gerçek yol koşullarına uzanan kapsamlı deneyler yürütmektedir [23]. Burada amaç, hem teknolojiyi olgunlaştırarak ticarileştirmek hem de toplumda otonom sürüşe duyulan güveni artırmaktır.

Özetle, otonom taşıtlar üzerine kurulu araştırma alanının günümüzde böylesine önem kazanmasının temel sebebi, sürüş güvenliğini iyileştirirken yolcu konforunu artırma ve yakıt tüketimini/enerji kullanımını optimize etme fırsatıdır. Hem akademik tarafta teorik olarak ispatlanabilir yöntemlerin hem de endüstriyel tarafta hızlı prototipleme ve sahada doğrulamanın değerli olduğu bu bağlamda, tez konusu olan "entegre yanal ve boylamsal kontrol" kritik bir ihtiyaca yanıt vermektedir. Özellikle düz olmayan (nonlinear) taşıt modellerinin dikkate alınmasıyla daha gerçekçi ve kararlı kontrol sistemleri tasarlamak mümkün hâle gelmekte, böylece otonom sürüşün güvenirliği ve konforu artmaktadır. Bu yönüyle bakıldığında, araştırmanın hem akademik hem de endüstriyel beklentileri karşılamaya aday olduğu söylenebilir. Önümüzdeki bölümlerde, bu motivasyon doğrultusunda geliştirdiğimiz yöntem ve elde ettiğimiz sonuçlar ayrıntılı şekilde ele alınacaktır.aktır.

1.2 Problem Tanımı

Otonom taşıtların gelişimi, sadece bir şeridi takip eden veya sabit bir hızı koruyan temel çözümlerden, çok daha karmaşık ve geniş kullanım senaryolarını kapsayan bütünleşik kontrol yaklaşımlarına doğru evrilmektedir [1, 8]. Bu noktada, *aynı anda yanal (lateral) ve boylamsal (longitudinal) kontrol* yapabilmek, klasik *yanal kontrol* (örneğin, direksiyon ayarını düzenleyerek taşıtın şeritte kalmasını sağlamak) veya *boylamsal kontrol* (örneğin, sabit hız veya takip mesafesi korunması) problemlerinden daha geniş kapsamlı bir yaklaşımı gerektirir.

Örneğin keskin bir virajda sadece direksiyon açısı (δ) değiştirilerek taşıtın yola tutunması yeterli olmaz; taşıtın hızını da aynı anda ayarlamak (örneğin otomatik frenleme veya gaz kısma eylemleri) gerekebilir. Aksi hâlde yüksek hızda keskin dönüş sırasında taşıtın savrulması veya yetersiz direksiyon manevrası sebebiyle

şerit dışına çıkması muhtemeldir [24, 25]. Dolayısıyla, problem "tekil" yanal veya boylamsal kontrollerin ötesinde, bu iki eylemin *entegre* bir çerçevede yürütülmesini gerektirir.

1.3 Temel Sorun ve Zorluklar

Bu tez çalışmasında, dümenleme ve hız kontrolünün tek bir kontrolcü ile verilen performans ölçümlerini optimum olarak sağlayacak şekilde yapılması hedeflenmiştir.

1.3.1 Çoklu Dinamik Değişkenlerin Aynı Anda Yönetilmesi

Otonom sürüşte, taşıtın direksiyon (δ), hız (V_x), ivme (a_x), yanal kayma (β) ve sapma açısı (ψ) gibi farklı değişkenler aynı anda kontrol edilir [26]. Yüksek hız, keskin viraj, ani fren gibi durumlarda yanal ve boylamsal kuvvetler birbirini doğrudan etkiler [27]. Son yıllarda, bu çok girişli ve çok çıkışlı (MIMO) yapının koordineli biçimde yönetilmesi üzerine çeşitli çalışmalarda, hem deneysel hem de teorik düzeyde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir [28–30].

1.3.2 Doğrusal Olmayan Taşıt Dinamikleri

Lastik kuvvetlerinin kayma açısıyla doğrusal olmayan ilişkisi, yüksek hızlarda veya keskin dönüşlerde belirgin hâle gelir [12]. Yük transferi, sürtünme katsayısı değişimleri, süspansiyon dinamikleri gibi faktörler, doğrusal varsayımları geçersiz kılacak kadar büyük sapmalara neden olabilir [25]. Yeni nesil kontrol yaklaşımlarında, bu tip doğrusal olmayan etkilerle başa çıkmak için *Doğrusal Olmayan Model Öngörülü Kontrol (NMPC)*, *kaymalı mod denetimi* ve *adaptif gözlemci* tabanlı yöntemler denenmekte; böylece taşıtın yüksek manevra kabiliyetine sahip olduğu senaryolarda dahi kararlılığı korumak hedeflenmektedir [29].

1.3.3 Geniş Çalışma Aralığı ve Belirsizlikler

Şehir içi dur-kalk trafiğinden otoyol hızlarına, hafif virajlardan keskin dönüşlere kadar çok geniş bir sürüş yelpazesi söz konusudur [24]. Lastik aşınması, değişen yük ve yol koşulları (ıslak, buzlu, çukurlu yüzeyler) gibi belirsizlikler hem yanal hem de boylamsal kontrolü etkiler [25]. Trafik akışı, öndeki taşıtın davranışı veya sensör gürültüsü gibi dışsal etkenler de sistem kararlılığını zorlayabilir [3].

Bu zorluklar birleştiğinde, otonom taşıtların yol tutuşunu ve güvenliğini garanti etmek için hem doğrusal olmayan hem de çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) bir kontrol yaklaşımına ihtiyaç duyulur [11]. Bu tezde ele alınan temel sorun, yanal ve boylamsal

dinamikleri entegre ve kısıtları dikkate alacak şekilde aynı kontrolcüde çözebilmektir. Böylece, taşıt hem referans yolu takip ederken hem de hızını anlık olarak ayarlayarak stabilite ve konforu koruyabilecektir. Güncel araştırmalar, bu tür entegre kontrol çerçevelerinin şehir içi gibi dar alanlarda dahi yüksek performans sunduğunu ve özellikle karmaşık trafik koşullarında öngörücü algoritmalarla kaza riskini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir [28, 30].

1.4 Kısıtlar ve Kabuller

1.4.1 Yol Geometrisi

Sabit Eğri veya Parametrik Eğri (Spline) Varsayımı Tezde, yol tanımlaması genellikle dönme yarıçapı (R) veya eğrilik ($\rho = 1/R$) üzerinden yapılabilir [8]. Bazı senaryolarda spline veya polinom temelli yol tanımlamaları da kullanılabilir [14].

Kabul: Yol, sürekli ve önceden bilinen bir eğri şeklinde tanımlı; keskin virajlar veya yol çatallanması durumları senaryoya göre modele eklenmiştir.

Şerit Genişliği ve Koridor Yaklaşımı Kontrolcü, $\pm e_y$ aralığında kalmayı hedefleyerek şerit merkezine yakın sürüşü sağlamalıdır [26].

Kısıt: Taşıtın şerit sınırlarını aşmayacak biçimde yanal hata (e_y) sınırlanmıştır.

1.4.2 Konfor Kriterine Dayalı Yanal İvme Sınırlaması

ISO 2631-5 Standardına Uyumlu İvme Kısıtı Kontrolcü tasarımında yalnızca dinamik kararlılık değil, aynı zamanda yolcu konforu da göz önünde bulundurulmuştur. ISO 2631-5 standardına göre, farklı seviyelerdeki konfor durumları belirli ivme sınırlarıyla tanımlanmaktadır (Bkz. Tablo 1.3) [31]. Bu kapsamda, özellikle ani yön değiştirme gerektiren zorlu viraj senaryolarında, yanal ivme değerinin "uncomfortable" (konforsuz) sınırını aşmaması hedeflenmiştir. Böylece, taşıtın dinamik performansı korunurken yolcu konforu açısından kabul edilebilir sınırlar içinde bir sürüş sağlanması amaçlanmıştır.

Konfor Seviyesi	**Yanal İvme Sınırı (m/s^2)**
Rahat (Not uncomfortable)	0.315
Hafif rahatsız (A little uncomfortable)	0.630
Oldukça rahatsız (Fairly uncomfortable)	1.000
Rahatsız (Uncomfortable)	1.600
Çok rahatsız (Very uncomfortable)	2.500

Tablo 1.3 ISO 2631-5 standardına göre konfor seviyeleri ve yanal ivme sınırları

1.4.3 Taşıt Dinamiği ile İlgili Sadeleştirmeler veya İhmal Edilen Etkiler

Bicycle (Tek İzli) Model Kullanımı Özellikle kontrolcü tasarımında, yüksek boyutlu tam taşıt modeli yerine doğrusallaştırılmış veya tam doğrusal olmayan temsili kullanılacaktır [1, 12].

- **İhmal Edilenler**: Yük transferi, süspansiyon detayı, diferansiyel ayarları, arka teker yönlendirmesi vb.
- **Geçerlilik Aralığı**: Orta hız ve küçük/orta kayma açıları için doğruluk yeterli kabul edilir [6].

Aerodinamik Kuvvetleri ve Dış Etkenler Orta hız senaryolarında, rüzgâr direnci veya aerodinamik kuvvetlerin etkisi sabit bir drag katsayısı veya basit bir fonksiyonla temsil edilebilir [9].

Kabul: Bu tezde, önemli manevraların gerçekleştiği hız aralığında aerodinamik etkilerin birincil önemde olmadığı varsayılmıştır.

Lastik Doygunluğu Düşük/orta kayma açılarında doğrusal lastik kuvvet yaklaşımı yeterli görülmektedir. Aşırı kayma durumları (örneğin drift, yoğun kar-buz) kapsam dışı tutulmuştur.

1.4.4 Sensör Verileri ve Gürültü Varsayımları

Erişilebilir Sensör Verileri Konum ve hız ölçümleri (GPS, IMU), direksiyon açı sensörü, teker hız algılayıcıları vb. [3]. Taşıt içi CAN üzerinden motor torku, fren basıncı gibi veriler alınmıştır.

Gürültü ve Örnekleme Sensör verileri Gauss tipi rastgele gürültüye maruz kalabilir [27]. Belirli bir örnekleme frekansında (f_s) ölçü alınarak, kontrolcüde kullanılacağı varsayılmıştır.

Kabul: Sensörler, görece düşük gürültü ve gecikme ile veri sağladığı varsayılarak, herhangi bir ölçüm hatası olmadığı varsayılmıştır.

1.4.5 Diğer Operasyonel Koşullar ve Trafik Etkileşimi

Tek Taşıt Senaryosu Çoğu çalışma, taşıtın çevresinde başka taşıtlar olsa bile temel kontrol mimarisini geliştirirken tek taşıt perspektifi alır [24].

Kabul: Yol üzerinde engel veya diğer taşıtların konumları sabit veya zamanla değişen parametreler olarak modele eklenebilecektir, fakat temel tasarımda odak tek taşıtın yanal-boylamsal ivmedeki değişiminin gözlenmesi ve yol takibinin sağlanmasıdır.

Sabit veya Yavaş Değişen Hız Referansı Entegre kontrol yaklaşımında, hız belirli bir aralıkta veya referansta tutulmak istenebilir. Ancak anlık hız değişimleri (örneğin frenleme, hızlanma) de yanal kontrol esnasında öngörülür [25].

Kabul: Hız farklı senaryolarda, aynı başlangıç hızı ile başlatılıp yol eğriliğine göre takip performansına bağlı olarak hız değişimleri gerçekleşecektir.

1.4.6 Değerlendirme

Bu tezdeki ana problem, *tek bir kontrol yapısı altında* taşıtın hem şerit izleme (lateral offset ve heading error) hem de hız/hızlanma (boylamsal) gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, taşıt ve yol modeline ait belirli kabuller yapılmış; dış etkiler (aerodinamik kuvvetler, yüksek kayma açısı, süspansiyon dinamiği vb.) senaryo bazlı olarak ele alınmıştır [26]. Sensör verilerinin düzenli ve yeterli örneklemeyle sağlandığı, gürültünün ise olmadığı varsayılmıştır [3].

Gerçek dünyada taşıt dinamikleri çok daha karmaşık olduğundan, geliştirilen kontrol stratejisi ve modelleme yaklaşımları kademeli olarak doğrulanmalıdır. Yine de, bu tezde sunulan entegre kontrol fikri, "bisiklet modeli" düzeyinde yapılacak optimizasyonlarla *düşük-orta hız* ve *tipik yol koşullarında* (sehir içi veya otoyol sürüş senaryoları) koşullarında yol takip performansını artırmaya yönelik güçlü bir temel oluşturur [8].

1.5 Literatür Taraması

Otonom taşıt sistemlerinin en temel fonksiyonlarından biri olan yol takibi, literatürde genellikle iki ana alt problem üzerinden incelenmektedir: yanal (lateral) kontrol ve boylamsal (longitudinal) kontrol. Yanal kontrol, taşıtın dümenleme açısını düzenleyerek şeritte kalmasını veya belirli bir referans yolu takip etmesini hedeflerken; boylamsal kontrol, taşıt hızının veya ivmesinin ayarlanmasını içerir [1, 6]. Trafik yoğunluğu, ani manevra ihtiyaçları ve çeşitli yol koşulları göz önüne alındığında bu iki kontrol eyleminin ortak bir çerçevede ele alınması, otonom sürüşün stabilitesi ve güvenliği açısından kritik bir önem taşımaktadır [2].

Yol takibi, başlangıçta daha çok yalın "şerit takip" (lane keeping) problemleri

üzerinden ele alınmış, ardıl dönemlerde ileri sürücü destek sistemlerinin (ADAS) gelişimiyle birlikte hızlama ve yavaşlama (acceleration/deceleration) stratejileri de kapsam içine dahil edilmiştir [7]. Çeşitli kontrol yaklaşımları, ilgili dinamik kısıtların türüne ve model varsayımlarına bağlı olarak farklı başarı seviyelerine ulaşmıştır. Dolayısıyla, bu bölümde öncelikle mevcut yöntemler yanal ve boylamsal olarak ayrı ayrı sınıflandırılacak; sonrasında ise yanal ve boylamsal kontrolün entegre şekilde ele alındığı çalışmalar tartışılacaktır.

1.6 Mevcut Yöntemler

1.6.1 Yanal Kontrol (Steering) Yaklaşımları

Yalnızca yanal kontrol üzerine odaklanan çalışmaların ilk örneklerinde, sistem genellikle doğrusallaştırılmış bir taşıt modeli üzerinden ele alınır ve taşıt yanal kayma açısı (β) ile sapma hızı (r) denetimi hedeflenir [6]. Burada kontrol yöntemleri arasında:

- **doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR):** Optimal kontrol prensibini kullanarak, belirli bir ağırlıklandırma matrisi (Q, R) ile taşıtın direksiyon açısı kontrolünü yapar. Basitliği ve analiz kolaylığı nedeniyle literatürde sıkça kullanılır [9].
- **$\mathbf{H}_\infty$ Kontrol:** Parametre belirsizliklerinin önemli olduğu durumlarda gürbüz (robust) performans sağlamak amacıyla kullanılır. Özellikle lastik-radyal sertlik (cornering stiffness) tahmin hatalarına karşı dirençlidir [13].
- **Kayan Kipli (Sliding Mode) Kontrol:** Yüksek dereceli belirsizlik ve harici bozucuların mevcut olduğu durumlarda yanal sapmayı azaltmak için tercih edilir. Ani kontrol işaretleri (chattering) dezavantaj olarak ortaya çıkabilir, ancak uygun tasarım ve filtreleme teknikleriyle bu etki minimize edilebilir [7].

Bu çalışmaların ortak özelliği, taşıtın hızı sabit veya kontrol edilebilir parametrelerden bağımsız olarak varsayılır. Yanal kontrolün tek başına başarılı olması, genellikle düşük hız veya sınırlı manevra kabiliyetine sahip taşıt senaryolarıyla sınırlıdır [6, 8]. Örneğin, düz yolda seyreden taşıtlarda veya hafif virajlarda yalın yanal kontrol, beklenen yol tutuşunu ve konforu sağlayabilir. Ancak keskin virajlar veya yüksek hızlarda, boylamsal dinamikleri de hesaba katmaksızın sadece direksiyon açısını değiştirmek yetersiz kalabilmektedir [1].

1.6.2 Yalnızca Boylamsal Kontrol (Hız/Hızlanma) Yaklaşımları

Boylamsal kontrol, temelde taşıtın hızını düzenlemek ve trafik akışına uyumlu bir takip mesafesi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [23]. Bu kapsamda yaygın olarak:

- **Sabit Seyir Kontrolü (Cruise Control):** Basit PID veya PD kontrolcülerle taşıtın hızını sabit bir referansta tutmayı amaçlar. Genellikle düz yol sürüşlerinde tatmin edici performans sunar [17].
- **Adaptif Seyir Kontrolü (ACC):** Taşıtın önündeki hedefle arasındaki takip mesafesini korumayı amaçlar. Radar, lidar veya kamera verileriyle, anlık fren veya gaz komutunu oluşturur. Bu yöntem, trafik güvenliğinin artırılmasında önemli bir adımdır [16].
- **Optimal Boylamsal Kontrol (Örneğin MPC Tabanlı):**
  - Yakıt ekonomisi veya enerji verimliliği kriteri ile taşıt hızının kontrolü,
  - Karbon salınımını azaltma, yakıt tüketimini minimize etme gibi amaçlarla kullanılır [18, 19].

Yalnızca boylamsal kontrol yaklaşımında, taşıtın yanal hareketleri çoğunlukla ihmal edilir veya taşıtın şerit içinde sabit kaldığı varsayılır. Bu yöntemler, yoğun şehir içi dur-kalk senaryolarında veya konvoy/platooning durumlarında oldukça etkili sonuçlar üretebilmektedir [3]. Ancak gerçek yol koşullarında, öngörülemeyen şerit değişiklikleri veya virajlar gibi durumlarda boylamsal kontrol tek başına yeterli değildir [2].

1.6.3 Yanal ve Boylamsal Kontrolün Entegre Edildiği Yaklaşımlar

Gerçek sürüş koşullarında yanal ve boylamsal hareketler birbirinden ayrı düşünülemez, çünkü taşıtın yönü ile hızı arasındaki etkileşim son derece kritiktir [12]. Bu nedenle entegre kontrol yaklaşımları, taşıtın hem direksiyon açısını hem de hızını (ve/veya frenlemesini) aynı çerçevede düzenlemeyi amaçlar:

- **Model Öngörülü Kontrol (MPC) Tabanlı Yöntemler:**
  - Zaman penceresinde taşıtın durumunu tahmin ederek (prediction), direksiyon ve hız komutlarını optimize eder [8, 14].
  - Yüksek hız, keskin viraj veya düşük sürtünmeli zemin gibi farklı koşullarda kararlı bir çözüme ulaşma potansiyeli vardır [15].

  - Çeşitli kısıtlar (lastik kuvvet sınırlamaları, hız limitleri vb.) eşzamanlı olarak gözetilir.

- **Kaymalı Kontrol ve Türetilmiş Metotlar:**
  - Hem yanal hem de boylamsal dinamikler için kayan yüzey tanımlanarak, taşıtın istenen şerit merkezine uygun hız ve direksiyon açısı elde edilir [7].
  - Kayan mod denetiminin belirsizliklere dayanıklı yapısı, sürücü modellemesi veya yol pürüzsüzlüğü gibi bilinmezlikleri yönetmeyi kolaylaştırabilir.

- **Entegre İç-Dış Kapalı Çevrim Denetimi:**
  - Çalışmada, ayrı ayrı kontrol edilen ABS fren sistemleri (iç kapalı çevrim) ile LQR tabanlı aktif direksiyon kontrolü (dış kapalı çevrim) entegre edilerek, karmaşık yol koşullarında hem boylamsal hem de yanal dinamiklerin kararlılığı sağlanmıştır [32].
  - İç döngü, ekstremum arama algoritması ile yol-tutunma katsayısı bilgisi olmadan optimum kayma oranında maksimum fren kuvveti üretirken; dış döngü, LQR yaklaşımıyla aracın yan kaymasını ve sapma açısını sınırlayarak yanal dengeyi korumaktadır.
  - Gerçekçi lastik, fren ve aktüatör modelleri ile modellenen sistem, μ-split gibi dengesiz zemin koşullarında başarıyla test edilmiş; entegre kontrol yapısı, savrulma riskini azaltıp kısa duruş mesafesi ve yönlendirme yeteneğini koruyarak sistemin etkinliğini göstermiştir.

- **LQR ve Ek Kısıtlar:**
  - Klasik LQR denetimi, sistemin doğrusal olmayan davranışlarını yakalayabilmek adına bileşik taşıt modellerinde kullanıldığında ek kısıtlar gerektirir (örneğin direksiyon açı limiti, hız aralığı vb.).
  - Bu tür çalışmalarda, doğrusal olmayan lastik modelleri veya sürtünme fonksiyonları da basitleştirilerek dahil edilebilir [9].

Bu entegre yaklaşımlar sayesinde taşıt, farklı senaryolara uyum sağlayabilmekte ve aynı zamanda yol tutuşu, sürüş konforu, enerji verimliliği gibi çoklu hedefleri sağlayabilme kabiliyetine sahip olmaktadır [32]. Örneğin yüksek hızla keskin viraj alınması gereken durumlarda MPC tabanlı kontrolcüler, direksiyon açısını ve hız komutunu aynı anda ayarlayarak taşıtın stabil kalmasını sağlayabilir. Buna

karşın, sadece yanal veya sadece boylamsal kontrolü önceleyen sistemlerde, bu gibi keskin manevralarda yol tutuş veya sürüş konforu bakımından ciddi sorunlar yaşanabilmektedir [8].

1.7 Literatürden Çıkarımlar

Mevcut literatür incelendiğinde, yanal ve boylamsal kontrollerin birlikte ele alındığı entegre yaklaşımların özellikle hızla değişen sürüş koşullarında daha üstün performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, aşağıda sıralanan zorluklar kontrol açısından dikkate alınması gereken problemlere işaret etmektedir:

- **Doğrusal Olmayan Taşıt Dinamikleri:** Birçok çalışma, taşıt dinamiklerini doğrusal varsayımlarla temsil etmekte veya doğrusal olmayan etkileri (örneğin lastiğin doğrusal olmayan bölgedeki davranışı, diferansiyel kayıpları, aerodinamik kuvvetler) tamamen göz ardı etmektedir [1, 12]. Bu durum, yüksek hız veya keskin manevra senaryolarında kontrol performansını düşürebilmektedir.
- **Optimum Hız/Hızlanma Stratejileriyle Yanal Kontrolün Eş Zamanlı Ele Alınması:** Her ne kadar MPC temelli entegre yöntemler literatürde yer bulsa da, bu çalışmaların büyük bir kısmı ya hızın sabit kaldığı varsayımını yapar ya da hız profilini önceden tanımlı bir fonksiyona dayandırır [8]. Gerçek trafik şartlarında ise hızın dinamik olarak düzenlenmesi ve direksiyon açısıyla ortak bir çerçevede optimize edilmesi gerekmektedir [20].
- **Gerçek Zamanlı Hesaplama Kısıtları:** Gelişmiş tahmin ve optimizasyon algoritmaları, yüksek sayısal maliyet getirebilir. Bu da gömülü (embedded) otomotiv sistemlerinde gecikmelere ve hesaplama gücü yetersizliğine yol açabilmektedir [22].
- **Çoklu Hedef Optimizasyonu:** Güvenlik, konfor, enerji verimliliği gibi birden fazla hedefin aynı anda karşılanması ve bu hedefler arasındaki önceliklendirme mekanizmalarının tasarlanması halen üzerinde çalışılan bir alandır [14].

Bu zorluklar doğrultusunda, tez çalışmasının yenilikçi yönü "doğrusal olmayan taşıt modeline dayalı" entegre bir yanal-boylamsal kontrol yapısı geliştirmek ve bu yapıyı belirli performans kriterleri (stabilite, konfor vb.) çerçevesinde optimize etmektir. Ayrıca, gerçek zamanlı uygulanabilirlik hedeflenerek, denklemlerdeki sadeleştirmelerin ve optimizasyon algoritmasının simülasyon ortamında çalışabilmesine yönelik iyileştirmeler yapılacaktır. Böylece, literatürdeki

eksikliği hissedilen "yüksek hız senaryolarında yol takibi ve hız kontrolünün bütünleşik ele alınması" meselesine, teorik ve uygulamalı bir bakış açısıyla katkı sağlamak hedeflenmektedir.

1.8 Tezin Anahatları

Bu tez, otonom taşıtların yanal ve boylamsal hareketlerini birlikte denetlemeyi amaçlayan bir kontrol yaklaşımını konu almaktadır. Çalışma kapsamı gereği, ilk bölümde (Giriş, Literatür Taraması ve Tezin Anahatları) yer alan temel bilgiler ışığında, sonraki bölümler aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır.

2. Kısım: Taşıt Modeli

İkinci bölümde öncelikle kontrol edilecek taşıtın ayrıntılı dinamik modeli tanıtılacak ve taşıtın yol tutuşunu belirleyen temel parametreler (örn. lastik kuvveti, kütle, atalet momenti) üzerinde durulacaktır. Ardından, kontrolcü tasarımı için kullanılan daha sadeleştirilmiş veya doğrusallaştırılmış taşıt modelleri (ör. "bicycle model") ele alınarak, gerçekçi ve hesaplanabilir bir çerçeve oluşturulacaktır [1, 12]. Bölümün amacı, tez boyunca kullanılacak denklemlerin ve varsayımların temellerini sağlam bir biçimde sunmaktır. Böylece, entegre kontrolcü yapısının dayandığı dinamiklerin hangi koşullarda geçerli olduğu açıklığa kavuşturulacaktır.

3. Kısım: Yörünge Takibi

Üçüncü bölümde, taşıt üzerinde tasarlanan kontrol yapısının teorik temelleri verilecek ve özellikle yanal (direksiyon) ile boylamsal (hız/ivme) kontrolün nasıl bütünleştirildiği detaylandırılacaktır. Bu kapsamda, hem tasarlanan kontrol yasasının matematiksel ifadesi hem de yol takibini sağlayacak referans sinyalleri (ör. hedef yanal konum, hedef hız) anlatılacak ve taşıt dinamikleriyle etkileşimi ortaya konacaktır. Ayrıca, tezde geliştirilen yöntemle kıyaslama yapmak üzere kullanılacak alternatif (benchmark) kontrolcüler de bu bölümde tanıtılacaktır.

4. Kısım: Simülasyon ve Sonuçlar

Dördüncü bölüm olan simülasyon ve sonuçların yer aldığı kısımda, tezde sunulan kontrol yönteminin performansının irdeleneceği bölümdür. İlk kısımda, simülasyon ortamının (MATLAB/Simulink) detayları ile senaryoların yapılandırılması açıklanacaktır [2]. Ardından, belirlenen senaryolara (düz yol, keskin viraj, farklı hız seviyeleri vb.) ilişkin sonuçlar görsel ve sayısal verilere dayalı olarak sunulacak; yanal sapma, hız dalgalanmaları, ivme sınırları ve konfor ölçütleri gibi parametreler üzerinden değerlendirmeler yapılacaktır [20]. Son olarak,

önerilen yaklaşımın literatürdeki diğer yöntemlerle (ör. tekil yanal kontrol veya tekil boylamsal kontrol) kıyaslanması neticesinde elde edilen avantajlar ve sınırlılıklar tartışılacaktır [14].

5. Kısım: Sonuçlar

Tezin son bölümünde, çalışmada elde edilen bulgular özetlenecek ve önerilen kontrol yönteminin genel performansı hakkındaki değerlendirmeler yapılacaktır. Hem teorik hem de uygulamalı boyutta ortaya konan yeniliklerin, literatürdeki eksiklikleri nasıl giderdiği belirtilecektir [22]. Ayrıca, gelecekteki olası çalışmalar ve iyileştirmeler (örneğin, farklı taşıt platformlarına uyarlama, daha karmaşık dinamik modellemeler, gerçek zamanlı hesaplama için simülasyon ortam testleri) üzerine öneriler sunulacaktır. Böylece, tezin hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara yönelik somut çıktıları belirginleşecektir.

2
TAŞIT MODELLEMESİ

2.1 Giriş

Bu bölümün amacı, tez kapsamındaki analiz ve kontrol yaklaşımının temelini oluşturacak taşıt modellerini tanıtmak ve bunların kontrolcü tasarım sürecindeki rolünü netleştirmektir. İlk olarak, temel lastik kuvveti ve boylamsal-yanal taşıt dinamikleri tanıtılacak; bu kapsamda hem bağımsız hem de birleştirilmiş (combined slip) lastik kuvveti modelleri ele alınacaktır. Doğrusal olmayan yol etkenleri, sadeleştirilmiş bir boylamsal dinamik model elde edebilmek için doğrusal yaklaşımla yeniden düzenlenecektir. Ayrıca, hem doğrusal olmayan hem de hız parametreli doğrusal tek iz modelleri incelenecek; böylece taşıtın yanal tepkisinin temelini oluşturan sapma hızı, direksiyon girdisi ve moment bozucu arasındaki ilişkiler değerlendirilecektir.

Taşıtın daha geniş kapsamlı tam taşıt(*full-vehicle*) dinamik özellikleri ve lastik kuvvet ilişkileri genel taşıt modeli başlığı altında özetlenecektir. Bunu takiben, gerçek zamanlı hesaplama ve kontrol tasarımına elverişli basitleştirilmiş bisiklet modeli sunulacak; doğrusal ya da doğrusal hız değişkenli yapıların kullanımının getirdiği avantaj ve kısıtlar tartışılacaktır. Son olarak, Aktarma Organı (Driveline) Modeli bölümünde, taşıtın hızlanma, yavaşlama ve tekerleklere güç iletimi gibi boylamsal dinamikleri şekillendiren ek unsurlar incelenecektir.

Bölümün genel çerçevesi aşağıdaki ana maddelerle özetlenebilir:

- **Temel Kinematik ve Dinamik Denklemler:**
  Taşıt kütle merkezi, yanal sapma hızı (r) (yaw rate) ve yanal kayma açısı (β) (side-slip angle) gibi parametrelerin tanımı; boylamsal ve yanal hareketlerin ifade edilmesi.
- **Lastik Modelleri:**
  Sadeleştirilmiş doğrusal ve doğrusal olmayan lastik kuvveti modellerinin tanıtılması; lastik kuvvetlerinin taşıt dinamiği ve kontrolü üzerinde etkisi.

- **Aktarma Organı (Driveline) Modeli:**
  Güç kaynağı, şanzıman ve diferansiyel gibi bileşenlerin temel işleyişi ve bunların boylamsal kuvvet üretimiyle yanal tutuş arasındaki etkileşimi.

- **Kontrolcü Tasarımıyla Entegrasyon:**
  Taşıtın hem boylamsal hem de yanal dinamiklerinin entegre şekilde ele alınarak, öngörü (prediction) ile optimizasyon kısıtlarının kullanımına dayalı kontrol yöntemleri.

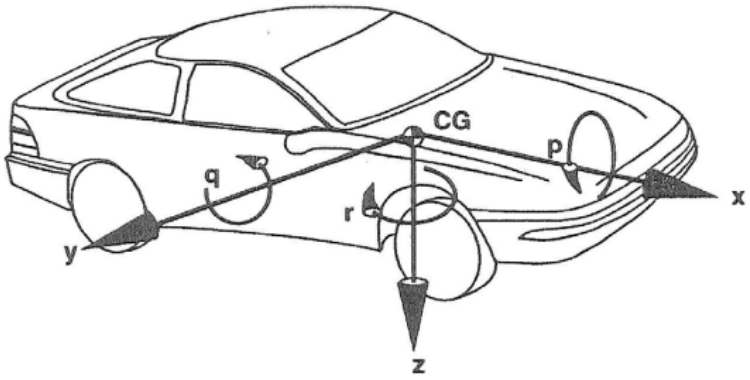
Ek olarak, yol geometrisi ve yol eğriliği girişleri de sisteme bir bozucu olarak dahil edilecek; bu sayede konum ve yönelim hatalarını içeren yol takibi (path tracking) modelleri hem doğrusal hem de doğrusal olmayan biçimde oluşturulacaktır. Belirli bir önizleme mesafesini esas alan yöntemler, saf takip (*pure pursuit*) ve *Stanley* gibi farklı dümenleme kontrol stratejileriyle karşılaştırılacaktır. Böylece, boylamsal-yanal etkileşimi daha kapsamlı değerlendirilip, bütünsel bir taşıt modeli üzerinden kontrolcü tasarımı amaçlanacaktır.

2.2 Modellemeye Giriş

Otonom taşıtlardaki kontrol uygulamalarının başarıya ulaşabilmesi, kullanılan taşıtın dinamik davranışını yeterince kapsayan gerçekçi bir modele bağlıdır [1]. *Full vehicle model* olarak adlandırılan geniş kapsamlı bu model, taşıtın dört tekerleğini, kütlesini, atalet momentlerini, lastik kuvvetlerini ve sürtünme etkilerini dikkate alarak yanal ve boylamsal dinamikleri birlikte tanımlar. Böylece yüksek hız, keskin viraj veya ani frenleme gibi farklı sürüş senaryolarında taşıtın davranışları daha doğru öngörülebilir.

Bu çalışmada kullanılan taşıt koordinat sistemi, otomotiv mühendisliği alanında uluslararası ölçekte kabul gören SAE J670 standardına uyacak biçimde tanımlanmıştır [33]. Söz konusu standarda göre; taşıt hareketleri, taşıtın ağırlık merkezine ve taşıtla hareket eden bir koordinat düzlemini yeryüzüne göre tanımlar. Burada, x ekseni taşıta ileri (boyuna) yönde, y ekseni taşıtın sağ (yanal) yönünde ve z ekseni aşağı yönde tanımlanarak taşıt atalet ve eylemsizlik özelliklerinin hesaplandığı bir referans çerçevesi oluşturulur. Ayrıca p, x ekseni etrafındaki dönme hızı; q, y ekseni etrafındaki dönme hızı ve r, z ekseni etrafındaki dönme hızı olarak tanımlanır. Böylece, taşıtın konumu, dönüşleri ve ivmeleri gibi temel hareket bileşenleri için tutarlı bir tanım sağlanır. Bu koordinat sistemi, ileri, yanal ve düşey kuvvetlerin ayrıştırılmasını ve sürüş koşullarının incelenmesini kolaylaştırır.

Aşağıdaki alt başlıklarda önce taşıtın kinematik temelleri açıklanacak, ardından lastik kuvvetlerini modellemede kullanılan yöntemlere yer verilecektir. Bu sayede, tezde

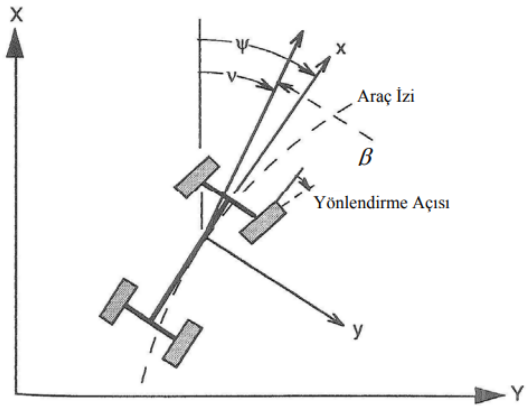


Şekil 2.1 SAE J670 koordinat sistemi [34].

kurulacak kontrol yapısının hangi fiziksel çerçeveye dayandığı ve hangi varsayımlarla çalıştığı netleştirilecektir.

2.2.1 Dinamik ve Kinematik Temeller

Kütle (M) ve İvme Taşıtın durma veya manevra sırasındaki yörüngesi, yeryüzünde sabit bir koordinat sistemine göre belirlenir. Bu sistem, hareketin başladığı noktada taşıt koordinat sistemiyle örtüşecek biçimde seçilir. Eksenler sırasıyla x-ileri, y-sağ ve z-dikey (aşağı pozitif) yönleri temsil eder. Ayrıca x ekseni ile X ekseni arasındaki açı Ψ, taşıtın hız vektörü ile X ekseni arasındaki açı ν ve taşıt x ekseni ile hız vektörü arasındaki açı β olarak tanımlanır (Şekil 2.2). Bu çerçevede kütle merkezi, yanal kayma açısı (β) ve yanal sapma hızı (yaw rate, r) gibi parametreler, Newton-Euler veya benzeri yaklaşımlarla ifade edilerek taşıtın boylamsal ve yanal hareketleri analiz edilebilir [1].

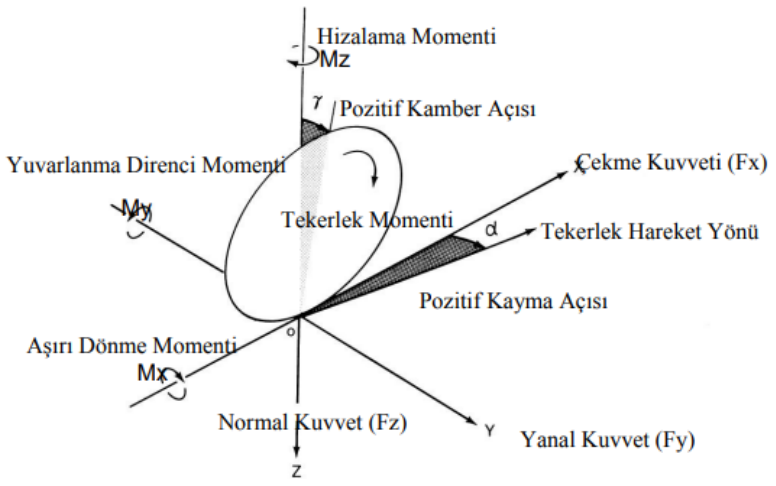


Şekil 2.2 Sabit ve taşıt koordinat sistemlerinin şematik gösterimi [34].

Atalet Momentleri (I_z) Yanal sapma hareketini (yaw) belirleyen temel dinamik parametre, taşıtın z ekseni etrafındaki atalet momentidir (I_z). Bu değer, taşıtın kütlesinin yayılımına ve boyutlarına bağlıdır. Yanal kontrol üzerinde taşıtın tepkisini önemli ölçüde etkilemektedir.

Viraj Sertlikleri (Cornering Stiffness, C_f ve C_r) Lastiklerin yanal kuvvete karşı tepkisini temsil eden viraj sertliği parametreleri, taşıtın ön (C_f) ve arka (C_r) akslarındaki lastiklerin yanal kayma açısı ile ürettikleri yanal kuvvetlerini ifade eder [12]. Bu parametreler, tekerleğin dönme açısıyla lastik kuvveti arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki kurar ve kontrol tasarımının ana girdilerinden biridir [6].

Sürtünme Kuvvetleri ve Yol-Tekerlek Etkileşimi Taşıt dinamiğinde kuvvet ve momentler temel parametreler olarak değerlendirilir. Taşıtın boyuna eksenindeki (x-ekseni) pozitif yön öne doğrudur. Lastiğe etki eden yük yukarı yönlü olduğu için, z-ekseni negatif biçimde tanımlanmıştır. Bu tanımdan doğan uyumsuzluğu gidermek amacıyla SAEJ670e (Taşıt Dinamiği Terminolojisi), aşağı yönde etkiyen kuvveti "Normal Kuvvet" olarak adlandırmakta, bu kuvvetin negatifini ise "Dikey Kuvvet" şeklinde tanımlamaktadır. Böylelikle "Dikey Kuvvet", yukarıya doğru pozitif işaretli lastik yüküne karşılık gelmektedir. (Şekil 2.3).

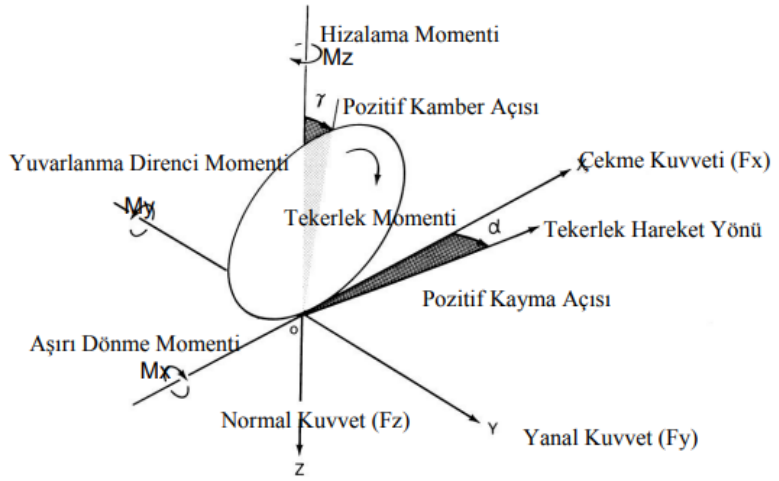


Şekil 2.3 SAE J670 Koordinat Sistemi Göre Lastik Kuvvet ve Momentlerinin şematik gösterimi [34].

2.3 Lastik Kuvveti Modeli

2.3.1 Lastik Kuvvetleri

Lastik kuvvetlerini tanımlarken, SAE koordinat sistemine göre x yönü nominal dönme ekseni, y yönü yanal eksen ve z yönü de normal (dikey) eksen olarak kabul edilir. Şekil 2.4'te gösterildiği üzere, teker üzerine etkiyen kuvvetler açıklanmaktadır.



Şekil 2.4 SAE lastik eksenleri ve temel kuvvet-moment bileşenleri [34].

- Boyuna Kuvvet (F_x): Yol ile tekerlek düzleminin kesişimine paralel konumlanan ve yolun lastiğe uyguladığı kuvvet.
- Yanal Kuvvet (F_y): Yol ile tekerlek düzleminin kesişimine dik konumlanan, yolun lastiğe uyguladığı kuvvet.
- Normal Kuvvet (F_z): Yol düzlemine dik doğrultuda, yolun lastiğe uyguladığı kuvvet.
- Aşırı Dönme Momenti (M_x): Yol ile tekerlek düzleminin kesişimine paralel konumlanan, yolun lastiğe uyguladığı moment.
- Yuvarlanma Direnci Momenti (M_y): Yol ile tekerlek düzleminin kesişimine dik konumlanan, yolun lastiğe uyguladığı moment.
- Hizalama Momenti (M_z): Yol düzlemine dik doğrultuda, yolun lastiğe uyguladığı moment.
- Kayma Açısı (α): Taşıtın hareket doğrultusu ile tekerleğin yönelimi arasındaki açı.
- Kamber Açısı (γ): Dikey eksen ile tekerlek düzlemi arasındaki açı olup, taşıtın dışına doğru eğim durumunda pozitif kabul edilir.

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, lastik x ekseninde boylamsal kuvvet, y ekseninde yanal kuvvet ve z ekseninde normal kuvvet oluşur. Lastiğin dönme hızı, taşıta göre farkı ya da kayma miktarı kayma oranıyla ilişkilidir. Yanal kayma, lastiğin dönüş sırasında oluşan sapma açığını ortaya koyar. Böylece, hem boylamsal hem de yanal kuvvetlerin ortaya çıkış mekanizması, modellemede temel öğe hâline gelir.

2.3.1.1 Doğrusal Olmayan Teker Modeli

Pacejka modeli, deneysel verilerle yüksek uyum sağlaması nedeniyle doğrusal olmayan lastik modelleri arasında sıkça tercih edilmektedir. Bu model, lastiğin yanal ve boylamsal kuvvet üretimini çeşitli tasarım ve yol koşullarına göre ifade eden parametrelere sahiptir. Aşağıdaki denklemler ve tanımlar, özellikle kayma açısı (slip angle) ve kayma hızı (slip ratio) kavramlarının doğru anlaşılmasına dayanmaktadır [12].

Boylamsal Kayma Oranı Deneysel çalışmalar, küçük kayma oranı değerlerinde boylamsal kuvvetin kayma oranıyla orantılı olduğunu göstermektedir. Burada kayma oranı genellikle s ile ifade edilir ve tekerleğin çevresel hızı ile taşıtın boylamsal hızı arasındaki farkı temsil eder. Çekiş (ivmelenme) veya frenlemede,

$$s = \frac{\omega R_e - V_x}{\omega R_e} \quad \text{(çekiş veya ivmelenme için)}, \tag{2.1}$$

$$s = \frac{\omega R_e - V_x}{V_x} \quad \text{(frenleme için)}, \tag{2.2}$$

şeklinde tanımlanabilir [1]. Burada V_x, tekerleğin aksındaki gerçek boylamsal hız, ω tekerleğin açısal hızı ve R_e lastiğin efektif yarıçapıdır. Küçük kayma oranı bölgelerinde boylamsal kuvvet, yaklaşık olarak doğrusal bir fonksiyonla ifade edilir.

2.3.1.1.1 Taşıt Yanal Kayma Açısı Yanal kuvvet oluşumu da küçük kayma açılarında benzer bir doğrusal orantıya sahiptir. Kayma açısı, tekerleğin bakış doğrultusu ile hız vektörü arasındaki açı olarak tanımlanır. Ön lastiklerin için kayma açısı,

$$\alpha_f = \delta - \beta_f, \tag{2.3}$$

şeklinde ifade edilir. Burada δ, direksiyon açısı, β_f ise ön tekerleğin hız vektörünün taşıt boyuna ekseniyle yaptığı açıdır. Arka lastiklerin kayma açısı ise benzer biçimde

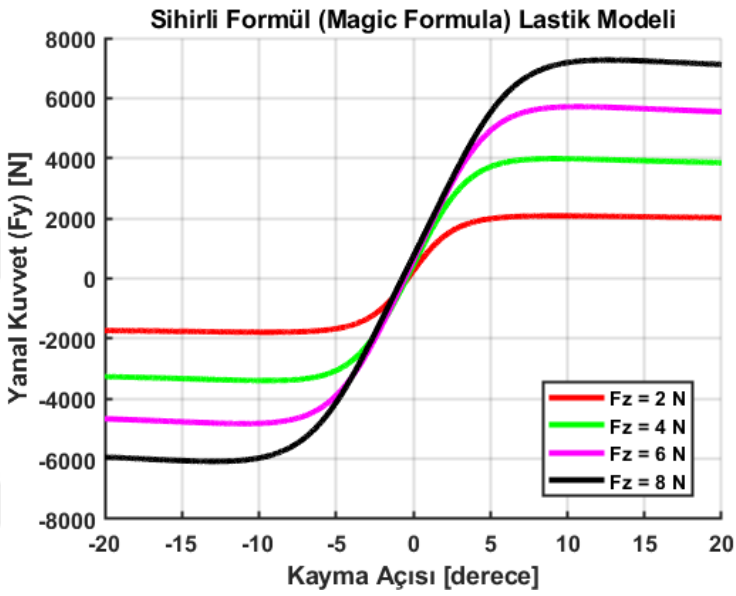
$$\alpha_r = -\beta_r \tag{2.4}$$

2.3.1.2 Yanal Kuvvetler

Lastiklerin yanal kuvvet üretebilme kapasitesi, lastik kayma açısına (α) bağlı olarak değişir. Bu ilişki, Pacejka tarafından önerilen şu denklemle ifade edilebilir [12]:

$$F_y(\alpha) = D\,\sin\Big(C\,\arctan\big(B\alpha - E\,(B\alpha - \arctan(B\alpha))\big)\Big), \tag{2.5}$$

burada B, C, D ve E parametreleri, lastiğin yapısal özellikleri, yük koşulları ve yol yüzeyi koşullarına göre belirlenir. Taşıtın ağırlık transferi değiştikçe, bu parametreler farklı değerler alabilir.



Şekil 2.5 Farklı F_z değerleri için yanal kuvvet-slip açısı ilişkisi [35].

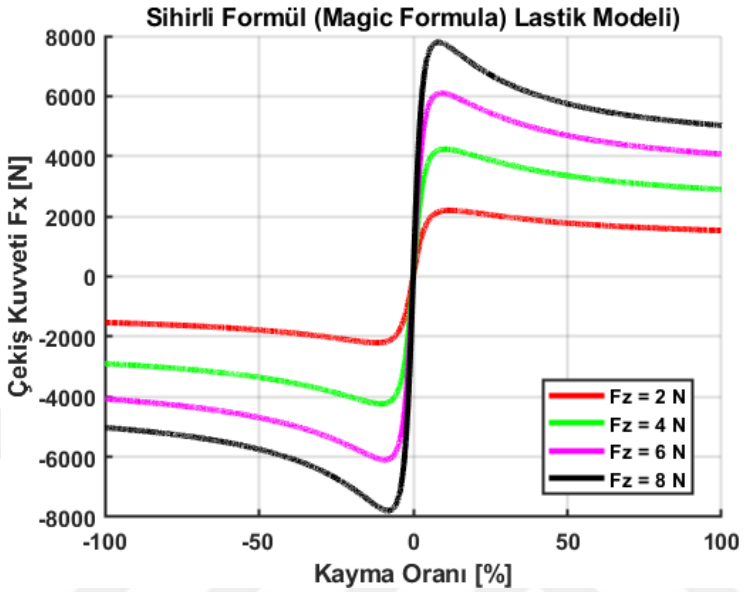
Şekil 2.5'te, farklı normal yük (F_z) değerleri altında lastiğin ürettiği yanal kuvvetin lastik kayma açısına (α) göre değişimi gösterilmektedir. Bu veriler, Genta tarafından sunulan deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak modellenmiştir [35]. Şekilde, artan normal yük altında yanal kuvvetin genel eğilimi gözlemlenmektedir.

2.3.1.3 Boylamsal Kuvvetler

Benzer şekilde, lastiğin boylamsal kuvveti (F_x), kayma oranı (s) ile ilişkilendirilir. Pacejka modeli, boylamsal kuvvet için de aynı yapıyı kullanır ancak ilgili parametreler, çekiş ve frenlemeye dair özel test koşullarıyla belirlenir. Bu parametreler, lastiğin farklı yük aktarım durumlarındaki çekiş gücünü veya fren kuvvetini temsil eder.

$$F_x(s) = D_x\,\sin\Big(C_x\,\arctan\big(B_x s - E_x\big(B_x s - \arctan(B_x s)\big)\big)\Big). \tag{2.6}$$

Şekil 2.6'te, farklı normal yük (F_z) değerleri altında lastiğin ürettiği boylamsal kuvvetin kayma oranına (s) göre değişimi sunulmuştur. Bu veri seti, yine Genta tarafından paylaşılan deney tabanlı sonuçlardan uyarlanarak hazırlanmıştır [35]. Grafikte, normal yük arttıkça kayma oranına bağlı boylamsal kuvvet profilinin nasıl değiştiği izlenebilir.



Şekil 2.6 Farklı F_z değerleri için boylamsal kuvvet-slip oranı ilişkisi [35].

2.3.1.4 Doğrusal Teker Modeli

Düşük kayma açılarında (α küçük) ve küçük direksiyon açıları varsayımı altında, lastik yanal kuvveti doğrusal bir ifadeyle yaklaşık olarak modellenebilir. Bu yaklaşımda yanal kuvvet

$$F_y \approx -C_f\,\alpha, \tag{2.7}$$

şeklinde tanımlanır ve C_f viraj sertliği katsayısı olarak adlandırılır [1]. Aynı şekilde, küçük kayma oranı değerlerinde boylamsal kuvvet de benzer bir yaklaşım kullanılarak

$$F_x \approx C_r\,s \tag{2.8}$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada C_r boylamsal viraj sertliği parametresidir.

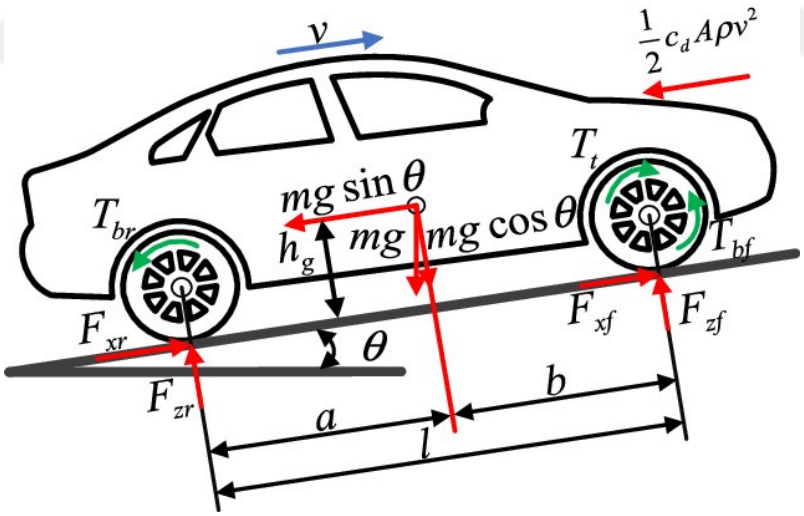
Bu doğrusal model, düşük hızlarda veya hafif direksiyon manevralarında tutarlı sonuçlar verebilir. Ancak yüksek hız, büyük direksiyon açıları ve yüksek kayma durumlarında doğrusal model ile gerçek lastik davranışı arasındaki uyum azalır [6]. Bu çalışmada yüksek hızlardaki kontrol uygulamaları esas alındığı için, doğrusal olmayan teker modeli tercih edilecektir.

2.3.2 Sonuç ve Değerlendirme

Tam taşıt modeli, gerek yanal gerekse boylamsal dinamikleri doğru şekilde yansıtan, lastik kuvvetleri gibi kritik etkenleri içeren kapsamlı bir taşıt modelidir. Bu model, yüksek hız veya zorlu yol koşullarında taşıtın davranışını tahmin etmek bakımından büyük bir avantaja sahiptir [12]. Ancak kontrol uygulamalarında, özellikle gerçek zamanlı hesaplama gereksinimi söz konusu olduğunda, bu kadar ayrıntılı bir modelin sadeleştirilmesi veya belirli varsayımlarla doğrusallaştırılması gerekebilmektedir [1, 22]. Dolayısıyla, tez kapsamında entegre yanal-boylamsal kontrol yaklaşımı geliştirilirken, hem tam model hem de sadeleştirilmiş modeller arasındaki denge gözetilecek ve bu yaklaşımların performans farklılıkları ilerleyen bölümlerde tartışılacaktır.

2.4 Taşıt Boylamsal Dinamiği

Boylamsal taşıt dinamiği, taşıt kinematiğinden farklı olarak hız ve ivme değişimlerini ele alır. Şekil 2.7'te, taşıta etkiyen kuvvetlerin genel görünümü verilmiştir. Bu kuvvetler arasında yuvarlanma direnci, aerodinamik sürükleme ve eğimli yoldaki yer çekimi bileşeni yer alır.



Şekil 2.7 Taşıt hareketine etki eden boylamsal kuvvetler

Yuvarlanma direnci, lastikler ile zemin arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkar ve taşıt kütlesi ile yuvarlanma direncine göre belirlenir:

$$F_r = Mg\, f_r, \tag{2.9}$$

burada M, taşıt kütlesi; g, yer çekimi ivmesi; f_r ise yuvarlanma direnci katsayısıdır.

Taşıt eğimli yolda hareket ederken, normal kuvvetin değişmesi nedeniyle denklem

$$F_r = M g\, f_r\, \cos(\theta) \tag{2.10}$$

şeklinde düzenlenir. Burada θ yol eğim açısını temsil eder.

Aerodinamik sürükleme, taşıtın hızı arttıkça etkisi artan bir kuvvettir:

$$F_w = \frac{1}{2}\, \rho\, A_f\, c_d\, v^2, \tag{2.11}$$

burada ρ, hava yoğunluğu; A_f, taşıtın önden kesit alanı ve c_d, aerodinamik sürükleme katsayısıdır.

Eğimi olan yollarda yer çekiminin eğim bileşeni de taşıt üzerinde etkilidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$F_g = M\, g\, \sin(\theta). \tag{2.12}$$

Taşıtın boylamsal hareket denklemi, tüm bu kuvvetlerin denge ve hareket ilişkisi göz önünde bulundurularak yazılabilir:

$$M\, \frac{dv}{dt} = F_T - \big(F_r + F_w + F_g\big), \tag{2.13}$$

ya da

$$M\, \frac{dv}{dt} = F_T - M\, g\, f_r\, \cos(\theta) - \tfrac{1}{2}\, \rho\, A_f\, c_d\, v^2 - M\, g\, \sin(\theta). \tag{2.14}$$

Burada F_T, taşıtın tahrik (traction) kaynağının oluşturduğu kuvvettir. Bu çalışmada, tahrik kaynağı (örneğin içten yanmalı motor veya elektrik motoru) ve aktarma organı kayıpları ayrıntılı biçimde ele alınmamaktadır. İstenen tahrik kuvvetinin, ilgili güç kaynağı tarafından karşılanabildiği varsayılmaktadır.

Taşıt dinamiğinde kullanılan bazı temel parametreler Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Burada, tipik bir sedan taşıtın önden kesit alanı değeri ve asfalt yol için geçerli yuvarlanma direnci katsayısı esas alınmıştır.

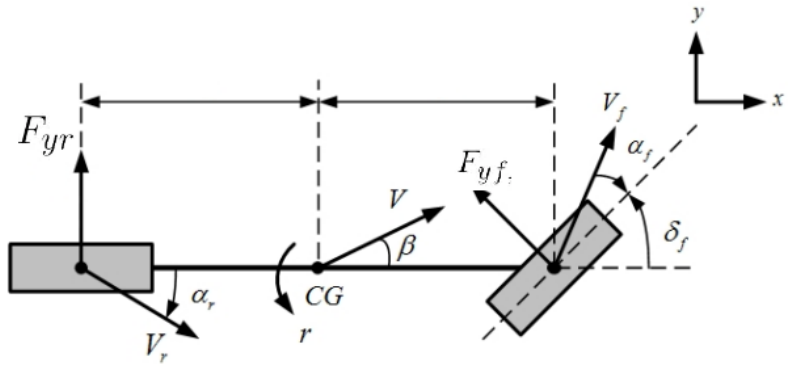
Tablo 2.1 Boylamsal dinamik denkleminde kullanılan parametreler [35].

Parametre	Değer
Hava yoğunluğu (ρ)	1.24 kg/m^3
$c_d \cdot A_f$	0.6 m^2
Yuvarlanma direnci katsayısı (f_r)	0.0012
Yer çekimi ivmesi (g)	9.81 m/s^2

2.5 Taşıt Yanal Dinamiği

2.5.1 Tek İzli Taşıt Modeli

Tek izli taşıt modelinde, O atalet sistemi taşıtın ilk konumuna yerleştirilir ve taşıtın kütle merkezi bu çerçevenin başlangıç noktasıyla çakışacak biçimde tanımlanır. Taşıtla birlikte hareket eden CG–x–y koordinat sistemi ise boylamsal ekseni x, yanal ekseni y olacak şekilde kabul edilir. Kütle merkezinin hızı V, taşıt boylamsal eksenine göre β yanal kayma açısıyla tanımlanır. Ön ve arka tekerleklerin hızları V_f ve V_r, ilgili lastik kayma açıları α_f ve α_r olarak ifade edilir. Dümenleme açısı δ_f olmakla birlikte, çalışmada arka direksiyon açısı δ_r sıfır (yalnızca ön tekerlekten dümenleme) kabul edilir.



Şekil 2.8 Üç serbestlik dereceli tek izli taşıt modeli

$$\sum F_x = M\,(a_x - r\,V_y) = -\,F_{y_f}(\alpha_f)\,\sin(\delta_f)\;-\;F_{y_r}(\alpha_r)\,\sin(\delta_r), \tag{2.15}$$

$$\sum F_y = M\,(a_y + r\,V_x) = F_{y_f}(\alpha_f)\,\cos(\delta_f)\;+\;F_{y_f}(\alpha_r)\,\cos(\delta_r), \tag{2.16}$$

Burada a_x, a_y taşıtın kütle merkezindeki boylamsal ve yanal ivmeyi, V_x, V_y ise kütle merkezindeki boylamsal ve yanal hızı simgeler. r yanal sapma oranı, m ise taşıt kütlesidir.

Taşıtın z eksenine göre kütle merkezi etrafındaki moment denklemi, yanal sapma hareketini tanımlamak üzere şu şekilde verilir:

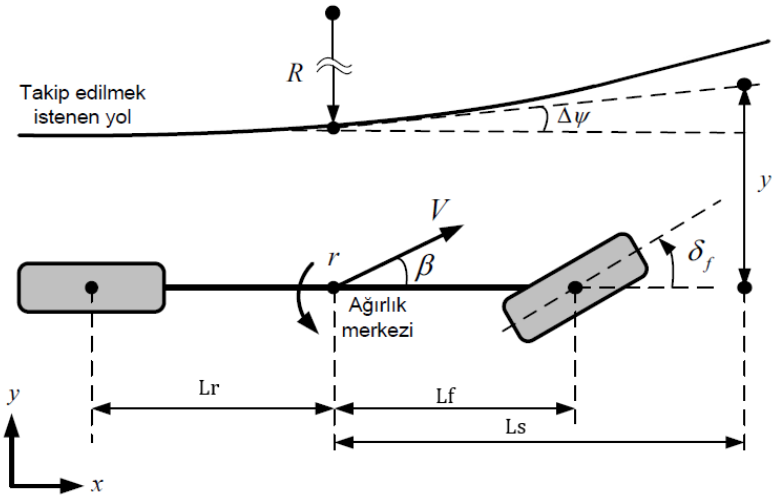
$$\sum M_z = I_z\,\dot{r} = L_f\,\cos(\delta_f)\,F_{y_f}(\alpha_f)\;-\;L_r\,\cos(\delta_r)\,F_{y_r}(\alpha_r) \tag{2.17}$$

burada I_z, z ekseni etrafındaki taşıt atalet momenti; L_f ve L_r, taşıtın kütle merkezinden ön ve arka aksa olan mesafeler, F_{x_f} ve F_{x_r} ise lastiklerin boylamsal ve

yanal kuvvetleridir. Böylece, üç serbestlik dereceli (iki öteleme ve bir yönelim/sapma dönmesi) bir taşıt modeli elde edilir.

2.5.2 Geliştirilmiş Tek İzli Yanal Model

Literatürde, yanal ve boylamsal hareketi temel alan 3 serbestlik dereceli (3-DOF) taşıt modeli, yol yanal hatası (e_y), viraj eğriliği (ρ_{ref}) ve yönelim farkı ($\Delta\psi_p$) gibi kinematik ifadelerin eklenmesiyle beş boyutlu bir sisteme genişletilmektedir. Dahası, önceki bölümlerde tanıtılan doğrusal olmayan tek iz (single-track) taşıt modeli ve boylamsal lastik kuvvetlerinin eklenmesiyle daha yüksek doğruluklu bir yapıya kavuşturulabilir. Bu genişletilmiş tek iz taşıt modeli, Şekil 2.9'da gösterilmekte olup, özellikle simülasyon çalışmalarında daha gerçekçi sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılacaktır.



Şekil 2.9 Taşıt hareketine etki eden boylamsal kuvvetler [36]

$$\dot{\beta} = -\frac{(C_f + C_r)}{M V_x}\,\beta \;-\; \left(1 - \frac{C_r L_r - C_f L_f}{M\,V_x^2}\right) r \;+\; \frac{C_f}{M V_x}\,\delta_f \;+\; \frac{C_r}{M V_x}\,\delta_r, \quad (2.18)$$

$$\dot{r} = \frac{(C_r L_r - C_f L_f)}{I_z}\,\beta \;-\; \frac{(C_f L_f^2 + C_r L_r^2)}{I_z\,V_x}\,r \;+\; \frac{C_f L_f}{I_z}\,\delta_f \;+\; \frac{C_r L_r}{I_z}\,\delta_r, \quad (2.19)$$

$$\Delta\dot{\psi}_p = r \;-\; V_x\,\rho_{\text{ref}}, \quad (2.20)$$

$$\dot{e_y} = V_x\,\beta \;+\; L_s\,r \;+\; V_x\,\Delta\psi_p \;-\; L_s\,V_x\,\rho_{\mathrm{ref}}, \tag{2.21}$$

$$V_x = \beta\,V_x\,r \;+\; \frac{F_{x,f} + F_{x,r}}{M}, \tag{2.22}$$

Burada β taşıt yanal kayma açısını, r yanal sapma hızını, V_x boylamsal hızı, $\Delta\psi_p$ taşıtın referans yol doğrultusuna göre yanal kayma açısı farkını, e_y yanal konum hatasını ve δ_f ile δ_r sırasıyla ön ve arka tekerlek direksiyon açılarını temsil etmektedir. Ayrıca C_f ve C_r lastiklerin viraj sertlikleri, L_f ve L_r taşıt kütle merkezinden ön ve arka akslara olan uzaklıklar, M taşıt kütlesi ve I_z ise atalet momentidir. $F_{x,f}$ ve $F_{x,r}$ öndeki ve arkadaki boylamsal lastik kuvvetlerini gösterir. Bu denklem kümesi, taşıt dinamiğini daha kapsamlı biçimde modelleyen beş serbestlik dereceli bir yol takibi (path-following) çerçevesi tanımlamaktadır.

Tablo 2.2 Taşıt modeline ait temel parametreler ve birimleri.

Sembol	**Tanım**	**Birim**
r	yanal sapma açısal hızı	rad/s
β	Şasi (taşıt) yanal kayma açısı	rad
V	Ağırlık merkezindeki taşıt hızı	m/s
μ	Tekerlek – yol sürtünme katsayısı	-
$\alpha_f(\alpha_r)$	Ön (arka) tekerlek kayma açısı	rad
δ_f	Ön tekerleklerdeki dümenleme açısı	rad
$C_f(C_r)$	Ön (arka) tekerleklerdeki viraj sertliği	N/rad
M	Taşıt kütlesi	m
I_z	z eksenine göre taşıtın atalet momenti	Nm
$L_f(L_r)$	Ön (arka) aks – ağırlık merkezi mesafesi	m
L_s	İleri bakma mesafesi	m
R	Yolun eğrilik yarıçapı	m

2.5.3 İstenen Yanal Sapma Hızı

Gerçekleştirilecek kontrol uygulamalarında, taşıtın arzu edilen (desired) yanal sapma oranı, ön tekerlek direksiyon açısı, taşıtın boylamsal hızı ve temel taşıt parametreleri üzerinden dinamik olarak belirlenebilir. Aşağıdaki denklem, yüksek yol-tutunma (yüksek sürtünme katsayısı) koşullarında yeterli lastik kuvveti üretilmesi hâlinde geçerli bir arzu edilen yanal sapma oranı sağlar :

$$r_d \;=\; \frac{V_x\,\delta_f}{\dfrac{M\,V_x^2\left(\mu\,C_r \;-\; \frac{L_r}{C_f}\right)}{2\,C_f\,C_r\left(L_f + L_r\right)} \;+\; \left(L_f + L_r\right)}, \tag{2.23}$$

Düşük sürtünme katsayısına sahip yol yüzeylerinde, denklem 2.23 ile hesaplanan yanal sapma oranını elde edebilecek yeterli lastik kuvveti sağlanamayabilir. Bu nedenle, taşıtın yanal ivmesi, lastik-yol sürtünme katsayısı sınırları içinde kalmak zorundadır. Aşağıdaki eşitsizlik, arzu edilen yanal sapma oranının bu sınırlamayla uyumlu biçimde belirlenmesi gerektiğini ifade eder [37]:

$$|r_d| \;\leq\; \frac{\mu\, g}{V_x} \tag{2.24}$$

Burada μ, lastik-yol sürtünme katsayısı, g ise yer çekimi ivmesidir. Pratikte, taşıtı yanal yönde tam anlamıyla kayma açısı sıfır olacak şekilde yönlendirmek mümkün değildir. Ancak arzu edilen yanal kayma açısının (β_d) sıfır alınması, taşıtın boyuna ekseni ile kütle merkezinden geçen hız vektörünün sürekli aynı doğrultuda kalmasının hedeflendiğini gösterir. Gerçekte, yol taşıtlarının non-holonomik yapısı nedeniyle tam sıfır kayma açısı mümkün olmasa da, kayma açısının küçük tutulması istenir.

2.5.4 İstenen Yanal Kayma Açısı

Taşıtın boylamsal hızı, kütlesi, aks mesafeleri ve yanal sertlik değerleri dikkate alınarak arzu edilen yanal kayma açısı

$$\beta_{\text{des}} = \frac{\delta_f \Big(L_r - \frac{L_f\, M\, U^2}{2\, C_r \left(L_f + L_r \right)} \Big)}{L_f + L_r + \frac{M\, U^2 \left(L_r\, C_r - L_f\, C_f \right)}{2\, C_f\, C_r \left(L_f + L_r \right)}}, \tag{2.25}$$

şeklinde belirlenir. Bu denklem, direksiyon açısı δ ve taşıt dinamik parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlar.

Arzu edilen yanal kayma açısı, taşıtın yanal tutunma sınırını aşmaması için belirli bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Bu üst sınır, maksimum izin verilebilir yanal kayma açısı

$$\beta_{\text{des}}^{\max} = \arctan\big(0.02\, M\, g\big) \tag{2.26}$$

olarak tanımlanır. Böylece,

$$|\beta_{\text{des}}| \;\leq\; \beta_{\text{des}}^{\max}$$

koşulu sağlanarak, taşıtın güvenli yanal ivme kapasitesi korunur.

2.6 Özet

Bu bölümde, taşıt dinamiğini şekillendiren temel kuvvetler, lastik kuvveti modelleri ve tek iz taşıt modeli ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, tam taşıt modeli bağlamında atalet momenti, kütle merkezi konumları ve viraj sertlikleri gibi taşıt parametrelerinin kontrol tasarımındaki önemine değinilmiştir.

Arzu edilen yanal sapma oranı ve yanal kayma açısı denklemlerinin yanı sıra, lastik-yol etkileşim sınırları gözetilerek oluşturulan satürasyon işlemi, sürüş güvenliği açısından kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

Bu noktada elde edilen taşıt modelleri, tez kapsamındaki yörünge (path) takibi ve ileri düzey kontrol algoritmalarının temelini oluşturacaktır. Bir sonraki bölümde, söz konusu yörünge planlama ve kontrol yöntemleri ayrıntılı biçimde ele alınacak ve burada sunulan dinamik modellerden yararlanılarak tasarım adımları gösterilecektir.

3
YÖRÜNGE TAKİP KONTROLÜ

3.1 Giriş

Bu bölümde, otonom taşıtların yörünge takibi (*path following*) problemi ele alınmakta ve tezde önerilen kontrol yaklaşımı bütünleşik şekilde sunulmaktadır. Öncelikle, yol takibine duyulan gereksinim ve diğer bölümlerle olan bağlantılar ele alınmıştır. Ardından, hata (*error*) tanımları ve yol modelleme yöntemleri detaylandırılıp, önerilen bütünleşik kontrolcü tasarımı anlatılmıştır. Ek olarak karşılaştırılacak alternatif kontrolcü tasarımları anlatılmış olup yörünge hesaplanmasının açıklanması ile tamamlanmıştır.

3.2 Hata Hesaplama

Burada, yol takibi sürecinde taşıt konumunun ve yöneliminin referans yola göre farklarını temsil eden hata değişkenleri tanımlanmaktadır. Yol takibinde, taşıtın konum ve yöneliminin referans yola göre hataları temel büyüklüklerdir. Bu hatalar, kontrol algoritmasının hesaplayacağı direksiyon (δ) ve/veya hız (V_x) gibi girdilerin belirlenmesini sağlar.

3.2.1 Hata Tanımları ve Yaklaşımlar

Taşıt konumu $(X_{\mathrm{veh}}, Y_{\mathrm{veh}})$, referans yol üzerindeki en yakın nokta $(x_{\mathrm{path}}, y_{\mathrm{path}})$ ile karşılaştırılarak yanal hata (e_y) ve yönelim (heading) farkı hatası $\Delta\psi_p$ tanımlanır. Aşağıda bu hata bileşenlerinin tanımlanmasında kullanılan yaygın iki yöntem özetlenmiştir.

En Yakın Nokta (Closest-Point) Yaklaşımı

- Yol, ayrıklaştırılmış biçimde $\big(x_{\mathrm{yol}}(i),\ y_{\mathrm{yol}}(i)\big)$ dizisi olarak saklanır.

- Taşıtın mevcut konumuna en yakın veritabanı indisi

$$i_{\min} \;=\; \arg\min_{i} \sqrt{\big(x_{\text{yol}}(i) - X_{\text{veh}}\big)^2 + \big(y_{\text{yol}}(i) - Y_{\text{veh}}\big)^2}.$$

- Bu noktadaki eğrilik veya ileri noktadaki yol yönelimi; yolun hedef yönü olarak alınır.
- Yanal hata e_y, taşıt merkez ağırlık noktasının $\big(X_{\text{veh}}, Y_{\text{veh}}\big)$ bu en yakın noktanın normal veya teğet doğrultusuna göre uzaklığı şeklinde ölçülür.

İleri Bakma Mesafesi (Look-Ahead) Yaklaşımı

- Taşıtın ön aksından veya merkezinden belirli bir uzaklık (ℓ_d) ileriye bakılır.
- Bu mesafede yol üzerindeki hedef nokta tespit edilir, yanal hata ve yönelme hatası bu hedefe göre hesaplanır.
- Pure Pursuit gibi yöntemler, ℓ_d parametresini hıza veya sürüş koşullarına göre değiştirebilir.

3.2.2 Yanal Hata, Yönelim Hatası ve Eğrilik Hesaplaması

Şekil 3.5'te gösterilen kurguda, referans yolun eğriliği $\rho_{\text{ref}} = 1/R$ (viraj yarıçapına göre) tanımlanır. Taşıt merkezine ait yönelme hatası $\theta_e = \theta_{\text{veh}} - \theta_{\text{path}}$, yanal hata e_y ise

$$e_y \;=\; d_{\perp}\Big((X_{\text{veh}}, Y_{\text{veh}}),\; (x_{\text{yol}}, y_{\text{yol}})\Big),$$

şeklinde "dik uzaklık" veya "projeksiyon" esaslı bir yöntemle elde edilir. Kontrolü kolaylaştırmak için, istenen yanal sapma hızı $\dot{r}_{\text{des}}$ de ρ_{ref} ve taşıt hızı V_x üzerinden

$$\dot{r}_{\text{des}} \;=\; V_x\, \rho_{\text{ref}}.$$

denklemi elde edilir.

3.3 Referans Yol ve Hız Profili

- **Referans yolu üç bölümden oluşmaktadır:**
  1. **Düz hat:** 0-300 m arası, $x = s$, $y = 0$, $\rho = 0$.
  2. **Sabit eğrilikli sol viraj:** 300-450 m arası, $R = 50$ m yarıçap, $\rho = \frac{1}{R}$.
  3. **Tekrar düz hat:** 450 m'den sonra, $\rho = 0$.

- **Yol parametreleri:**
  - Yol parametresi s, 0.001 m adımlarla artırılır.
  - Kartezyen koordinatlar (x_{path}, y_{path}) ve eğrilik ρ_{path} önceden hesaplanır.
- **En yakın nokta belirleme:**
  - taşıtın konumu (X_{veh}, Y_{veh}) için Öklid mesafesi:

$$\text{mesafe} = \sqrt{(x_{\text{path}} - X_{\text{veh}})^2 + (y_{\text{path}} - Y_{\text{veh}})^2}$$

Algorithm 1 Referans Yol Üreteci

Kalıcı değişkenleri başlat: $s_{\text{yol}}, x_{\text{yol}}, y_{\text{yol}}, \rho$yol
eğer ilk çağrı ise
  $s_{\text{yol}} \leftarrow 0 : 0.001 : 1800$ ▷ Yol parametresi
  $s_{\text{viraj_bas}} \leftarrow 300$, $s_{\text{viraj_son}} \leftarrow 450$, $R \leftarrow 50$
  her her $i = 1$ **ile** uzunluk(s_{yol}) **için için**
    $s \leftarrow s_{\text{yol}}(i)$
    eğer $s < 300$ **ise**
      $x \leftarrow s$, $y \leftarrow 0$, $\rho \leftarrow 0$
    değilse eğer $300 \leq s < 450$ **ise**
      $\phi \leftarrow \frac{s-300}{R}$ ▷ Açısal konum
      $x \leftarrow 300 + R \cdot \sin(\phi)$
      $y \leftarrow R(1 - \cos(\phi))$
      $\rho \leftarrow \frac{1}{R}$
    değilse
      $\alpha_{\text{son}} \leftarrow \frac{\pi}{2} + \frac{450-300}{R}$
      $x \leftarrow x_{\text{son}} + (s - 450) \cdot \cos(\alpha_{\text{son}})$
      $y \leftarrow y_{\text{son}} + (s - 450) \cdot \sin(\alpha_{\text{son}})$
      $\rho \leftarrow 0$
    son eğer
    Değerleri kaydet: $x_{\text{yol}}(i) \leftarrow x$, $y_{\text{yol}}(i) \leftarrow y$, $\rho_{\text{yol}}(i) \leftarrow \rho$
  son her
son eğer
$mesafeDizi \leftarrow \sqrt{(x_{\text{yol}} - X_{\text{taşıt}})^2 + (y_{\text{yol}} - Y_{\text{taşıt}})^2}$
$indeks_{\text{min}} \leftarrow \arg\min(mesafeDizi)$
döndür $x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}, \rho_{\text{ref}}$

Parametreler:

- s_{viraj_start}: Viraj başlangıç pozisyonu (300 m)
- R: Viraj yarıçapı (50 m)
- ρ: Pozitif değer sol virajı gösterir

3.3.1 Virajın Hesaplanması

Parametrik olarak tanımlanmış bir yolun (λ parametresine göre) eğriliği (ρ), aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\rho(\lambda) = \frac{x'(\lambda) \cdot y''(\lambda) - x''(\lambda) \cdot y'(\lambda)}{\left(\left(x'(\lambda)\right)^2 + \left(y'(\lambda)\right)^2 \right)^{3/2}} \tag{3.1}$$

Açıklamalar:

- λ: Yol parametresi (örneğin yay uzunluğu veya zaman)
- $x'(\lambda)$, $y'(\lambda)$: x ve y koordinatlarının birinci türevleri
- $x''(\lambda)$, $y''(\lambda)$: x ve y koordinatlarının ikinci türevleri

3.4 Önerilen Kontrolcü Tasarımı: Doğrusal Olmayan Öngörülü Kontrol

Bu kısımda, tezde önerilen *entegre yanal ve boylamsal (direksiyon ve hız/ivme) kontrolünü* eşzamanlı yöneten yol takibi yaklaşımı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Önerilen kontrolcü, doğrusal olmayan taşıt dinamiklerini göz önünde bulunduracak şekilde *kısa ufuklu (short-horizon)* bir öngörü (predictive) yapısı benimser; yanal kayma açısı, yanal kayma oranı ve yanal konum hatası gibi durum değişkenlerini, direksiyon açısı ve hız/ivme komutlarıyla birlikte aynı çerçevede optimize eder. Bu bölümde, kontrol mimarisinin temel ilkeleri, hata azaltma stratejileri ve taşıt/tasarım kısıtları adım adım açıklanarak, önerilen yöntemin kuramsal altyapısı ve uygulamaya yönelik tasarım detayları ortaya konmaktadır [22].

3.4.1 Durum Denklemleri

Literatürde, yanal ve boylamsal hareketi temsil eden 3-DOF taşıt modeli, yörünge takibi amaçlı $\Delta\psi_p$ ve e_y kinematik ifadeleriyle genişletilir. Böylece, doğrusal olmayan fonksiyon $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, aşağıdaki gibi parçalara ayrılabilir:

Denklemler,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\,\mathbf{u} \tag{3.2}$$

şeklinde yazılır.

$$\dot{\beta} = \underbrace{-\frac{C_f + C_r}{mV_x}\,\beta - \left(1 - \frac{C_r L_r - C_f L_f}{mV_x^2}\right) r}_{f_1(\mathbf{x})} + \frac{C_f}{mV_x}\,\delta_f \;+\; \frac{C_r}{mV_x}\,\delta_r, \tag{3.3}$$

$$\dot{r} = \underbrace{\frac{C_r L_r - C_f L_f}{I_z}\,\beta - \frac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z V_x}\,r}_{f_2(\mathbf{x})} + \frac{C_f L_f}{I_z}\,\delta_f \;+\; \frac{C_r L_r}{I_z}\,\delta_r, \tag{3.4}$$

$$\Delta\dot{\psi}_p = \underbrace{r - V_x\,\rho_{\text{ref}}}_{f_3(\mathbf{x})}, \tag{3.5}$$

$$\dot{e_y} = \underbrace{V_x\,\beta + l_s\,r + V_x\,\Delta\psi_p - l_s V_x\,\rho_{\text{ref}}}_{f_4(\mathbf{x})}, \tag{3.6}$$

$$\dot{V}_x = \underbrace{\beta\,V_x\,r}_{f_5(\mathbf{x})} + \frac{F_{x,f} + F_{x,\text{r}}}{m}. \tag{3.7}$$

Ele alınan sistem aşağıdaki biçimde iki alt sisteme bölünmüştür:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}), \tag{3.8}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_2(\mathbf{x})\,\mathbf{u}. \tag{3.9}$$

burada $\mathbf{x}_1 : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^{n_1}$ ve $\mathbf{x}_2 : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^{n_2}$, $n_1 + n_2 = n$ olmak üzere,

$$\mathbf{x}(t) \;=\; \left[\mathbf{x}_1^\top(t)\;\; \mathbf{x}_2^\top(t)\right]^\top \;\in\; X \;\subset\; \mathbb{R}^n$$

durum vektörünü ifade eder. Ayrıca, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ sistemi tanımlayan kontrol giriş vektörüdür. $\mathbf{x}_1$ kinematikle ilişkili alt değişkenleri (örneğin $\Delta\psi_p$ ve e_y); $\mathbf{x}_2$ ise dinamik alt değişkenleri (örneğin β ve r) içerecek biçimde seçilebilir. Bu ayrım, kinematik ($\mathbf{f}_1$) ve dinamik ($\mathbf{f}_2$) ifadelerin ayrı ayrı işlenmesine olanak tanımaktadır.

Böylece denklem aynı mantıkta

$$\dot{\mathbf{x}} \;=\; \mathbf{f}(\mathbf{x}) \;+\; \mathbf{G}(\mathbf{x})\,\mathbf{u}$$

şeklinde de tekrar yazılabilir.

Bu tanıma göre,

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{f_1} \\ \mathbf{f_2} \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 \end{pmatrix} \;\triangleq\; \big[\mathbf{g}_1,\; \mathbf{g}_2,\; \ldots,\; \mathbf{g}_m\big].$$

Tipik bir $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ matrisi, (lastik kuvvetleri ve direksiyon açıları üzerinden gelen) kontrol girdilerinin hangi durum değişkenlerine etki ettiğini göstermektedir. Örneğin, yanal-dinamik etkileri (β ve r) ve boylamsal hız değişimini (V_x) ayrı satırlarda barındıran bir yapı aşağıdaki gibi olabilir:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{m\,V_x} & \frac{C_r}{m\,V_x} & 0 & 0 \\ \frac{C_f\,L_f}{I_z} & \frac{C_r\,L_r}{I_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \end{bmatrix}.$$

Benzer şekilde, denetleyici tarafından üretilmesi gereken kontrol işareti $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{u} = \big[\delta_f,\; \delta_r,\; F_{x,f},\; F_{x,r}\big]^\top$ gibi seçilerek, direksiyon açıları ve boylamsal itki/kuvvet katkıları bir arada modellenebilir.

Durum (state) vektörü $\mathbf{x}$ ve sistem dinamikleri $\big[f_1(\mathbf{x}), \ldots, f_5(\mathbf{x})\big]$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \Delta\psi_p \\ e_y \\ V_x \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ f_3(\mathbf{x}) \\ f_4(\mathbf{x}) \\ f_5(\mathbf{x}) \end{bmatrix}. \tag{3.10}$$

Burada β yanal kayma açısı, r yanal sapma oranı, $\Delta\psi_p$ ve e_y yörünge takibinde kullanılan yönelim ve yanal konum hataları, V_x ise taşıt kütle merkezindeki boylamsal hızdır. M taşıt kütlesi, I_z yanal sapma atalet momenti, C_f, C_r lastik viraj sertlikleri, L_f, L_r kütle merkezinden ön ve arka akslara olan uzaklıkları göstermektedir. $F_{x,f,r}$ ise ön/arka tekerdeki boylamsal çekiş kuvvetleri ifade eder.

Referans Yörünge Sistemin $\mathbf{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ biçiminde bir referans yörüngesi, aynı dinamik model altında belirli bir $\mathbf{u}^*(t)$ kontrol girdisi kullanılarak üretilir. Bu nedenle:

$$\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^\top(t) \\ \mathbf{q}_2^\top(t) \end{bmatrix},$$

ve

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \mathbf{f}_1\big(\mathbf{q}\big), \tag{3.11}$$

$$\dot{\mathbf{q}}_2 = \mathbf{f}_2\big(\mathbf{q}\big) + \mathbf{B}_2\big(\mathbf{q}\big)\,\mathbf{u}^*(t). \tag{3.12}$$

Yörünge takibinde, genellikle

$$\mathbf{q}^\top(t) = \big[\beta_{\text{ref}},\ r_{\text{ref}},\ \Delta\psi_{p,\text{ref}},\ e_{y,\text{ref}},\ V_{x,\text{ref}}\big] \tag{3.13}$$

şeklinde yanal kayma açısı, yanal sapma oranı, yönelim farkı, yanal konum hatası ve boylamsal hız gibi hedef değerler tanımlanır. Söz konusu referans büyüklükler, öngörülü (predictive) denetleyicinin maliyet fonksiyonunda yer alacak şekilde tasarıma dahil edilir.

3.5 Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde, taşıtın yanal ve boylamsal hareketini kontrol etmeyi hedefleyen *doğrusal olmayan öngörülü denetleyici* türetilmektedir. Özellikle *kısa ufuk (single-step horizon)* yaklaşımı benimsenmiş, $H > 0$ uzunluğundaki bir gelecek zaman aralığındaki (t + H) andaki durum hatası ve kontrol maliyeti göz önüne alınarak bir maliyet fonksiyonu kurgulanmıştır [22]. Temel amaçlar:

(i) Sistemin durum değişkenlerini $\mathbf{x}(t)$ referans yörünge $\mathbf{q}(t)$ doğrultusunda yönlendirmek,

(ii) Direksiyon ve hız gibi kontrol değerlerinde ani veya aşırı değişimleri sınırlayarak sistem kararlılığını korumak.

3.5.1 Maliyet Fonksiyonunun Oluşturulması

Gelecekteki takip hatasını ve mevcut kontrol eylemini birlikte cezalandıran bir performans indeksi, aşağıdaki biçimde tanımlanabilir:

$$J\big[\mathbf{u}(t)\big] \;=\; \tfrac{1}{2}\,\big[\mathbf{x}(t+h) \;-\; \mathbf{q}(t+h)\big]^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}\,\big[\mathbf{x}(t+h) \;-\; \mathbf{q}(t+h)\big] \;+\; \tfrac{1}{2}\,\mathbf{u}^{\mathsf{T}}\,\mathbf{R}\,\mathbf{u}(t), \tag{3.14}$$

burada $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ve $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{m\times m}$ en azından yarı-pozitif tanımlı matrislerdir.

Sabit $\mathbf{x}(t)$ ve $\mathbf{q}(t)$ değerleri için, maliyet fonksiyonunun $\mathbf{u}(t)$ açısından türevi sıfıra eşitlenerek ($\partial J/\partial \mathbf{u} = 0$) çözülür ve aşağıdaki öngörücü kontrol ifadesi elde edilir:

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(t) = &\Big\{\big[\mathbf{\Lambda}(h)\,\mathbf{W}(\mathbf{x})\big]^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}\,\mathbf{\Lambda}(h)\,\mathbf{W}(\mathbf{x}) \;+\; \mathbf{R}\Big\}^{-1} \\ &\times\Big\{\big[\mathbf{\Lambda}(h)\,\mathbf{W}(\mathbf{x})\big]^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}\,\big[\mathbf{e}(t) \;+\; \mathbf{v}\big(\mathbf{x},h\big) \;-\; \mathbf{d}(t,h)\big]\Big\}.\end{aligned} \tag{3.15}$$

burada $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{q}(t)$ mevcut hatayı ifade etmektedir. Literatürde işaret edildiği üzere, h değerinin belirsizliği (*step size*) ayrık sistemlerin barındırmadığı faydalı bazı özelliklerin sağlanmasına zemin hazırlamaktadır [22]. Bu çalışmada, h değeri, taşıtın yörünge takibi ile ivme kısıtlamaları (örneğin ani direksiyon veya hız değişimini önleme) arasındaki dengeyi ayarlamak amacıyla kullanılır.

Bu yaklaşımda hedef, referans yörünge $\mathbf{q}(t)$ ile gerçek durum $\mathbf{x}(t)$ arasındaki hatayı mümkün olduğunca küçük tutmaktır. Taşıtın yanal ve boylamsal dinamiklerine ilişkin çeşitli durum değişkenleri (örneğin $\beta_{\mathrm{ref}},\ r_{\mathrm{ref}},\ V_{x,\mathrm{ref}},\ldots$) yörünge tanımına dâhil edilir. Böylece, $\mathbf{q}(t)$ vektörü ilgili referans değerlerini içerir.

(3.14) ifadesindeki $\mathbf{x}(t+h)$ ve $\mathbf{q}(t+h)$ terimlerini hesaplamak için geleceğe yönelik bir tahmine ihtiyaç vardır. Yeterli derecede küçük bir $h > 0$ için, sistemin gelecek andaki durumu $\mathbf{x}(t+h)$ aşağıdaki kompakt Taylor serisi açılımıyla yaklaştırılabilir:

$$\mathbf{x}(t+h) \;\approx\; \mathbf{x}(t) \;+\; \mathbf{v}\big[\mathbf{x}(t),\,h\big] \;+\; \mathbf{\Lambda}(h)\,\mathbf{W}\big[\mathbf{x}(t)\big]\;\mathbf{u}(t). \tag{3.16}$$

Burada $\mathbf{v}[\mathbf{x}(t),h]$, sistemin doğrusal olmayan fonksiyonlarının $r_i - 1$ mertebeye kadar alınan Lie türevlerini içeren bir toplamı temsil eder. İncelenen taşıt dinamiklerinde çoğu kez $\mathbf{v}\big(\mathbf{x},h\big) \;=\; h\,\mathbf{f}(\mathbf{x})$ varsayımı (*birinci mertebe yaklaşım*) yapılmaktadır [22]. Daha yüksek mertebeden türev ve terimleri de içeren genelleştirilmiş formülasyonlarda ise

$$v_i \;=\; h\,L_f^0\big(f_i\big) \;+\; \frac{h^2}{2!}\,L_f^1\big(f_i\big) \;+\; \ldots \;+\; \frac{h^{r_i}}{r_i!}\,L_f^{r_i-1}\big(f_i\big), \quad i = 1,\ldots,n$$

şeklinde ifade edilir. Burada r_i, $\mathbf{x}_i$ değişkeninin denkleme hangi mertebede dâhil

olduğunu gösterir.

Ayrıca, $\mathbf{\Lambda}(h) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ diyagonal bir matristir ve ana diyagonal elemanları

$$\lambda_{ii}(h) \;=\; \frac{h^{r_i}}{r_i!} \quad i = 1, \ldots, n$$

şeklinde verilir. Taşıt modeli için sıklıkla

$$\mathbf{\Lambda}(h) = \mathrm{diag}\Big[\frac{h^2}{2},\; \frac{h^2}{2},\; h,\; h,\; \ldots\Big]$$

benzeri bir yapı kullanılabilir.

Son olarak, $\mathbf{W}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{n\times m}$ duruma bağlı bir matristir ve her bir satırı, kontrol girdilerinin ilgili durum bileşenlerini nasıl etkilediğini belirten Lie türevlerinden oluşur. Bir araç dinamiği için örnek $\mathbf{W}(\mathbf{x})$ aşağıdaki formda olabilir:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \cdots \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}.$$

Benzer şekilde, referans yörünge $\mathbf{q}(t)$ için de

$$\mathbf{q}(t+h) \;\approx\; \mathbf{q}(t) \;+\; \mathbf{d}(t,h),$$

ifadesi yazılabilir. Burada $\mathbf{d}(t,h) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{q}(t)$ vektörünün Taylor serisi açılımından gelen ileriye dönük kestirim terimleridir.

3.5.2 Optimal Denetim Yasası

Yukarıdaki yaklaşım çerçevesinde, $\mathbf{x}(t+h)$ ve $\mathbf{q}(t+h)$ terimleri (3.16) ve benzeri doğrusal olmayan genelleştirmeler aracılığıyla yaklaşıklandıktan sonra, maliyet fonksiyonu (3.14) $\mathbf{u}(t)$ açısından türetilerek $\partial J/\partial \mathbf{u}(t) = 0$ eşitliği sağlanır. Böylece elde edilen *optimal* öngörülü kontrolör

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(t) = \; -\mathbf{P}\Big\{ \tfrac{1}{2\,h^2}\big(\mathbf{F}_{12}\mathbf{B}_2\big)^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_1\,\mathbf{e}_1 \;+\; h\,\mathbf{e}_1 \;+\; \tfrac{h^2}{2}\big[\mathbf{F}_{11}\,\mathbf{f}_1 \;+\; \mathbf{F}_{12}\,\mathbf{f}_2\big] \;-\; \dot{\mathbf{q}}_1(t)\Big\} \\ +\; \frac{1}{h}\,\mathbf{B}_2^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_2\Big[\mathbf{e}_2 \;+\; h\big(\mathbf{f}_2 \;-\; \dot{\mathbf{q}}_2(t)\big)\Big].\end{aligned} \tag{3.17}$$

şeklinde elde edilir. Burada $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{q}(t)$ mevcut izleme hatasını ifade etmektedir. Kontrolörün türetilmesinde kullanılan $\mathbf{R}$ matrisinin pozitif tanımlı seçimi, kontrol işaretlerinin (örneğin direksiyon δ, hız komutu vb.) aşırı büyüyerek sistemin

kararlılığını bozmasını engellemek açısından önemlidir.

Özellikle, kısa ufuklu (*single-step horizon*) yaklaşımda, denetleyici yalnızca t ile $t+h$ arasındaki davranışı göz önüne alır. Bu sayede algoritma gerçek zamanda daha hızlı çalışabilir, ancak ufkun kısa olması nedeniyle elde edilen çözümün optimum kalitesi tam ufuk (*full-horizon*) yöntemlere göre daha sınırlı olabilir. Uygulamada, düşük hesaplama maliyeti ve yeterli denetim performansı sağlaması sebebiyle kısa ufuklu öngörülü denetimler sıklıkla tercih edilmektedir.

3.5.3 Ağırlıklandırma Matrisleri

Maliyet fonksiyonundaki ağırlıklandırma matrisleri çoğu zaman köşegen olarak seçilir:

$$\mathbf{Q} = \operatorname{diag}\big[q_1,\ q_2,\ q_3,\ q_4,\ q_5\big], \qquad \mathbf{R} = \operatorname{diag}\big[r_1,\ r_2,\ \ldots, r_m\big].$$

Bu seçim, izleme hatası ve kontrol eforunu ayrı ayrı ayarlamayı kolaylaştırmaktadır. Örneğin, $\mathbf{Q}$ matrisindeki bazı elemanlar yanal kayma (β) ve yaw hızı (r) hatalarına yüksek ceza verebilirken, $\mathbf{R}$ matrisindeki elemanlar direksiyon (δ) veya çekiş kuvveti (F_x) değişikliklerini sınırlayacak şekilde seçilir.

$\mathbf{Q}_1$ ve $\mathbf{Q}_2$ boyutları sırasıyla $n_1 \times n_1$ ve $n_2 \times n_2$ olan pozitif tanımlı alt bloklar hâlinde seçildiğini varsayalım. Benzer şekilde

$$\mathbf{F}_{11} \;=\; \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_1}, \quad \mathbf{F}_{12} \;=\; \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \mathbf{x}_2}$$

tanımları kullanıldığında, denetleyici girişi

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(t) = \; - \; \mathbf{P}\Big\{ \tfrac{1}{2\,h^2}\big(\mathbf{F}_{12}\mathbf{B}_2\big)^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_1\,\mathbf{e}_1 \;+\; h\,\mathbf{e}_1 \;+\; \tfrac{h^2}{2}\big[\mathbf{F}_{11}\,\mathbf{f}_1 \;+\; \mathbf{F}_{12}\,\mathbf{f}_2\big] \;-\; \dot{\mathbf{q}}_1(t)\Big\} \\ +\; \frac{1}{h}\,\mathbf{B}_2^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_2\Big[\mathbf{e}_2 \;+\; h\big(\mathbf{f}_2 \;-\; \dot{\mathbf{q}}_2(t)\big)\Big].\end{aligned} \tag{3.18}$$

biçiminde yazılabilir. Burada

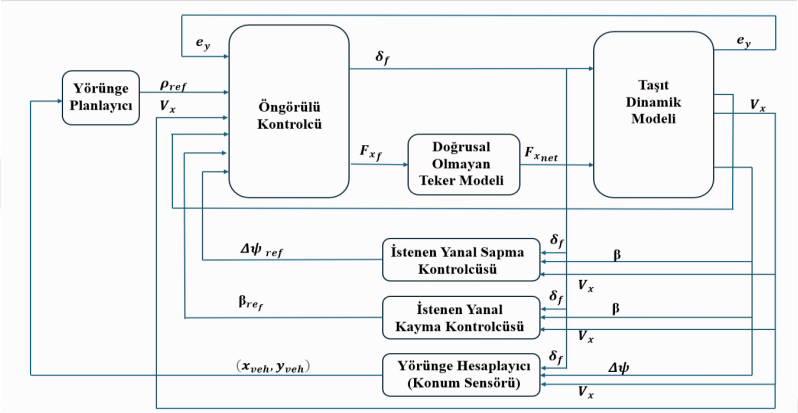
$$\mathbf{P} \;=\; \Big\{ \tfrac{1}{4\,h^2}\,\mathbf{B}_2^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_1\big(\mathbf{F}_{12}\,\mathbf{B}_2\big) \;+\; \mathbf{B}_2^{\mathsf{T}}\,\mathbf{Q}_2\,\mathbf{B}_2 \;+\; h^{-4}\,\mathbf{R}\Big\}^{-1}. \tag{3.19}$$

Uygulamada, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{5\times5}$ sıklıkla köşegen seçilirken $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{4\times4}$ matrisinin (yarı-)pozitif tanımlı olması, kontrol işaretinin aşırı yükselmesini önleme bakımından fayda sağlar. *Tek adımlık* (single-step) öngörücü yaklaşımlarda, yalnızca yol takip doğruluğuna öncelik vermek istenirse $\mathbf{R} = 0$ seçilebilir. Ancak, uygulamada

direksiyon veya çekiş kuvvetindeki ani değişiklikleri sınırlandırmak amacıyla küçük pozitif değerler eklenmesi yararlı olabilir [22]. Bu çalışmada, kısa ufuklu (short-horizon) denetim kurgusunda $\mathbf{R} = 0$ yaklaşımı tercih edilmiş ve test koşulları için yeterli performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Son olarak, yalnızca ön direksiyon açısı (δ_f) ve ön lastik boylamsal kuvveti $(F_{x,f})$ aktif hâle getirilerek, arka direksiyon $(\delta_r = 0)$ ve arka tahrik kuvveti $(F_{x,r} = 0)$ devre dışı bırakılmıştır. Böylece, iki boyutlu bir kontrol girişi üzerinden öngörücü denetleyicinin tasarımı mümkün kılınmıştır.

Aşağıda kontrolcü tasarımını blok diyagramı verilmştir.



Şekil 3.1 Öngörülü Kontrol Blok Diyagramı

Direksiyon Açısı Kontrol İşareti

$$\delta_{f_{\text{ctrl}}} = \frac{A + B + C}{a + b + c + d}.$$

$$A = A_{\text{factor}} \times \left[A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6\right],$$

burada

$$A_{\text{factor}} = \frac{H^2\, Q_4 \left(\frac{C_f}{m} + \frac{C_f L_f l_s}{I_z}\right)}{2}.$$

$$
\begin{aligned}
A_1 &= \big(e_{y_{\text{ref}}} - e_y\big),\\
A_2 &= H\,\dot{e}_{y_{\text{ref}}},\\
A_3 &= \tfrac{H^2}{2}\Big\{l_s\Big[\beta\left(\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{I_z}\right) + r\left(\tfrac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z\,V_x}\right)\Big]\\
&\quad + V_x\Big[r + \beta\left(\tfrac{C_f + C_r}{m\,V_x}\right) + r\left(\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{m\,V_x}\right)\Big] - V_x\big(r - V_x\,\rho_{\text{ref}}\big)\\
&\quad - V_x\,\beta\,r\,(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}})\Big\},\\
A_4 &= \tfrac{H^2}{2}\,\ddot{e}_{y_{\text{ref}}},\\
A_5 &= -H\Big[V_x\,\beta + l_s\,r + \Delta\psi_p\,V_x - V_x\,l_s\,\rho_{\text{ref}}\Big],\\
A_6 &= -\frac{F_{x_f}\,H^2\,\big(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}}\big)}{2\,m}.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
B &= B_{\text{factor}} \times \big[B_1 + B_2\big],\\
B_{\text{factor}} &= \frac{C_f\,H^2\,L_f\,Q_3}{2\,I_z}.\\
B_1 &= \Delta\psi_{p_{\text{ref}}} - \Delta\psi_p + \frac{H^2}{2}\Big\{\beta\Big(\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{I_z}\Big) + r\Big(\tfrac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z\,V_x}\Big) + V_x\,\beta\,r\,\rho_{\text{ref}}\Big\},\\
B_2 &= \frac{H^2}{2}\,\ddot{\Delta\psi}_{p_{\text{ref}}} - H\big(r - V_x\,\rho_{\text{ref}}\big) + H\,\dot{\Delta\psi}_{p_{\text{ref}}} + \frac{F_{x_f}\,H^2\,\rho_{\text{ref}}}{2\,m}.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C &= C_1 + C_2,\\
C_1 &= \frac{C_f\,H\,Q_1}{V_x\,m}\Big[\beta_{\text{ref}} - \beta + H\,\dot{\beta}_{\text{ref}} + H\Big(r + \beta\,\tfrac{C_f + C_r}{m\,V_x} + r\,\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{m\,V_x}\Big)\Big],\\
C_2 &= \frac{C_f\,H\,L_f\,Q_2}{I_z}\Big[r_{\text{ref}} - r + H\,\dot{r}_{\text{ref}} + H\Big(\beta\,\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{I_z} + r\,\tfrac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z\,V_x}\Big)\Big].
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
a &= \frac{H^4\,Q_4\left(\frac{C_f}{m} + \frac{C_f L_f l_s}{I_z}\right)^2}{4}, \qquad b = \frac{C_f^2\,H^2\,L_f^2\,Q_2}{I_z^2},\\
c &= \frac{C_f^2\,H^4\,L_f^2\,Q_3}{4\,I_z^2}, \qquad d = \frac{C_f^2\,H^2\,Q_1}{V_x^2\,m^2}.
\end{aligned}
$$

$$
\delta_{f_{\text{ctrl}}} = \frac{A + B + C}{a + b + c + d}.
$$

Boylamsal Kontrol İşareti,

$$F_{x_{f_{\text{ctrl}}}} \;=\; -\,\frac{U + (V_1 + V_2) \;-\; (W_1 + W_2)}{p + q + r}$$

$$U \;=\; \frac{H\,Q_5}{m}\Big[V_x \;-\; V_{x_{\text{ref}}} \;-\; H\,\dot{V}_{x_{\text{ref}}} \;+\; H\,V_x\,\beta\,r\Big]$$

$$V_1 \;=\; \frac{H^2\,Q_3\,\rho_{\text{ref}}}{2\,m}\Big[\Delta\psi_{p_{\text{ref}}} \;-\; \Delta\psi_p\Big]$$

$$\begin{aligned} V_2 \;=\; \frac{H^2\,Q_3\,\rho_{\text{ref}}}{2\,m}\Big[\frac{H^2}{2}\Big\{\beta\Big(\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{I_z}\Big) \;+\; r\Big(\tfrac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z\,V_x}\Big) \;+\; V_x\,\beta\,r\,\rho_{\text{ref}}\Big\} \\ +\; \frac{H^2}{2}\,\ddot{\Delta\psi}_{p_{\text{ref}}} \;-\; H\big(r - V_x\,\rho_{\text{ref}}\big) \;+\; H\,\dot{\Delta\psi}_{p_{\text{ref}}} \;-\; \frac{C_f\,H^2\,L_f\,\delta_f}{2\,I_z}\Big] \end{aligned}$$

$$W_1 \;=\; \frac{H^2\,Q_4\,\big(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}}\big)}{2\,m}\Big[e_{y_{\text{ref}}} \;-\; e_y \;+\; H\,\dot{e}_{y_{\text{ref}}}\Big]$$

$$\begin{aligned} W_2 \;=\; \frac{H^2\,Q_4\,\big(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}}\big)}{2\,m}\Big[\frac{H^2}{2}\Big\{l_s\Big[\beta\Big(\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{I_z}\Big) \;+\; r\Big(\tfrac{C_f L_f^2 + C_r L_r^2}{I_z\,V_x}\Big)\Big] \\ +\; V_x\Big(r + \;\beta\,\tfrac{C_f + C_r}{m\,V_x} \;+\; r\,\tfrac{C_f L_f - C_r L_r}{m\,V_x}\Big) \;-\; V_x\big(r - V_x\,\rho_{\text{ref}}\big) \\ -\; V_x\,\beta\,r\big(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}}\big)\Big\} \;+\; \frac{H^2}{2}\,\ddot{e}_{y_{\text{ref}}} \\ -\; H\Big[V_x\,\beta \;+\; l_s\,r \;+\; \Delta\psi_p\,V_x \;-\; V_x\,l_s\,\rho_{\text{ref}}\Big] \\ -\; \frac{H^2\,\delta_f}{2}\Big(\tfrac{C_f}{m} + \tfrac{C_f L_f\,l_s}{I_z}\Big)\Big] \end{aligned}$$

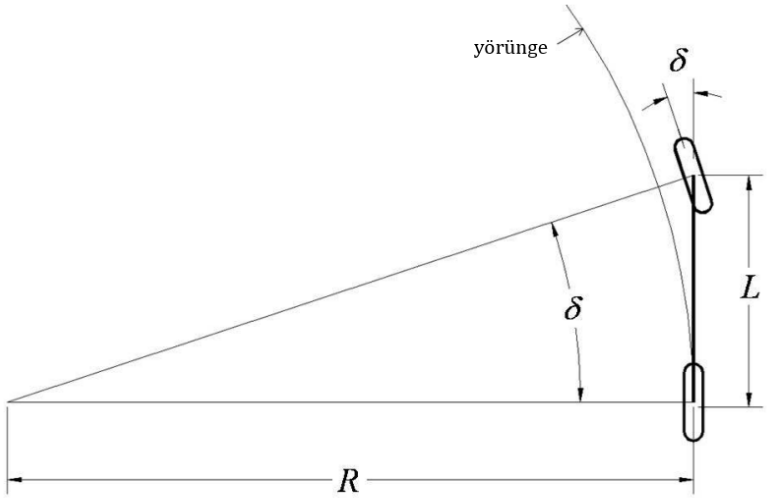
$$\begin{aligned} p \;&=\; \frac{H^2\,Q_5}{m^2}, \qquad q \;=\; \frac{H^4\,Q_4\,\big(\Delta\psi_p + \beta - l_s\,\rho_{\text{ref}}\big)^2}{4\,m^2}, \\ r \;&=\; \frac{H^4\,Q_3\,\rho_{\text{ref}}^2}{4\,m^2}. \end{aligned}$$

3.6 Karşılaştırma için Seçilen Kontrolcüler

Farklı yaklaşım ve zorluk düzeylerinde, literatürde sıkça geçen kontrol algoritmaları seçilerek, önerilen yöntem ile kıyaslama yapılması amaçlanmaktadır.

3.6.1 Geometrik Yöntemler: Stanley ve Pure Pursuit

Robotik alanında yaygın kullanılan yörünge takip yöntemlerinden biri, geometrik temelli kontrol yaklaşımıdır. Bu yöntemler, taşıt ile hedef yol arasındaki geometrik ilişkileri kullanarak kontrol yasaları oluşturur. Çoğu uygulamada, taşıttan ileriye doğru belirli bir mesafe (look-ahead) seçilir ve bu mesafe üzerinden konum hatası hesaplanır [38]. Bu kısımda, söz konusu geometrik yaklaşım çerçevesinde kullanılan taşıt modeli ve iki temel yöntem olan Pure Pursuit ile Stanley yöntemi ele alınacaktır.



Şekil 3.2 Geometrik bisiklet modeli

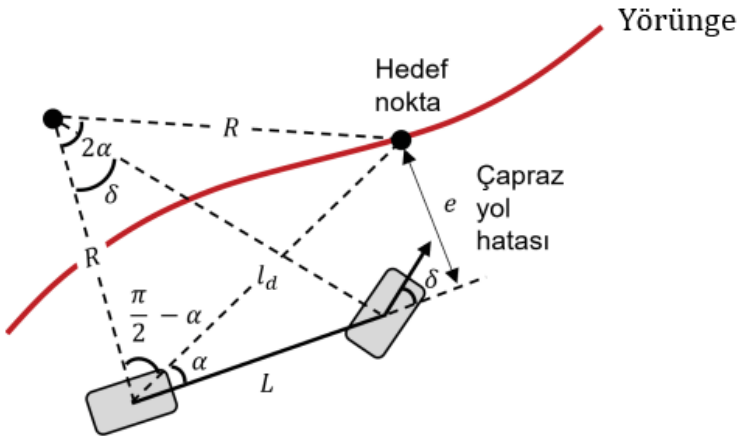
3.6.1.1 Pure Pursuit Yöntem

Mobil robotlar veya düşük hızlı taşıtlarda yörünge takibi için sıkça kullanılan yöntemlerden biri, Pure Pursuit yaklaşımıdır [38]. Bu yöntemde, taşıtın arka aks konumundan belirli bir ileri bakma mesafesi ℓ_d kadar ileride bulunan yol hedef noktası geometrik olarak tespit edilir. Daha sonra, bu noktayla arka aks arasına çizilen dairesel yayın eğriliğinden yararlanılarak taşıt direksiyon açısı δ hesaplanır.

Şekil 3.3'da $\left(g_x, g_y\right)$ konumu hedef noktayı, ℓ_s ileri bakma mesafesini ve α açısı taşıt yönelimiyle hedef noktaya giden vektörün yaptığı açıyı simgeler. Yöntem, basit dairesel yay geometrisi ile trigonometrik ilişkisini kullanır. Sinüs yasası uygulandığında:

$$\frac{\ell_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin(\theta)}, \tag{3.20}$$

biçiminde bir bağıntı elde edilir. Burada R, dairesel yayın yarıçapı, θ ise ilgili geometrideki tamamlayıcı açı olup, taşıt yönlendirmesinde gereken direksiyon



Şekil 3.3 Pure Pursuit Yöntemi Gösterimi

açısına (δ) ulaşmada aracılık eder. Tipik olarak, taşıt dingil mesafesi L ve diğer kinematik parametrelerle ilişkilendirilerek:

$$\delta \;=\; \arctan\!\left(\frac{2\,L\,\sin(\alpha)}{\ell_d}\right), \tag{3.21}$$

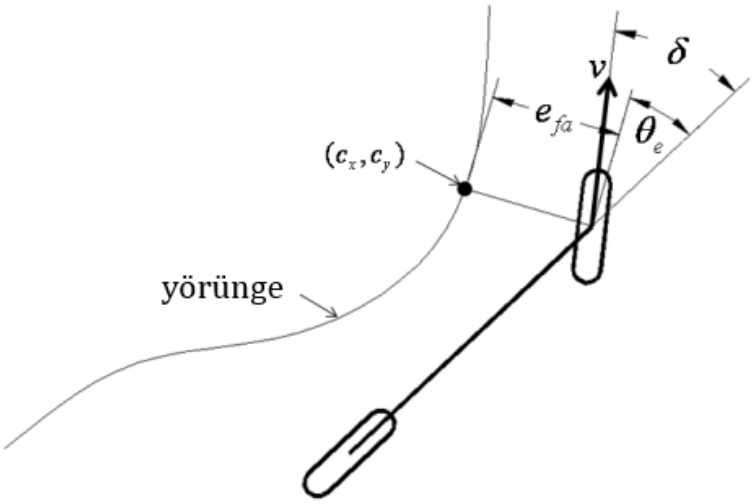
ifadesi elde edilebilir. Böylece, taşıtın yönelimi ile yol üzerindeki hedef nokta arasında basit bir geometrik ilişki kurularak yörünge takibi sağlanır.

3.6.1.2 Stanley Yöntemi

Stanford Üniversitesi'nin DARPA Grand Challenge yarışmasına katılan "Stanley" adlı otonom taşıtında kullanılan Stanley yöntemi, yol takibi problemine yönelik doğrusal olmayan bir geri besleme kontrol yaklaşımıdır [39]. Bu yöntem, taşıt ön aksının en yakın yol noktasına olan yanal hatası (e_{fa}) üzerine kuruludur ve *heading* (yön) hatası ile yanal hatanın birlikte ele alınması sayesinde üstel yakınsama elde edilebilmektedir. Direksiyon kontrol noktasının ön aks üzerinde konumlandırılması, denetim yasasının sezgisel biçimde formüle edilmesine imkân tanır.

Denetimdeki ilk terim, direksiyon açısına (δ) taşıt ile yol arasındaki yön farkını ($\theta_e = \theta - \theta_p$) ekleyerek, tekerleklerin yolun başlangıç noktasına hizalanmasını sağlar. Eğer e_{fa} sıfır değilse, ikinci terim, direksiyon açısını ayarlayarak öngörülen yolun, ön akstan $k\,v_x(t)$ kadar ilerideki bir noktadan yol teğetiyle kesişmesini sağlar. Şekil 3.4 bu geometrik ilişkiyi göstermektedir. Elde edilen denetim kuralı şöyledir:

$$\delta(t) \;=\; \theta_e(t) \;+\; \tan^{-1}\!\left(\frac{k\,e_{\text{fa}}(t)}{v_x(t)}\right), \tag{3.22}$$



Şekil 3.4 Stanley Yöntemi Gösterimi

burada k bir kazanç parametresidir. Bu formül, yanal hata büyüdükçe direksiyonun yola doğru daha fazla yönlendirileceğini ifade etmektedir.

3.7 Hata Tabanlı Yol Takibi ve LQR Yaklaşımı

3.7.1 Temel Model ve Hata Tanımları

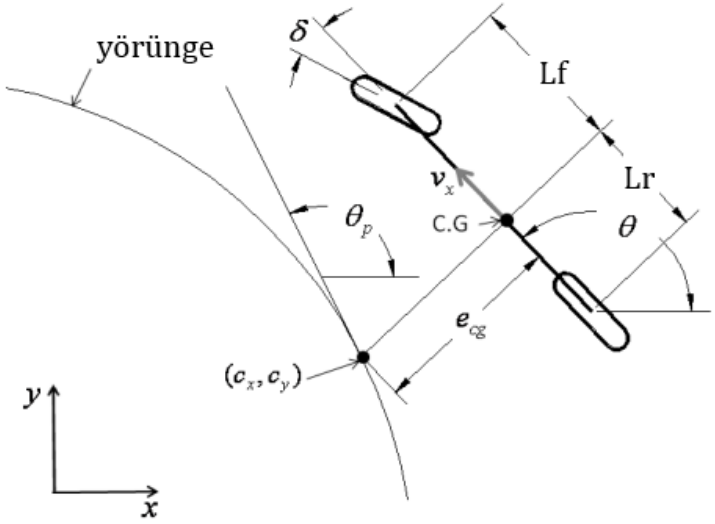
Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, yol takibi probleminde taşıt konum ve yönelme hatası, taşıt merkez ağırlık noktası (*C.G.*) ile referans yol arasındaki farklar üzerinden tanımlanır. Bu çalışma kapsamında, yanal dinamikler için 3 serbestlik dereceli model, $\Delta\psi_p$ (yönelim açısı farkı) ve e_y (yanal sapma) gibi kinematik ifadelerle genişletilerek beş serbestlik dereceli bir hata temelli sistem oluşturulmuştur. Literatürdeki doğrusal uzay model yaklaşımına göre, sistem denklemleri şu genel biçimdedir:

$$\dot{x} \;=\; A\,x \;+\; B_1\,\delta \;+\; B_2\,\dot{r}_{\mathrm{des}}, \tag{3.23}$$

burada

$$x = \begin{bmatrix} e_{\mathrm{cg}} \\ \dot{e}_{\mathrm{cg}} \\ \theta_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}$$

Model parametreleri kütle (m), yalpa atalet momenti (I_z), ön ve arka aks mesafeleri (l_f, l_r) ile ön/arka lastik viraj sertlikleri (C_f, C_r) olarak belirlenir.



Şekil 3.5 Dinamik Bisiklet modeli gösterimi ve yörünge koordinatları

3.7.2 LQR İle Yol Takibi Denetimi

Hata temelli yol takibi için, doğrusal uzay modelini kullanarak *Linear Quadratic Regulator* (LQR) yaklaşımı uygulanabilir. LQR, durum geribeslemesi yoluyla hem taşıt sapmasını hem de kontrol giriş büyüklüğünü dengeleyecek kazançları hesaplar. Disiplinli bir şekilde tanımlanan maliyet fonksiyonunun (durum ve kontrol girdisi ağırlıklarını içeren) eniyileştirilmesi sonucunda, direksiyon açısı

$$\delta = -K\,x$$

formülüyle belirlenir. Burada K ise Riccati denkleminin çözümünden elde edilen optimal kazanç matrisidir.

3.7.3 Genelleştirilmiş Durum-Uzay Denklemleri

Genişletilmiş tek iz (*single-track*) model, aşağıdaki durum-uzay eşitlikleri ile tanımlanabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{\mathrm{cg}} \\ \ddot{e}_{\mathrm{cg}} \\ \dot{\theta}_e \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} = \underbrace{A}_{\text{Sistem matrisi}} \begin{bmatrix} e_{\mathrm{cg}} \\ \dot{e}_{\mathrm{cg}} \\ \theta_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} + \underbrace{B_1}_{\text{Kontrol matrisi}} \delta + \underbrace{B_2}_{\text{Yol eğriliği matrisi}} r_{\mathrm{des}}, \tag{3.24}$$

burada A, B_1 ve B_2, taşıt hızı (v_x) ve model parametrelerine bağlı katsayıları içeren blok matrislerdir. r_{des} ise mevcut yol eğriliği ve taşıt hızından hesaplanan istenen

yalpa hızıdır.

Durum-uzay temelli tam durum geri besleme ve LQR yaklaşımıyla K kazanç matrisinin elde edilmesi

Tamamen durum-uzay temelli bir yaklaşımda, sistem

$$\dot{\mathbf{x}} = A\,\mathbf{x} + B_1\,\delta + B_2\,\dot{\psi}_p$$

biçiminde tanımlanabilir. Burada $\mathbf{x} = [\,e_r \;\; \dot{e}_r \;\; \psi_e \;\; \dot{\psi}_e]^{\mathsf{T}}$, B_1 ve B_2 sırasıyla giriş ve artık (residual) matrislerini temsil etmektedir. Sistemin *tam denetimliliği* (controllability) sağlanıyorsa, direksiyon açısı δ,

$$\delta \;=\; -\,K\,\mathbf{x}$$

şeklinde tanımlanarak kapalı çevrim elde edilir. Bu durumda sistemin dinamiği

$$\dot{\mathbf{x}} \;=\; \big(A - B_1\,K\big)\,\mathbf{x} \;+\; B_2\,\dot{\psi}_p$$

biçiminde yazılır. Kapalı çevrim sistem matrisinin $A_c = A - B_1\,K$ özdeğerleri, istenen kararlılık ve performans özelliklerini karşılayacak biçimde yerleştirilmelidir.

Söz konusu özdeğer yerleştirme işlemini *manuel* olarak gerçekleştirmek yerine, *Doğrusal-Kadratik Regülatör (LQR)* yaklaşımı kullanmak çözüm esnekliği açısından önemli avantajlar sunar. LQR yönteminde, sistemin durum değişkenleri $\mathbf{x}(t)$ ve kontrol girdisi $\delta(t)$, bir *maliyet fonksiyonu* (cost function) üzerinden birlikte değerlendirilir. Genellikle şu biçimde tanımlanan bir fonksiyon kullanılır:

$$J \;=\; \tfrac{1}{2}\int_0^{\infty}\Big[\,\mathbf{x}^{\mathsf{T}}(t)\,Q\,\mathbf{x}(t) \;+\; \delta^{\mathsf{T}}(t)\,R\,\delta(t)\Big]\,\mathrm{d}t,$$

burada Q ve R, sırasıyla durum değişkenleri ile kontrol girdisine verilen ağırlıkları belirten pozitif tanımlı matrislerdir. Türetilen LQR çözümünde, tam durum geri besleme kazanç matrisi

$$K \;=\; R^{-1}\,B_1^{\mathsf{T}}\,P$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada P, *Cebirsel Riccati Denklemi* olarak bilinen denklemin sayısal yöntemlerle veya Schur ayrıştırması gibi tekniklerle çözümü sonucunda elde edilen simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir. Riccati denklemi, basitçe özetlemek gerekirse, kapalı çevrimde sistemin kararlı olması ve J fonksiyonunun en küçük değere ulaşması için P matrisinde sağlanması gereken koşulları içerir. Zaman $t \to \infty$ giderken, $\mathbf{x}(t)$ vektörünün sıfıra yaklaşması (yani sistemin kararlılığı) sağlandığında, söz konusu maliyet fonksiyonu da en aza indirilmiş olur.

Bu şekilde elde edilen K matrisi, hem *durum hatalarını* hem de *kontrol girdi büyüklüğünü* dengeleyerek, sistemin belirlenen ağırlık matrislerine (Q ve R) göre en uygun performansla çalışmasına imkân tanır. Dolayısıyla, K matrisinin seçimi bir yandan istenmeyen salınımları bastırırken, diğer yandan kontrol eylemini aşırı zorlamadan amaçlanan yörünge takibini gerçekleştirecek biçimde optimize edilir. Bu yaklaşım sayesinde kapalı çevrim özdeğerlerinin konumu, *otomatik* ve *optimal* olarak saptanır [40].

3.8 Yörünge Hesaplama

Taşıtın küresel koordinatlardaki konum $\big(x(t), y(t)\big)$ ve yönelim açısı $\psi(t)$ yanal sapma açısı, taşıt gövde koordinat sisteminde ölçülen hız bileşenlerinin zamana göre dönüştürülmesiyle elde edilir.

- **Kinematik değişkenler:**
  - β — *yanal kayma açısı* : Araç boylamsal ekseni ile hız vektörü arasındaki açı $[\mathrm{rad}]$.
  - V_x — *boylamsal hız* : Araç boylamsal doğrultusundaki hız bileşeni $[\mathrm{m/s}]$.
  - V_y — *yanal hız* : Araç yanal doğrultusundaki hız bileşeni $[\mathrm{m/s}]$.
  - ψ — *yanal sapma açısı* : Araç boylamsal ekseninin küresel x-ekseni ile yaptığı açı $[\mathrm{rad}]$.

3.8.1 Gövdeden Küresele Hız Dönüşümü

Araç gövde eksenlerindeki hız vektörü $\boldsymbol{v}_{\mathrm{b}} = [\, V_x \;\; V_y \,]^{\top}$ küresel eksenlere $\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}} = [\, \dot{x} \;\; \dot{y} \,]^{\top}$ şu yönelim dönüşümü ile aktarılır:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}. \tag{3.25}$$

Kayma açısı kullanılarak hız bileşenleri $V_x = V\cos\beta$ ve $V_y = V\sin\beta$ (V toplam hız büyüklüğü) biçiminde de yazılabilir. Böylece (3.25)

$$\dot{x} = V\cos\big(\psi + \beta\big), \qquad \dot{y} = V\sin\big(\psi + \beta\big). \tag{3.26}$$

İlk konum $\big(x_0, y_0\big)$ ve yönelim ψ_0 biliniyorsa,

$$x(t) = x_0 + \int_0^t V(\tau)\, \cos\big[\psi(\tau) + \beta(\tau)\big]\, \mathrm{d}\tau, \tag{3.27}$$

$$y(t) = y_0 + \int_0^t V(\tau)\, \sin\big[\psi(\tau) + \beta(\tau)\big]\, \mathrm{d}\tau, \tag{3.28}$$

$$\psi(t) = \psi_0 + \int_0^t r(\tau)\, \mathrm{d}\tau, \tag{3.29}$$

burada $r(t) = \dot{\psi}(t)$ taşıtın z-ekseni etrafındaki yanal sapma açısal hızıdır.

Elde edilen denklemler, taşıtın gövde koordinatlarında ölçülen hız bileşenlerini küresel koordinat sistemine dönüştürerek konum ve yönelimdeki zamana bağlı değişimleri izlemeyi sağlar. Bu yöntem, dolayısıyla bir "sanal sensör" işlevi görmektedir.

4
SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

4.1 Giriş

Bu bölümde, önceki kısımlarda geliştirilen kontrol algoritmalarının (*Pure Pursuit*, *Stanley*, *LQR* ve "Önerilen Öngörülü Kontrol Yöntemi") farklı hız ve yol eğriliği senaryolarında test edilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi anlatılmaktadır. Simülasyonlar, önceki bölümlerde tanımlanan taşıt modeli ve yol takibi çerçevesinde değerlendirilmiştir. Burada, farklı hız senaryoları ile yol eğriliği senaryolarından elde edilen performans çıktıları karşılaştırılmıştır. Amaç, kontrolcü yaklaşımının güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirerek tez kapsamında geliştirilen yöntemin performans indekslerine yer verilmesidir. Bölümün devamında simülasyon ortamı, senaryo tanımları ve ayrıntılı sonuçlar sunulmakta; son kısımda ise bulgular eleştirel olarak tartışılmaktadır.

4.2 Simülasyon Ortamı

Bu çalışmada, kontrol algoritmalarının testleri için **MATLAB 2024b ve Simulink** aracı kullanılmıştır. MATLAB'in sağladığı, grafiksel geliştirme ortamı ve kütüphane desteği sayesinde, taşıt dinamiklerini simüle etmek ve kontrol algoritmaları geliştirme konusunda kolaylık sağlamaktadır. Simülasyon adımları aşağıdaki şartlar altında gerçekleştirilmiştir:

- **Bilgisayar Özellikleri:** Intel(R) Core(TM) i7 CPU, 16 GB RAM, Windows 10 x64.
- **Kontrol Frekansı:** Denetleyici döngüsü, $1\,(\mathrm{ms})$ örnekleme periyodu ile çalıştırılmıştır.

4.3 Simülasyon Senaryoları

Bu çalışmada iki temel senaryo üzerinde durulmuştur: **Hız Senaryoları ve Bozucu Etkenler** ve **Yol Eğriliği Senaryoları**. Amaç, kontrolcülerin farklı sürüş koşullarında davranışını gözlemektir. Ayrıca, önerilen kontrolcü yöntemi, üç farklı kontrol yöntemi (*Pure Pursuit*, *Stanley*, *LQR*) ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1 Yol Eğriliği Senaryoları

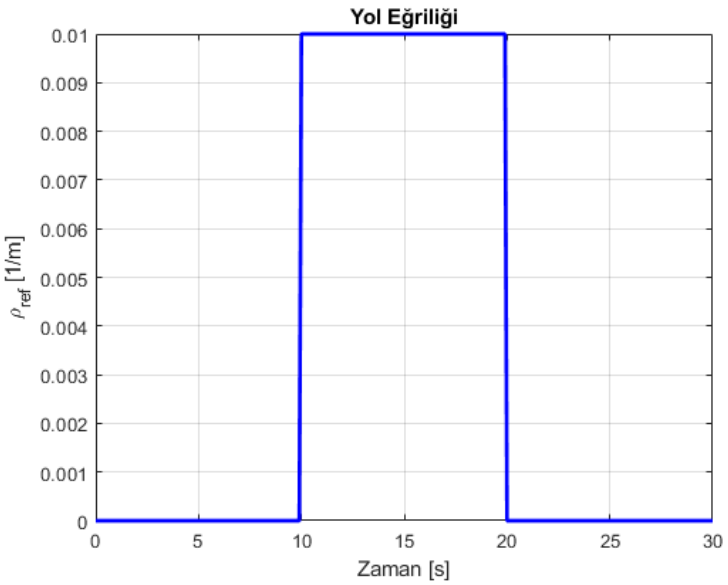
Burada taşıt, dört farklı eğrilik değeriyle oluşturulmuş yol profilinde test edilmektedir:

- **Senaryo 1:** Orta Eğrilik ($\rho = 1/100$).
- **Senaryo 2:** Çok Keskin Eğrilik ($\rho = 1/50$).
- **Senaryo 3:** Değişken Eğrilik ($\rho = 1/50$).
- **Senaryo 4:** Spiral Eğrilik ($\rho = 1/50$).

Her viraj, farklı hız değerleri ile alınmakta ve önerilen öngörülü kontrol ile *Pure Pursuit*, *Stanley*, *LQR* kontrol yöntemleri karşılaştırılmaktadır.

4.3.1.1 Senaryo 1: Orta Eğrilik

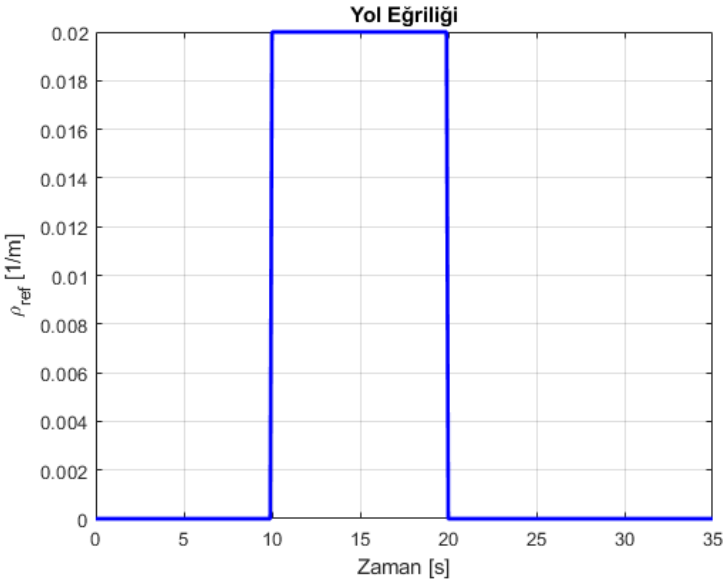
Bu senaryo taşıt başlangıçta düz bir yol üzerinde, başlangıç hız değeri ile seyir halindedir. Düz yol sonunda taşıt, viraj eğriliği yarı çapı 100 [m] olan bir yolu takip etmektedir. Aşağıda yolun eğrilik profili verilmektedir.



Şekil 4.1 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R=100).

4.3.1.2 Senaryo 2: Çok Keskin Eğrilik

Bu senaryo taşıt başlangıçta düz bir yol üzerinde, başlangıç hız değeri ile seyir halindedir. Düz yol sonunda taşıt, viraj eğriliği yarı çapı 50 [m] olan bir yolu takip etmektedir. Aşağıda yolun eğrilik profili verilmektedir.



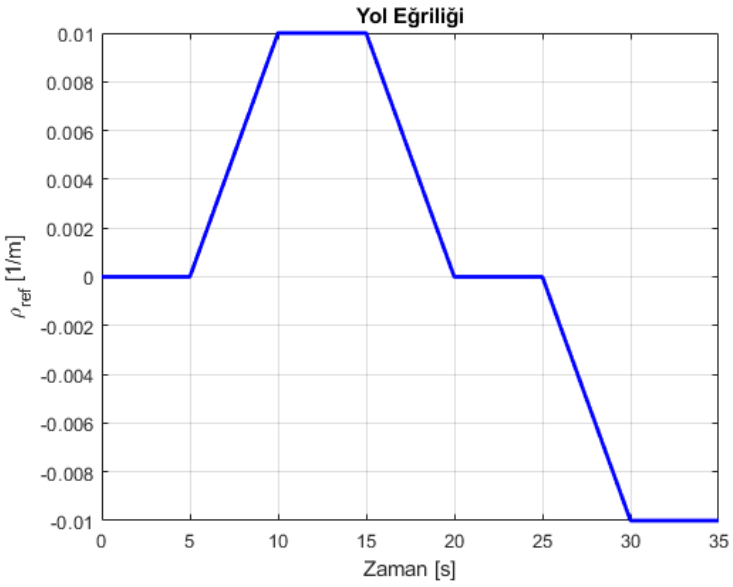
Şekil 4.2 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R=50).

4.3.1.3 Senaryo 3: Değişken Eğrilik

Burada taşıt, çift şerit değiştirme manevrasına benzer bir yörünge üzerinde test edilmektedir:

- **Başlangıç Değer:** Eğrilik Yok ($\rho = 0$).
- **Yükseliş Değer:** Doğrusal olarak artan eğrilik ($\rho : 0 \rightarrow 0.01$).
- **Düzlik Değer:** Sabit eğrilik ($\rho = 0.01$).
- **İniş Değer:** Doğrusal olarak azalan eğrilik ($\rho : 0.01 \rightarrow 0$).
- **Bitiş Değer:** Eğrilik Yok ($\rho = 0$).

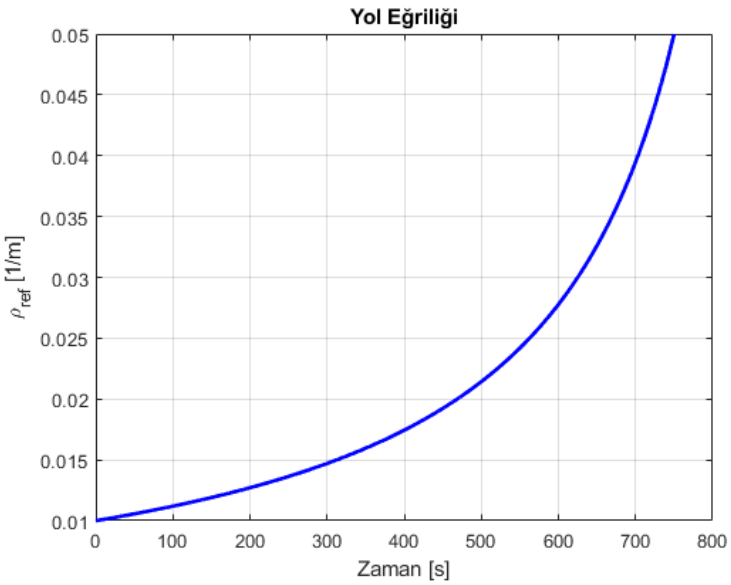
Aşağıda yolun eğrilik profili verilmektedir.



Şekil 4.3 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R = Değişken).

4.3.1.4 Senaryo 4: Spiral Şeklinde Artan Eğrilik

Bu senaryoda taşıt, $R_{\text{start}} = 100\,\text{m}$ ile $R_{\text{end}} = 20\,\text{m}$ arasında doğrusal biçimde azalan yarıçaplı, içe doğru spiral bir yol izler. Araç, yol boyunca ilerlerken, bulunduğu konumdaki anlık yarıçap ile bitiş yarıçapı (R_{end}) arasındaki farkı hesaplamakta ve bu farkı toplam yol uzunluğuna bölerek sürekli artan bir eğrilik referansı ρ_{ref} oluşturmaktadır. Aşağıda, yolun eğrilik profili verilmektedir.



Şekil 4.4 Referans yol eğriliğinin zamana göre gösterimi - (R = Spiral).

4.3.2 Hız Senaryoları ve Bozucu Etkenler

Bu kısımda taşıt, farklı boylamsal hız değerlerinde düz ve virajlı yolda ilerlemektedir. Yörünge profiline uygun olarak seçilen farklı hız seviyesilerinde, *Pure Pursuit*, *Stanley*, *LQR* ve "Önerilen Öngörülü Kontrol Tasarımı" çalıştırılıp ve yanal sapma, direksiyon açı değişimi, yanal ve boylamsal ivme gözlenmiştir. Her alt senaryonun tekrarında eşit şekilde gürültü ve bozucu etkenler ile kontrolcülerin güvenilirliği gözlenmiştir. Senaryo 1, 2 ve 3'te yol sürtünmesine denk gelen $\mu = 0.83$ olarak seçilmiştir. Senaryo 4'te ise yol sürtünme katsayısı $\mu = 1$ ve $\mu = 0.45$ olarak seçilmiş olup, önceki testlerde yüksek başarı gösteren kontrolcü önerilen öngörülü kontrolcü ile ek teste tabi tutulmuştur.

4.4 Simülasyon Sonuçları

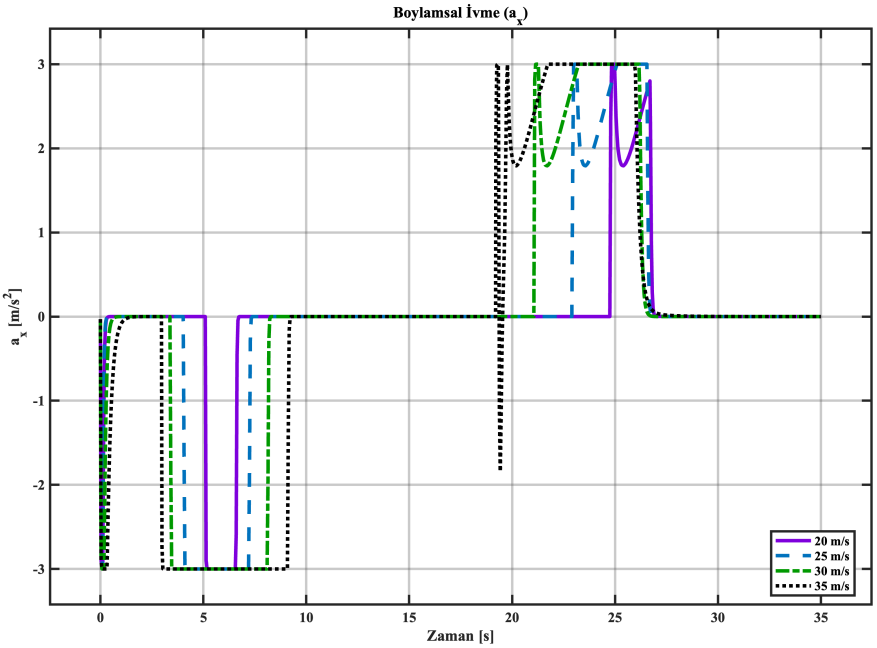
Bu bölümde yukarıdak bahsedilen simülasyon sonuçları verilmektedir. Farklı senaryolarda gerçekleştirilen testlerin sonuçları önce önerilen kontrolcü ile başlayıp kıyaslanan kontrolcülerin sonuçları ile verilecektir. Bölüm sonunda ise genel değerlendirme yapılmıştır.

4.4.1 Senaryo 1 Sonuçları

Bu senaryoda yol eğriliğinin 100 [m] olup, yol sürtünme katsayısı $\mu = 0.83$ olarak seçilmiştir. Viraj eğriliği ortalama bir değerde olduğu için kontrolcü testleri 20, 25, 30 ve 35 [m/s]'lik hız değerlerinde test edilmiştir.

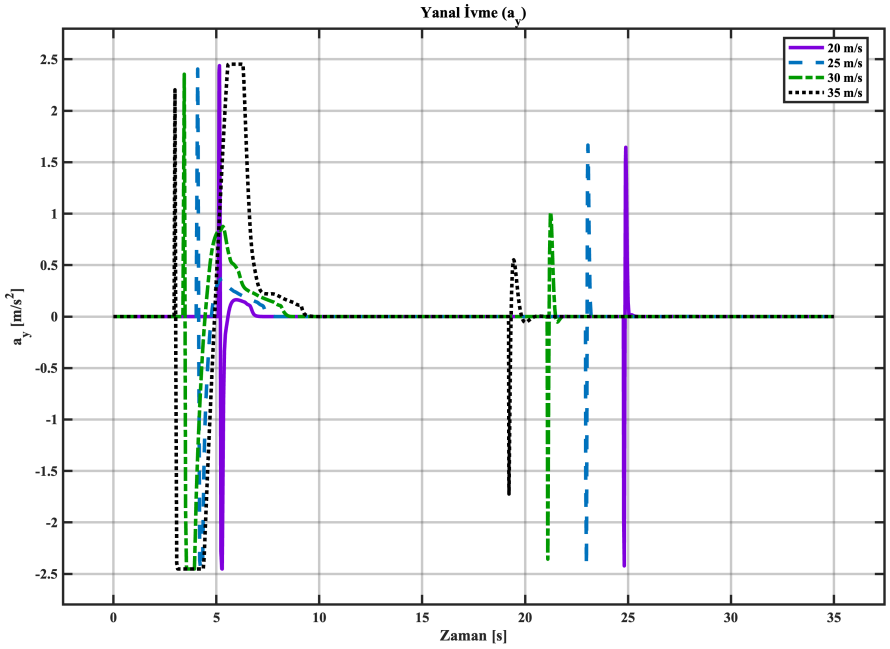
4.4.1.1 Öngörülü Kontrolcü Sonuçları

Boylamsal İvme Sonuçları : Yüksek hız hedeflerinde, özellikle 35 m/s değerinde, frenlemenin daha agresif olduğu ve a_x'ın daha büyük negatif değerlere indiği tespit edilmiştir. Viraj çıkışında ise pozitif ivme pikleri kaydedilerek hedef hıza ulaşmak amacıyla ivmelenmenin arttığı görülmüştür. Daha düşük hız hedefi (20 m/s) senaryosunda, ivme geçişlerini daha yumuşak çıkışlar yaptığı görülmektedir..



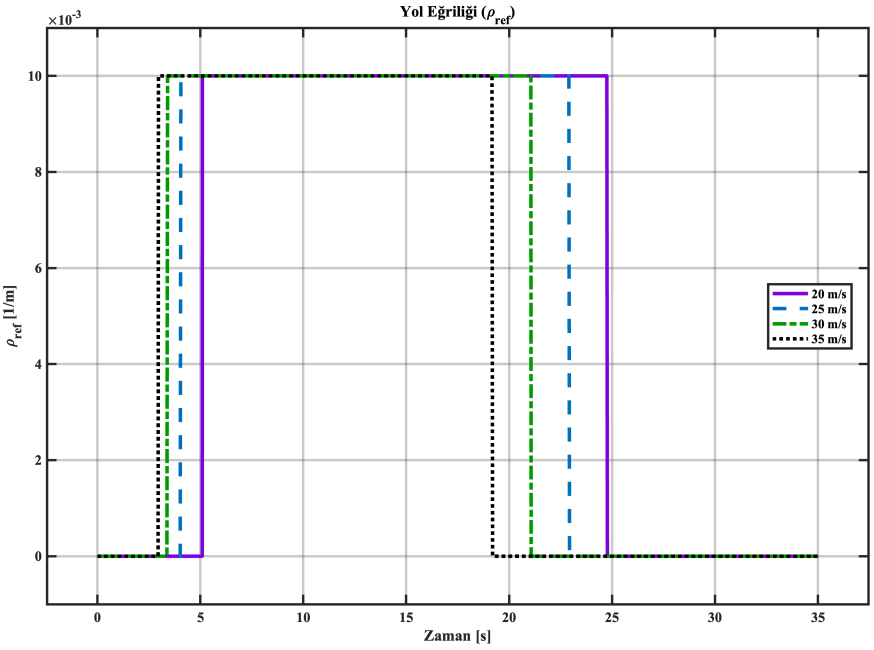
Şekil 4.5 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme

Yanal İvme Sonuçları : Yanal ivme 35 m/s senaryosunda yaklaşık 2.5 m/s^2 düzeyinde en yüksek ivmelere erişildiği kaydedilmiştir. Orta hız senaryolarında (25–30 m/s) ise yanal ivme piklerinin 1–2 m/s^2 aralığında seyrettiği gözlenmiştir. 20 m/s hızında viraj başındaki kısa süreli negatif dalgalanma sonrasında düşük seviyeli yanal ivme değerleri tespit edilmiştir. Bu farklılıkların, hız arttıkça araçta gereken yanal kuvvetin yükselmesi ve kontrolcünün direksiyon açısını buna göre uyarlamasıyla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.



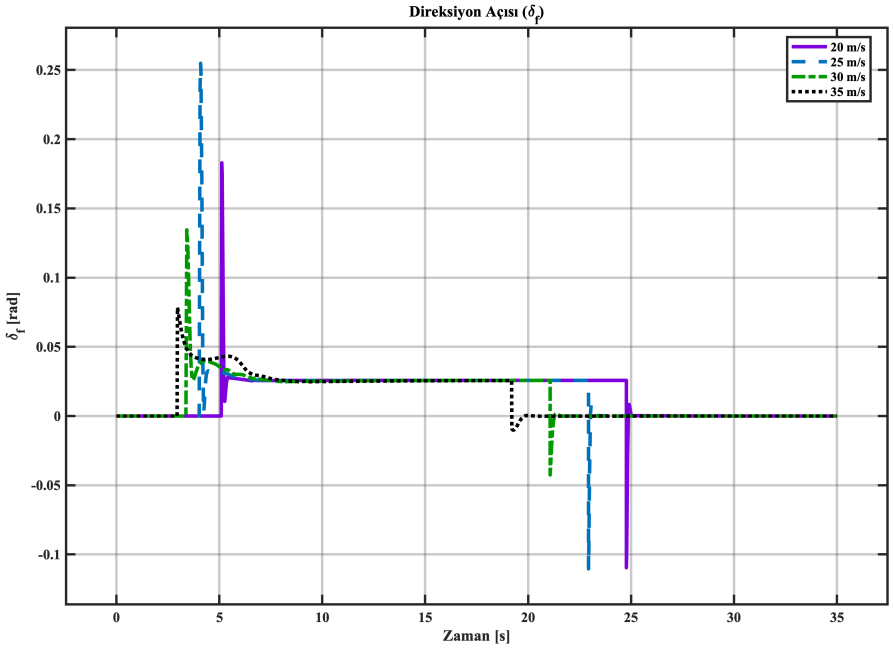
Şekil 4.6 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme

Yol Eğriliği Sonuçları : Farklı hız hedefleri (20, 25, 30, 35 m/s), viraja giriş ve çıkış zamanlarında hıza bağlı küçük kaymalar sergilese de aynı eğrilik profili takip edilmektedir.



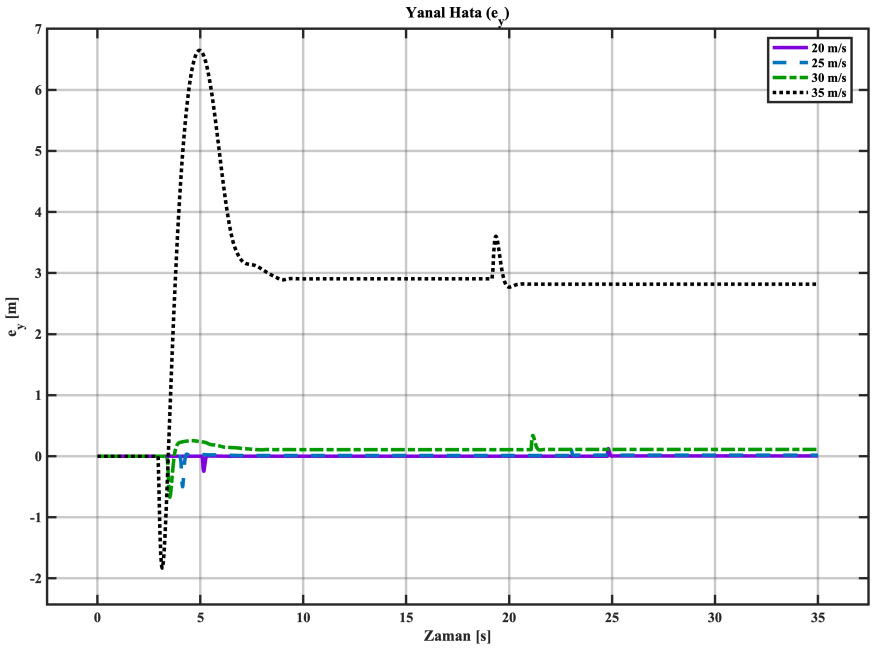
Şekil 4.7 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği

Direksiyon Açısı Sonuçları : Direksiyon açısının, artan hız değerleriyle birlikte viraj boyunca daha büyük maksimum değerlere ulaştığı gözlemlenmektedir. 25 m/s senaryosunda δ_f'nin yaklaşık 0.25 rad düzeyine yükseldiği, 20 m/s hızında ise 0.2 rad'ın altında kaldığı tespit edilmektedir. Bu durumun, yüksek hızda aynı yarıçapı dönmek için daha fazla lastik yönlendirme gereksiniminden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Virajın sonunda ve düz yol kesitlerinde direksiyon açısının tekrar 0 rad seviyesine inerek normal seyir durumuna geçildiği anlaşılmaktadır.



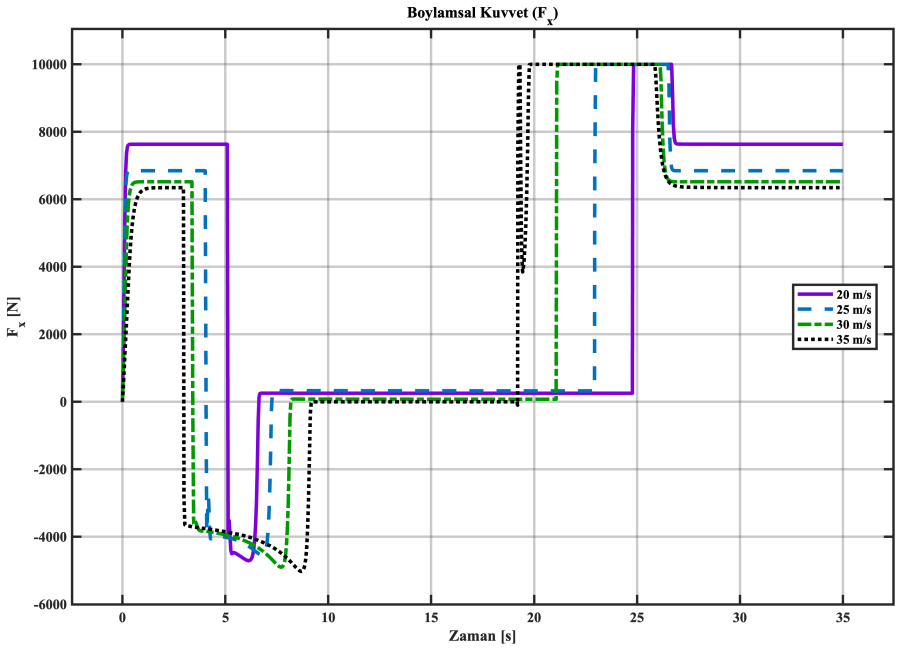
Şekil 4.8 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı

Yanal Konum Hatası Sonuçları : 35 m/s senaryosunda viraj başlangıcında yaklaşık 6–7 m seviyesinde bir sapma görülmüş, ancak kontrolcü müdahaleleriyle bu hatanın kademeli olarak azaltılmıştır. Orta hızlarda (25 ve 30 m/s), yanal hatanın 1 m'nin altında seyrettiği ve kısa süre içinde 0 civarına yakınsadığı gözlemlenmiştir. En düşük hız (20 m/s) içinse sapma genliğinin ±1 m aralığına bile ulaşmadan kararlılığa ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu, sonuçların yüksek hızlarda artan merkezkaç kuvvetine rağmen kontrolcünün yanal sapmayı makul seviyelere çekebildiğini göstermektedir.



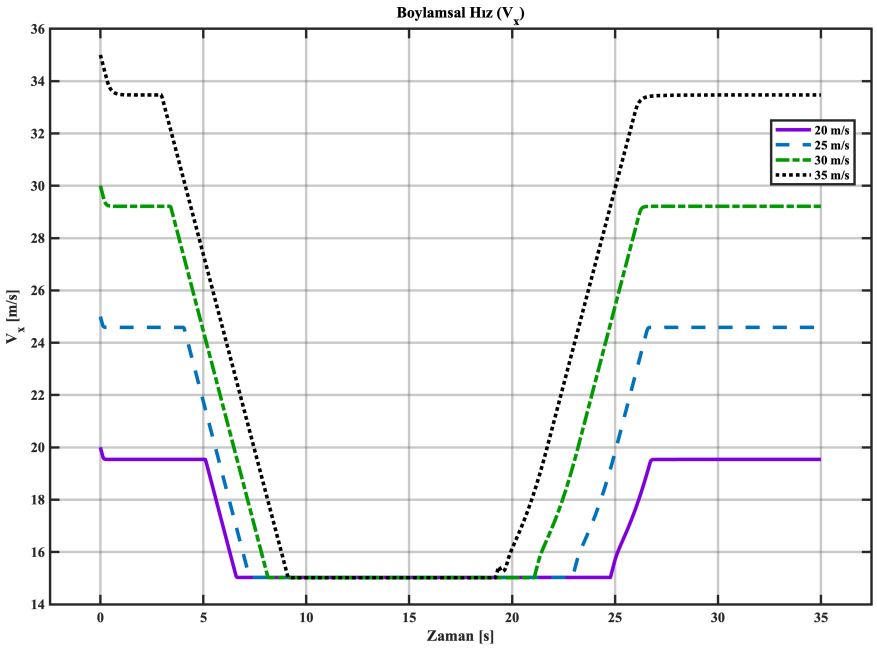
Şekil 4.9 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası

Boylamsal Kuvvet Sonuçları : Yüksek hız senaryolarında (30 ve 35 m/s), frenleme ve ardından gelen çekiş kuvveti piklerinin daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiş, bunun artan kinetik enerjiyi sınırlama ve sonrasında yeniden ivmelenme gereksiniminden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Düşük hızlarda (20 m/s) ise kuvvet geçişlerinin daha düşük genliklerde gerçekleştiği ve aracın virajı daha yumuşak bir hız profiliyle tamamladığı görülmüştür.



Şekil 4.10 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet

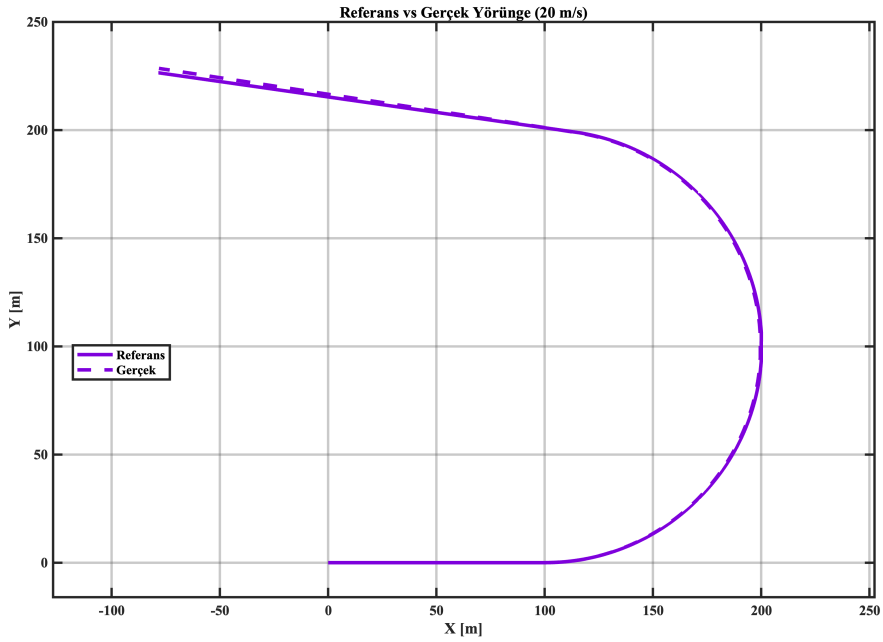
Boylamsal Hız Sonuçları : Her hız senaryosunda kontrolcü tarafından viraj girişinde hızın yaklaşık 20 m/s bandına çekildiği, böylece virajın daha güvenli bir hızla alındığı gözlenmiştir. Yüksek hız senaryolarında (örneğin 35 m/s), frenleme aşamasının ardından ivmelenmenin daha hızlı gerçekleştiği ve kontrolcünün hedef hıza kısa sürede erişebilmek amacıyla agresif gaz komutu uyguladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.11 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız

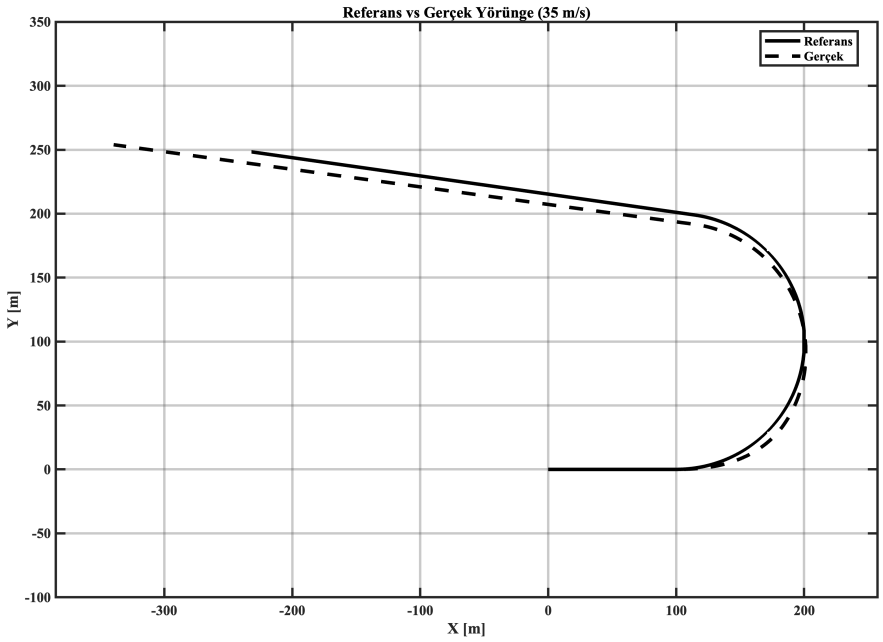
Referans Yörünge Sonuçları :

Simülasyon süresini kısaltmak adına yolun düzlük ve eğrilik olan kısmı diğer hızlarla orantılı olacak şekilde kısaltılmıştır. Test, taşıtın virajı dönüşünden sonraki noktada durdurulmuş olup, 35 saniyelik bir kısmı göstermektedir. Burada kontrolcünün virajı başarıyla aldığı ve düzlükte takibi sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.12 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 20 m/s).

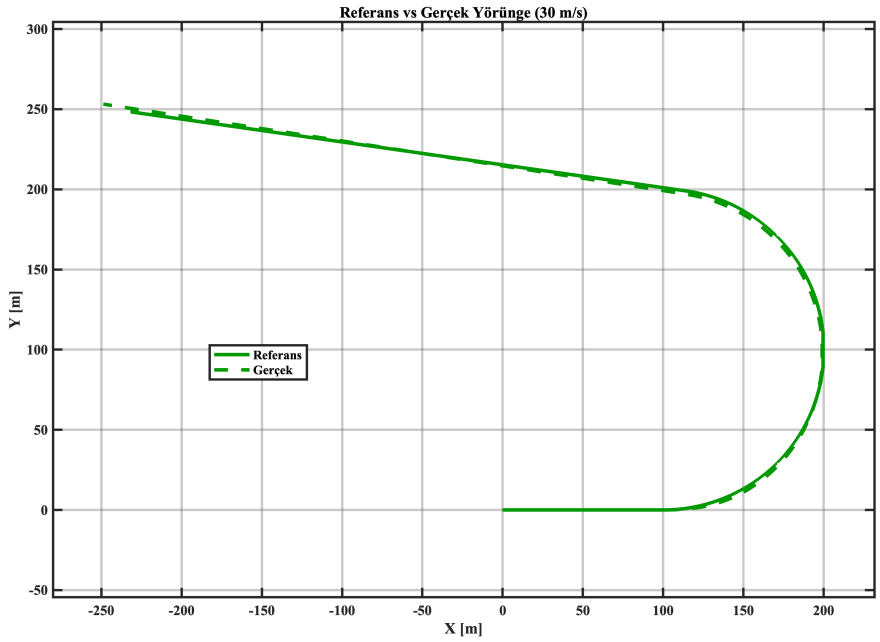
Referans Yörünge Sonuçları : Taşıtın başlangıç düzlüğünde yol takibi başarılı olmasına rağmen viraj giriş ve çıkış kısımlarında takip performansı azalmıştır. Viraj eğriliği sonrasındaki düzlükte araç yörünge takibi performansı kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Buradaki yol profilinin 35 saniyelik bir kısmı dikkate alınmaktadır.



Şekil 4.13 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 25 m/s).

Referans Yörünge Sonuçları :

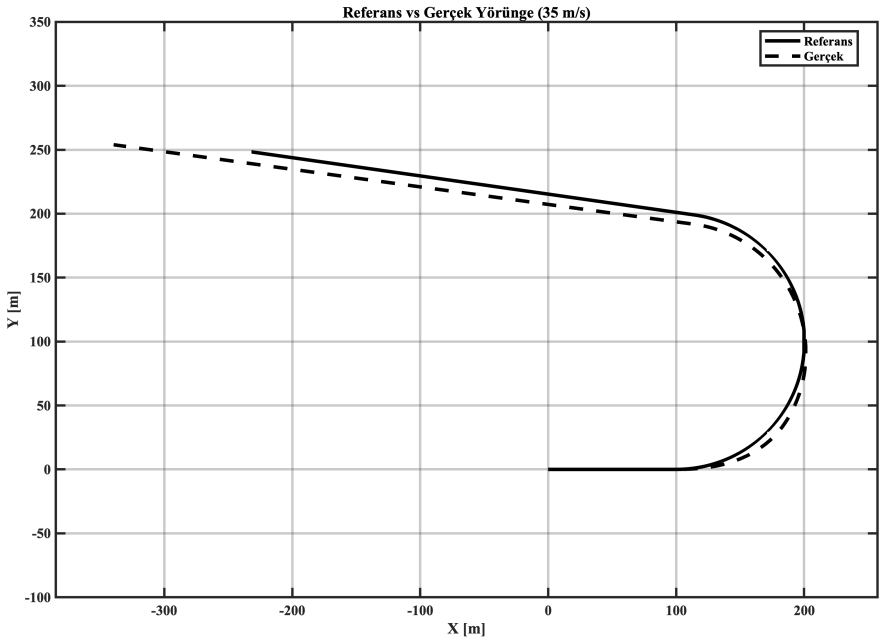
30 m/s araç başlangıç düzlüğünde ve viraj sonraki düzlüğe kadar ki olan kısımda takibi başarıyla sağlamıştır. Eğrilik profili takibinden yörünge takibi başarıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.14 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 30 m/s).

Referans Yörünge Sonuçları :

Taşıtın başlangıç düzlüğünde yol takibi başarılı olmasına rağmen viraj giriş ve çıkış kısımlarında takip performansı azalmıştır. Viraj eğriliği sonrasındaki düzlükte araç yörünge takibi performansı kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Buradaki yol profilinin 35 saniyelik bir kısmı dikkate alınmaktadır.



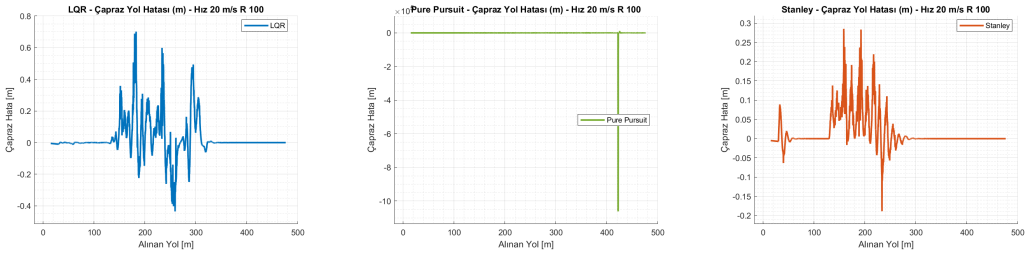
Şekil 4.15 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 35 m/s).

4.4.1.2 Kıyaslanan Kontrolcü Sonuçları

Bu senaryoda yol eğriliği ($R = 100$ m) olup, yol sürtünme katsayısı μ = 0.83 seçilmiştir. Farklı hızlarda yapılan test sonuçları gösterilmektedir.

Çapraz Yol Hatası Sonuçları :

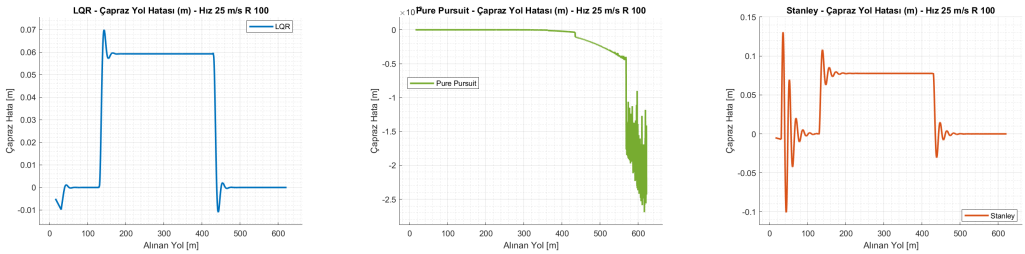
CTE değerleri LQR kontrolcüsünde düşük seviyede tutulmuştur. Stanley kontrolcüsünde, başlangıç ve dönüş bölgelerinde hafif osilasyonlar gözlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde yüksek sapmalar saptanmıştır.



Şekil 4.16 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

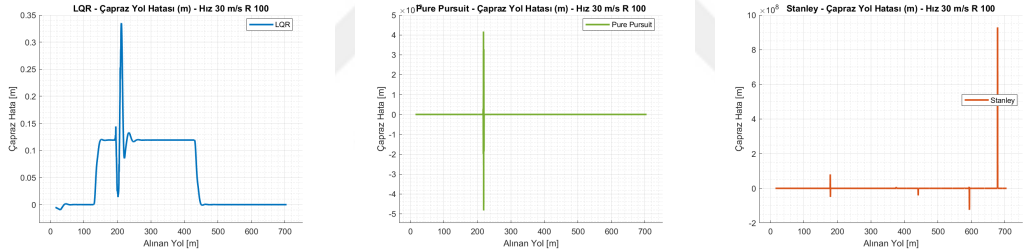
LQR kontrolcüsünde seyir hattına uyum sağlanmış ve CTE değerleri düşük kalmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde eğrilik artışıyla birlikte sapma değerlerinde

yüksek şekilde artış ile dalgalanmalar kaydedilmiştir. Stanley kontrolcüsünde CTE değerlerinde viraj girişinde ve çıkışında artan sapma ve belirgin osilasyon eğilimi tespit edilmiştir.



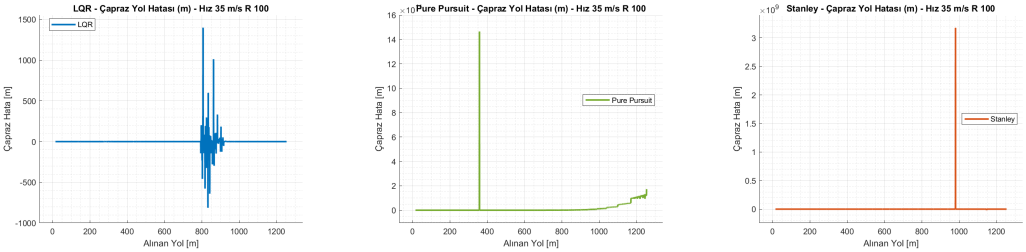
Şekil 4.17 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

LQR kontrolcüsünde artan hız koşullarına rağmen CTE değerleri kontrol altında tutulmuştur. Pure Pursuit kontrolcüsünde sapma değerlerinin artmasıyla osilasyonlar belirginleşmiştir. Stanley kontrolcüsünde hata değerlerinde yükselme ve zamanla yavaş yakınsama eğilimi gözlenmiştir.



Şekil 4.18 30 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

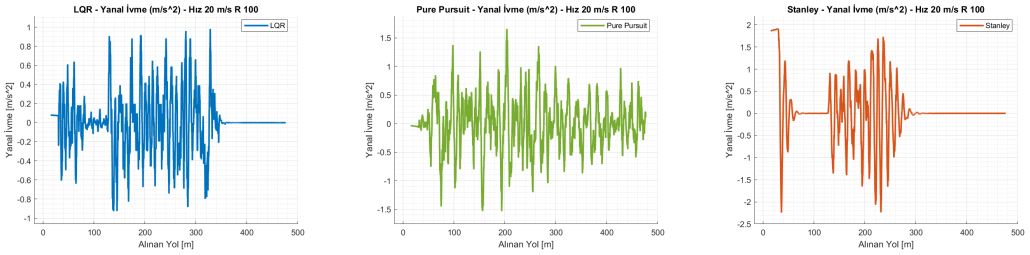
LQR kontrolcüsünde yüksek hız etkisiyle CTE değerlerinde artış meydana gelmiş; seyir hattına yakınsama kısmen sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde düzenli osilasyonlar ve sapma artışı kaydedilmiştir. Stanley kontrolcüsünde yüksek hız koşullarında kontrol tepkilerinde yavaş yakınsama ile önemli artış gözlenmiştir.



Şekil 4.19 35 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

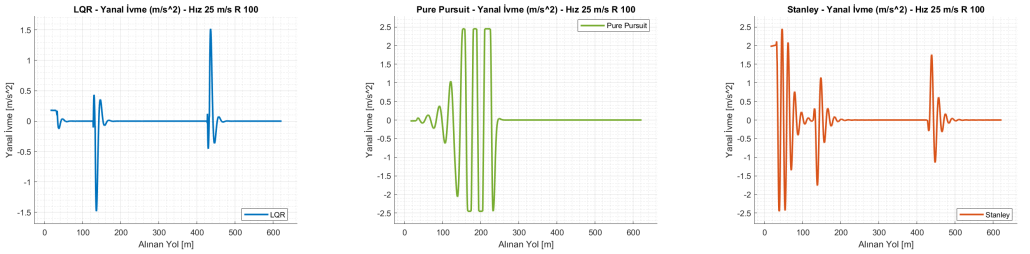
Yanal İvme Sonuçları :

Yanal ivme profilinde, LQR kontrolcüsünde düşük değerler korunarak stabil bir yapı sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde, orta düzey dalgalanmalar kaydedilmiş ve ivme değişimleri ölçülebilir seviyede saptanmıştır. Stanley kontrolcüsünde ise, diğer yöntemlere oranla belirgin artış ve dalgalanma gözlenmiştir.



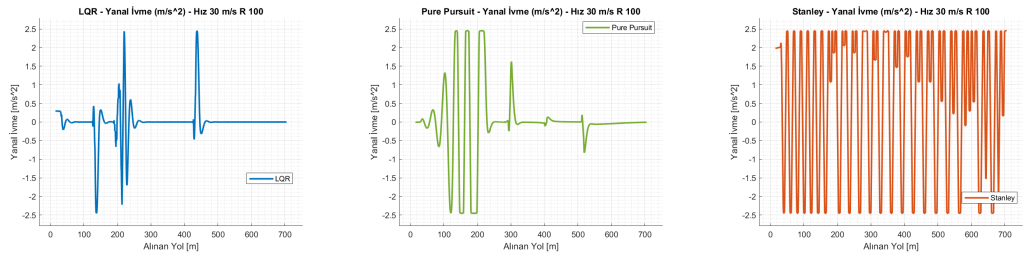
Şekil 4.20 20 m/s için yanal ivme sonuçları

25 m/s koşulunda, LQR kontrolcüsünde yanal ivme değerlerinin düşük seviyede kalması ve stabil bir seyir elde edilmesi sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde artan hızın etkisiyle hafif artış ve dalgalanmalar meydana getirilmiştir. Stanley kontrolcüsünde, yüksek hız koşullarında ani artışların ve belirgin dalgalanmaların ortaya çıkması tespit edilmiştir.



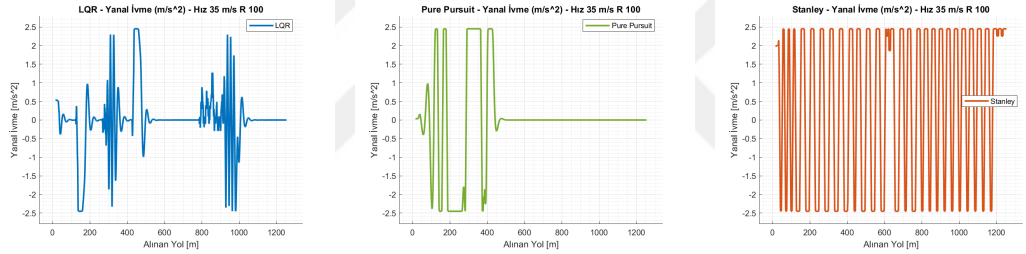
Şekil 4.21 25 m/s için yanal ivme sonuçları

30 m/s hızında, LQR kontrolcüsünde ölçülebilir bir artışa rağmen genel stabilitenin korunduğu saptanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde artan hıza bağlı olarak dalgalanmalar ile ani değişimlerin daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde, özellikle dönüş bölgelerinde ani ivme artışlarının ve yoğun dalgalanmaların meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.22 30 m/s için yanal ivme sonuçları

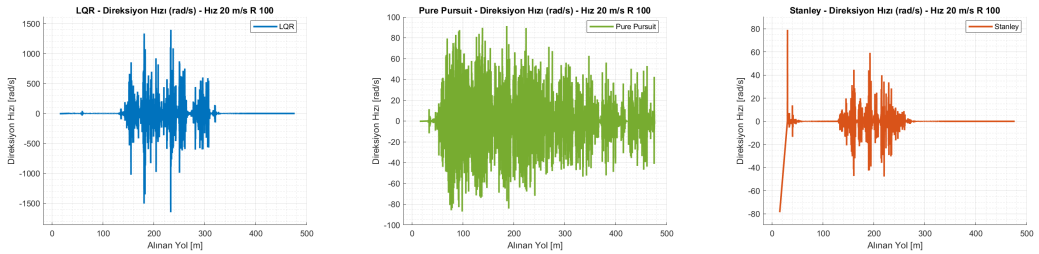
35 m/s koşulunda, LQR kontrolcüsünde yüksek hızın etkisiyle ani ivme artışlarının meydana geldiği ve belirli aralıklarda ±2.5 m/s^2 seviyelerine ulaşıldığı saptanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde, dönüş bölgelerinde ani sıçramaların oluştuğu ve ivmede hızlı dalgalanma eğiliminin gözlendiği tespit edilmiştir. Stanley kontrolcüsünde ise, neredeyse periyodik sayılabilecek şekilde ±2.5 m/s^2 aralığında yoğun dalgalanmalar meydana gelmiş ve stabil bir davranış sergilenemediği belirlenmiştir.



Şekil 4.23 35 m/s için yanal ivme sonuçları

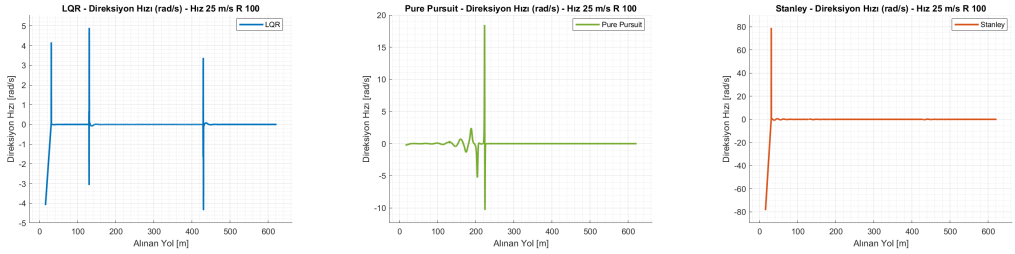
Direksiyon Açısı Değişim Hızı Sonuçları :

LQR kontrolcüsünde yönlendirme hızı düşük seviyede kalmış ve stabil seyir sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde geçiş bölgelerinde orta düzey salınımlar gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde ise daha yüksek salınımlar ve ani yön değişiklikleriyle belirgin sapmalar meydana getirilmiştir.



Şekil 4.24 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

LQR kontrolcüsünde yönlendirme hızı düşük seviyede korunmuş ve stabilitenin devamı sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde hız artışıyla salınım genliği hafif artmış, dalgalanmalar belirginleşmiştir. Stanley kontrolcüsünde yüksek hız koşullarında ani artışlar ve artan salınım genlikleri gözlemlenmiştir.



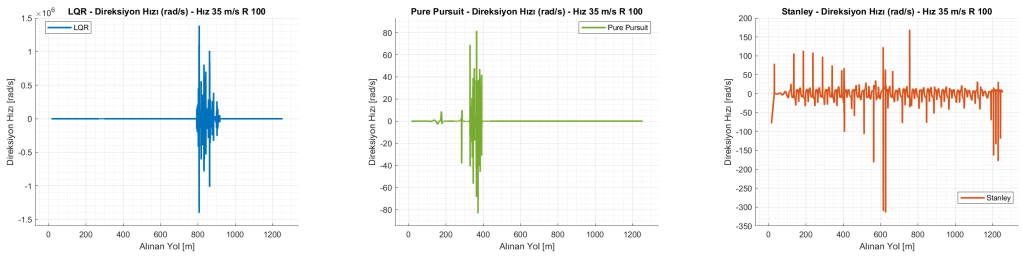
Şekil 4.25 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

30 m/s koşulunda LQR kontrolcüsünde yönlendirme hızı artışına rağmen genel olarak stabil seyir sağlanmıştır. Pure Pursuit kontrolcüsünde orta düzey salınımlar ve ani tepkiler meydana gelmiştir. Stanley kontrolcüsünde agresif yanıtlar, yüksek salınım genlikleri ve ani yön değişiklikleri kaydedilmiştir.



Şekil 4.26 30 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

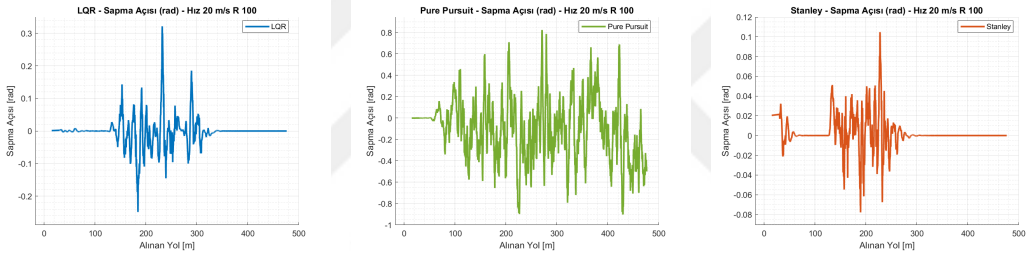
LQR kontrolcüsünde yüksek genlikli salınımlar ve segmentlerde aşırı ani değişimler gözlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde başlangıçta orta düzey salınımlar, ilerleyen kısımlarda nispeten kararlı değişimler saptanmıştır. Stanley kontrolcüsünde yüksek hız etkisiyle ani sıçramalar ve dalgalanmalar meydana getirilmiştir.



Şekil 4.27 35 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

Yanal Sapma Hatası Sonuçları :

Yanal Sapma hata değerleri düşük seviyede tutulmuş olarak gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritması kapsamında, hafif dalgalanmalar eşliğinde orta büyüklükte sapmalar meydana getirilmiştir. Stanley yöntemi için ise, diğer kontrolcülere kıyasla daha yüksek sapma değerleri ile belirgin dalgalanmalar saptanmıştır.



Şekil 4.28 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

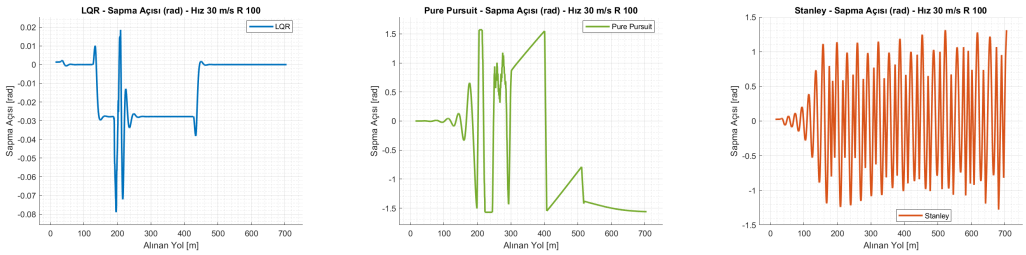
25 m/s koşulunda, yanal sapma hata değerlerinin düşük seviyede sabit kaldığı gözlenmiştir. Pure Pursuit denklemleri kapsamında, artan hızın etkisiyle sapma değerlerinde hafif bir artış ve dalgalı yapı oluşmuştur. Stanley kontrolünde ise, belirgin sapmalar ile hata değerlerinin daha değişken seyrettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.29 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

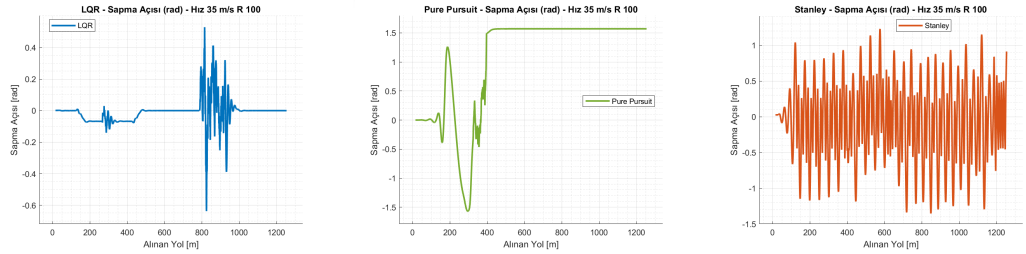
30 m/s hızında, yanal sapma hata değerlerinin orta seviyede izlendiği ve kontrol

altında tutulduğu gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritması kapsamında, artan hız ile birlikte hafif artışlar ve daha belirgin salınımlar meydana getirilmiştir. Stanley yöntemi için, diğer yöntemlere göre daha yüksek sapma değerleri ve artan değişkenlik saptanmıştır.



Şekil 4.30 30 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

Artan hızın etkisiyle, LQR kontrolünde yanal sapma hata değerlerinde belirli aralıklarda 0.4 rad seviyesine kadar yükselen salınımlar meydana getirilmiştir. Pure Pursuit yöntemi kapsamında, dönüş bölgelerinde ani sıçramalar gözlenmiş ve yaklaşık 1.5 rad mertebesine kadar çıkan büyük hatalar tespit edilmiştir. Stanley algoritmasında ise, ±1.0 rad aralığında yoğun dalgalanmalar ile hatanın yüksek hız koşulunda periyodik salındığı saptanmıştır.



Şekil 4.31 35 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

Değerlendirme

- **Çapraz yol hatası.** Öngörülü kontrolcü, $V = 20$–25 km/s aralığında en küçük hatayı üretmiş; $V = 30$ km/s'de klasik yöntemlerle benzer büyüklükte kalmış; $V = 35$ km/s'de ise hata artmıştır. Pure Pursuit ve Stanley, özellikle yüksek hızda sayısal olarak kararsız sonuçlar vermiştir.
- **Yanal sapma açısı.** LQR, Stanley ve Öngörülü yöntemler düşük–orta değerlere sahipken, Pure Pursuit tüm hızlarda daha yüksek sapma açıları üretmiştir.

Tablo 4.1 Farklı Hız–Eğrilik Senaryolarında Kontrolcülerin RMSE Sonuçları ($R = 100\,\text{m}$)

Hız [m/s]	**Kontrolcü**	**Çapraz Yol Hatası** [m]	**Yanal Sapma Açısı** [rad]	**Yanal İvme** [m/s^2]	**Direksiyon Açısı Hızı** [rad/s]
20	LQR	0.12504	0.11174	1.108	165.33
20	Stanley	0.04748	0.05447	0.93223	5.659
20	Pure Pursuit	2.7445×10^{4}	0.87717	1.4124	23.026
20	Öngörülü Kontrolcü	0.01310	0.11430	0.2031	0.0210
25	LQR	0.04218	0.00953	0.2663	0.2269
25	Stanley	0.05777	0.00961	0.62224	2.0514
25	Pure Pursuit	5.8277×10^{11}	1.2982	0.96472	0.8135
25	Öngörülü Kontrolcü	0.03070	0.11840	0.2519	0.0233
30	LQR	0.08296	0.02191	0.62605	14.830
30	Stanley	2.5552×10^{7}	0.85958	2.4062	20.511
30	Pure Pursuit	1.4986×10^{11}	1.1901	0.98512	0.7892
30	Öngörülü Kontrolcü	0.12520	0.12630	0.3658	0.0207
35	LQR	58.693	0.24017	1.1043	7.7990×10^{4}
35	Stanley	7.5917×10^{7}	0.85111	2.4277	19.156
35	Pure Pursuit	4.7596×10^{10}	1.3831	1.2519	4.4174
35	Öngörülü Kontrolcü	3.0324	0.14370	0.6841	0.0209

- **Yanal ivme.** Öngörülü kontrolcü, konfor sınırı kabul edilen $2\,\text{m/s}^2$ değerinin altında kalmayı başarmıştır. Stanley'de ivme artışı hızla birlikte belirginleşmiştir.
- **Direksiyon hızı.** Öngörülü yaklaşımın aktüatör talebi oldukça düşüktür ($<$ $0.03\,\text{rad/s}$). LQR'de hız yükseldikçe direksiyon hızının çok büyük değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Genel olarak, sınırlı-horizontlu öngörülü strateji düşük ve orta hızlarda izleme doğruluğu ve konfor açısından avantaj sağlamış, yüksek hızda ise kontrol parametrelerinin iyileştirmelere açık olduğunu işaret etmiştir.

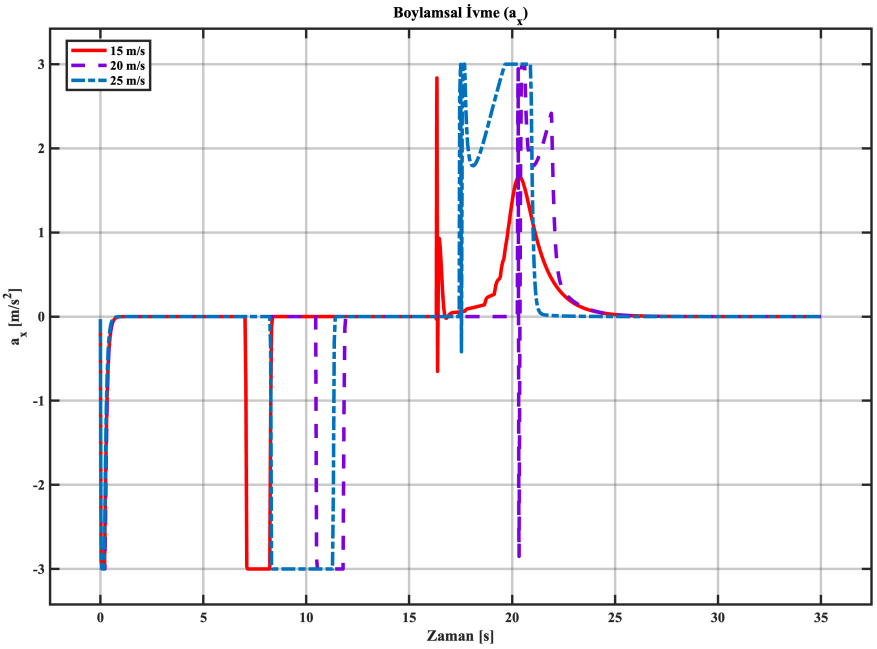
4.4.2 Senaryo 2 Sonuçları

Bu senaryoda yol eğriliğinin 50 [m] olup, yol sürtünme katsayısı μ = 0.83 olarak seçilmiştir.

4.4.2.1 Öngörülü Kontrolcü Sonuçları

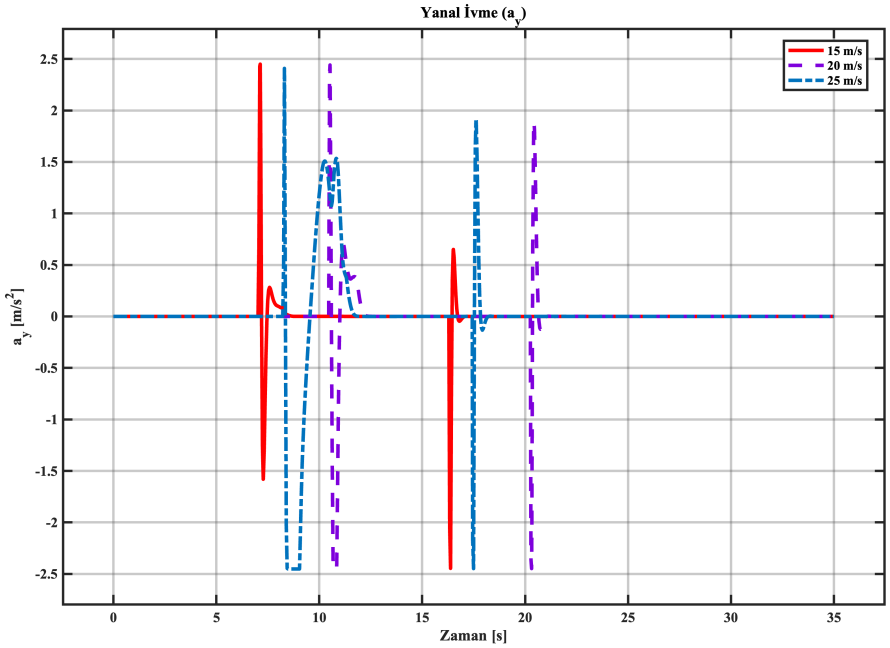
Boylamsal İvme Sonuçları :

Aracın ileri yöndeki ivmesinin zamanla değişiminde, viraj girişlerinde $a_x < 0$ değerlerine ulaşarak fren uygulandığı, viraj çıkışı ve düz yolda $a_x > 0$ ile hızlanıldığı görülmektedir. Yüksek hızlarda daha büyük frenleme ve ivmelenme pikleri gözlenmektedir.



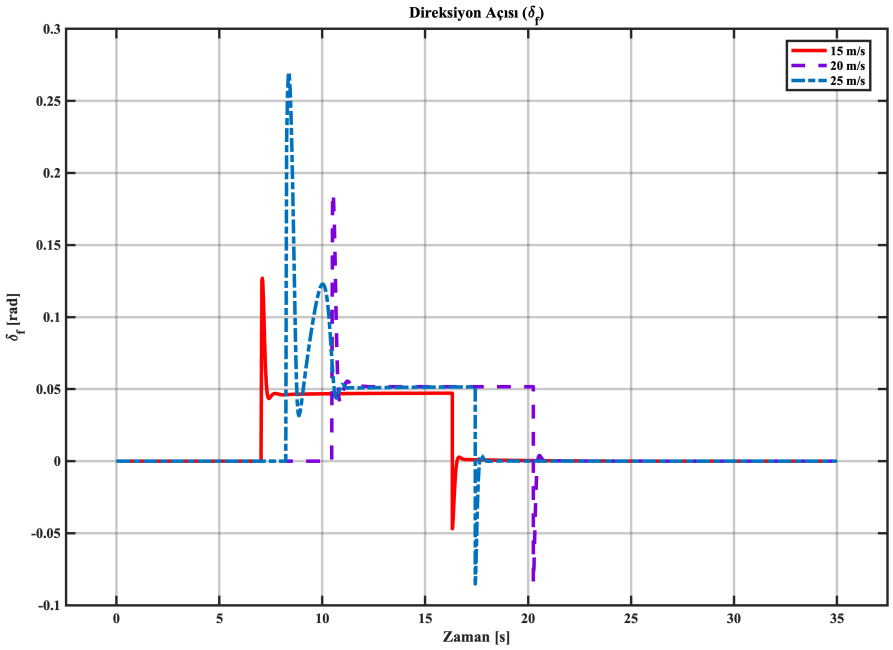
Şekil 4.32 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal İvme

Yanal İvme Sonuçları : Aracın yanal ivmesi, virajlarda oluşan yan kuvvetleri doğrudan yansıtmaktadır. Hız arttıkça merkezkaç kuvveti büyüdüğünden, a_y pikleri de yükselmektedir. Kontrolcü, direksiyon ve fren/gaz komutlarını entegre biçimde ayarlayarak yanal ivmeyi dengede tutmaya çalışmaktadır.



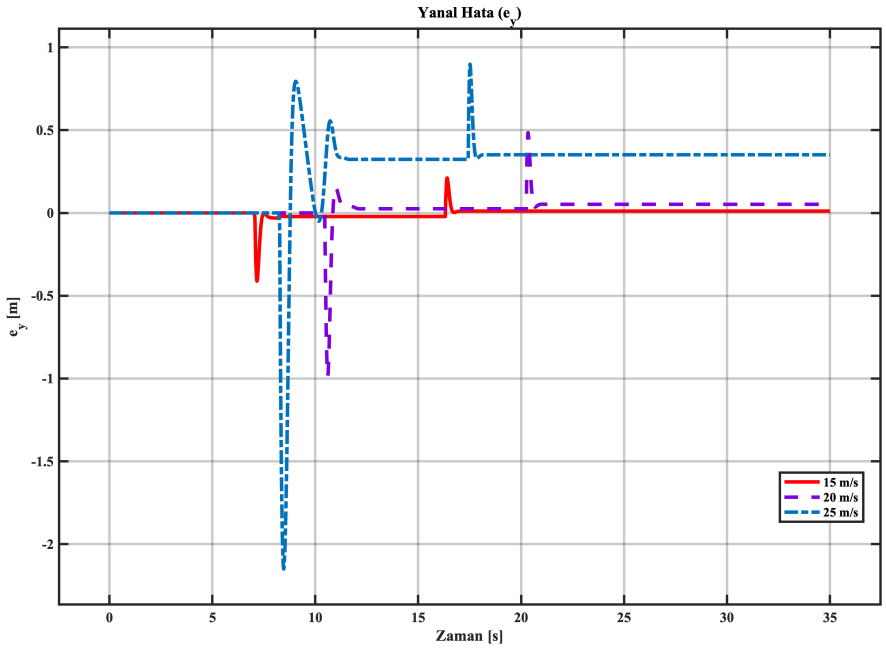
Şekil 4.33 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal İvme

Direksiyon Açısı Sonuçları : Yüksek hızlarda direksiyon açısı pik değerleri artmaktadır ve sabit yol eğriliği altında virajı dönebilmek için lastiklere daha büyük yönlendirme komutu verilmektedir. Viraj sonuna doğru direksiyon açısı yeniden sıfıra yaklaşarak düz yol konumuna geçmektedir.



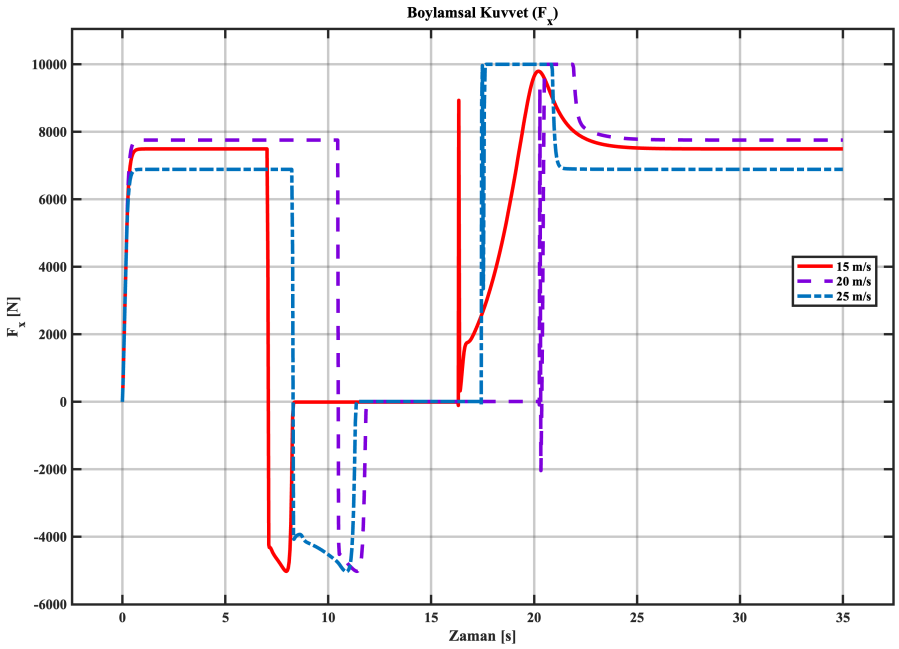
Şekil 4.34 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı

Yanal Hata Sonuçları : Yüksek hızlarda sapmaların daha belirgin ve dalgalı olduğu, kontrolcü müdahaleleriyle zamanla azaltıldığı izlenmektedir. Düşük hız (15 m/s) senaryosunda ise e_y değerlerinin çoğunlukla daha sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir.



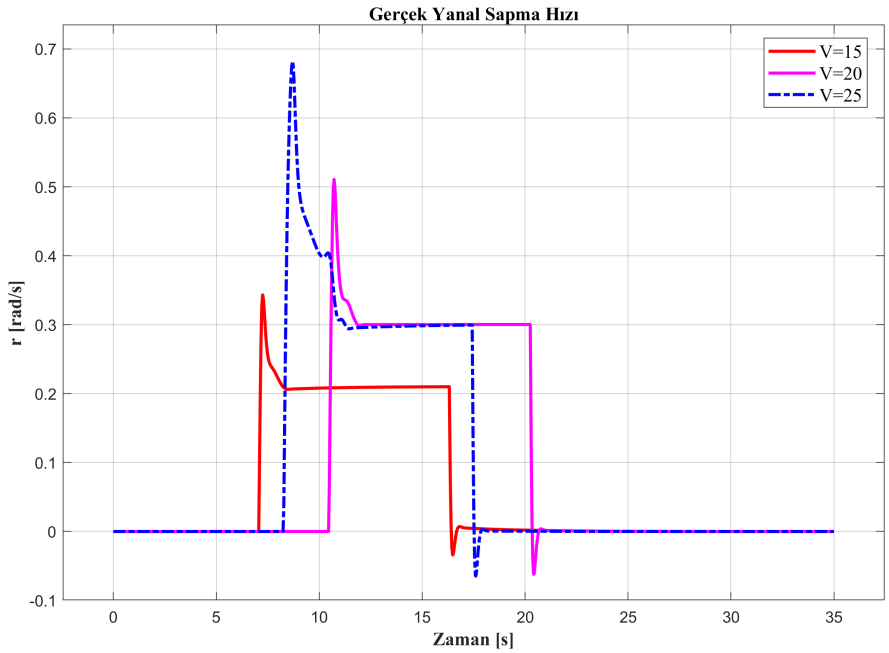
Şekil 4.35 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal hata

Boylamsal Lastik Kuvvetleri Sonuçları : Viraj girişinde belirgin negatif kuvvet pikleri, aracın hızını azaltmak amacıyla kontrolcünün fren uyguladığını; viraj çıkışındaki pozitif pikler ise hızın yeniden yükseltilmesini amaçladığını yansıtmaktadır. Yüksek hızlarda $(v = 25\,\mathrm{m/s})$ fren ve çekiş kuvvetlerinin daha yüksek genliklere ulaştığı görülmektedir.



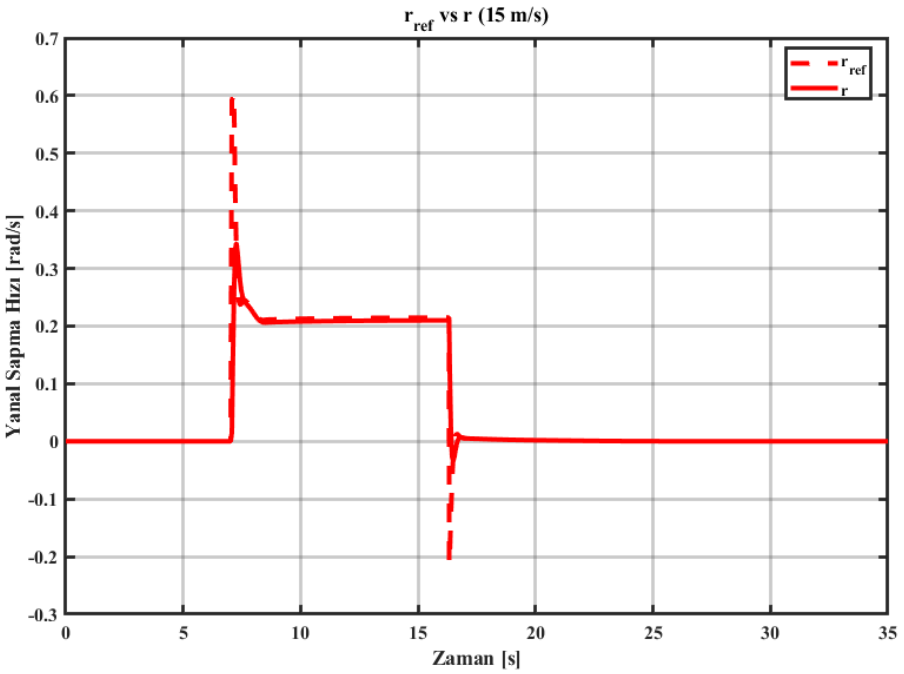
Şekil 4.36 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal Lastik Kuvvetleri

Yanal Sapma Sonuçları : Yüksek hızlarda viraj girişinde yanal sapma hızında ani yükselişler kaydedilmektedir. Kontrolcü, direksiyon ve boylamsal kuvvet komutlarıyla bu hızın referans değere yaklaştırılmasını hedeflemektedir. Viraj bitiminde ise r sıfıra veya düşük seviyelere inerek düz yol sürüşüne geçildiği görülmektedir.



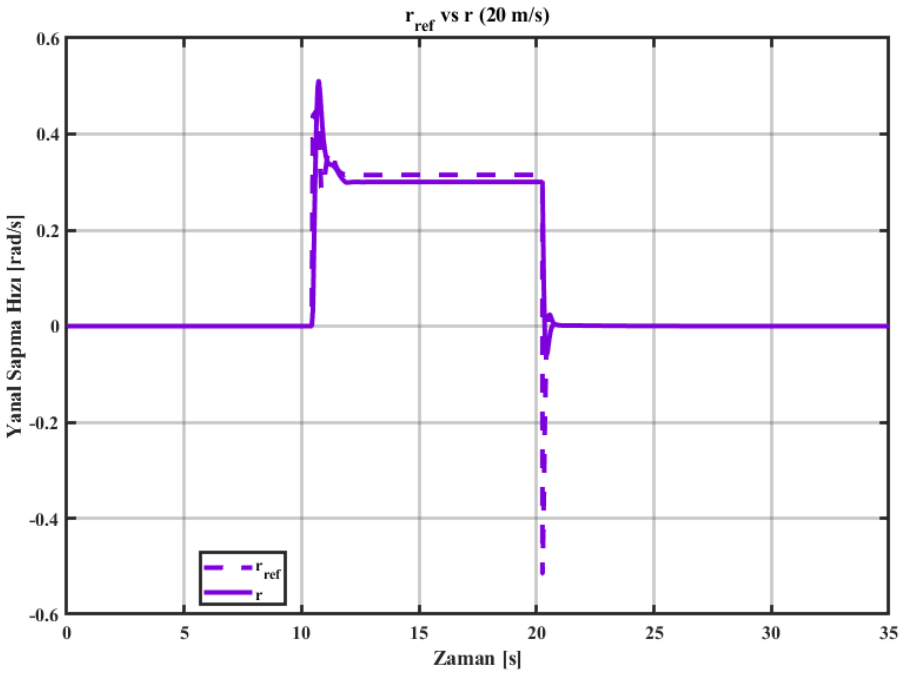
Şekil 4.37 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal sapma hızı

Referans Yanal Sapma Hızı Sonuçları : Viraj başlangıcında, hız ve yol eğriliğinin çarpımıyla belirlenen r_{ref} aniden yükselmekte; viraj içinde ise sabit veya hafifçe azalan bir düzeyde seyretmektedir. Kontrolcü, gerçek yanal hızının (r) bu referans eğri sınırları içerisinde kalması ile başarısını göstermektedir.



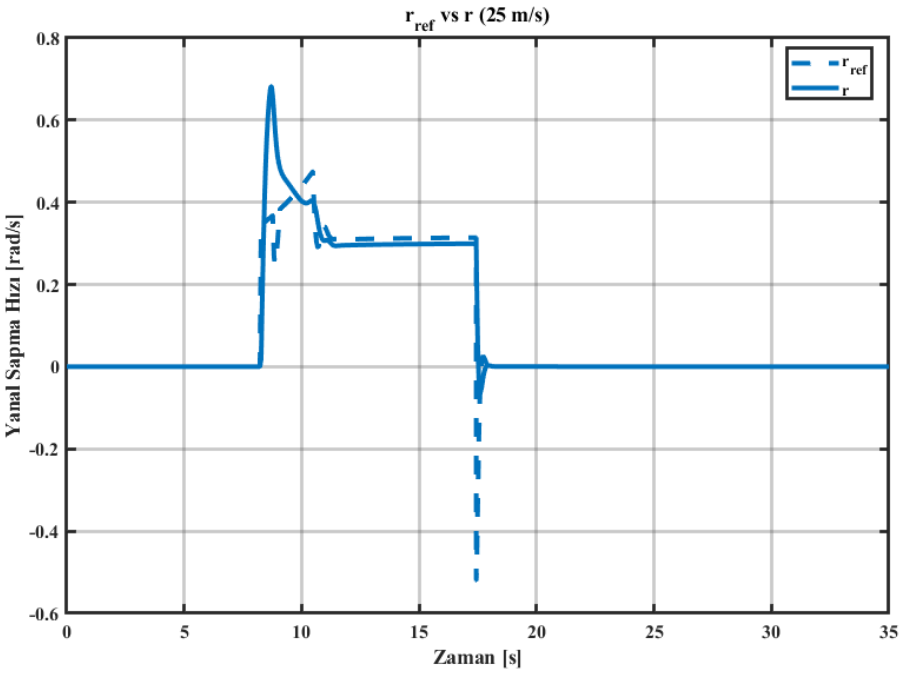
Şekil 4.38 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 15 m/s)

Referans Yanal Sapma Hızı Sonuçları : Viraj başlangıcında, hız ve yol eğriliğinin çarpımıyla belirlenen r_{ref} aniden yükselmekte; viraj içinde ise sabit veya hafifçe azalan bir düzeyde seyretmektedir. Kontrolcü, gerçek yanal hızının (r) bu referans eğri sınırları içerisinde kalması ile başarısını göstermektedir.



Şekil 4.39 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 20 m/s)

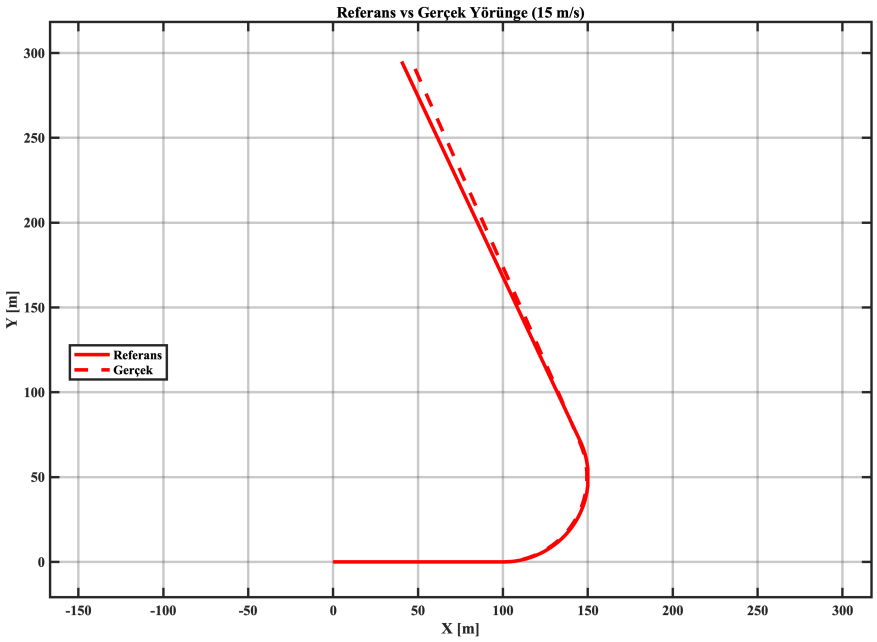
Referans Yanal Sapma Hızı Sonuçları : Viraj başlangıcında, hız ve yol eğriliğinin çarpımıyla belirlenen r_{ref} aniden yükselmekte; viraj içinde ise sabit veya hafifçe azalan bir düzeyde seyretmektedir. Kontrolcü, gerçek yanal hızının (r) bu referans eğri sınırları içerisinde kalması ile başarısını göstermektedir.



Şekil 4.40 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma hızı (V = 25 m/s)

Referans Yörünge Sonuçları :

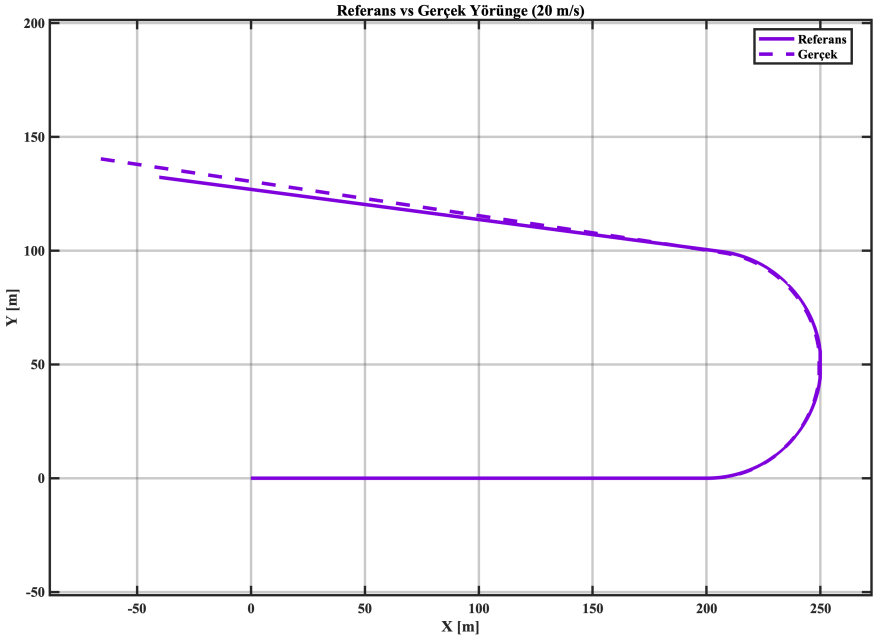
Simülasyon süresini kısaltmak adına yolun düzlük ve eğrilik olan kısmı diğer hızlarla orantılı olacak şekilde kısaltılmıştır. Test, taşıtın virajı dönüşünden sonraki noktada durdurulmuş olup, 35 saniyelik bir kısmı göstermektedir. Burada kontrolcünün virajı başarıyla aldığı ve düzlükte takibi sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.41 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 15 m/s).

Referans Yörünge Sonuçları :

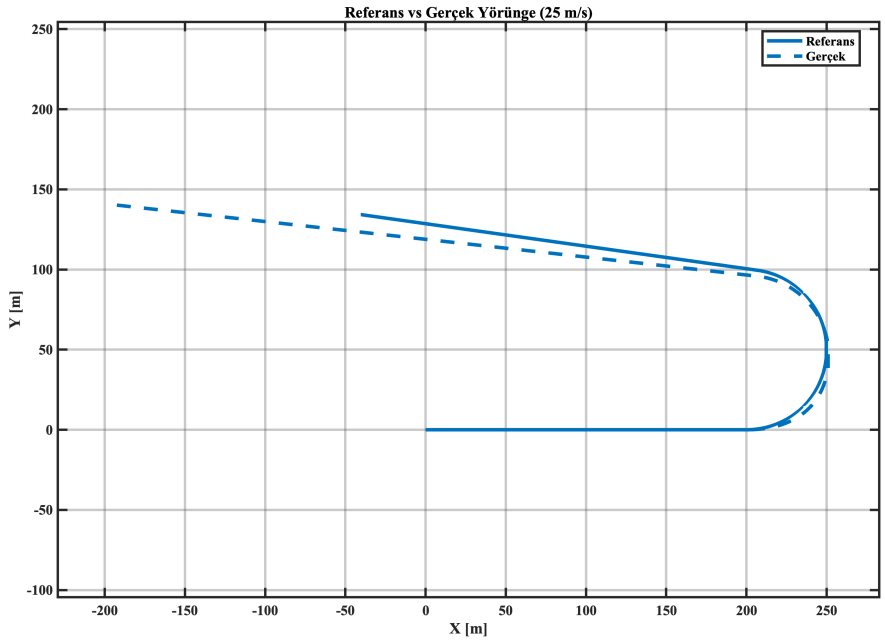
20 m/s araç başlangıç düzlüğünde ve viraj sonraki düzlüğe kadar ki olan kısımda takibi başarıyla sağlamıştır. Eğrilik profili takibinden yörünge dışına çıkılmamıştır.



Şekil 4.42 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 20 m/s).

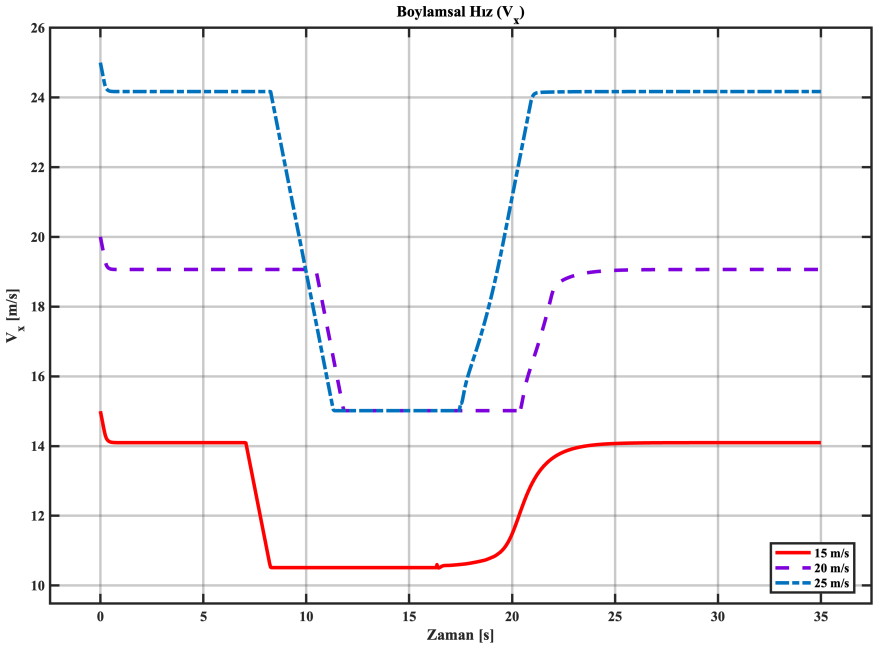
Referans Yörünge Sonuçları :

Taşıtın başlangıç düzlüğünde yol takibi başarılı olmasına rağmen viraj giriş ve çıkış kısımlarında takip performansı azalmıştır. Viraj eğriliği sonrasındaki düzlükte araç yörünge takibi performansı kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Buradaki yol profilinin 35 saniyelik bir kısmı dikkate alınmaktadır.



Şekil 4.43 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek ve referans yörünge (V = 25 m/s).

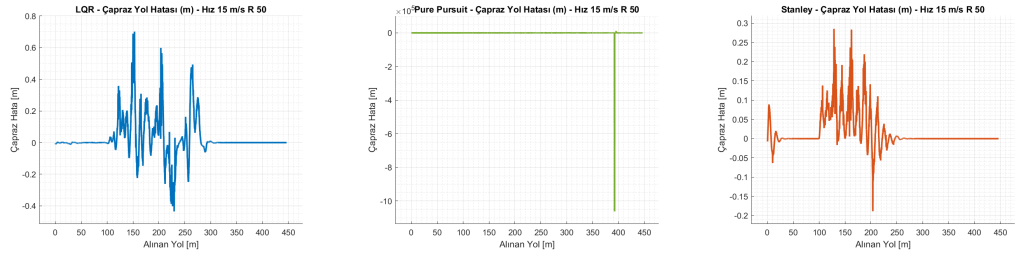
Boylamsal Hız Sonuçları : Yüksek referans hızlarda, viraj öncesinde hızın belirgin biçimde düşürüldüğü; virajdan çıkışta ise yeniden artırıldığı tespit edilmektedir. Düşük hızlarda ise bu geçişler daha sınırlı kalmakta ve hız profili görece daha kararlı bir seyir izlemektedir.



Şekil 4.44 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız (Vx) (R=50).

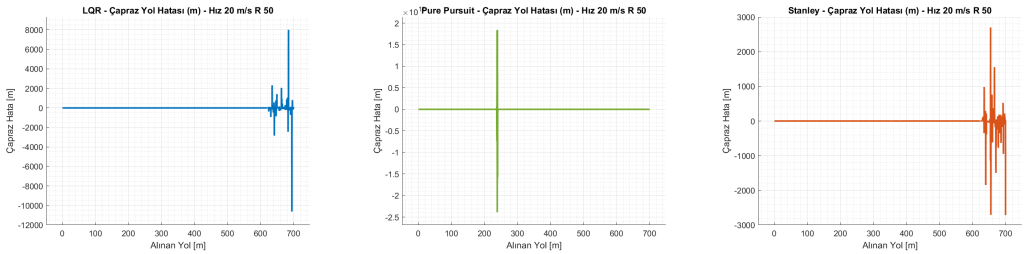
4.4.2.2 Kıyaslanan Kontrolcü Sonuçları

Çapraz Yol Hatası Sonuçları : LQR kontrolcüsünde CTE sinyalinin düşük genlikli olduğu, hızlı stabilleştiği gözlenmiştir. Stanley algoritmasında başlangıçta belirgin aşım ve salınımlar saptanmış, zamanla azalma eğilimi izlenmiştir. Pure Pursuit yönteminde ise geçici yüksek hata sonrası kararlı bir değer elde edilmiştir.



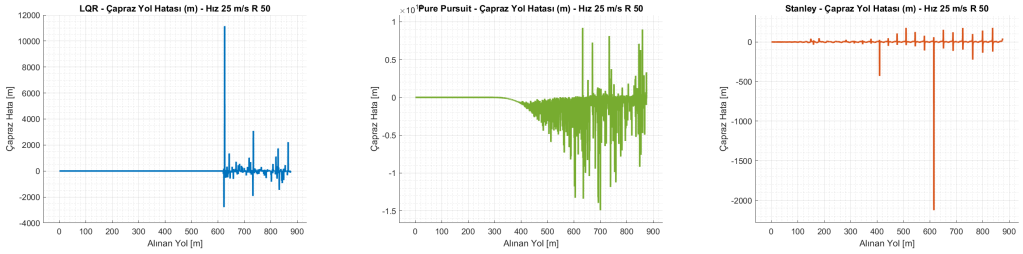
Şekil 4.45 15 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

LQR kontrolcüsünde CTE'nin hafif artış gösterdiği, fakat sinyalin genel olarak düz ve stabil seyretmekte olduğu tespit edilmiştir. Stanley algoritmasında, hızın artmasıyla aşım ve salınımların belirginleştiği, dinamik zorlukların etkisiyle geçici artışların meydana geldiği saptanmıştır. Pure Pursuit yönteminde ise geçici hata artışına rağmen sonradan kararlı yapı elde edilmiştir.



Şekil 4.46 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

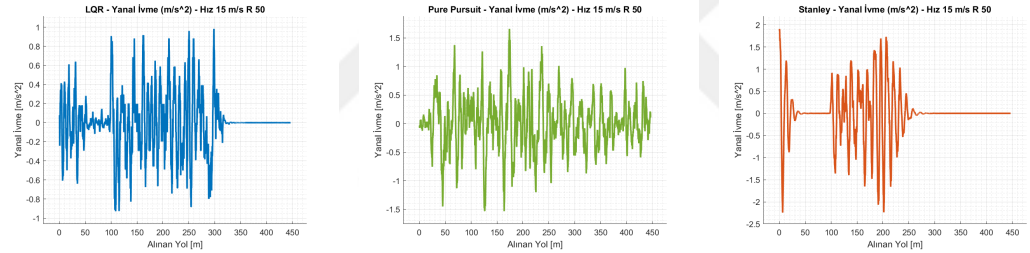
LQR kontrolcüsünde CTE sinyalinde hatanın belirgin şekilde arttığı, ancak pürüzsüz bir geçiş sağlandığı saptanmıştır. Stanley algoritmasında yüksek hızın etkisiyle büyük aşım değerleri ve devamlı salınımlar gözlenmiştir. Pure Pursuit yöntemiyle elde edilen verilerde ise hem geçici hem de yerleşik hata büyüklüğünde artış gözlenmiş, performansın yüksek hızda sınırlı kaldığı izlenmiştir.



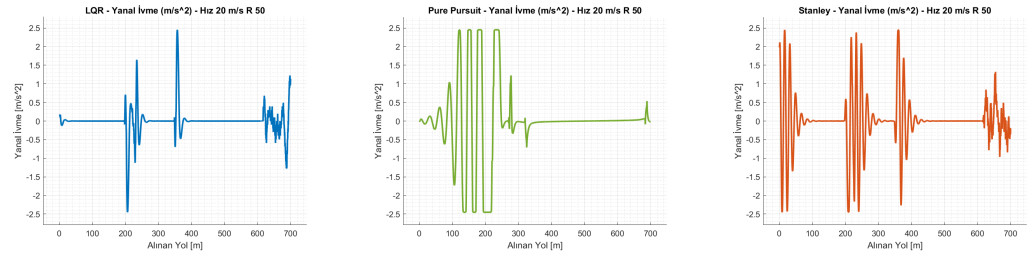
Şekil 4.47 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

Yanal İvme Sonuçları :

LQR kontrolcüsünde, hız artışının etkisiyle hafif ivme artışı olmakla birlikte, sinyal pürüzsüz ve stabil seyretmiştir. Stanley algoritmasında başlangıçta daha belirgin tepe ivme değerleri ve salınımlar tespit edilmiş; geçici artışların ardından kontrol tepkisinde düzenlilik sağlanmıştır. Pure Pursuit yönteminde de geçici yüksek ivme değerleri sonrasında sistem belirli bir düzleme ulaşmıştır.



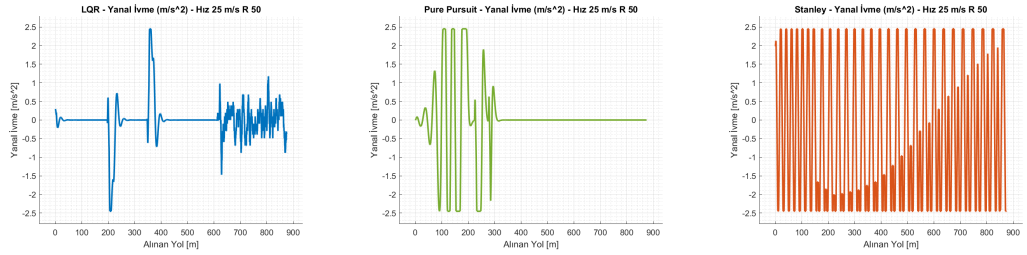
Şekil 4.48 15 m/s için yanal ivme sonuçları



Şekil 4.49 20 m/s için yanal ivme sonuçları

LQR kontrolcüsünde, ivme genliğinde artış kaydedilmiş; sinyal genel olarak düzgün ve stabil kalmıştır. Stanley algoritmasında, yüksek hız etkisiyle başlangıçtaki tepe ivme değerleri ve salınım aralıkları belirgin şekilde artmış, kontrol dinamikleri agresifleşmiştir. Pure Pursuit yönteminde ise, en yüksek geçici ivme değerleri ve ani

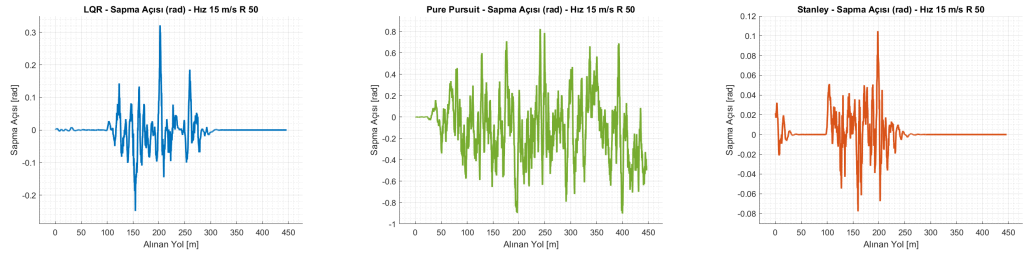
geçişler gözlemlenmiş, yöntemin yüksek hızda daha yüksek dinamik talepler ürettiği belirlenmiştir.



Şekil 4.50 25 m/s için yanal ivme sonuçları

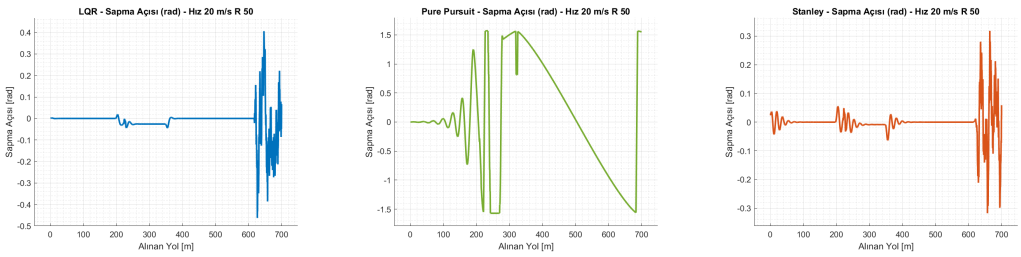
Yanal Sapma Hatası Sonuçları :

LQR kontrolcüsüne ait sapma açısı hatası verilerinde düşük genlikli hata mevcut olduğu, geçici aşamada hızlı iyileşme sağlanarak sistemin kısa sürede kararlı hale getirildiği gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritması kapsamında başlangıçta daha yüksek tepe değerlerinin saptandığı, bu aşırı sapmaların geçici olduğu ve sonrasında referans yola yaklaşım elde edildiği belirlenmiştir. Stanley kontrol yönteminde ise başlangıçta belirgin salınımlar ve yüksek dalgalanma değerleri gözlemlenmiş; ilerleyen aşamalarda sistemde denge sağlandığı tespit edilmiştir.



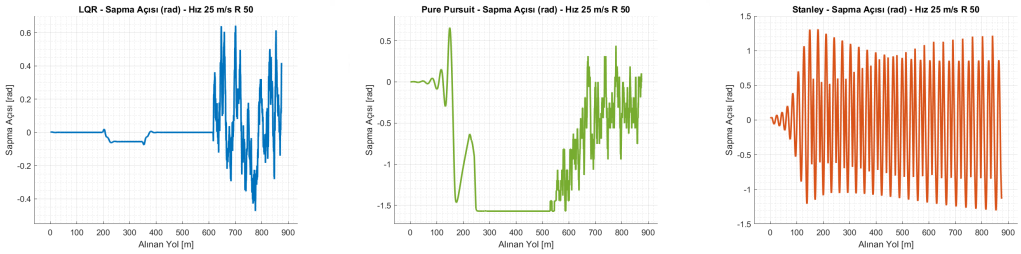
Şekil 4.51 15 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

LQR kontrolcüsüne ilişkin sapma açısı hatası verilerinde, hız artışının etkisiyle hata genliğinde hafif bir artış gözlenmiş; sinyalin genel yapısı stabil kalmış ve kontrol girişine hızlı yakınsama sağlanmıştır. Pure Pursuit yöntemi kapsamında, 20 m/s koşullarında geçici olarak artan hata değerleri saptanmış; belirli bir süre sonunda kontrol performansının iyileşerek referans değerle uyum sağladığı kaydedilmiştir. Stanley algoritmasında ise başlangıç ve geçiş aşamalarında belirgin osilasyon ve artan sapma değerleri gözlemlenmiş; sonrasında sistemde genel denge tesis edilmiştir.



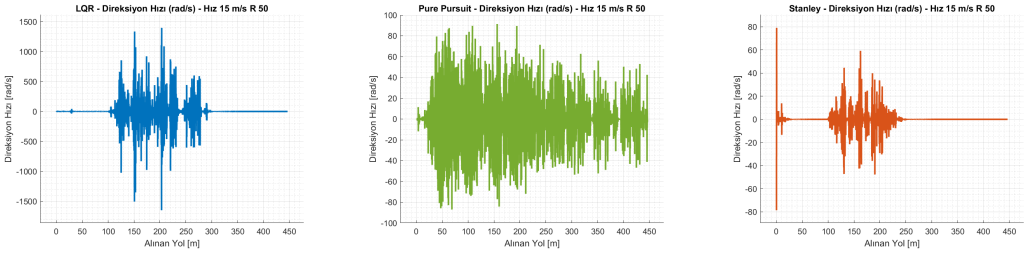
Şekil 4.52 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

LQR kontrolcüsünde, 25 m/s hız koşullarında hız artışına bağlı olarak sapma açısı hatası genliğinde belirgin bir yükseliş gözlenmiş; geçiş süreçlerinin görece pürüzsüz seyrettiği ve sistem kararlılığının korunduğu tespit edilmiştir. Pure Pursuit algoritması kapsamında, geçici fazda en yüksek hata değerleri ve ani dalgalanmaların meydana geldiği, ardından referansa yaklaşım çabası görüldüğü belirlenmiştir. Stanley kontrol yöntemi verilerinde ise yüksek hız etkisiyle sapma açısı hatasının salınımlı yapısının daha da belirginleştiği, kontrol sinyalinde aşırı artışların gözlemlendiği ve sistemin geçici tepkilerinde daha agresif stratejilerin uygulandığı saptanmıştır.



Şekil 4.53 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

Direksiyon Açısı Değişim Hızı Sonuçları : LQR kontrolcüsüne ait direksiyon açısı değişim hızı sinyali düşük genlikli, akıcı ve kısa sürede stabil hale gelmiş olarak gözlenmiştir. Stanley algoritmasında başlangıçta belirgin aşım ve salınım tespit edilmiş; zamanla osilasyon şiddetinde azalma meydana getirilmiştir. Pure Pursuit yönteminde ise geçici fazda daha keskin hareketler sergilenmiş olup, sonrasında kontrol tepkisinde düzeltici bir yaklaşım izlenmiştir.



Şekil 4.54 15 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

LQR kontrolcüsünde, direksiyon açısı değişim hızı sinyalinde hafif bir artış olmakla birlikte, genel yapı düz ve kararlı seyretmiştir. Stanley algoritmasında hız artışıyla birlikte aşım değerlerinde ve salınımlarda belirginleşme, geçici agresif tepkiler şeklinde ortaya konulmuştur. Pure Pursuit yönteminde geçici yüksek tepe değerleri kaydedilmiş, sonrasında sabit bir kontrol tepkisine ulaşılmıştır.



Şekil 4.55 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

LQR kontrolcüsünde hız artışına bağlı olarak sinyal genliğinde artış gözlemlenmiş; sinyal pürüzsüzlüğünü korumuştur. Stanley algoritması kapsamında osilasyon aralığının genişlediği ve aşım değerlerinin artarak devam ettiği saptanmıştır. Pure Pursuit yönteminde ise en yüksek salınım ve dalgalanmanın meydana geldiği, geçici fazda agresif ve keskin düzeltmeler gerçekleştirildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.56 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

Değerlendirme

Tablo 4.2'ta verilen kök-ortalama-karesel-hata (RMSE) sonuçları, üç farklı hız–eğrilik senaryosunda (*V15,R50*, *V20,R50* ve *V25,R50*) dört yol takip kontrolcüsünün *çapraz yol hatası*, *yanal sapma açısı*, *yanal ivme* ve *direksiyon açısı değişim hızı* bakımından karşılaştırmasını sunmaktadır. Aşağıda, *Öngörülü Kontrolcü*nün (predictive controller) dâhil edilmesiyle elde edilen bulgular özetlenmiştir.

Tablo 4.2 Kontrolcülerin Senaryo 2 Altında RMSE Değerleri

Hız (m/s)	Kontrolcü	Çapraz Yol Hatası (m)	Yanal Sapma Açısı (rad)	Yanal İvme (m/s^2)	Direksiyon Açısı Değişimi (rad/s)
15	LQR	0.12504	0.11174	1.108	165.33
15	Stanley	0.047478	0.054472	0.93223	5.6587
15	Pure Pursuit	27445	0.87717	1.4124	23.026
15	Öngörülü Kontrolcü	0.0325	0.1104	0.1875	0.0251
20	LQR	344.11	0.23235	0.68868	3.8799e+05
20	Stanley	127.13	0.16621	1.0151	34.274
20	Pure Pursuit	8.4223e+09	0.96734	1.0603	1.8239
20	Öngörülü Kontrolcü	0.0845	0.1636	0.2893	0.0300
250	LQR	309.91	0.37201	0.96106	3.8171e+05
25	Stanley	52.492	0.86597	2.4078	16.122
25	Pure Pursuit	1.7331e+13	1.2296	0.99552	1.3404
25	Öngörülü Kontrolcü	0.3624	0.1792	0.4767	0.0394

- **Çapraz Yol Hatası (RMSE) :** Öngörülü kontrolcü, tüm hız-eğrilik kombinasyonlarında en düşük değerleri elde etmiştir. Hız arttıkça LQR ve Pure Pursuit'te hatanın birkaç mertebe büyüdüğü, Stanley'de ise orta düzeyde seyrettiği gözlenmiştir.
- **Yanal Sapma Açısı (RMSE) :** Öngörülü kontrolcü yöntem $0.11\,\mathrm{rad}$ - $0.18\,\mathrm{rad}$ aralığında kalırken, Pure Pursuit $0.88\,\mathrm{rad}$'dan $1.23\,\mathrm{rad}$'a yükselmiştir. LQR ve Stanley artan hızda sınırlı bir artış sergilemiştir.
- **Yanal İvme (RMSE) :** Öngörülü kontrolcü $0.19\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ ile $0.48\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ konfor sınırlarının $(2\,\mathrm{m\,s^{-2}})$ oldukça altında kalmıştır. Diğer yöntemler belirli senaryolarda bu sınıra daha çok yakın sonuçlar vermiştir.
- **Direksiyon Açısı Değişim Hızı (RMSE) :** Öngörülü kontrolcü $0.025\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$ ile $0.039\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$ değerleriyle en düşük aktüatör talebini göstermiştir. Özellikle LQR'de yüksek hız senaryolarında çok büyük salınımlar oluşmuştur.

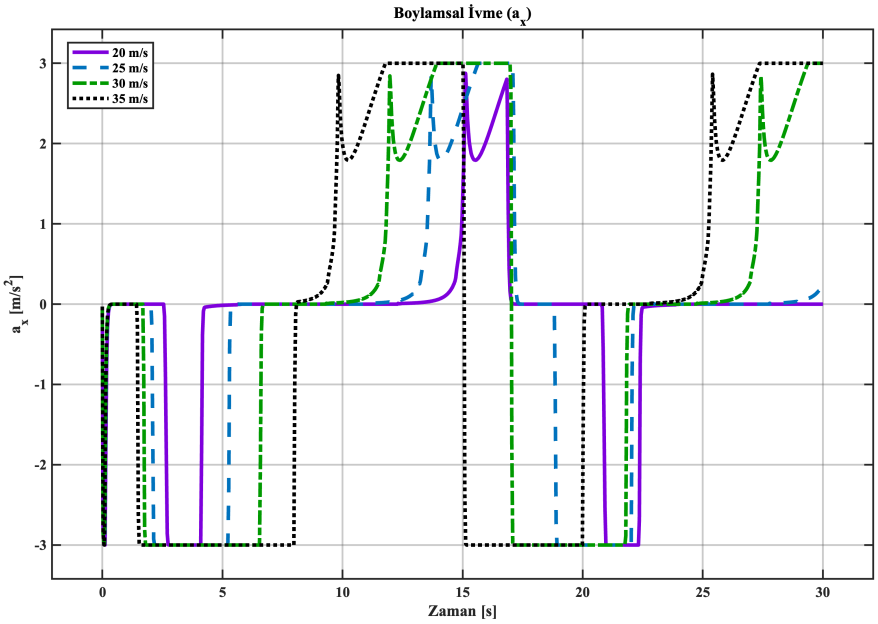
Bu sonuçlar, sınırlı-horizontlu öngörülü stratejinin, hız artışı ve eğrilik değişimlerine karşı hem iz hatasını hem de sürüş konforunu koruyarak diğer klasik yöntemlere göre daha tutarlı performans sağladığını göstermektedir.

4.4.3 Senaryo 3 Sonuçları

Bu senaryoda yol eğriliği değişken olup, yol sürtünme katsayısı μ = 0.83 olarak seçilmiştir.

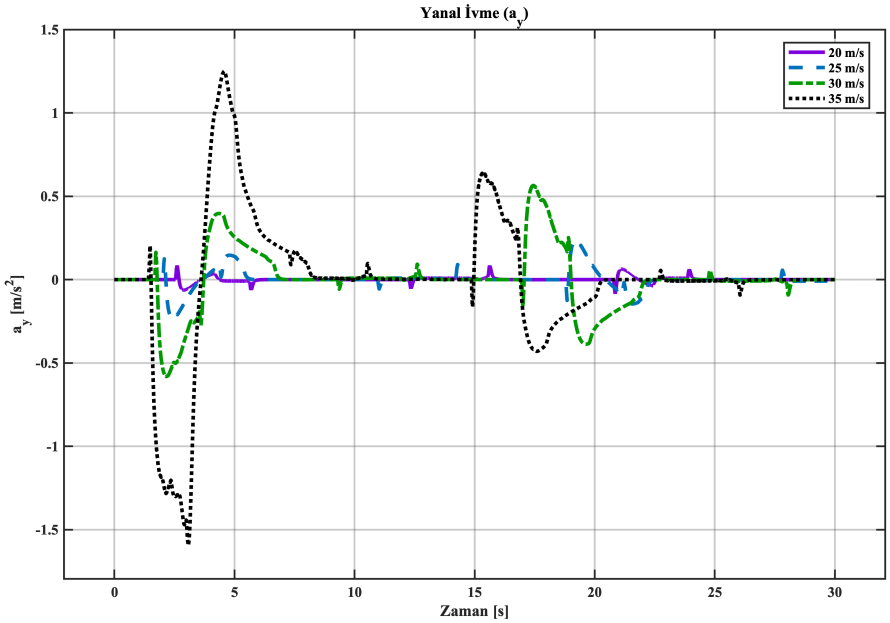
4.4.3.1 Önerilen Kontrolcü Sonuçları

Boylamsal İvme Sonuçları : Değişken eğrilik koşullarında, özellikle $30-35$ m/s hızlarda, pozitif ve negatif ivme piklerinin daha sık ve yüksek genliklerde tekrarlandığı anlaşılmaktadir. Daha düşük hızlarda (örneğin 20 m/s) boylamsal ivme değerlerinin $2-3$ m/s^2 mertebesini nadiren aştığı ve kontrolcünün agresif olmayan bir strateji izlediği gözlemlenmektedir.



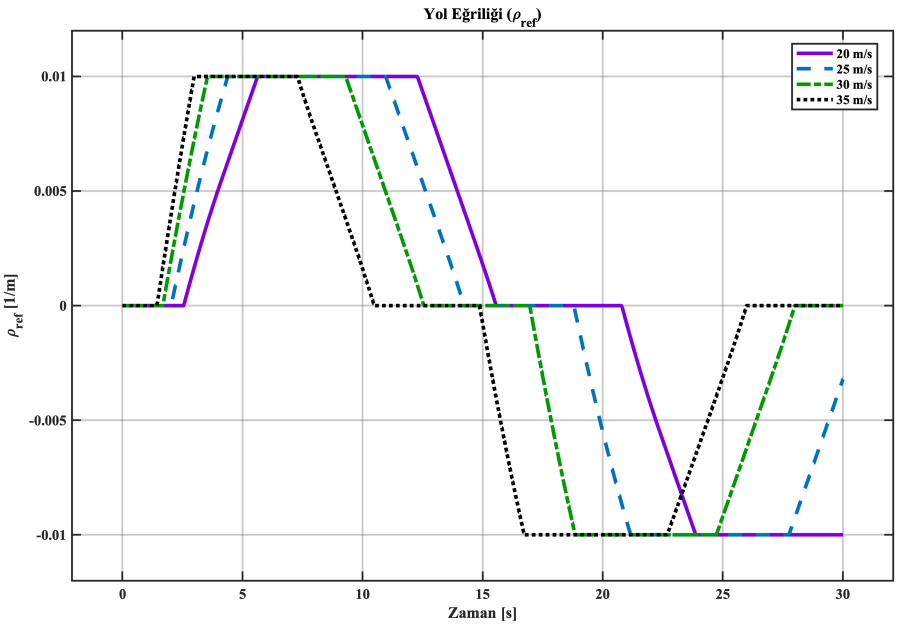
Şekil 4.57 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme

Yanal İvme Sonuçları : Yüksek hızlarda ($30-35$ m/s) $|\pm 1.5$ m/s$^2|$ ve üzerindeki pik değerlerin araç dinamiklerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Düşük hız senaryolarında (20 m/s) ise a_y dalgalanmalarının dar bir aralıkta tutulduğu ve kontrolcünün yol tutuşu korumak üzere daha yumuşak manevralar uyguladığı gözlemlenmiştir.



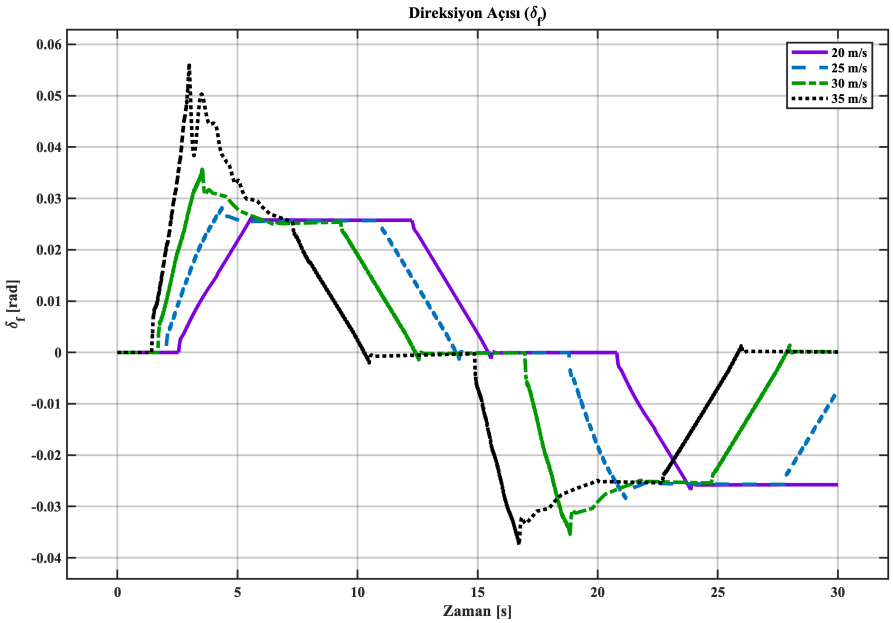
Şekil 4.58 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme

Yol Eğriliği Sonuçları : Başlangıçta $\rho_{\text{ref}} \approx 0.01$ 1/m olarak düşük bir dönme yarıçapı ile viraj alındığı, ardından $\rho_{\text{ref}} = 0$ düz yol segmentine geçildiği ve sonrasında $\rho_{\text{ref}} < 0$ bölgesinde ters yönde bir virajın meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yüksek hızlarda aynı eğrilik geçişlerinin daha kısa zaman aralıklarında tamamlanması gerektiği için direksiyon ve gaz/fren kumandalarının daha agresif olduğu görünmektedir.



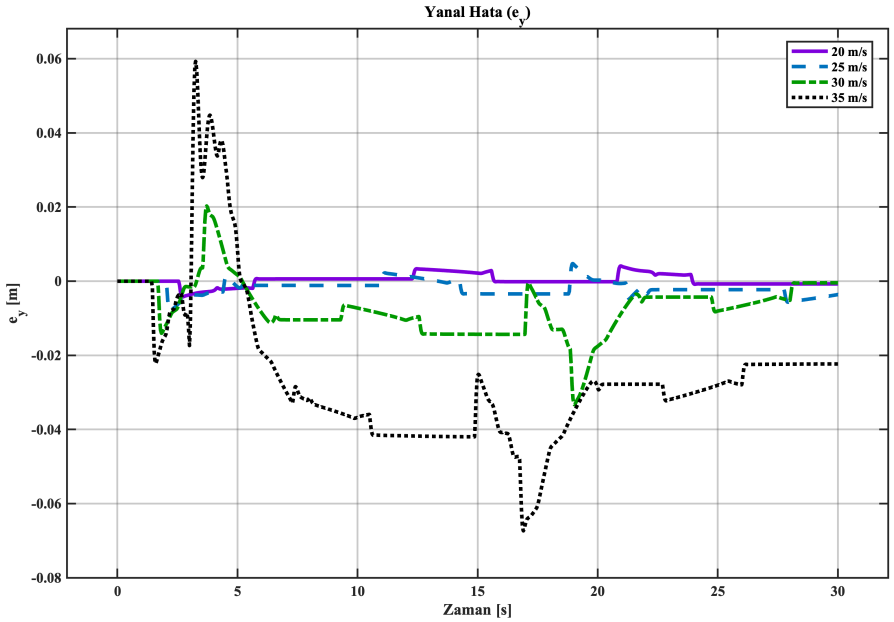
Şekil 4.59 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği

Direksiyon Açısı Sonuçları : Zamanla değişen eğrilik değerlerinin hem pozitif hem de negatif direksiyon açılarına yol açtığı görülmektedir. Özellikle 35 m/s hızda direksiyon açısının $0.05-0.06$ rad mertebesine ulaştığı anlaşılmaktadır. Daha düşük hızlarda (örneğin 20 m/s) direksiyon açısının nispeten dar bir aralıkta kaldığı ve düz yol segmentlerinde $\delta_f \approx 0$ değerine dönüldüğü anlaşılmaktadır



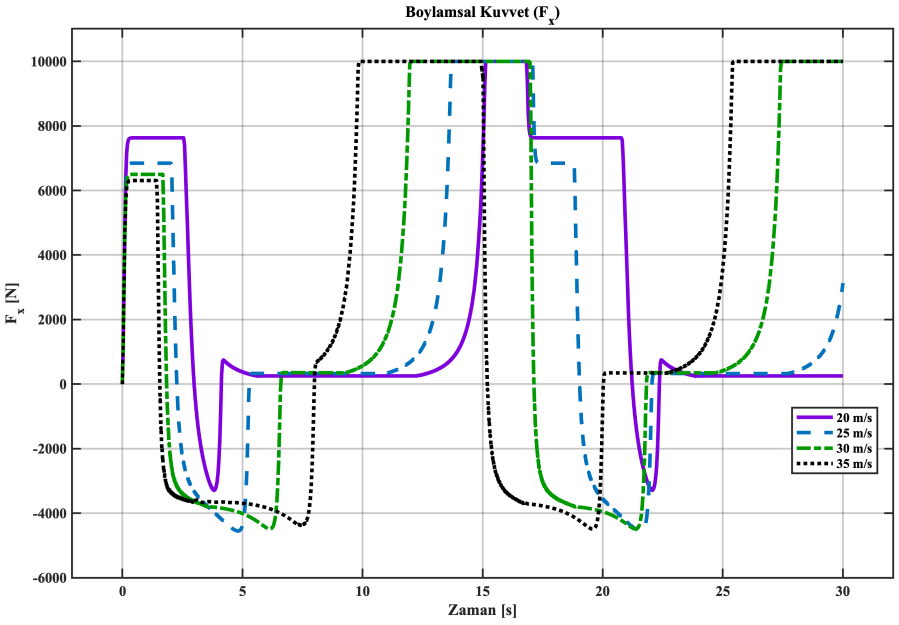
Şekil 4.60 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı

Yanal Hata Sonuçları : Referans yol hattına göre yanal sapmanın küçük değerlerde tutulduğu görülmektedir. Düşük hızlarda ($20-25$ m/s) hata genellikle ± 0.03 m aralığında kalarak aracın kararlı biçimde takip yapabilmektedir. Yüksek hızlarda ($30-35$ m/s) zaman zaman $0.05-0.08$ m düzeylerinde sapmaların oluştuğu ve kontrolcünün bunu kısa sürede düzelttiği anlaşılmaktadır.



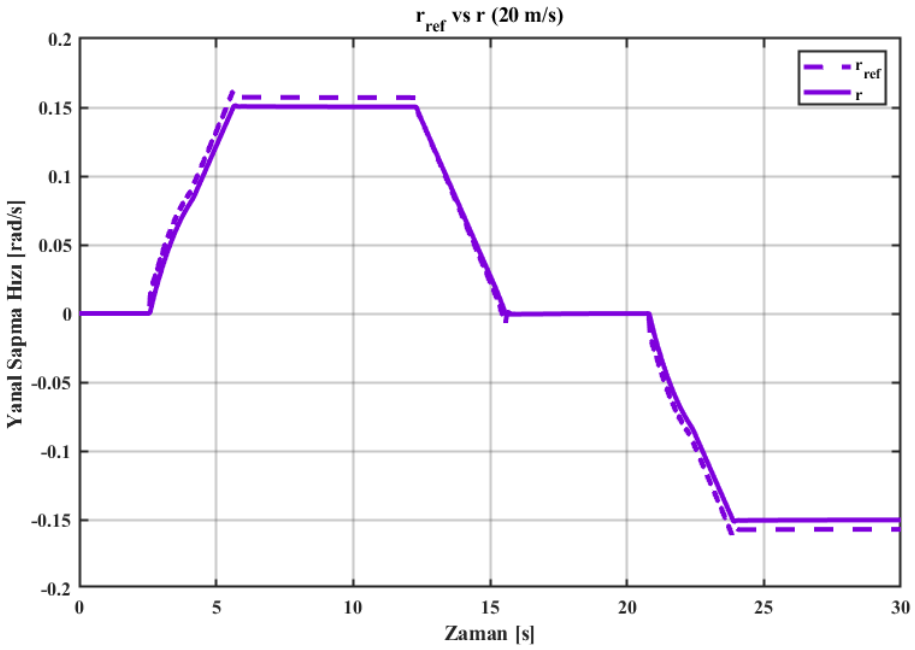
Şekil 4.61 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Y konum hatası (Değişken ρ).

Boylamsal Kuvvet Sonuçları : Fren aşamalarında $-5000\,\mathrm{N}$ düzeyine kadar inen negatif değerler görülmektedir; viraj çıkışı veya düz yol kesitlerinde ise $7000-9000\,\mathrm{N}$ düzeyinde pozitif kuvvetlerle hedef hızın yeniden kazanıldığı anlaşılmaktadır. Yüksek hızlarda daha yüksek pik değerlere ulaşıldığı ve kontrolcünün boylamsal stratejiyi daha agresif biçimde ayarladığı gözlemlenmektedir.

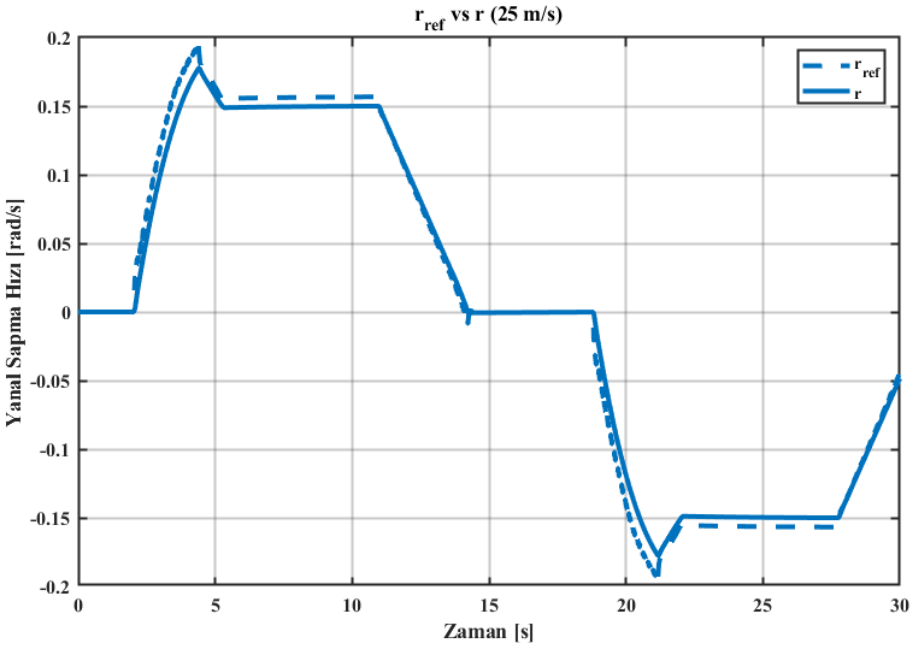


Şekil 4.62 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal kuvveti

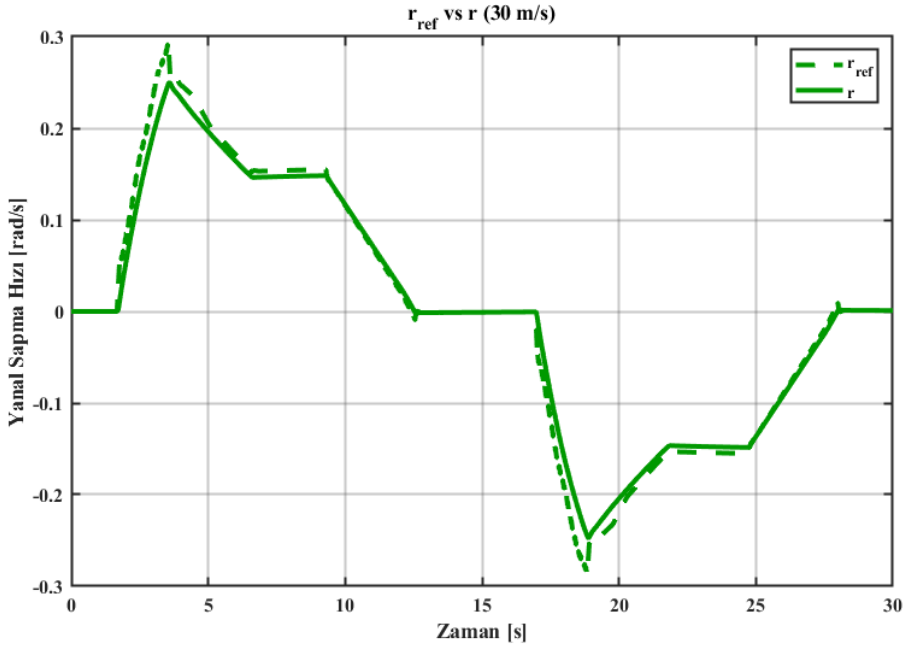
Referans Yanal Sapma Hızı Sonuçları : Referans yanal sapma hızı ile gerçek yanal sapma hızı arasındaki yakınlık, kontrolcünün doğruluk düzeyini yansıtmaktadır. Yüksek hızlarda (35 m/s) 0.35 rad/s civarına çıkan değerler, dönme hızının viraj girişinde hızla tırmanıp, viraj sonunda tekrar düşük değerlere çekildiğini gösterir. Düşük hızlarda (20 m/s) maksimum yanal sapma hızı $0.15-0.2$ rad/s düzeyinde kalarak daha sınırlı bir manevra ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır.



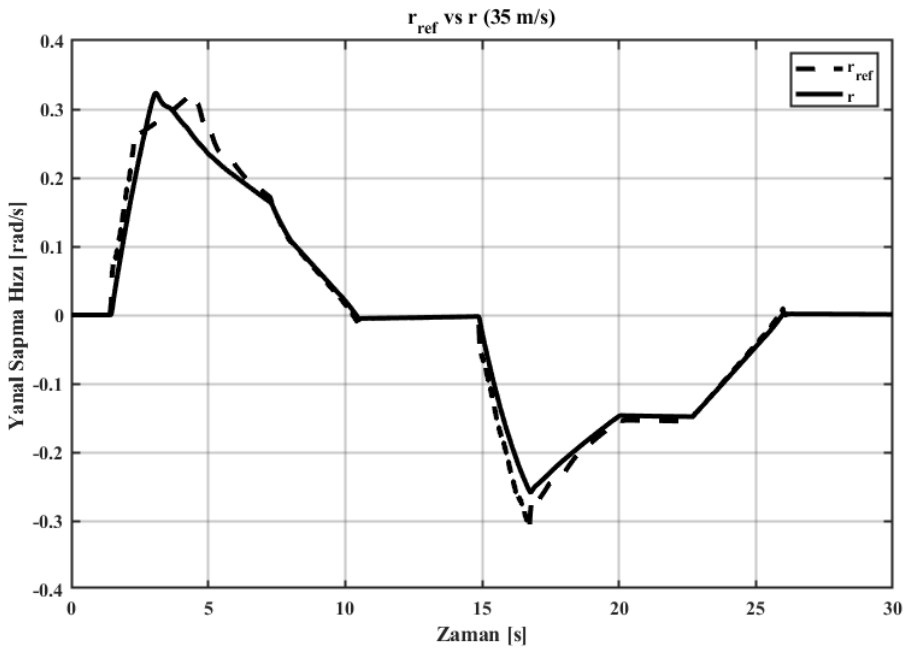
Şekil 4.63 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (20 m/s).



Şekil 4.64 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (25 m/s).



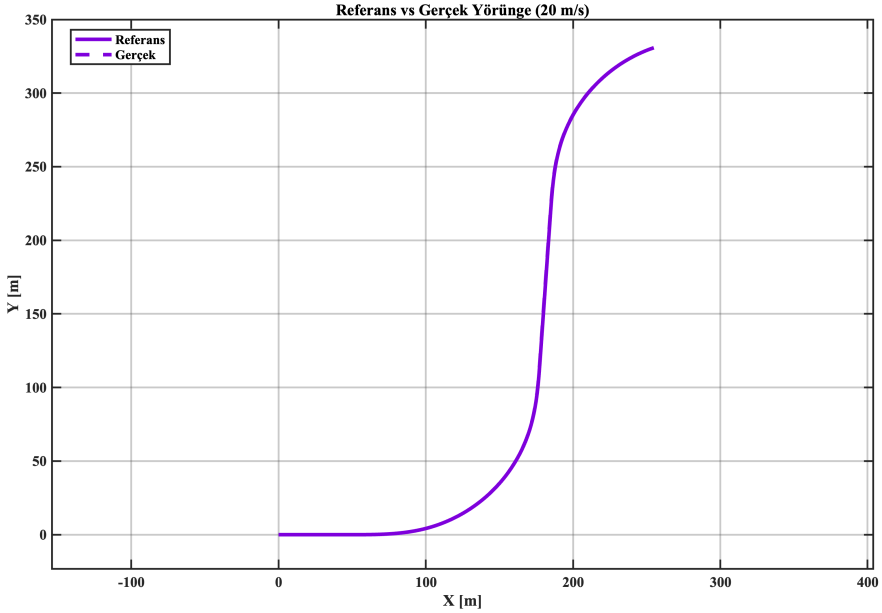
Şekil 4.65 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (30 m/s).



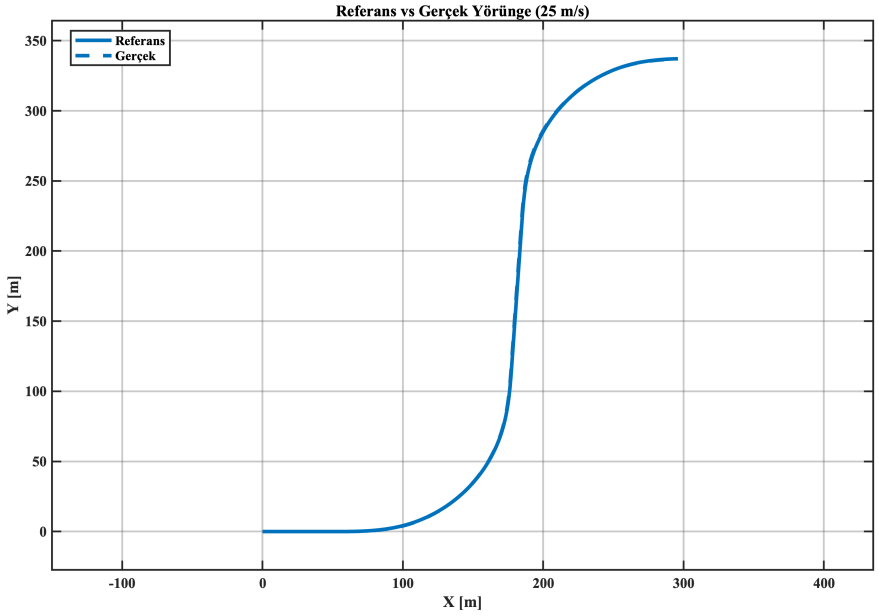
Şekil 4.66 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans ve gerçek yanal sapma hızı (35 m/s).

Gerçek ve Referans Yörünge Takip Sonuçları :

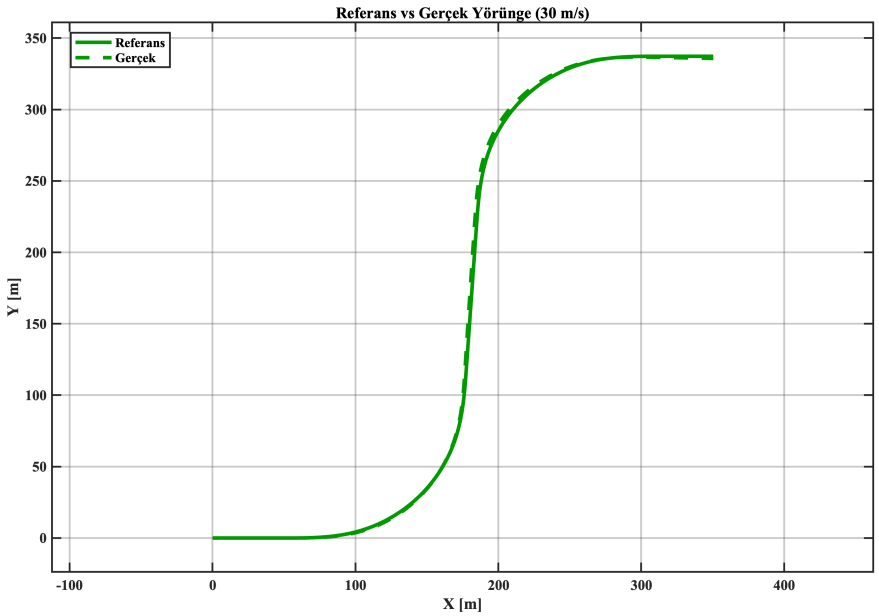
Bu grafikte, hızların artmasıyla merkezkaç ve lastik kayma etkilerinin belirginleştiği görülmektedir; ancak kontrolcü, izlenen yörüngelerin referans eğriyle büyük oranda uyumlu kalmasını sağlamaktadır. Düşük hızda (20 m/s) yörünge neredeyse referansla örtüşmekte, orta hızlarda (25–30 m/s) hafif sapmalar hızlıca düzeltilmekte ve en yüksek hızda (35 m/s) dahi sapmalar sınırlı seviyede tutulmaktadır. Böylece hız artışına karşın yol takip performansı korunmaktadır.



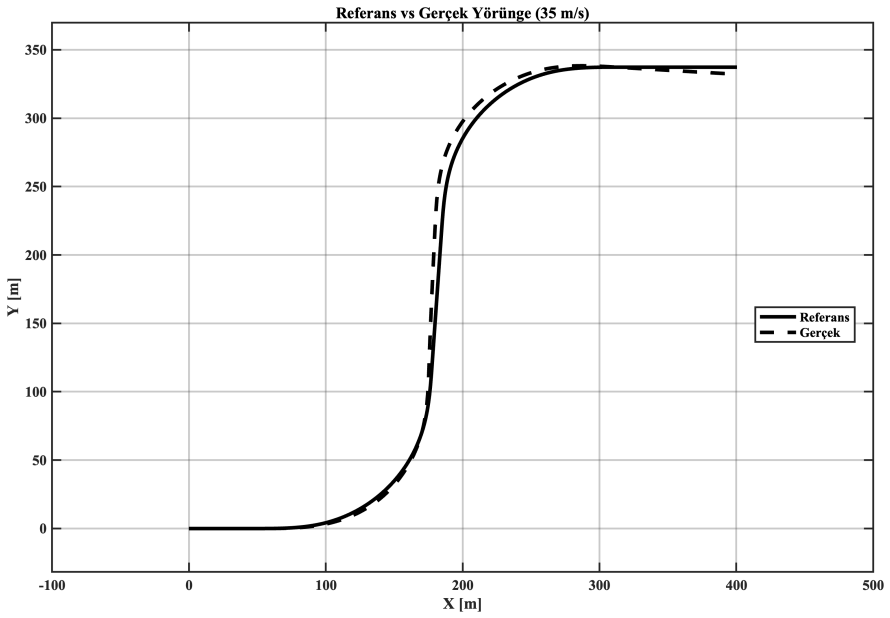
Şekil 4.67 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s)



Şekil 4.68 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s)



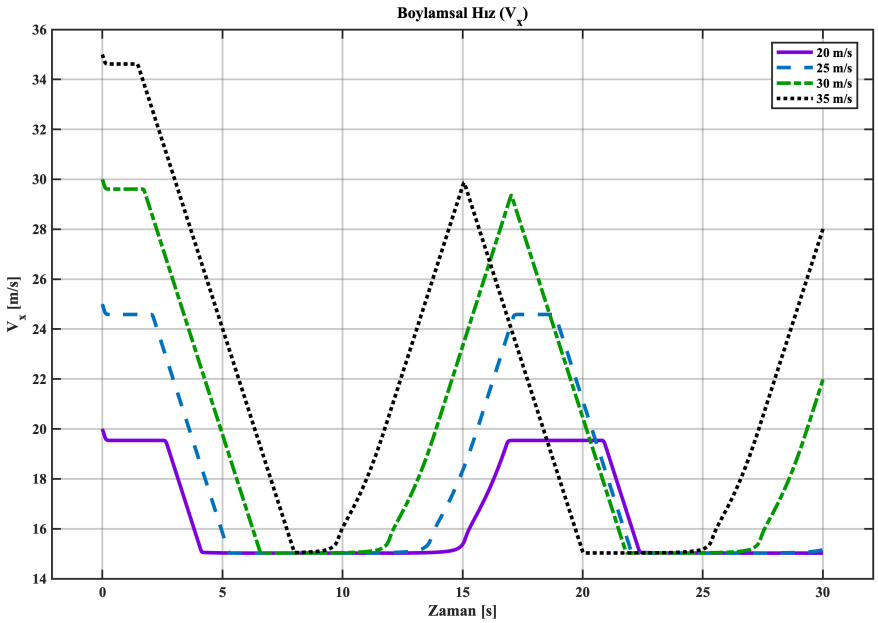
Şekil 4.69 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s)



Şekil 4.70 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (35 m/s)

Boylamsal Hız Sonuçları : Her bir sabit hız senaryosunda fren ve ivmelenme aşamalarına bağlı olarak boylamsal hızın belirli aralıklarda dalgalandığı görülmektedir. Yüksek hızda (35 m/s) frenleme sonrası hızın 15 m/s civarına kadar

indiği, ardından tekrar hedef değere çıkarıldığı görülmektedir. Düşük hızda (20 m/s) ise hız dalgalanmalarının dar bir bantta kaldığı ve fren/ivme gereksinimlerinin daha yumuşak olduğu anlaşılamktadır.



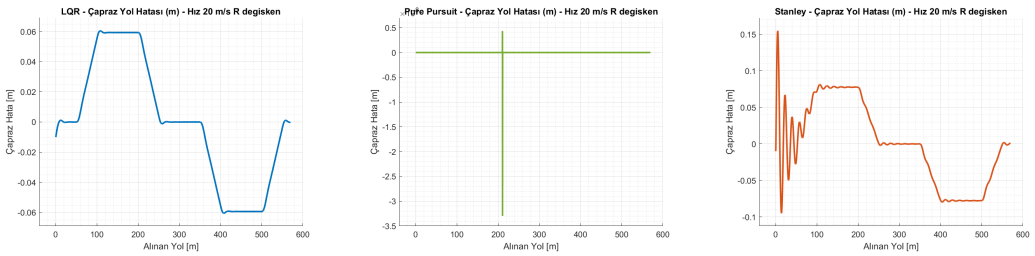
Şekil 4.71 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız

4.4.3.2 Kıyaslanan Kontrolcü Sonuçları

Bu senaryoda değişken yol eğriliği senaryolarında kıyaslanan kontrolcüleri farklı hızlarda verdiği sonuçlar figürler ile gösterilmektedir.

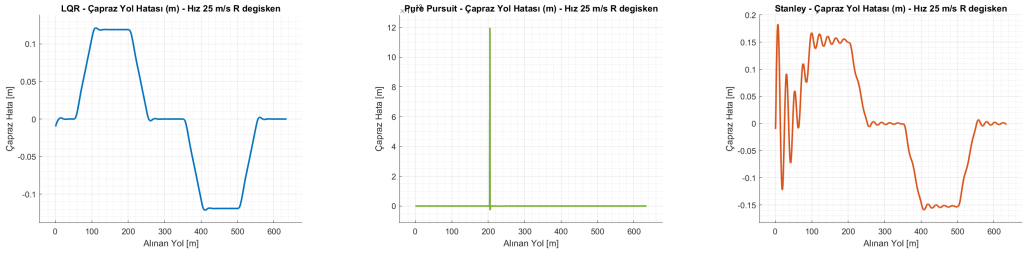
Çapraz Yol Hatası Sonuçları :

20 m/s hız koşulunda, LQR kontrolcüsünde çapraz yol hatası (CTE) değerlerinde minimum sapma gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde, CTE değerlerinin stabil seyrettiği belirlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde ise CTE değerlerinde tutarlı ve düşük seviyeli sapmalar gözlenmiştir.



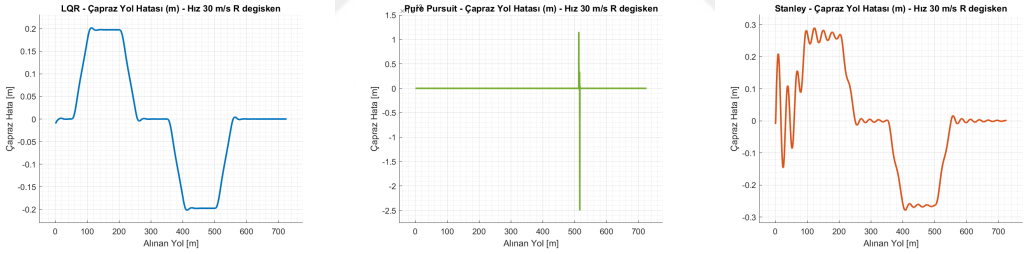
Şekil 4.72 20 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

25 m/s hız koşulunda, LQR kontrolcüsünde artan hıza bağlı olarak hafif bir CTE artışı gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde, CTE dağılımında kısmi değişkenlik belirlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde ise CTE değerlerinde orta seviyede artış gözlenmiştir.



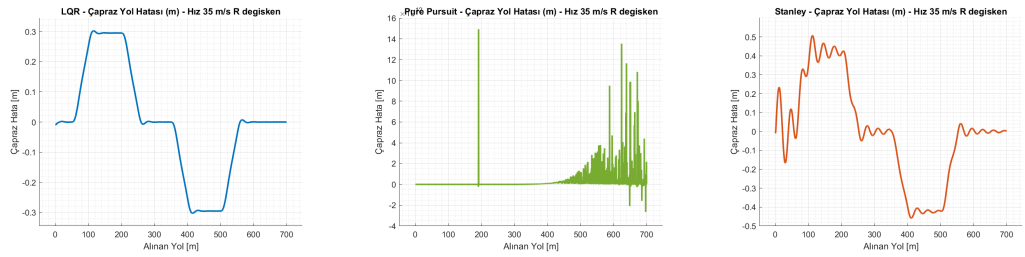
Şekil 4.73 25 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

30 m/s hızında, LQR kontrolcüsünde CTE değerlerinde genel bir artış eğilimi gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde, CTE değerlerinde daha belirgin dalgalanmalar gözlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde ise CTE dağılımında orta derecede artış ve kısmi tutarlılık gözlenmiştir.



Şekil 4.74 30 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

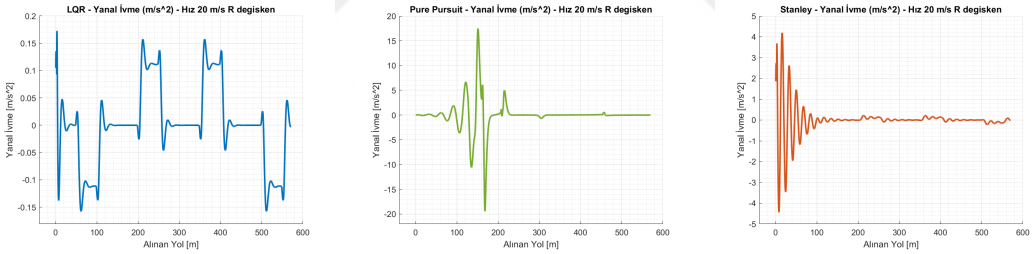
35 m/s hız koşulunda, LQR kontrolcüsünde CTE değerlerinde anlamlı bir artış gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde, yüksek hız koşullarında CTE'de önemli sapmalar ve dalgalanmalar belirlenmiştir. Pure Pursuit kontrolcüsünde ise CTE değerlerinde artışa bağlı olarak belirgin varyasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.75 35 m/s için çapraz yol hatası sonuçları

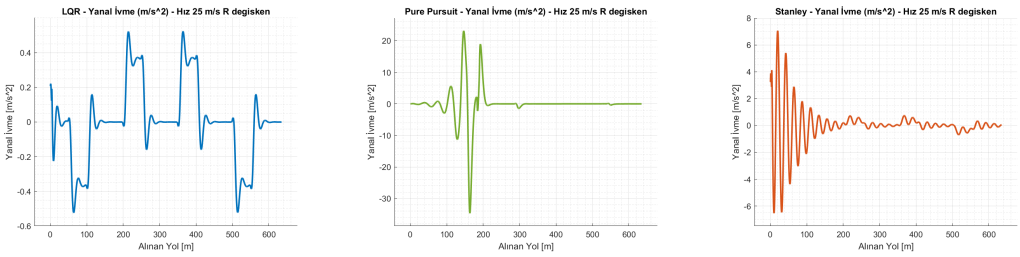
Yanal İvme Sonuçları :

20 m/s hız koşulunda, LQR kontrolcüsünde lateral ivme değerlerinin oldukça stabil ve düşük genlikli olduğu, herhangi bir ani dalgalanmanın yaşanmadığı gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritmasında, lateral ivme değerlerinde yüksek ve kısa süreli dalgalanmalar saptanmış olup, kontrolcünün yola uyumlu ve kontrollü tepkiler verdiği belirlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde ise lateral ivme dağılımının daha belirgin salınımlara sahip olduğu ve periyodik değişimlerle yol eğriliğine duyarlı bir seyir izlendiği gözlenmiştir.



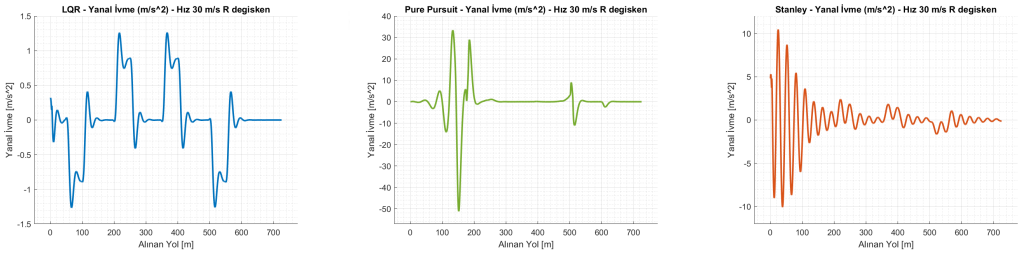
Şekil 4.76 20 m/s için yanal ivme sonuçları

25 m/s hızında, LQR kontrolcüsüne ait lateral ivme grafiğinde düşük genlikli salınımlar ve stabil bir seyir gözlenmiştir. İvme değerlerinin genel olarak sınırlı bir aralıkta seyrettiği, ani ve yüksek değişimlerin yaşanmadığı belirlenmiştir. Pure Pursuit algoritmasında, 20 m/s koşulunda lateral ivme dağılımında bölgesel olarak kısa süreli artışlar ve hafif dalgalanmalar kaydedilmiştir. Bu durum, kontrolcünün yol takip doğrultusunda reaktif fakat ölçülü bir tepki verdiğini göstermektedir. Stanley kontrolcüsünde, lateral ivme değerlerinin LQR'ye göre daha belirgin salınımlar sergilediği, ivme piklerinin yol eğriliğine bağlı olarak periyodik artış ve azalışlar şeklinde izlendiği gözlenmiştir.



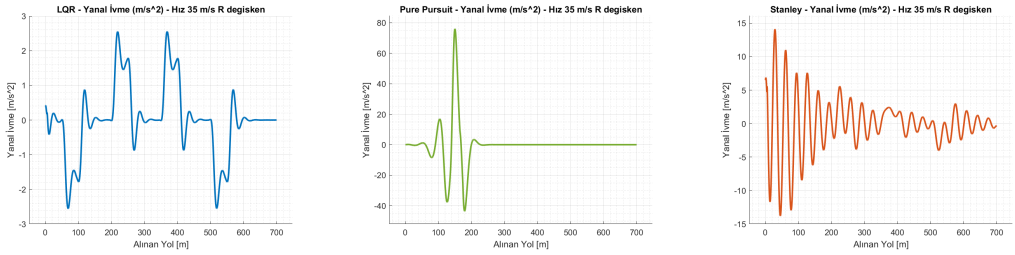
Şekil 4.77 25 m/s için yanal ivme sonuçları

30 m/s hızında, LQR kontrolcüsüne ait lateral ivme grafiğinde ivme değerlerinde genel olarak hafif bir artış gözlenmiş; dalgalanmalar hız artışının etkisiyle aşamalı olarak yükselmiştir. Stabilite korunmuş, ancak kritik noktalarda daha keskin ivme değişimleri belirlenmiştir. Pure Pursuit algoritmasında, 25 m/s hız koşulunda lateral ivme profilinde belirgin tepe noktaları ve ani ivme artışları saptanmıştır. Bu durum, algoritmanın hedef yörüngeye ulaşma çabasında agresif düzeltmeler uyguladığını göstermektedir. Stanley kontrolcüsünde, lateral ivme dağılımında daha yüksek genlikli salınımlar ve periyodik ivme artışları kaydedilmiştir. Bu durum, algoritmanın yol eğriliği değişimlerine karşı duyarlı olduğunu ve dinamik yanıtının hız artışıyla birlikte güçlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.78 30 m/s için yanal ivme sonuçları

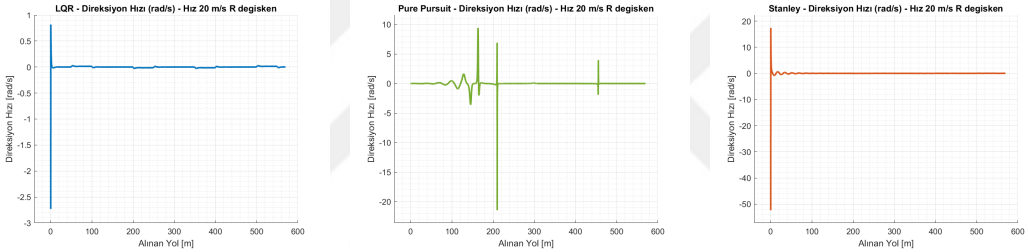
35 m/s hız koşulunda, LQR kontrolcüsüne ait lateral ivme grafiğinde kritik viraj bölgelerinde belirgin ivme artışları ve önemli salınımlar gözlenmiştir. Bu durum, yüksek hızın getirdiği dinamik taleplere adaptasyon sürecinde kontrolcünün ortaya koyduğu reaktif davranışa işaret etmektedir. Pure Pursuit algoritmasında, lateral ivmede ani ve yüksek genlikli salınımlar ile ivme artışları belirlenmiştir. Yüksek hız koşulunda, algoritmanın hedef nokta uyarınca daha keskin ve reaktif düzeltmeler gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Stanley kontrolcüsünde ise lateral ivme değerlerinde, diğer kontrolcülere kıyasla daha geniş bir aralıkta ve yüksek genlikli salınımlar saptanmıştır. Bu durum, algoritmanın yüksek hızda oluşan dinamik değişimlere karşı oldukça çevik tepki verdiğini göstermektedir.



Şekil 4.79 35 m/s için yanal ivme sonuçları

Direksiyon Açısı Değişim Hızı Sonuçları :

20 m/s hızında LQR kontrolcüsü direksiyon hızında düşük genlikli ve stabil dalgalanmalar göstermiştir. Pure Pursuit algoritmasında ise belirgin dalgalanma ve ani değişimler görülmüş, Stanley kontrolcüsü orta düzeyde salınımlarla daha ölçülü bir tepki sergilemiştir.



Şekil 4.80 20 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

25 m/s koşulunda, LQR kontrolcüsünün direksiyon hızında hafif artışlar gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritması daha yüksek frekanslı ve belirgin salınımlar göstermiş, Stanley kontrolcüsü ise daha dinamik ve periyodik tepkiler ortaya koymuştur.



Şekil 4.81 25 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

30 m/s hızında LQR kontrolcüsünde artan dalgalanmalar gözlenmiştir. Pure Pursuit algoritması yüksek hızda ani ve keskin direksiyon hareketleri sergilemiş, Stanley kontrolcüsü ise belirgin piklerle agresif tepkiler göstermiştir.



Şekil 4.82 30 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

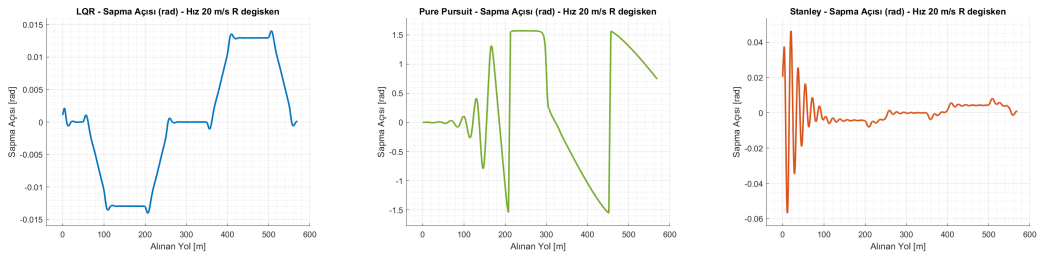
35 m/s hızında LQR kontrolcüsünde başlangıçta -3 rad/s civarında düzeltme sonrası stabilizasyon görülmüştür. Pure Pursuit algoritmasında kısa süreli yüksek bir pik (25 rad/s) ardından düşük varyasyonlar kaydedilmiştir. Stanley kontrolcüsü ise başlangıçta yüksek bir tepki (10 rad/s üzeri) verdikten sonra stabil ve dengeli seyir göstermiştir.



Şekil 4.83 35 m/s için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

Yanal Sapma Hatası Sonuçları :

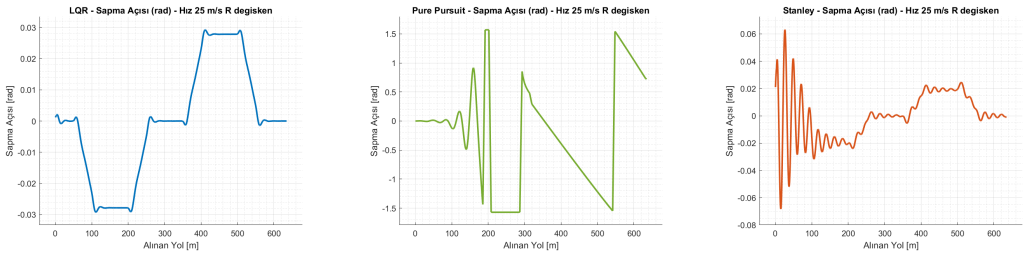
20 m/s hızında LQR kontrolcüsünde yanal sapma düşük genlikli ve stabil salınımlar göstermiştir. Pure Pursuit algoritmasında orta düzeyde dinamik salınımlar ve ani değişimler gözlenmiş; Stanley kontrolcüsünde ise belirgin artış ve düşüşlerle geniş bir hata dağılımı sergilenmiştir.



Şekil 4.84 20 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

25 m/s hızında LQR kontrolcüsünde yanal sapma hatası orta düzeyde artmış ancak

genel olarak stabil kalmıştır. Pure Pursuit algoritmasında belirgin salınımlar ve hızlı değişimler yaşanmış, Stanley kontrolcüsünde geniş hata dağılımı ve kritik noktalarda yüksek aşım değerleri gözlenmiştir.



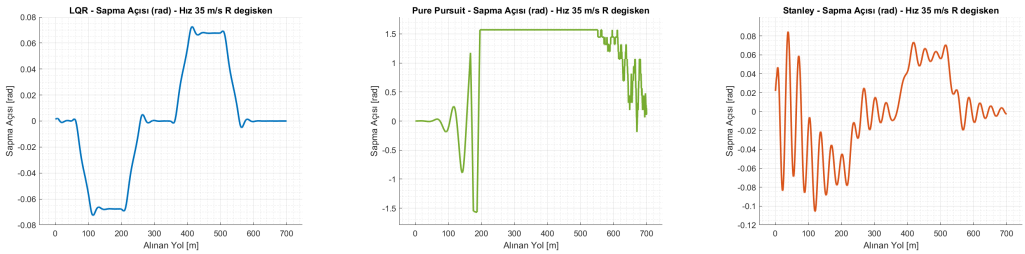
Şekil 4.85 25 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

30 m/s hızında LQR kontrolcüsünde yanal sapma hatasında artan dalgalanmalar göstermiştir. Pure Pursuit algoritmasında yüksek genlikli ani artış ve düşüşler, Stanley kontrolcüsünde ise geniş aralıklı agresif dalgalanmalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.86 30 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

35 m/s hızında LQR kontrolcüsünde yanal sapma hatası başlangıçta 0.06 rad'a kadar yükselmiş, sonra belirgin bir dalgalanma sergilemiştir. Pure Pursuit algoritmasında hata değerleri -1.2 rad ile +1.5 rad arasında geniş dalgalanmalar göstermiştir. Stanley kontrolcüsünde başlangıçta 0.1 rad civarında pikler kaydedilmiş ve daha sonra hata değerleri 0.08 rad civarında stabil kalmıştır.



Şekil 4.87 35 m/s için yanal sapma hatası sonuçları

Direksiyon Açısı Sonuçları :

Tablo **??** incelendiğinde, *LQR (Linear Quadratic Regulator)* yönteminin çoğu senaryoda *Çapraz Yol Hatası* ve *Sapma Açısı Hatası* bakımından daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. *Stanley* yöntemi ise, özellikle *Yanal İvme* ve *Direksiyon Hızı* değerlerinde daha yüksek büyüklüklere çıkabilmesine rağmen, bazı hız aralıklarında kabul edilebilir hata değerleri sunmaktadır.

Öte yandan, *Pure Pursuit* yöntemi bazı koşullarda aşırı büyük hatalar (örneğin, 10^6–10^{12} aralığında) üreterek belirli hız veya dönüş yarıçaplarında izleme performansının keskin bir biçimde düştüğüne işaret etmektedir. Bununla birlikte, genel eğilim incelendiğinde, hız arttıkça (örneğin $V = 20, 25, 30, 35$ m/s) hem konum ve yönelim hatalarının hem de kontrol sinyallerinin (örneğin direksiyon hızı) belirgin şekilde büyüdüğü görülmektedir. Bu durum, daha yüksek hızlarda yol takip kontrolü sağlamanın daha zorlayıcı olduğu gerçeğini desteklemektedir.

Değerlendirme :

Tablo 4.3 Değişken Yarıçap Senaryosu İçin Kontrolcülerin RMSE Sonuçları

Hız [m/s]	**Kontrolcü**	**Çapraz Yol Hatası** [m]	**Yanal Sapma Açısı** [rad]	**Yanal İvme** [m/s^2]	**Direksiyon Açısı Hızı** [rad/s]
20 m/s	LQR	0.04061	0.00895	0.08294	0.05684
20 m/s	Stanley	0.05628	0.01034	1.0894	1.0864
20 m/s	Pure Pursuit	6.2284×10^{6}	1.0037	3.3444	0.7195
20 m/s	Öngörülü Kontrol	0.00160	0.1104	0.0151	0.0189
25 m/s	LQR	0.07738	0.01819	0.22753	0.06727
25 m/s	Stanley	0.10250	0.01915	1.7719	1.1526
25 m/s	Pure Pursuit	2.6418×10^{12}	0.95466	5.7340	0.7491
25 m/s	Öngörülü Kontrol	0.00270	0.1181	0.0581	0.0197
30 m/s	LQR	0.11997	0.02819	0.50023	0.07544
30 m/s	Stanley	0.16495	0.02990	2.7942	1.1820
30 m/s	Pure Pursuit	5.6535×10^{11}	0.91812	8.7674	1.0028
30 m/s	Öngörülü Kontrol	0.01040	0.1286	0.1816	0.0197
35 m/s	LQR	0.18237	0.04225	1.0276	0.09022
35 m/s	Stanley	0.26729	0.04501	4.4805	1.3015
35 m/s	Pure Pursuit	9.2340×10^{11}	1.3792	13.413	0.7471
35 m/s	Öngörülü Kontrol	0.03250	0.1413	0.4114	0.0212

- **Çapraz yol hatası.** Öngörülü kontrolcü, tüm hız aralıklarında en düşük iz hatasını sağlamıştır (≤ 0.033 m). LQR ve Stanley'de hata hızla birlikte büyürken, Pure Pursuit'te sayısal kararsızlıklar görülmüştür.

- **Yanal sapma açısı.** LQR ve Stanley düşük değerlere sahip olsa da, Öngörülü yaklaşımın artan hızla sapma açısı sınırlı bir artış göstermiştir. Pure Pursuit yüksek sapma nedeniyle izleme doğruluğunu koruyamamıştır.

- **Yanal ivme.** Öngörülü kontrolcü 0.41 m/s^2'nin altında kalarak konfor sınırının oldukça altında performans göstermiştir. Diğer yöntemlerde ivme, hızla birlikte belirgin şekilde artmıştır.

- **Direksiyon hızı.** Öngörülü tasarım, aktüatör talebini $0.03\,\mathrm{rad/s}$ altında tutmuştur. LQR'de hız yükseldikçe talepler artarken, Stanley ve Pure Pursuit orta seviyede kalmıştır.

Bu sonuçlar, değişken yarıçap koşullarında sınırlı-horizontlu öngörülü stratejinin izleme doğruluğu ve konfor kriterleri açısından istikrarlı bir üstünlük sunduğunu göstermektedir. Ek olarak bu senaryoda lateral ivme limitinin olmaması, öngörülü kontrolde konforlu aralıkta değerler elde edilirken, kıyaslanan yöntemlerde çok yüksek değerlere ulaşması önerilen yöntemin başarısını öne çıkarmaktadır

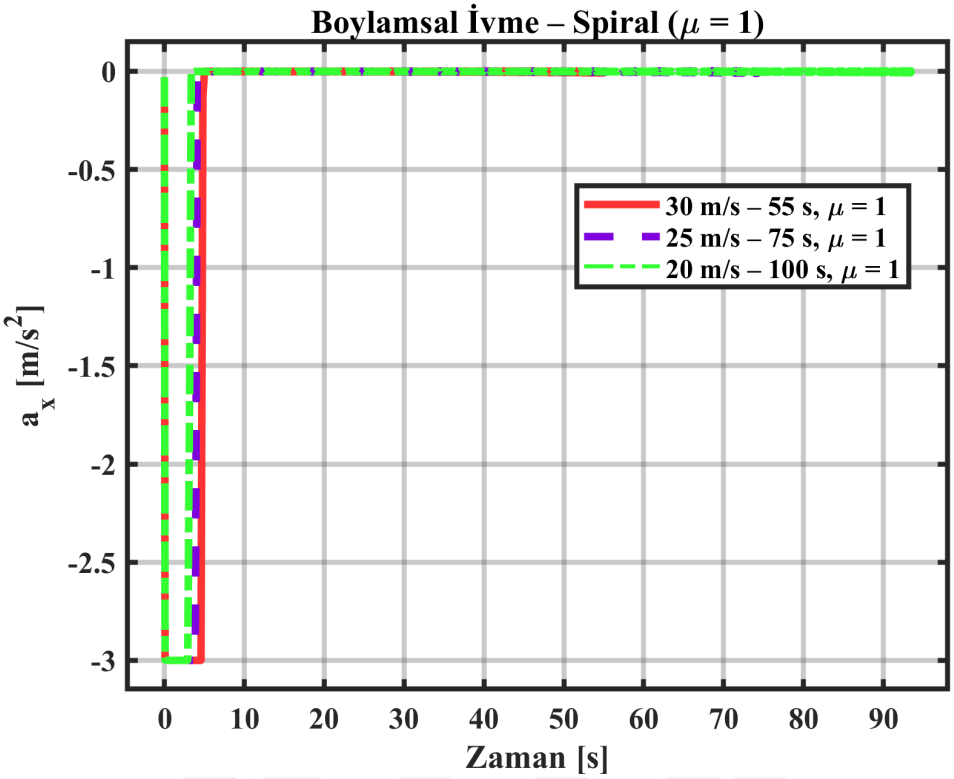
4.4.4 Senaryo 4 Sonuçları

Bu senaryoda yol eğriliğinin senaryol başlangıcında 100 [m] olup, yol sonunda 20 [m] olacak şekilde ilerlemektedir. Yol sürtünme katsayısı μ = 1 ve μ = 0,45 olarak seçilmiştir.

4.4.4.1 Öngörülü Kontrolcü Sonuçları

Spiral Yol μ = 1 Sonuçları

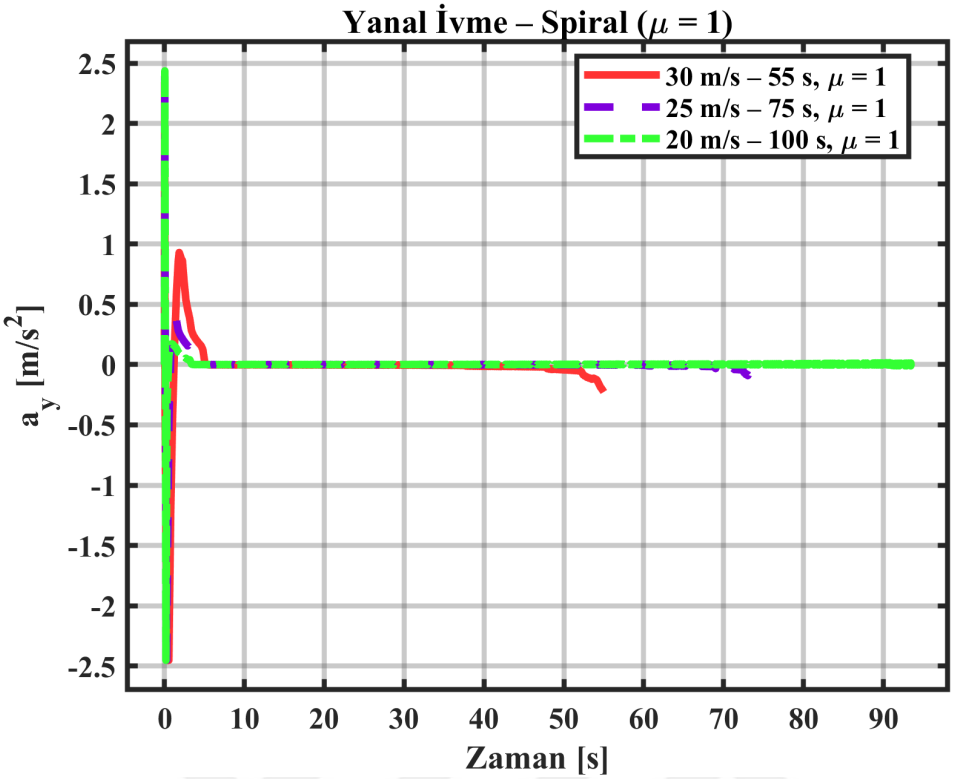
Boylamsal İvme Sonuçları : Simülasyonun başlangıcında tüm hızlarda ani negatif boylamsal ivme uygulanarak araçların yavaşlaması sağlanmıştır. Takip eden süreçte ivme değeri sıfıra yakın sabitlenmiş ve boylamsal yönde kararlı bir hareket sağlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.88 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme

Yanal İvme Sonuçları :

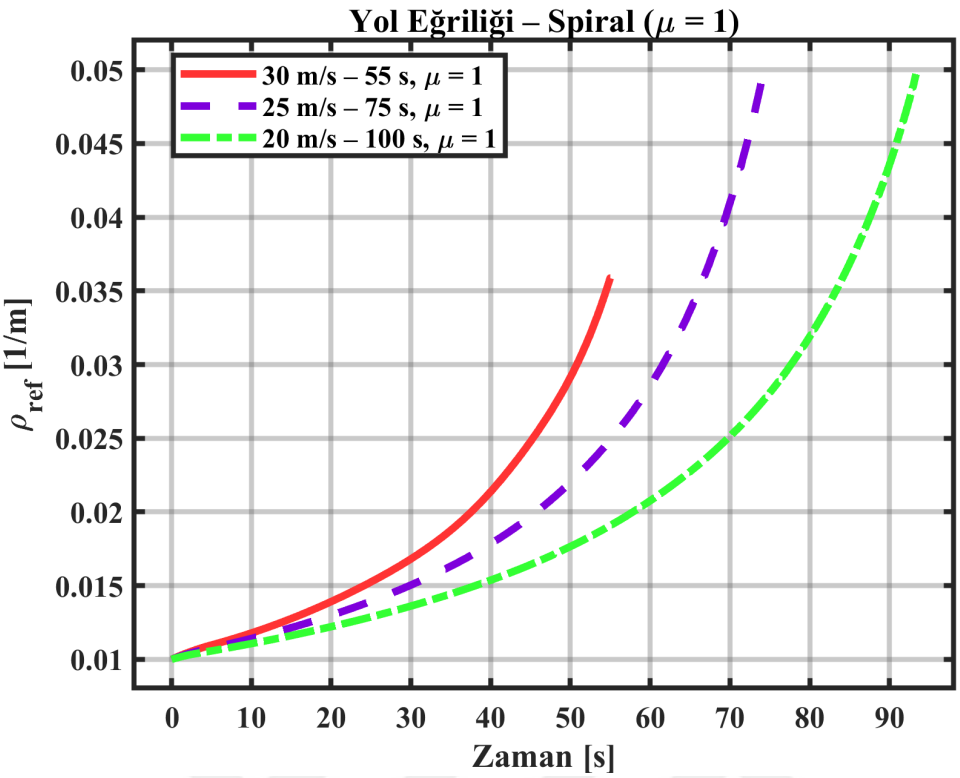
Yanal ivme eğrileri incelendiğinde, başlangıçta yüksek bir yanal ivme oluştuğu, ardından bu ivmenin hızla azalarak sıfıra yakınsadığı belirlenmiştir. Yüksek yanal ivme değerlerinin, sistemin viraj girişindeki ani direksiyon değişimi talebine olan tepkisinden kaynaklandığı görünmektedir



Şekil 4.89 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme

Yol Eğriliği Sonuçları :

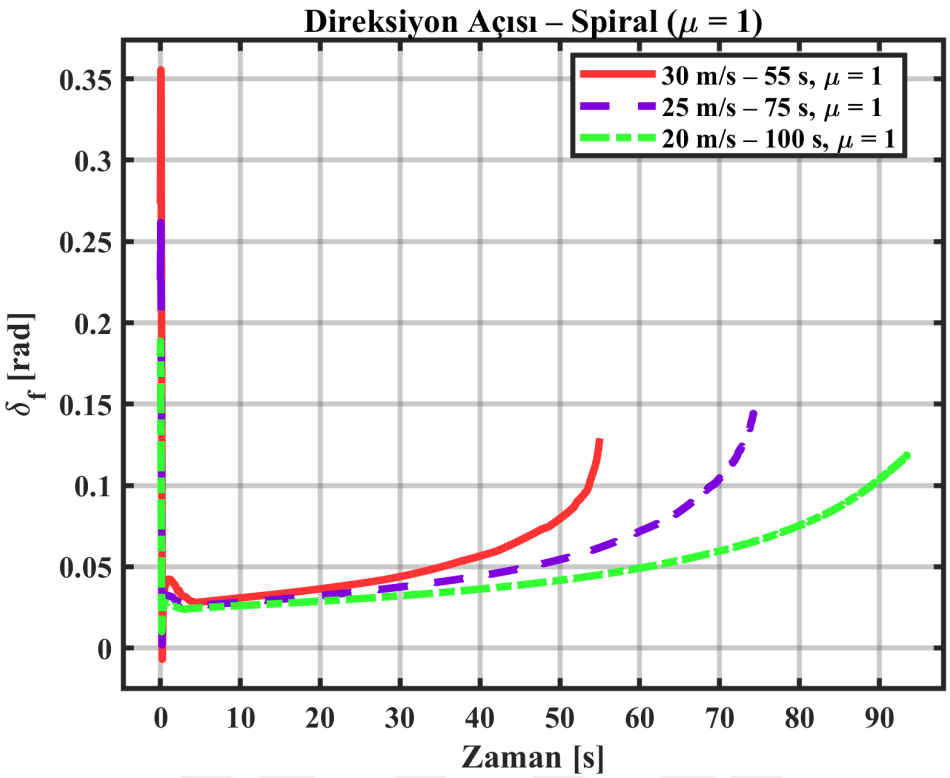
Yol eğriliği profili spiral yörüngeye uygun olarak zamanla artan bir eğilim göstermektedir. Eğrilik artışı ile birlikte, kontrolcü üzerinde daha fazla yük oluşturarak sistemin sınır performansını test etmiştir.



Şekil 4.90 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği

Direksiyon Açısı Sonuçları :

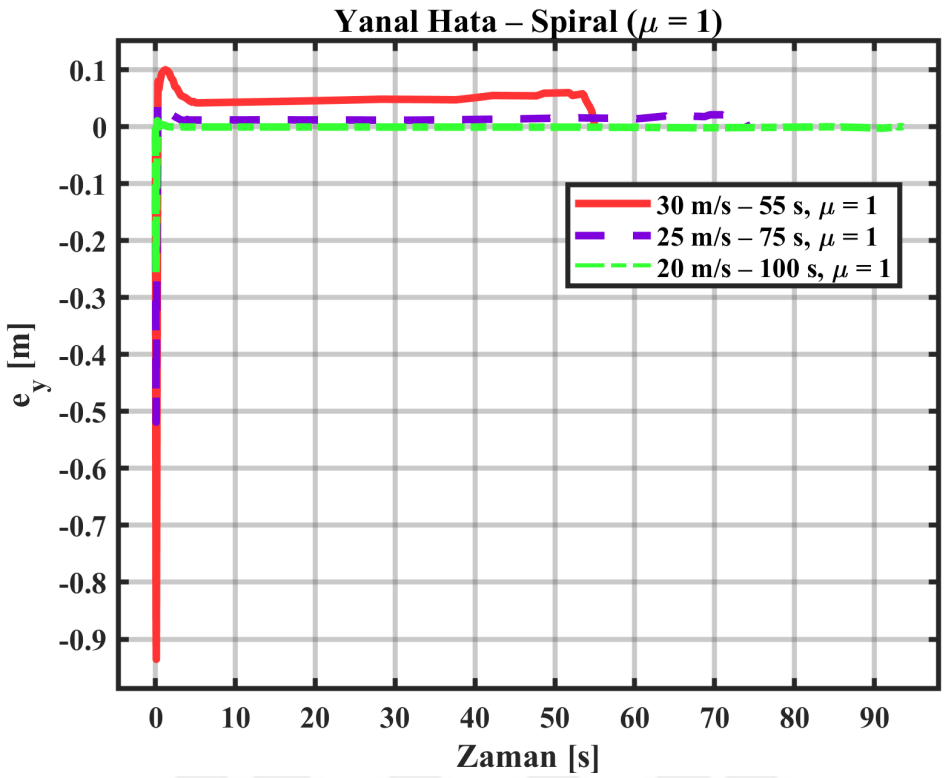
Direksiyon açısının zamanla arttığı ve daha yüksek hızlarda daha büyük direksiyon açılarına ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Bu durum, spiral yörüngede dönme yarıçapının azalmasına rağmen hız azalmadığı kararlılığa ulaşmasıyla gerekli yönlendirme kuvvetinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.91 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı

Yanal Konum Hatası Sonuçları :

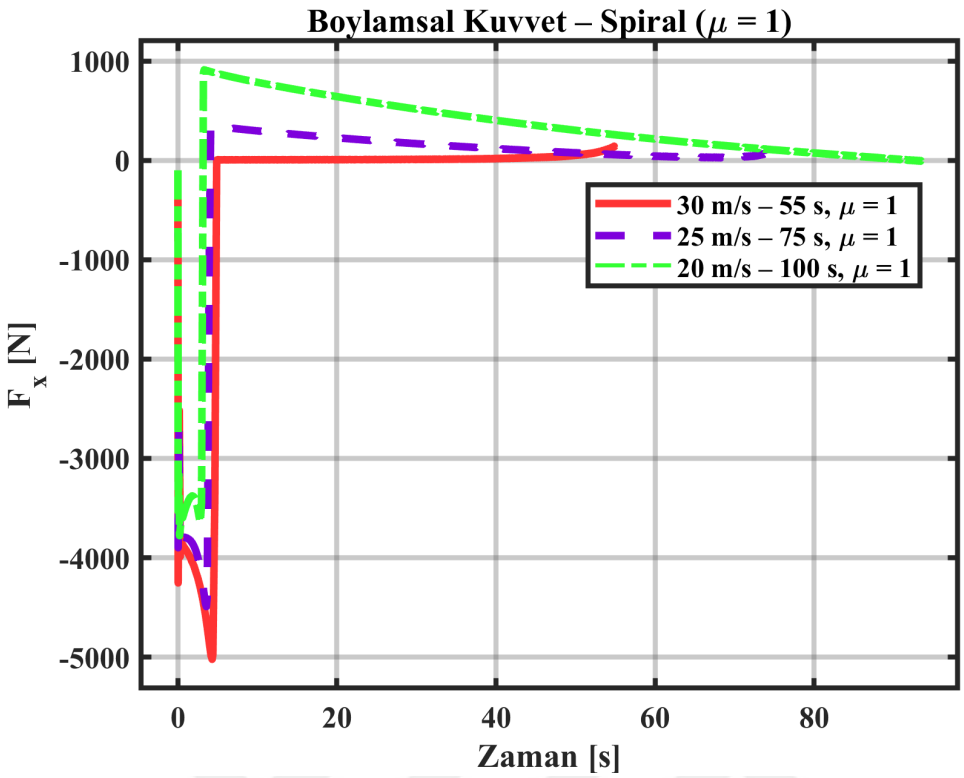
Yanal sapma hatası incelendiğinde, düşük hızlarda sistemin referans yörüngeye daha hızlı ve daha küçük sapmalarla yakınsadığı gözlenmiştir. Özellikle $20\,\mathrm{m/s}$ ve $25\,\mathrm{m/s}$ hızlarında hata minimal seviyede kalmış, ancak $30\,\mathrm{m/s}$ hızında artan hata ile birlikte sistemin kararlılığının azaldığı çıkarılmıştır. Bu durum, yüksek hızlarda kontrolcü performansında bozulmalar olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.92 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası

Boylamsal Kuvvet Sonuçları :

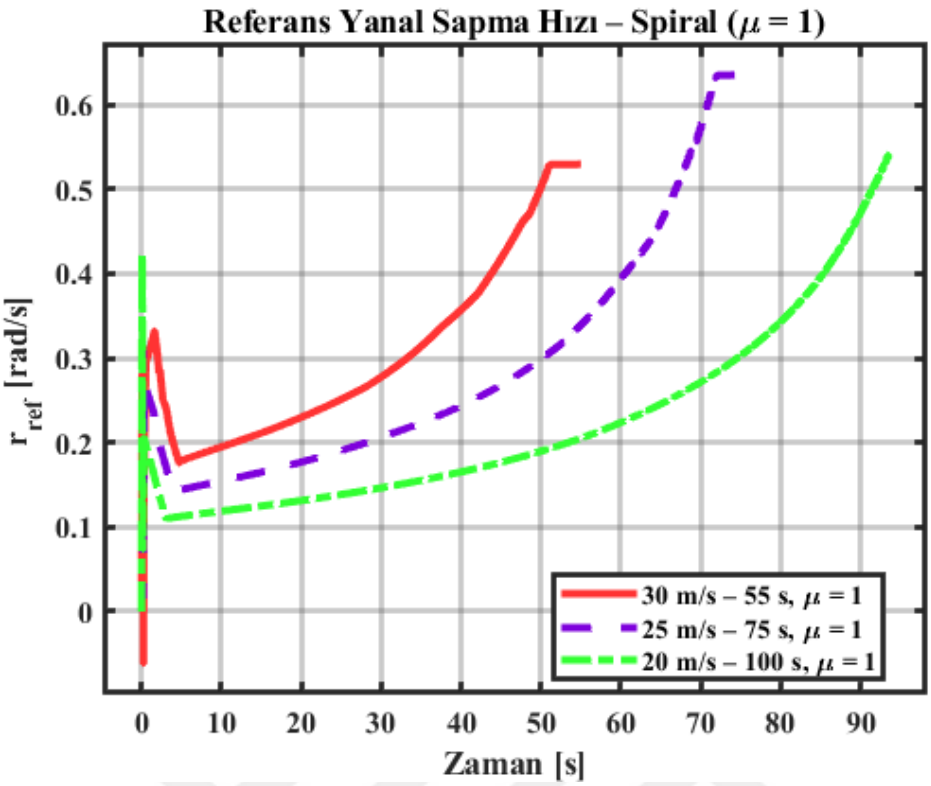
Boylamsal kuvvetin zamana göre değişimi incelendiğinde, başlangıçta yüksek negatif kuvvetlerin uygulandığı ve sistemin hız kesmeye çalıştığı anlaşılmıştır. Hız arttıkça daha büyük frenleme kuvvetlerine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu durum, hız kontrol stratejisinin dinamik koşullara göre uyarladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.93 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet

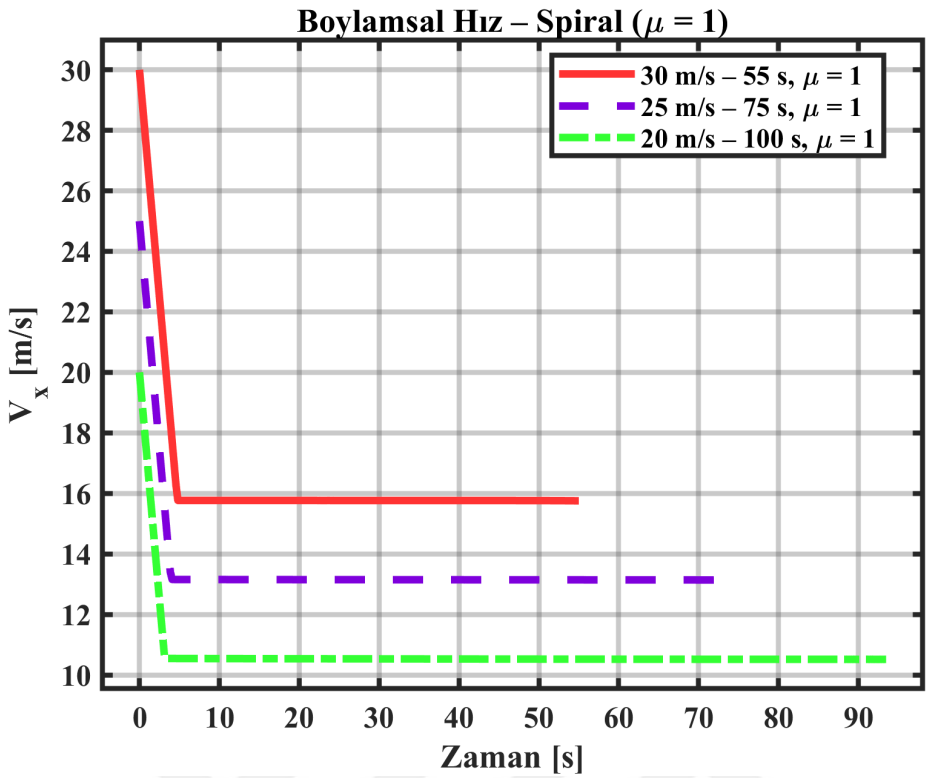
Yanal Sapma Açısı Sonuçları :

Referans yanal sapma hızı, yol eğriliğine ve boylamsal hıza bağlı olarak modellenmiştir. r_{ref} profili, eğriliğin zamana bağlı artışı ile orantılı olarak yükselmiştir. Özellikle yüksek hız senaryosunda $(30\,\mathrm{m/s})$, kısa sürede daha büyük sapma hızları hedeflenmiş, bu da kontrolcüden daha hızlı tepki vermesine neden olmuştur. .



Şekil 4.94 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Referans yanal sapma (R=Spiral).

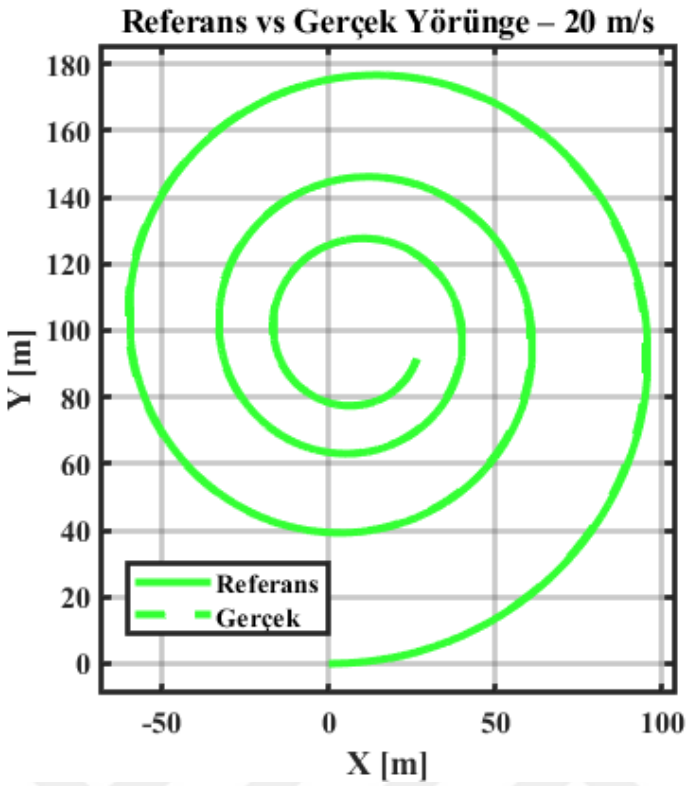
Boylamsal Hız Sonuçları : Boylamsal hız profilleri incelendiğinde, her üç senaryoda da başlangıçta ani bir yavaşlama uygulanarak hedef sabit hız değerine ulaşılmıştır.



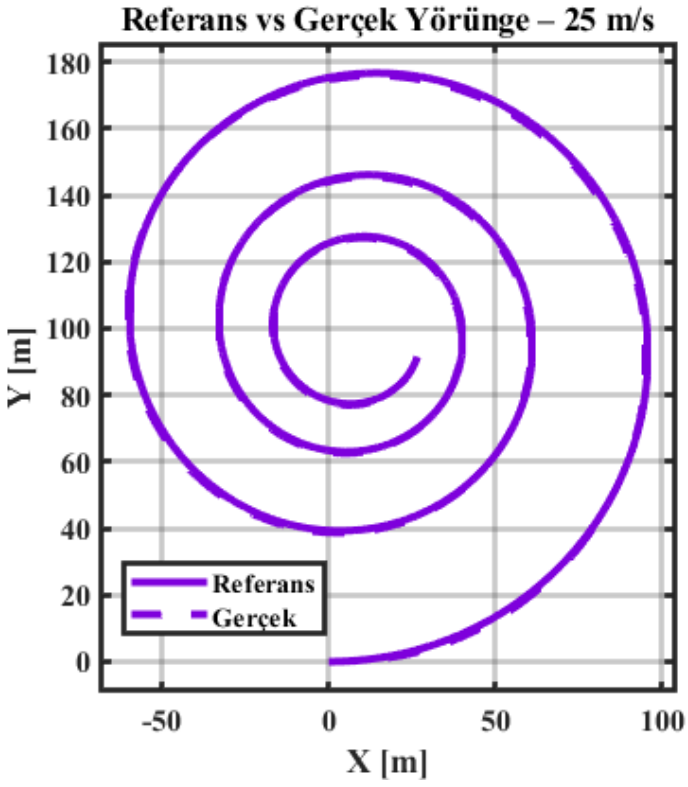
Şekil 4.95 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız

Gerçek ve Referans Yörünge Takip Sonuçları :

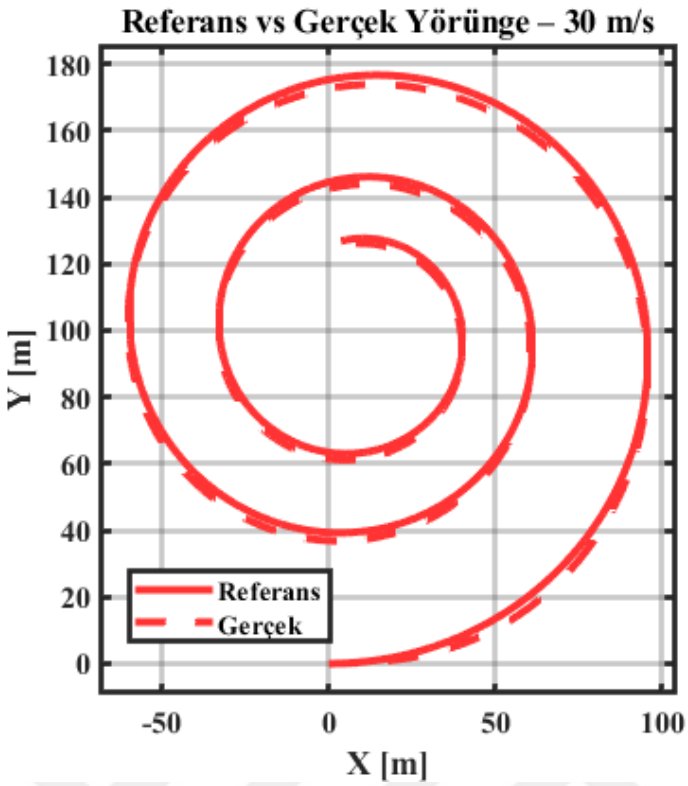
Yörünge karşılaştırma grafiklerinde, düşük hızlarda referans yörüngenin başarılı bir şekilde takip edildiği gözlemlenmiştir. $20\,\mathrm{m/s}$ ve $25\,\mathrm{m/s}$ hızlarında referans ve gerçek yörüngeler çakışmakta iken, $30\,\mathrm{m/s}$ senaryosunda spiral yapının merkez bölgelerine yaklaşıldıkça artan sapmalar tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek hızda oluşan yönlendirme hatalarının ve kontrol sınırlarının daha erken hissedildiğini ortaya koymuştur. Ek olarak yüksek hızda taşıt senaryoyu tamamlayamadığı görünmektedir.



Şekil 4.96 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s)



Şekil 4.97 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s)

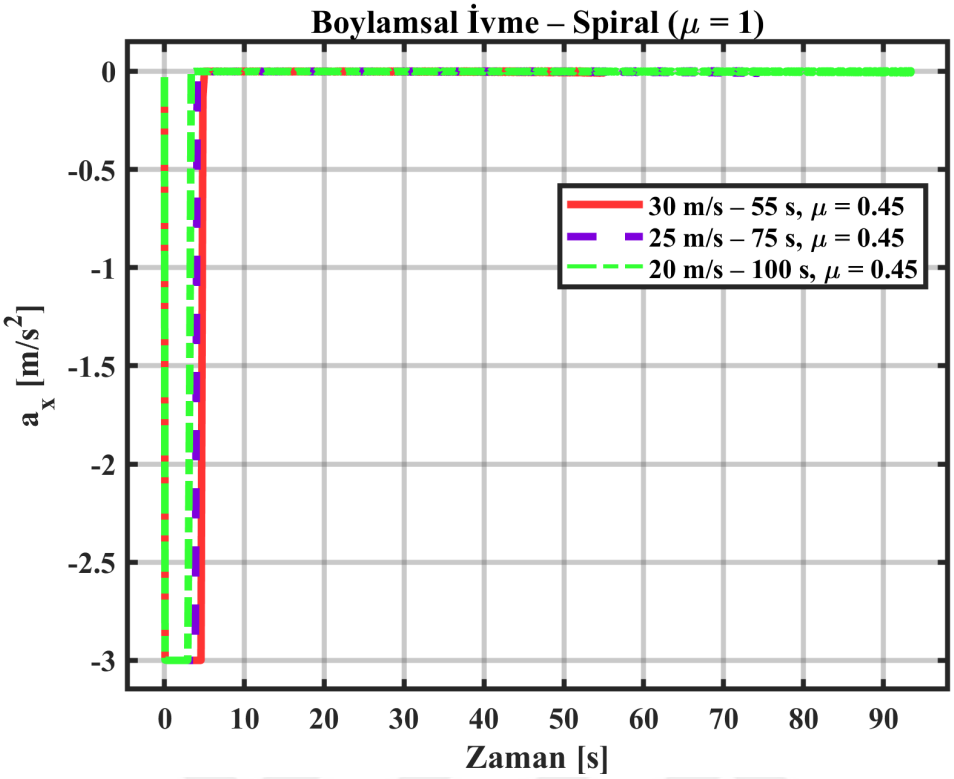


Şekil 4.98 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s)

Spiral Yol μ = 0.45 Sonuçları

Boylamsal İvme Sonuçları :

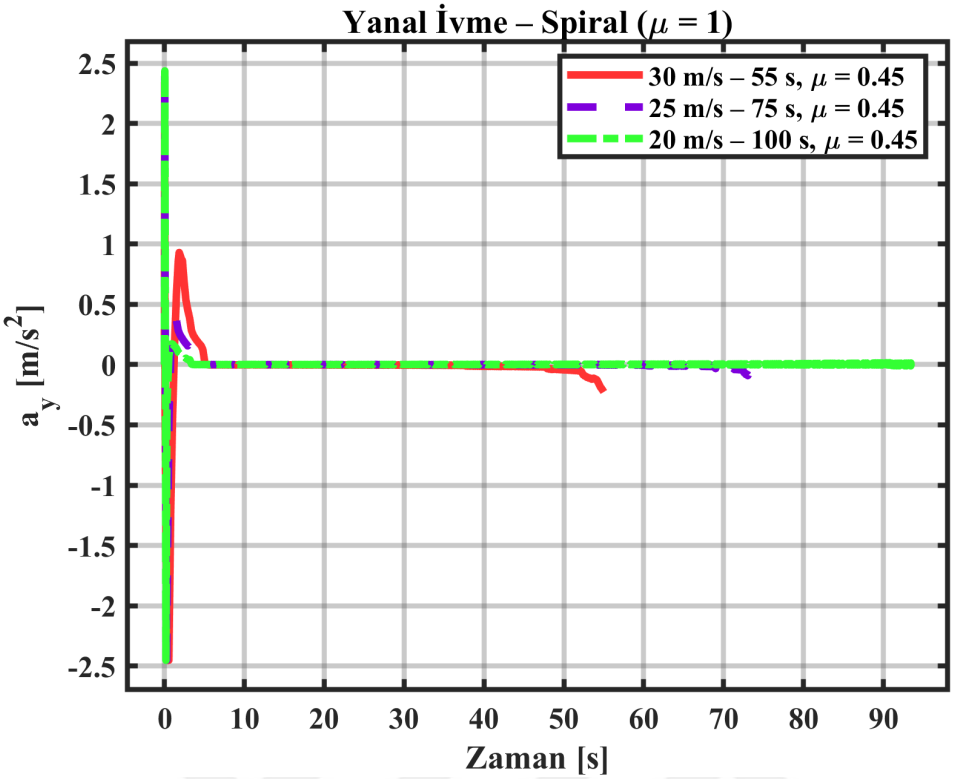
Tüm hız seviyelerinde negatif yönlü hızlı bir ivmelenme gözlemlenmiş, ardından sistem sabit hıza geçiş yapmıştır. Bu durum, taşıtın istenen sabit hıza ulaşmak için ani bir frenleme tepkisi verdiğini ve daha sonra bu seviyede sabit kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.99 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal ivme

Yanal İvme Sonuçları :

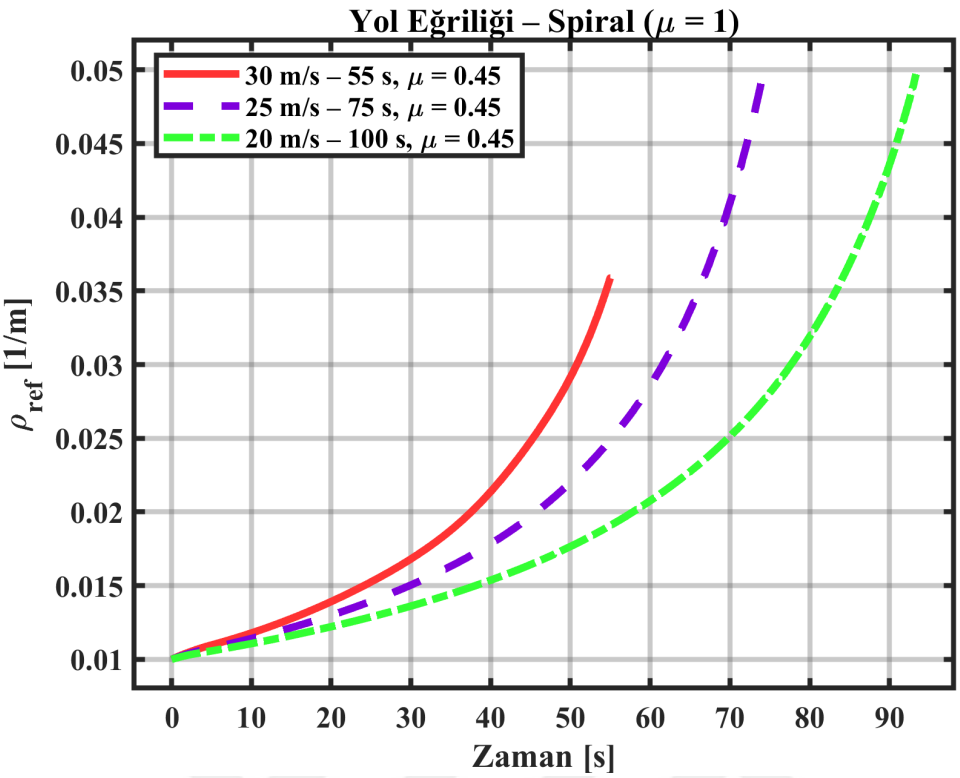
Başlangıç anında tüm senaryolar için yüksek frekanslı bir geçici durum cevabı gözlemlenmiş, ancak çok kısa sürede sistemin dengeye geldiği anlaşılmıştır. Bu durum, sistemin ani girişlere karşı hassas fakat hızlı sönümlü olduğu izlenimini vermektedir. Yanal ivmelerin farklı hızlarda kısa sürede sıfıra yakın değerlere inmesi, kontrolcünün etkinliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.100 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal ivme

Yol Eğriliği Sonuçları :

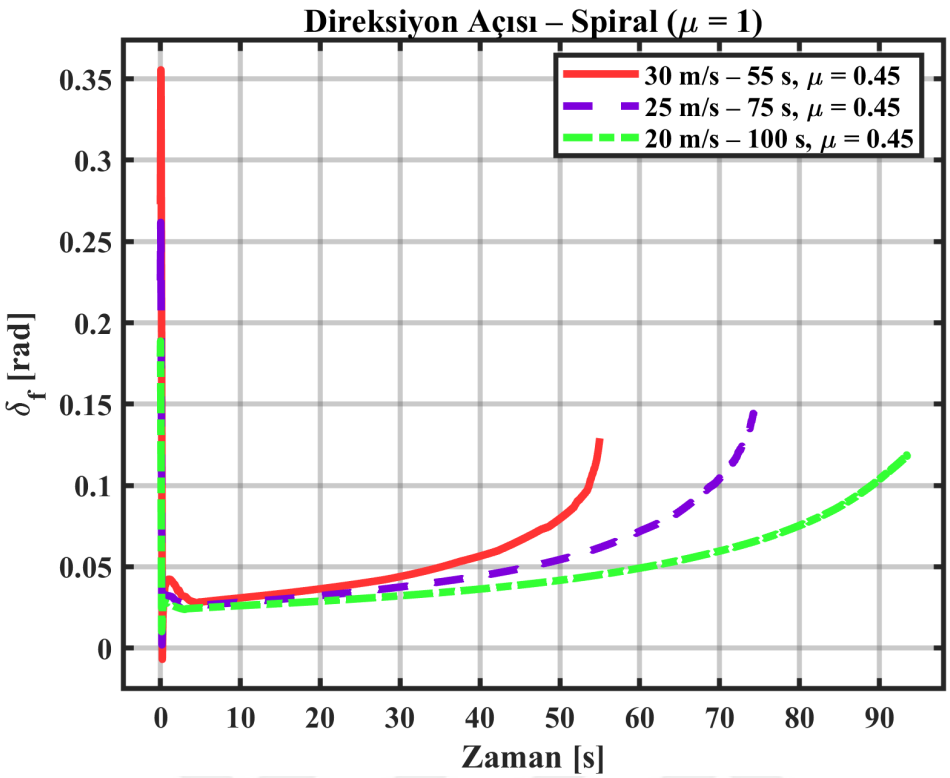
Şekil **??**'de referans yol eğriliği ρ_{ref} zamanla artan bir profil sergilemiştir.



Şekil 4.101 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yol eğriliği

Direksiyon Açısı Sonuçları :

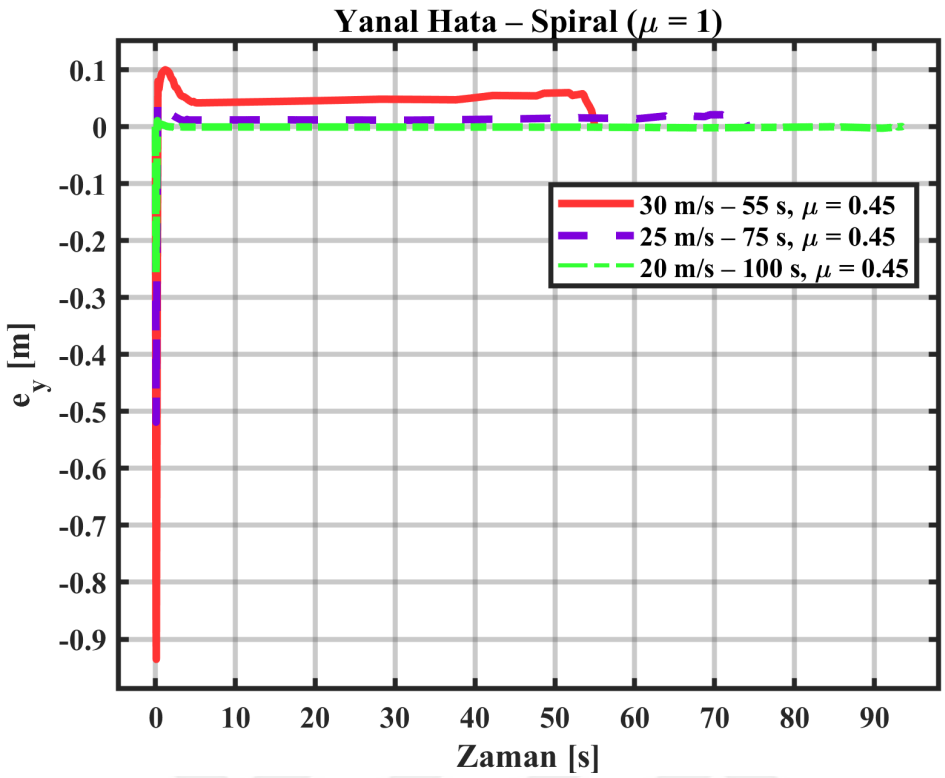
Başlangıçta ani ve yüksek genlikli bir giriş olduğu, sonrasında ise açının zamanla yavaşça arttığı görülmüştür. Artan yol eğriliği ile birlikte direksiyon açısının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu yapı, kontrol sisteminin yolun eğrilik taleplerine karşılık verdiğini ve düzgün bir yönlendirme sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.102 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Direksiyon açısı

Yanal Konum Hatası Sonuçları :

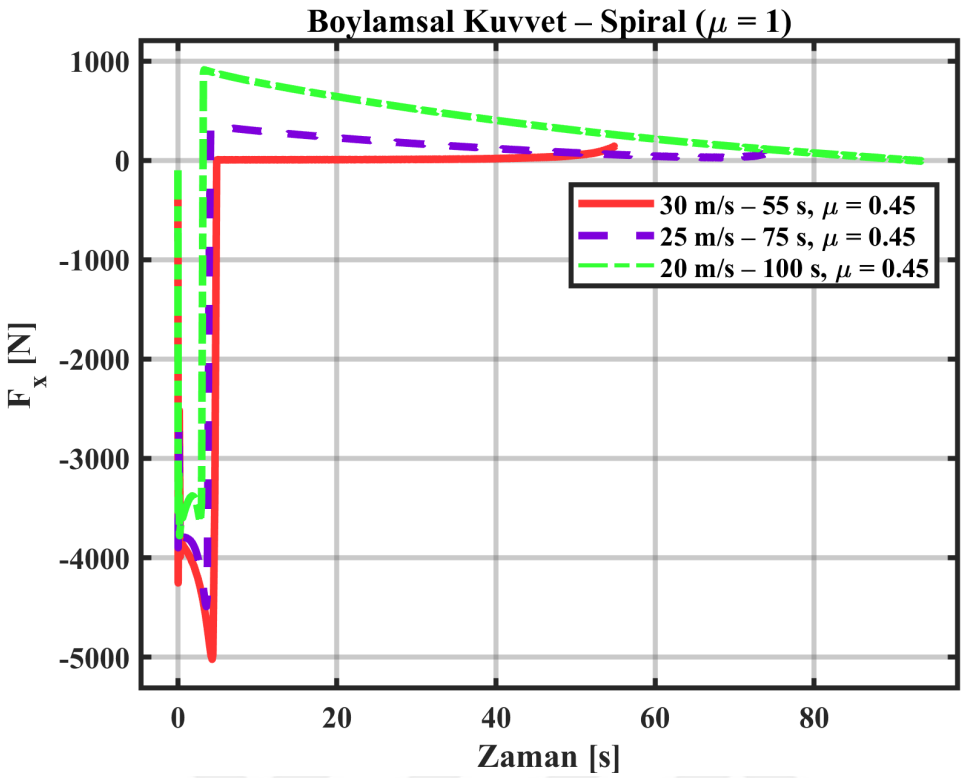
Özellikle düşük hızlarda yanal hatanın oldukça düşük olduğu ve referans yola olan sapmanın minimize edildiği anlaşılmıştır. Yüksek hızda ise geçici bir sapma gözlenmiş olsa da sistem kısa sürede bu hatayı düzeltebilmiştir.



Şekil 4.103 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal konum hatası

Boylamsal Kuvvet Sonuçları :

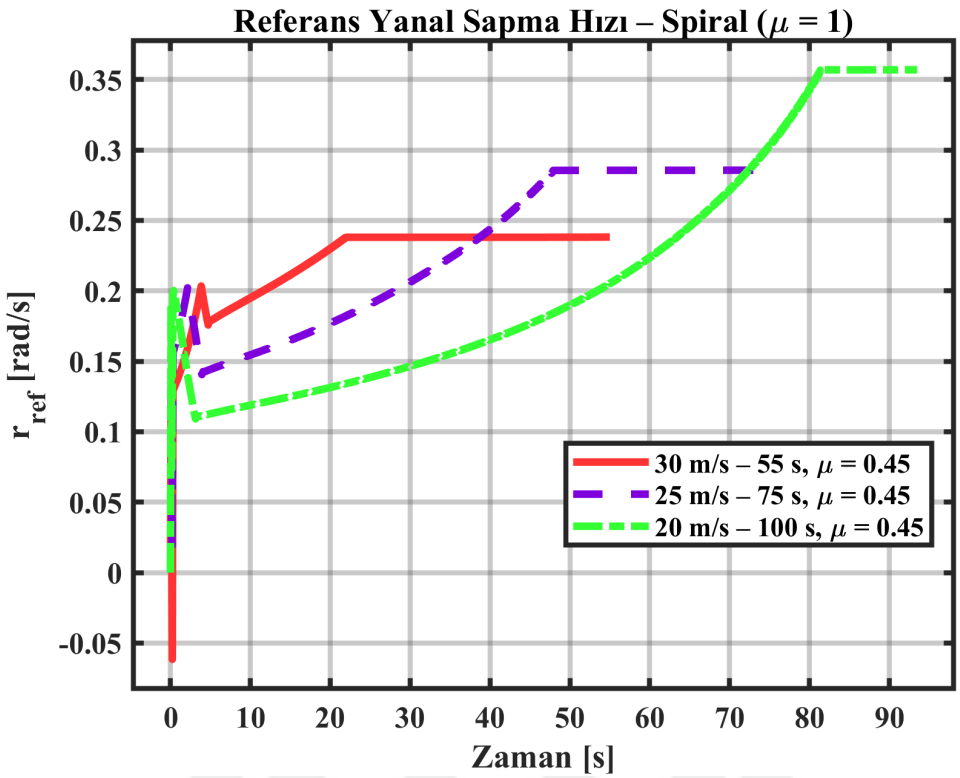
Başlangıçta yüksek negatif değerler gözlenmiş, ardından sıfıra yakın bir rejime geçildiği anlaşılmıştır. Bu durum, başlangıçta gerçekleşen ani frenleme kuvvetinin ardından sistemin sabit bir hız rejimine geçtiğini göstermektedir. Düşük hızda, kuvvetlerin daha az dalgalandığı ve daha dengeli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.104 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi -Boylamsal kuvvet

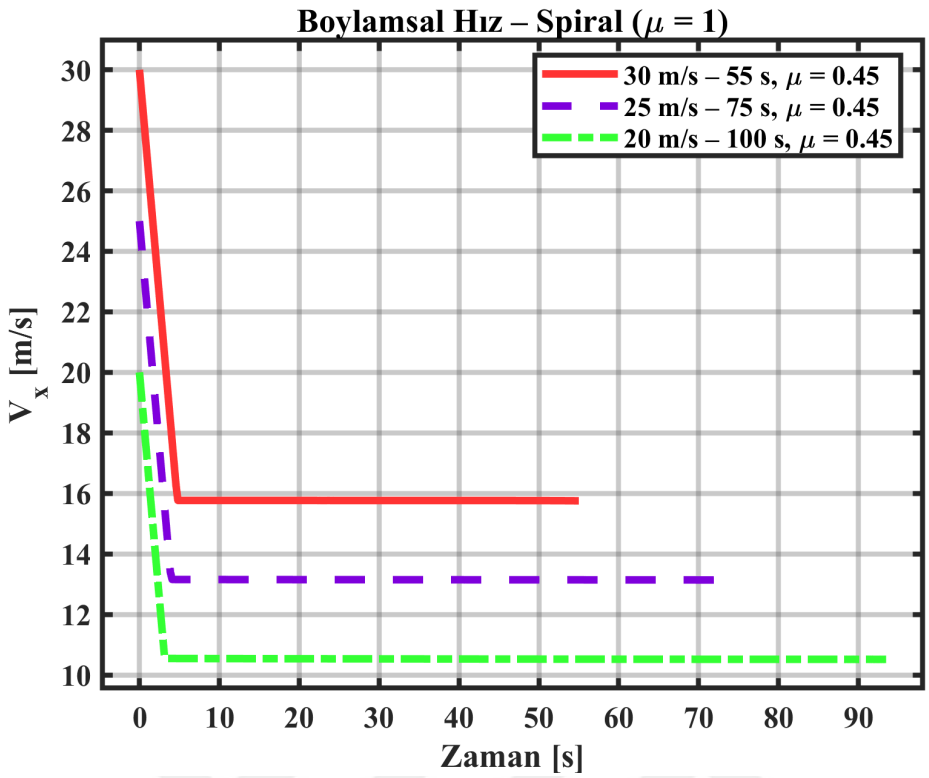
Yanal Kayma Açısı :

Her üç hız seviyesinde de eğriliğin artmasına paralel olarak r_{ref} değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Özellikle düşük hızda (20 m/s) daha yumuşak bir artış sergilenmiş, bu da düşük hızda daha yavaş bir yönelme gereksinimi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, yol eğriliği ile yanal sapma hızı arasındaki doğrudan ilişkiyi doğrulamaktadır.



Şekil 4.105 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Yanal Kayma Açısı (R=Spiral).

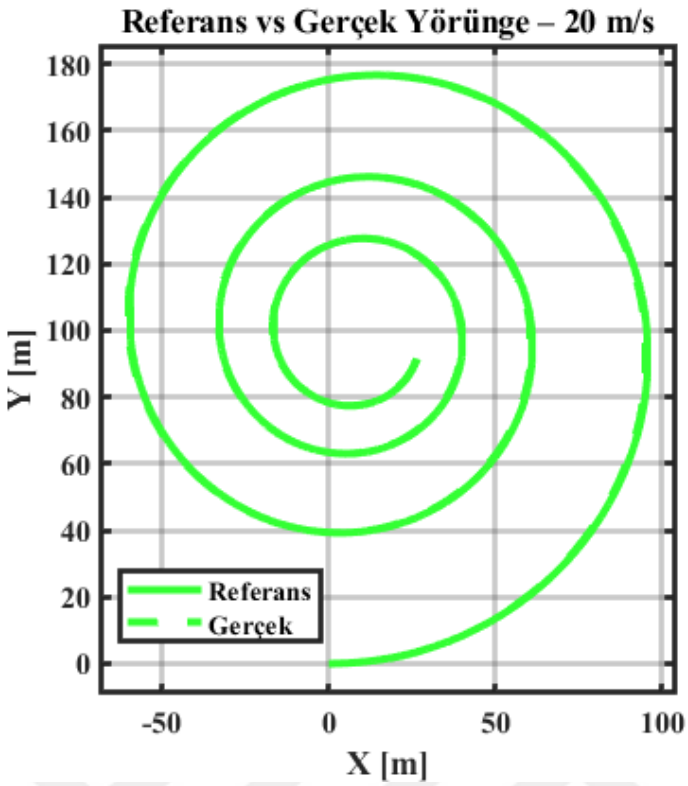
Boylamsal Hız Sonuçları : Özellikle yüksek hız senaryolarında, kontrol sistemi tarafından hız düşüşünün daha belirgin olduğu ve ardından sistemin sabit hız rejiminde çalıştığı tespit edilmiştir.



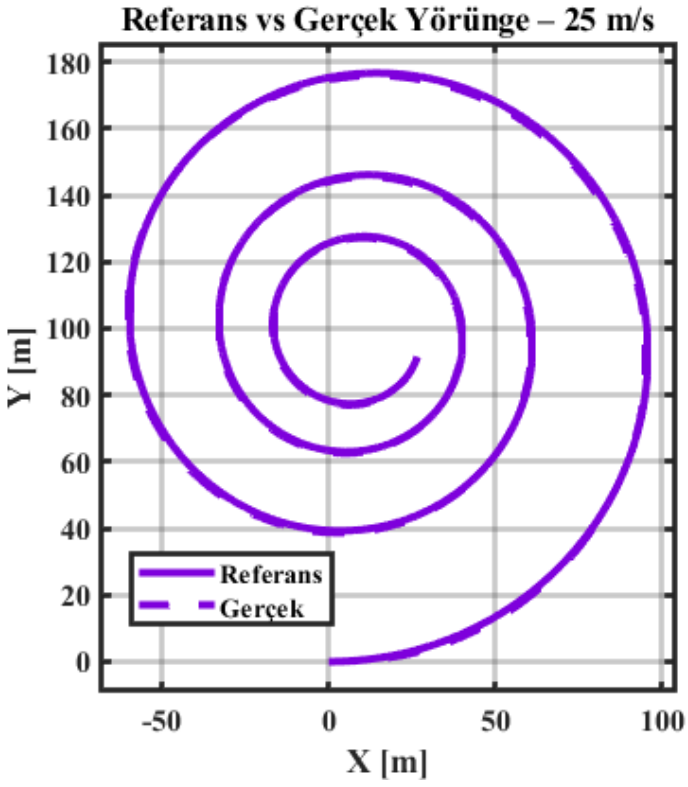
Şekil 4.106 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Boylamsal hız

Gerçek ve Referans Yörünge Takip Sonuçları :

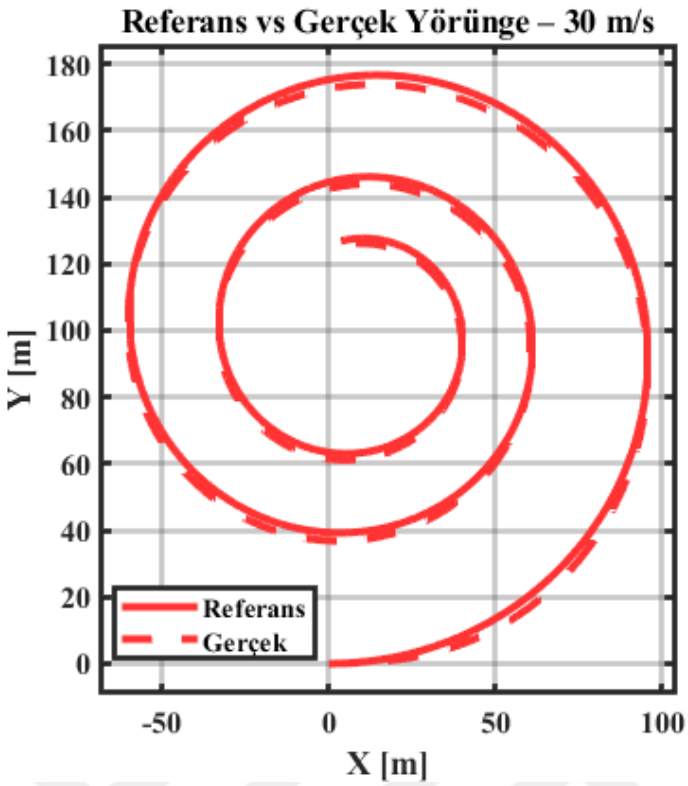
Bu grafikte, hızların artmasıyla merkezkaç ve lastik kayma etkilerinin belirginleştiği görülmektedir; ancak kontrolcü, izlenen yörüngelerin referans eğriyle büyük oranda uyumlu kalmasını sağlamaktadır. Düşük hızda (20 m/s) yörünge neredeyse referansla örtüşmekte, orta hızlarda (25–30 m/s) hafif sapmalar hızlıca düzeltilmekte ve en yüksek hızda (35 m/s) dahi sapmalar sınırlı seviyede tutulmaktadır. Böylece hız artışına karşın yol takip performansı korunmaktadır.



Şekil 4.107 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (20 m/s)



Şekil 4.108 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (25 m/s)



Şekil 4.109 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi - Gerçek vs Referans yörünge (30 m/s)

4.4.4.2 Kıyaslanan Kontrolcü Sonuçları

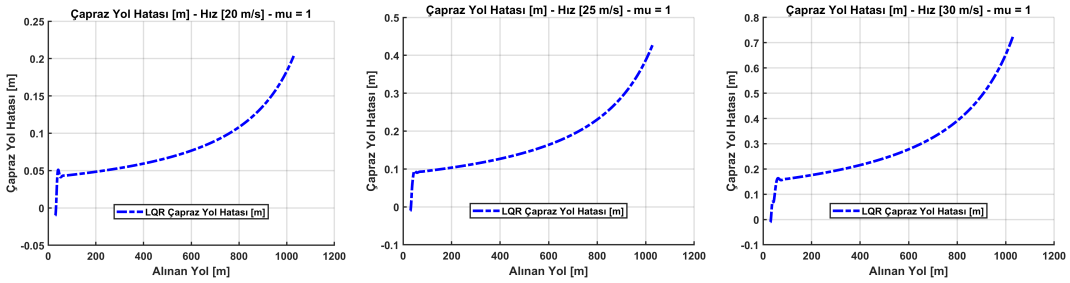
Bu senaryoda yol eğriliği ($R = 100$ m) olup, yol sürtünme katsayısı μ = 1 ve μ = 0.45 seçilmiştir. Farklı hızlarda yapılan test sonuçları gösterilmektedir. Bu senaryoda önceki testlerde daha iyi performans gösteren LQR yöntemi test edilmiştir

Çapraz Yol Hatası Sonuçları :

LQR ile elde edilen çapraz yol hatasının, farklı hız değerlerinde (20 m/s ve 25 m/s) zamana bağlı olarak değişimi sunulmaktadır. Tüm durumlarda sürtünme katsayısı $\mu = 1$ olarak sabitlenmiştir.

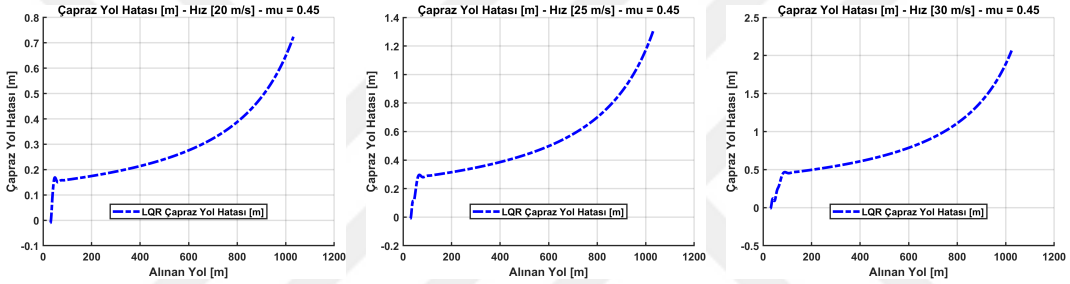
Elde edilen sonuçlarda, düşük hız seviyesinde (20 m/s) çapraz yol hatasının sınırlı düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, hızın 25 m/s'ye çıkarılması durumunda hata değerinin belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin izleme performansının hızla birlikte zayıfladığını ve yüksek hızlarda yol takibinin daha karmaşık hale geldiğini göstermektedir.

Genel olarak, LQR kontrolcüsü kullanılarak sistemin kararlı bir yanıt verdiği, ancak hız arttıkça doğruluk düzeyinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.110 μ = 1 için çapraz yol hatası sonuçları

GDüşük hızda (20 m/s) hata sınırlı kalırken, hız arttıkça (25 ve 30 m/s) sapmanın belirgin biçimde büyüdüğü gözlenmektedir. Bu durum, kontrolcünün yüksek hızlardaki yanal hatayı azaltmakta zorlandığı görülmektedir.

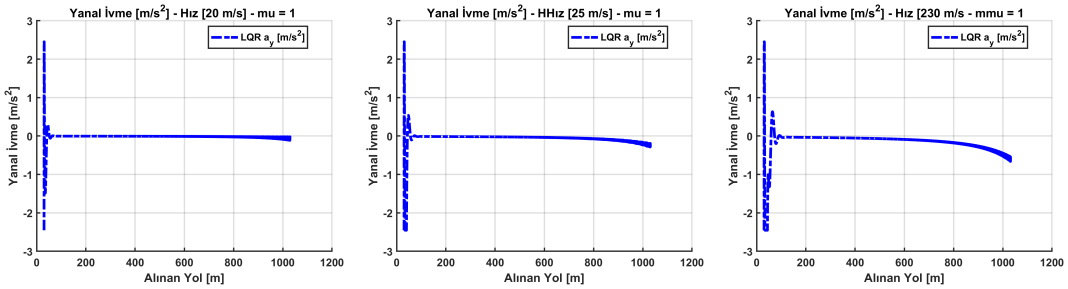


Şekil 4.111 μ = 045 için çapraz yol hatası sonuçları

Yanal İvme Sonuçları :

Elde edilen sonuçlarda, başlangıçta gözlemlenen geçici salınımların kısa sürede sönümlendiği ve sistemin kararlı duruma geçtiği görülmektedir. Hız artışının sönüm süresini uzattığı, ancak kontrolörün kararlılığı sağladığı tespit edilmiştir. Aynı parametrelerle yapılan tekrarlı simülasyonlar benzer sonuçlar vermiş ve sistem tepkisinin tutarlılığı doğrulanmıştır.

Genel olarak, LQR kontrolörünün yanal dinamikler üzerinde etkin olduğu ve sistem kararlılığını başarıyla sağladığı görülmektedir.

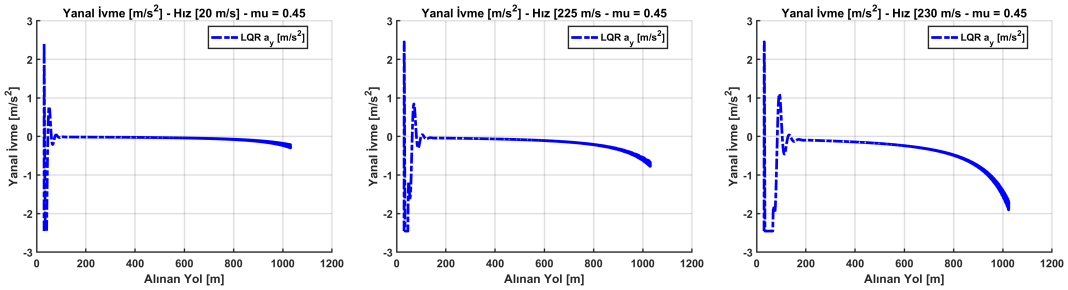


Şekil 4.112 $\mu = 1$ için yanal ivme sonuçları

Yanal ivme grafikleri, farklı hız değerlerinde (20, 25 ve 30 m/s) aracın aldığı yola bağlı olarak yanal ivmenin değişimini göstermektedir.

Düşük hızda (20 m/s) elde edilen sonuçlar incelendiğinde, başlangıçtaki kısa süreli salınımların ardından yanal ivmenin sıfıra yakınsadığı gözlemlenmektedir. Bu durum, sistemin düşük hızlarda yanal dengeyi hızlı bir şekilde sağlayabildiğini göstermektedir.

Hız arttıkça (25 ve 30 m/s), başlangıçta gözlemlenen salınımların şiddetinde ve süresinde artış meydana gelmektedir. Ayrıca, yolun sonlarına doğru yanal ivme değerlerinin sıfırdan daha belirgin şekilde sapmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu sapmalar, azalan yol eğriliği ile birlikte kontrolörün yanal dengeyi sağlama kapasitesinin zorlandığını ve sistemin kararlılık sınırlarına yaklaştığını göstermektedir.

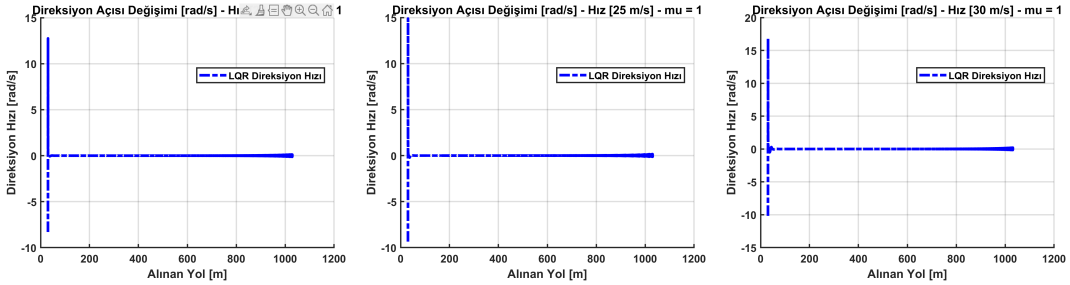


Şekil 4.113 $\mu = 045$ için yanal ivme sonuçları

Direksiyon Açısı Değişim Hızı Sonuçları :

Başlangıçta çok yüksek bir direksiyon açısı hızı gözleniyor (örneğin ±12–15 rad/s civarında). Çok kısa sürede bu değer sıfıra yakın seviyelere indiği görülmektedir. Yol ilerledikçe direksiyon açısı hızı neredeyse sabit ve sıfıra yakın kalmıştır. Bu durum, LQR kontrolcüsünün ilk etapta keskin bir düzeltme yaptığı, ardından ise sistemi

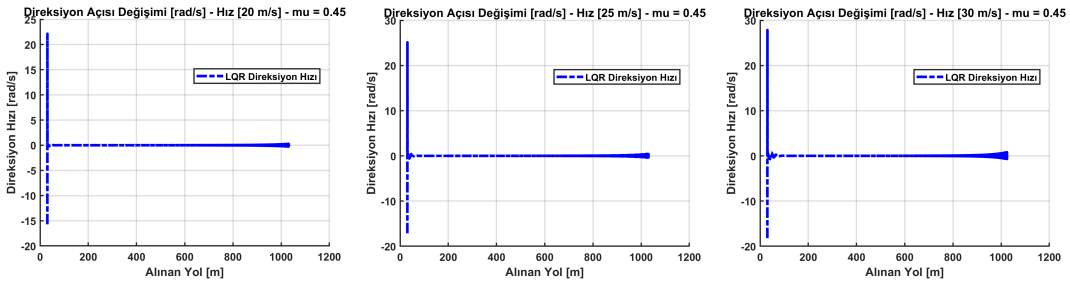
dengede tuttuğu anlamına gelir. İlk tepkideki bu sert değişim, sistemin dengeye hızlı ulaşmasını sağlamıştır



Şekil 4.114 μ = 1 için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

Direksiyon hızı eğrilerinin incelenmesi sonucunda, başlangıç anında yüksek frekanslı ve genlikli salınımlar gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin denge konumuna ulaşabilmesi adına gerçekleştirdiği hızlı düzeltme manevralarını yansıtmaktadır. Özellikle ilk birkaç saniyelik periyotta ortaya çıkan bu ani tepkiler, kontrol sisteminin başlangıç koşullarına yanıt olarak gösterdiği aktif dengeleme davranışlarıyla ilişkilendirilmektedir.

Araç hızının 20 m/s'den 30 m/s'ye artmasıyla birlikte, ilk direksiyon tepkisinin şiddetinin de belirgin şekilde yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek hızlarda kontrol gereksiniminin arttığını ve sistemin daha agresif bir müdahale stratejisi sergilemek zorunda kaldığını göstermektedir. Hızın artmasıyla birlikte araç dinamiklerinin daha karmaşık hale gelmesi, kontrolcü tarafından daha büyük düzeltici hareketlerle dengelenmeye çalışılmaktadır.



Şekil 4.115 μ = 045 için direksiyon açısı değişim hızı sonuçları

Yanal Sapma Hatası Sonuçları :

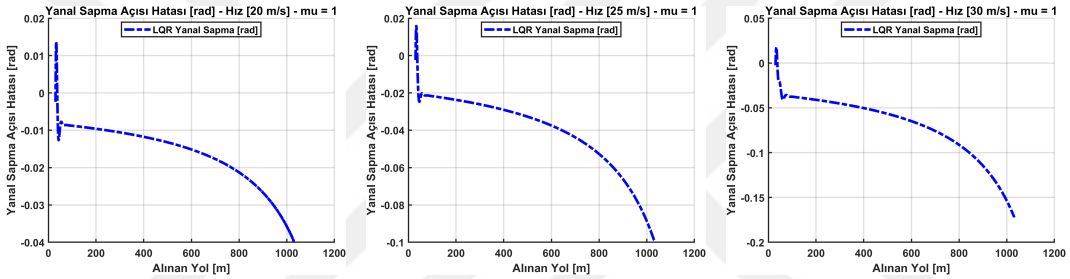
Başlangıç kısmında, özellikle 0-100 metre aralığında, kısa süreli osilasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin başlangıç anında kararlı hâle

gelmek üzere bir toparlanma sürecine girdiğini göstermektedir.

20 m/s hızında yanal sapma açısı hatasının yaklaşık olarak -0.01 *rad* seviyelerinde dengelendiği; buna karşın 25 m/s hızında bu hatanın daha yüksek (≈ -0.02 *rad*) olduğu ve zamanla daha belirgin sapmalar sergilediği tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler, hız artışıyla birlikte sistemin sapma hatasını kontrol etme kapasitesinin azaldığını ve bu nedenle sapma açısının daha negatif değerlere yöneldiğini ortaya koymaktadır.

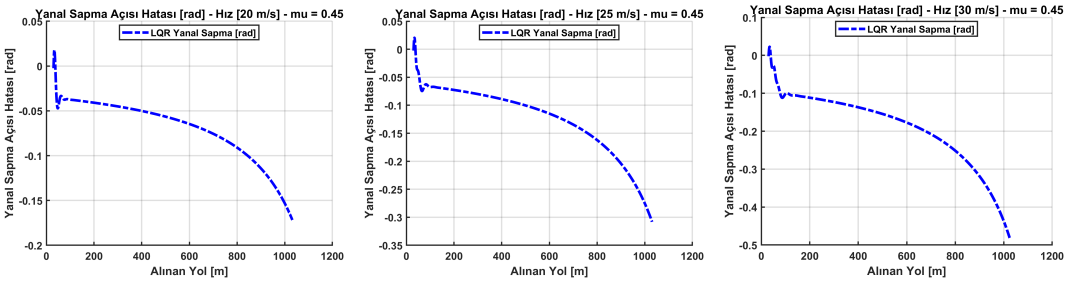
Araç hızındaki artışa bağlı olarak yanal sapma açısı hatasında da artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu, LQR kontrolörünün yüksek hızlarda yetersiz kaldığına değil; daha agresif manevralar nedeniyle sistemin daha büyük sapmalara maruz kaldığına işaret etmektedir.



Şekil 4.116 μ = 1 yanal sapma hatası sonuçları

Araç hızındaki artışın, yanal sapma açısı hatası üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Nitekim, hız 20 m/s seviyesindeyken sapma hatası yaklaşık olarak -0.15 rad civarında kalmaktadır. Hız 25 m/s'ye yükseltildiğinde bu hata değeri -0.30 rad seviyelerine ulaşmakta; 30 m/s hızda ise sapma hatasının -0.45 rad düzeyine kadar çıktığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, mevcut LQR kontrol parametrelerinin hız arttıkça etkinliğini yitirdiğini ve sapma hatasını sıfıra yakın bir değerde tutmakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, kontrol stratejisinin hız parametresine duyarlı hale getirilmesi veya farklı hız aralıkları için optimize edilmesi gerektiği önerilmektedir.



Şekil 4.117 μ = 045 için yanal sapma hatası sonuçları

Değerlendirme

Tablo 4.4 Spiral yol senaryosunda LQR ve Öngörülü kontrolcünün Kıyaslanması

Hız	μ	**Kontrolcü**	Yanal Hata RMSE	Yanal İvme RMSE	Yanal Sapma Açısı RMSE	Direksiyon Açısı Değişim Hızı RMSE
20	1.00	Öngörülü Kontrol	0.0076	0.1072	0.2373	0.0535
20	1.00	LQR	0.0925	0.1310	0.0182	0.2166
25	1.00	Öngörülü Kontrol	0.0237	0.1615	0.2992	0.0580
25	1.00	LQR	0.1971	0.2492	0.0451	0.2800
30	1.00	Öngörülü Kontrol	0.0675	0.3009	0.3083	0.0552
30	1.00	LQR	0.3339	0.3619	0.0782	0.3444
20	0.45	Öngörülü Kontrol	0.0237	0.1615	0.2992	0.0580
20	0.45	LQR	0.3318	0.2531	0.0780	0.3869
25	0.45	Öngörülü Kontrol	0.0237	0.1615	0.2991	0.0580
25	0.45	LQR	0.5971	0.4057	0.1389	0.4899
30	0.45	Öngörülü Kontrol	0.0674	0.3010	0.3085	0.0553
30	0.45	LQR	0.8962	0.6861	0.2037	0.6005

- **Yanal Sapma (e_y).** Öngörülü Kontrol, her iki sürtünme katsayısında da tüm hız aralıklarında LQR'ye göre daha düşük çapraz yol hatası sağlamıştır. Özellikle $\mu = 0.45$ ve $v \geq 25$ m/s durumlarında LQR'nin hatası bir büyüklük mertebesine kadar artmaktadır.

- **Yanal İvme (a_y).** Öngörülü Kontrol'nin ürettiği ivmeler (< 0.31 m/s^2) konfor eşiğinin (≈ 2 m/s^2) altında kalırken, LQR'de ivme değeri düşük sürtünmede belirgin şekilde yükselmiştir.

- **Yanal Sapma Açısı Hatası (r).** Öngörülü Kontrol, μ değişimine duyarsız bir seyir izlerken, LQR özellikle düşük μ senaryosunda artan hızla birlikte daha büyük sapma açıları üretmiştir.

- **Direksiyon Açısı Değişim.** Öngörülü Kontrol'nin direksiyon açısı RMSE'si tüm senaryolarda ≤ 0.06 rad düzeyinde kalmıştır. LQR'nin direksiyon hız talebi ise hem hız hem de sürtünme azaldıkça artmış, aktüatör sınırları açısından daha eleştirel değerler göstermiştir.

Sonuç olarak, sınırlı-horizontlu öngörülü yaklaşım spiral yol koşulunda daha düşük iz hatası ve aktüatör talebi ile birlikte konfor kriterlerini koruyarak LQR'ye kıyasla

üstün bir performans sergilemiştir. LQR'nin performansı, yol tutuşunun azaldığı ($\mu = 0.45$) ve hızın yükseldiği durumlarda belirgin şekilde bozulmaktadır.

Sonuçların Değerlendirilmesi

4.4.4.2.1 (i) Senaryo 1 – $R = 100\,\mathbf{m}$, $\mu = 0.83$. $H = 0.05$ s'lik kısa ufuk ve $Q_1/Q_4 \ll 1$ oranı, 20 m/s'de çapraz yol RMSE'sini $\approx$1–2 cm düzeyine indirmiştir. 25–30 m/s'de Q_1 büyütülerek hız artışına bağlı yol hatası telafi edilmiş, ancak V^2/R terimi ivme gereksinimini artırdığı için yanal ivme ile direksiyon hızı RMSE'lerinde hafif yükselme gözlenmiştir. 35 m/s denemesinde ufuk *daha da kısaltılmıştır* ($H = 0.03$ s); bu "miyop" ayar hatayı 3 cm civarında tutsa da direksiyon açısı hızında sık düzeltme hamleleri (RMSE $\approx 2.1\times10^{-2}$ rad/s) üretmiştir. Böylece, yüksek hızda kısa ufuk yaklaşımı hata yüksek çıksa da, aktüatör faaliyetinde gözle görülür bir fark olmadığı gözlemlenmiştir.

4.4.4.2.2 (ii) Senaryo 2 – $R = 50\,\mathbf{m}$, $\mu = 0.83$. Daha dar kavis için 15 m/s'de küçük Q_1–Q_3 seçilerek konfor önceliği denenmiş; konum hatası 3–4 cm iken ivme ve direksiyon hızı minimal kalmıştır. 20 m/s'de Q_1 ve özellikle Q_4 üç-dört mertebe büyütülmüş, çapraz hata 8.4 cm'ye gerilemiş ancak tamamen giderilememiştir; yüksek Q_4 konforu korusa da tutuş sınırı hatayı sıfırlamaya izin vermemiştir. 25 m/s testinde $H = 0.01$ s'ye inilmesi reaktif direksiyon profili üretmiş (RMSE$_{\dot\delta} \approx 4\times10^{-2}$rad/s)

4.4.4.2.3 (iii) Senaryo 3 – Değişken eğrilik $R = \pm100\,\mathbf{m}$, $\mu = 0.83$. 20–25 m/s'de yüksek Q_4 yanal ivme RMSE'sini 0.015–0.058 m/s^2 arasında tutmuştur; $H = 0.05$ s orta ufku "ϱ" işaretli eğrilik keskinliklerini önceden görüp yumuşatmıştır. 30–35 m/s'de Q_1–Q_2 birer mertebe düşürülerek takip–konfor dengesi sağlanmış, çapraz hata 1–3 cm'de kalmıştır.

4.4.4.2.4 (iv) Senaryo 4 – Spiral yol, $\mu = 1.0$ ve 0.45. Spiralde $Q_4 = 10^8$–10^9 büyüklükleri, uzun yarıçap daralmasında yanal ivme birikimini cezalandırarak öngörülü kontrolcüye LQR'ye kıyasla $\approx$6–7 kat düşük çapraz yol RMSE'si kazandırmıştır (Tab. 4.4). Kaygan zemin ($\mu = 0.45$) için Q'ların 1.8 kat büyütülmesi tutuş limitlerini aşmadan benzer RMSE seviyelerini korumuştur; bu da performansı belirleyen unsurun *göreli* Q oranları olduğunu teyit etmektedir.

Tablo 4.5 Dört senaryoda öngörülü kontrolcü için seçilen H ve $Q_{1\text{–}5}$ ağırlıkları

Senaryo	μ	V [m/s]	H [s]	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
(R = 100)	0.83	20	0.05	1.0×10^2	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^5	5.0×10^1
(R = 100)	0.83	25	0.05	1.0×10^4	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = 100)	0.83	30	0.05	1.0×10^4	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = 100)	0.83	35	0.03	1.0×10^4	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = 50)	0.83	15	0.05	1.0×10^0	1.0×10^0	1.0×10^0	1.0×10^5	1.0×10^0
(R = 50)	0.83	20	0.05	1.0×10^3	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	1.0×10^1
(R = 50)	0.83	25	0.01	1.0×10^2	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = $\pm$100)	0.83	20	0.05	1.0×10^4	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = $\pm$100)	0.83	25	0.05	1.0×10^4	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^8	5.0×10^1
(R = $\pm$100)	0.83	30	0.05	1.0×10^3	1.0×10^0	1.0×10^1	1.0×10^7	5.0×10^0
(R = $\pm$100)	0.83	35	0.05	1.0×10^3	1.0×10^0	1.0×10^1	1.0×10^7	5.0×10^0
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	1.00	20	0.05	1.0×10^1	1.0×10^2	1.0×10^1	1.0×10^8	1.0×10^2
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	1.00	25	0.05	1.0×10^3	1.0×10^2	1.0×10^3	1.0×10^9	5.0×10^2
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	1.00	30	0.05	1.0×10^3	1.0×10^2	1.0×10^3	1.0×10^9	5.0×10^2
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	0.45	20	0.05	1.8×10^1	1.8×10^2	1.8×10^1	1.8×10^8	1.8×10^2
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	0.45	25	0.05	1.8×10^3	1.8×10^2	1.8×10^3	1.8×10^9	9.0×10^2
(R = 100 $\rightarrow$ 20)	0.45	30	0.05	1.8×10^3	1.8×10^2	1.8×10^3	1.8×10^9	9.0×10^2

4.4.4.2.5 (v) Q ve H Seçimlerinin Makuliyeti.

- Q_4 **yüksekliği** spiral ve yüksek hız koşullarında yanal ivme artışını etkin biçimde bastırmıştır.
- Q_1**–**Q_2'nin hızla birlikte mertebe atlaması (20$\rightarrow$25 m/s'de $10^2 \rightarrow 10^4$) yol hatasını sınırlamış; ancak çok kısa H durumunda (35 m/s, $H = 0.03$ s) direksiyon aktivitesini artırmıştır.
- H **küresel optimumu** verilerde **0.01–0.05 s** aralığında görünmektedir; $H < 0.03$ s aşırı reaktivite, $H > 0.1$ s ise model yanılgısı nedeniyle tahmin sapması doğurur.

4.5 Özet

Bu bölümde, geliştirilen sınırlı-ufuklu öngörülü kontrolcü dört farklı yol-hız senaryosunda doğruluk, konfor ve aktüatör talebi ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar özetle şöyledir: (i) Orta yarıçaplı virajda ($R = 100$ m) önerilen yöntem $2\,\mathrm{cm}$ mertebesinde iz hatasıyla en yakın rakibini geride bırakmıştır. (ii) 50 m yarıçapında, ufuk parametresinin $H = 0.05$–0.10 s aralığında dengeli bir performans sağladığı gösterilmiştir. (iii) Değişken eğrilik senaryosunda hata büyüklüğü hızdan bağımsız olarak $3\,\mathrm{cm}$ altında tutulmuş, yanal ivme ise konfor sınırının yarısında kalmıştır. (iv) Spiral yol testleri, düşük ($\mu = 0.45$) ve yüksek ($\mu = 1$) tutuş koşullarında ağırlık matrislerinin ölçeklenmesiyle benzer performansın korunabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, öngörülü kontrol

yaklaşımının hem nominal hem de zorlu sürüş koşullarında güvenilir bir takip performansı sunduğunu teyit etmektedir

5
SONUÇ

Bu tez kapsamında, otonom taşıtların yanal ve boylamsal dinamiklerini eşzamanlı olarak yöneten, doğrusal olmayan bir öngörülü kontrol (predictive control) yaklaşımı tasarlanmış ve farklı yol-yük koşullarında kapsamlı şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, sadece yönlendirme (lateral) veya sadece hız/ivme (longitudinal) kontrolüne odaklanan yöntemlerin yüksek hız veya keskin viraj gibi uç koşullarda yetersiz kalabileceği gözleminden yola çıkarak, bu iki kontrol eylemini aynı çerçevede bütünleştirmektir. Tez sürecinde elde edilen deneysel ve kuramsal bulgular, geliştirilen kontrol yapısının güvenlik, konfor ve takip doğruluğu bakımından önemli kazanımlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Öncelikle, entegre kontrol tasarımının teorik çerçevesi irdelenmiştir. Geleneksel yöntemlerde, taşıtın direksiyon açısı ile boylamsal hızı birbirinden bağımsız biçimde düzenlenmekte, oysa gerçek sürüşte bu iki etki birbirinden ayrı tutulamayacak kadar iç içe geçmektedir. Örneğin, dar bir virajın yüksek hızla alınması hem yanal sapma riskini hem de taşıtın kayma olasılığını artırmakta, bu da yalnızca direksiyon hareketleriyle çözülemeyecek stabilite sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sebeple tezde, taşıt dinamiklerine dair doğrusal olmayan bir model tercih edilmiş ve hem yanal hem de boylamsal ivme kısıtlarını içeren, kısa ufuklu (short-horizon) bir tahmin (prediction) yapısı benimsenmiştir. Kurulan bu çerçevede, taşıt denetleyicisi gelecekteki durumu öngörerek, direksiyon açısı ve hız komutlarını eşzamanlı şekilde optimize etmektedir.

Elde edilen bulgular, özellikle yüksek hızlarda veya keskin dönüşlerde güvenli ve konforlu bir manevra kabiliyeti sağlayabilmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Yanal ve boylamsal ivme limitleri gözetilerek tasarlanan kontrol yasası, kullanıcının hissedeceği yüksek ivme değişimlerini sınırlandırmakta ve taşıtın şerit dışına çıkma ya da savrulma riskini belirgin ölçüde azaltmaktadır. Böylece, sürüş konforu ve güvenliği arasında çoğu zaman zıt yönde etki eden iki hedef, bütünleşik kontrol yaklaşımıyla dengelenebilmektedir. Özellikle geleneksel kontrol yöntemleriyle (yalnızca direksiyon veya yalnızca sabit hız kontrolü) karşılaştırıldığında, önerilen

yapının hem yanal hatada azalma hem de ivme profilinde daha yumuşak geçişler sağladığı gözlenmiştir.

Buna ek olarak, artan işlemci gücü ve sensör teknolojisindeki gelişmeler, bu tür entegre ve gerçek zamanlı hesaplama gerektiren yöntemleri uygulamada daha erişilebilir hâle getirmektedir. Geçmişte, doğrusal olmayan model öngörülü kontrol yöntemlerinin anlık çözümü ve karar üretmesi, gömülü sistemlerde kayda değer bir hesaplama maliyeti oluşturmaktaydı. Ancak güncel otomotiv elektronik üniteleri (ECU'lar) ve çok çekirdekli işlemcilerin yaygınlaşmasıyla, daha karmaşık taşıt modellerinin dahi hızla işlenmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu durum, kısa ufuklu kontrol yaklaşımıyla birleştirildiğinde tezde geliştirilen yöntemin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini de yükseltmektedir.

Gerçek yol koşullarında, farklı sürtünme değerlerine sahip zeminlerde (ıslak, buzlu veya çakıllı yol vb.) veya yüksek hızda değişen trafik senaryolarında (ani şerit değiştirme, engel etrafından dönme vb.) kontrol performansının korunması kritik bir ihtiyaçtır. Bu tezde sunulan yaklaşım, konfor ve güvenliği önceleyen bir maliyet fonksiyonu ile direksiyon ve hız emirlerini aynı anda optimize etmektedir. Yanal ve boylamsal ivme limitleri sayesinde, aşırı agresif manevraların engellenmesi ve lastik ömrünün korunması da dolaylı bir kazanım hâline gelmektedir.

Öte yandan, kontrolcü tasarımının kapsamını genişletmek adına gelecekte yapılabilecek çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunlar arasında:

- Daha kapsamlı lastik modelleri ve sürüş yüzeyi etkileri: Özellikle yüksek slip açıları veya zorlayıcı manevralarda, lastik kuvvetlerinin lineer varsayımlardan sapması belirginleşmektedir. Bu tip senaryoları kapsayan daha gelişmiş ve belirsizlikleri tolere edebilen bir modelleme, gerçekçi sürüş koşullarında performansı iyileştirebilir.
- Çoklu taşıt etkileşimleri (platooning, çarpışma kaçınma): Entegre kontrol sayesinde taşıtların birbirine göre konum, hız ve şerit koordinasyonunu sağlama gibi konularda da yararlı olabilir. Örneğin, konvoy hâlindeki taşıtlarda (platoon), entegre kontrol sayesinde takip mesafelerini ve yanal konumu aynı anda düzenlemek mümkün olacaktır.
- Saha testleri ve donanım üzeri deneyler: Gömülü sistemlerde gerçekleştirilerek, kontrolcü algoritmasının gerçek taşıtlarda farklı sürücü profilleri ve trafik senaryolarına uyarlanabilirliği incelenmelidir.
- Pure Pursuit ve önerilen kontrolcüde yer alan ileri-bakış (preview) parametresi, mevcut LQR/Stanley yapılarında bulunmadığından kıyaslama tam adil değildir.

Gelecekte LQR yöntemine ileri bakma mesafesi eklendiğinde dengeleyici performans artışı beklenmektedir.

- Bu tezde $R = \mathbf{0}$ seçimi, kontrol işaretlerini cezalandırmayarak santimetre düzeyinde yol hatası elde edilmesini sağlamıştır. Literatür, $R > 0$ durumunda takip hatasının artacağını, ivme ve direksiyon salınımlarının ise azalacağını bildirmektedir. Sistematik bir $R = \alpha I$ taraması önerilmektedir
- Direksiyon, fren ve tork dağıtım mekanizmalarının ikinci dereceden transfer fonksiyonlarıyla modellenmesi, hidrolik–elektromekanik aktüatörlerin gerçek tepki sürelerini yakalamayı sağlayacak; kontrolcü performanısının doğrulanmasına imkân tanıyacaktır.

Sonuç olarak, bu tezdeki çalışmalar, otonom taşıtların entegre hız ve direksiyon kontrolünü gerçekçi kılan önemli bir adım niteliğindedir. Doğrusal olmayan öngörülü kontrol mimarisi sayesinde, hem yanal hem de boylamsal ivme kısıtlarının gözetilmesiyle elde edilen sürüş deneyimi, geleneksel tek-yönlü (yalnızca yanal veya yalnızca boylamsal) metotlara göre daha tatmin edici bir performans sergilemektedir. Sürekli artan işlemci gücü ve sensör doğruluğu düşünüldüğünde, bu tür bütünleşik ve öngörülü yaklaşımların yakın gelecekte hem binek otomobiller hem de ticari taşıt filoları için standart hâle gelmesi beklenebilir.

KAYNAKÇA

[1] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*, 2nd. Springer, 2012.

[2] D. M. Bevly, J. Ryu C. C. Wilson, *Automated driving and advanced driver assistance systems*. Springer, 2016.

[3] P. Ioannou Z. Xu, *Intelligent transportation systems: Theory and practice*. CRC Press, 2013.

[4] TÜİK, *Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2023*, https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2023-53479, Yayımlanma Tarihi: 16 Mayıs 2024, Saat: 10:00, Sayı: 53479. (Erişim Tarihi: 26 Ocak 2025), 2024.

[5] European Commission, *EU Transport in Figures — Statistical Pocketbook*, https://transport.ec.europa.eu/facts-funding/studies-data/eu-transport-figures-statistical-pocketbook/statistical-pocketbook-2024_en, (Erişim Tarihi: 25 Ocak 2025), 2021.

[6] J. Ackermann, *Robust control for automotive applications*. Springer, 1999.

[7] Y. Chen, C. Lv, S. Li, Y. He X. Cao, "Adaptive sliding mode lateral control for intelligent vehicles based on a sparse cerebellar model articulation controller," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 139, s. 106 613, 2020.

[8] P. Falcone, F. Borrelli, H. Tseng, J. Asgari D. Hrovat, "A linear time varying MPC approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems," *Mechatronics*, c. 18, no. 7, ss. 349–368, 2008.

[9] Y. Zhang, Z. Sun D. Cao, "Robust gain-scheduling steering control for vehicle lane keeping," *Vehicle System Dynamics*, c. 53, no. 1, ss. 37–52, 2015.

[10] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE International, 2021. erişim adresi: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/.

[11] X. Zhang, M. Wang L. Chen, "Nonlinear integrated control of path tracking and speed control for autonomous vehicles under uncertainties," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 149, s. 107 193, 2021.

[12] H. Pacejka, *Tire and vehicle dynamics*, 2nd. Butterworth-Heinemann, 2006.

[13] E. Van Nunen, F. Borrelli, T. Keviczky, R. Babuska B. De Schutter, *Robust predictive control for vehicle steering using LMIs*. 2007, c. 40, ss. 240–245.

[14] K. Berntorp, "Path planning and integrated collision avoidance for autonomous vehicles," *European Journal of Control*, c. 45, ss. 141–154, 2018.

[15] Y. Huang, Z. Sun Z. Hu, "Adaptive integrated lateral and longitudinal control for intelligent vehicles using online parameter and state estimation," *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, c. 4, no. 2, ss. 85–97, 2021.

[16] K. Liang, J. Mårtensson K. H. Johansson, "When is it fuel efficient for a heavy duty vehicle to catch up with a platoon?" *IFAC-PapersOnLine*, IFAC, c. 49, 2016, ss. 289–294.

[17] Y. Guo, J. Cao, Z. Zhang E. Osetrov, "Adaptive cruise control with safety spacing for rear-end collision avoidance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 60, ss. 198–210, 2015.

[18] H. Xu, K. Li R. Bucknall, "Nonlinear predictive cruise control to improve vehicle fuel economy," *IFAC Proceedings Volumes*, IFAC, c. 45, 2012, ss. 136–141.

[19] S. Park, J. Lee S. Cho, "Eco-driving adaptive cruise control with model predictive approach for real-time application," *IEEE Access*, c. 7, ss. 120 452–120 463, 2019.

[20] R. Mo, Y. Luo Y. Liu, "Hierarchical control of vehicle lateral-longitudinal integrated dynamics with tire force allocation," *Mechanism and Machine Theory*, c. 152, ss. 103–115, 2020.

[21] PARTS, *Updated ADAS Penetration Report*, `https://www.mitre.org/sites/default/files/2024-09/PR-24-2614-PARTS-Market-Penetration-Advanced-Driver-Assistance-Systems.pdf`, Erişim Tarihi: 10 Ekim 2023, 2023.

[22] P. Lu, "Nonlinear predictive controllers for continuous systems," *International Journal of Control*, c. 71, no. 5, ss. 801–818, 1994.

[23] P. Ioannou C. Chien, "Autonomous intelligent cruise control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, c. 42, no. 4, ss. 657–672, 1993.

[24] L. Xiao F. Gao, "Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, c. 12, no. 4, ss. 1184–1194, 2011.

[25] H. Wang, Y. Guo W. Li, "Robust integrated chassis control for electric vehicles with uncertain tire friction," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 25, no. 2, ss. 845–855, 2020.

[26] B. Zhou, S. Ren S. Li, "Nonlinear integrated control for active front steering and direct yaw moment control," *Vehicle System Dynamics*, c. 59, no. 10, ss. 1531–1555, 2021.

[27] R. Hult, "Enhancing vehicle safety in trajectory planning and control via robust optimization," *Vehicle System Dynamics*, c. 56, no. 5, ss. 763–786, 2018.

[28] L. Zhang, L. Qu, Y. Geng S. Li, "Unified velocity planning for combined lateral and longitudinal control of autonomous vehicles in dynamic traffic," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, c. 139, s. 103 687, 2022.

[29] Z. Y. Ren, C. Q. Zhu, H. B. Zhou S. Li, "Adaptive integrated lateral and longitudinal control using sliding-mode observer for intelligent vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, ss. 1–13, 2023.

[30] Y. Chen, C. Lv, L. Li, Y. He D. Cao, "Nonlinear model predictive path following control for full-range adaptive cruising of automated vehicles," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 185, s. 109 768, 2023.

[31] Mechanical Vibration and Shock, *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Part 5: Method for Evaluation of Vibration Containing Multiple Shocks*, ISO 2631-5:2004, International Organization for Standardization, 2004.

[32] E. Dincmen T. Acarman, "Application of Vehicle Dynamics' Active Control to a Realistic Vehicle Model," *2007 American Control Conference*, 2007, ss. 200–205. doi: 10.1109/ACC.2007.4282862.

[33] *Vehicle Dynamics Terminology, SAE International Recommended Practice, SAE Standard J670_202206*, Reaffirmed June 2022, Revised January 2008, Issued July 1952, SAE International, 2022. erişim adresi: https://doi.org/10.4271/J670_202206.

[34] T. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition*. Warrendale, PA: SAE International, 2021.

[35] G. Genta, *The automotive chassis: Volume 2, System design*. Springer., 1997.

[36] M. T. Emirler, H. Wang, B. Aksun Güvenç L. Güvenç, "Automated robust path following control based on calculation of lateral deviation and yaw angle error," *ASME Dynamic Systems and Control Conference*, Columbus, Ohio, USA, 2015, ss. 1–8.

[37] M. T. Emirler, "Advanced Control Systems for Ground Vehicles," YÖK Tez Merkezi, Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering ve Technology, 2023.

[38] J. M. Snider, "Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking," 2009. erişim adresi: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17512121.

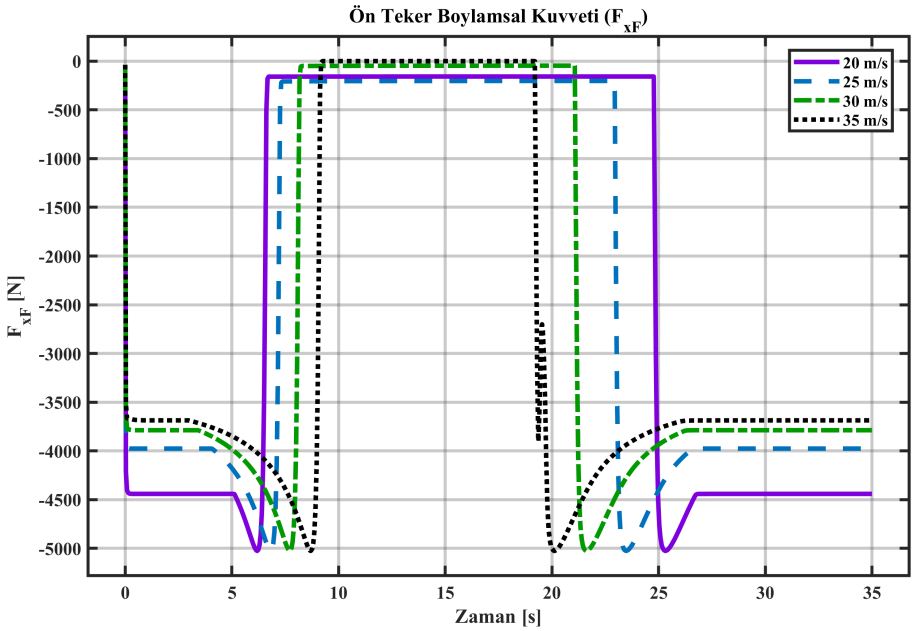
[39] S. Thrun ve diğ., "Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge," içinde *The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race*, M. Buehler, K. Iagnemma S. Singh, ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, ss. 1–43, isbn: 978-3-540-73429-1. doi: 10.1007/978-3-540-73429-1_1. erişim adresi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-73429-1_1.

[40] M. N. Yazar, Z. A. Erbudak, A. Bay, İ. Dost A. Semiz, "Path Tracking Methods Employed in Lane Centering Systems," *2022 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*, 2022.

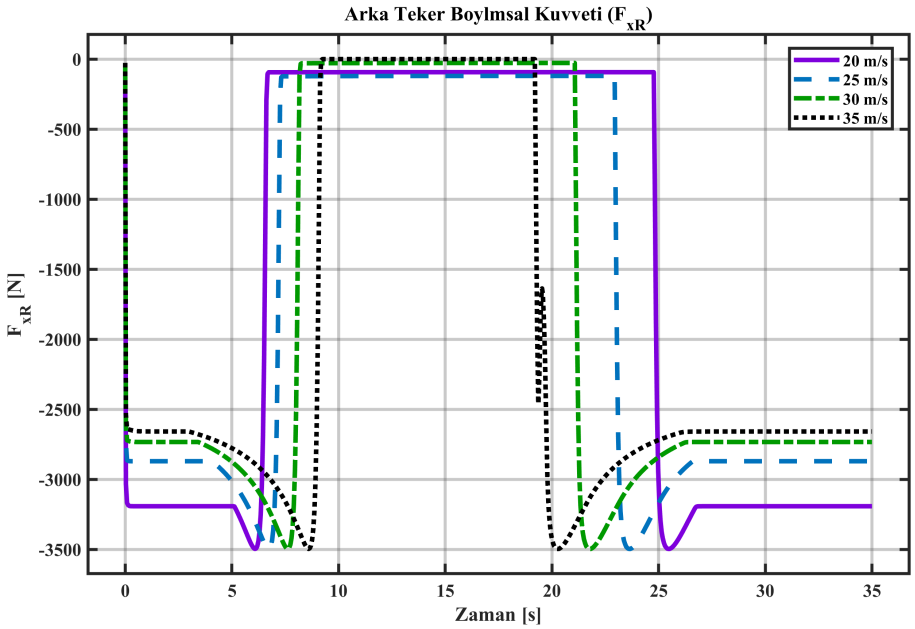
A
EK BÖLÜMÜ BAŞLIĞI

A.1 Teker Kuvvetleri ve Yanal Hız Çıktıları

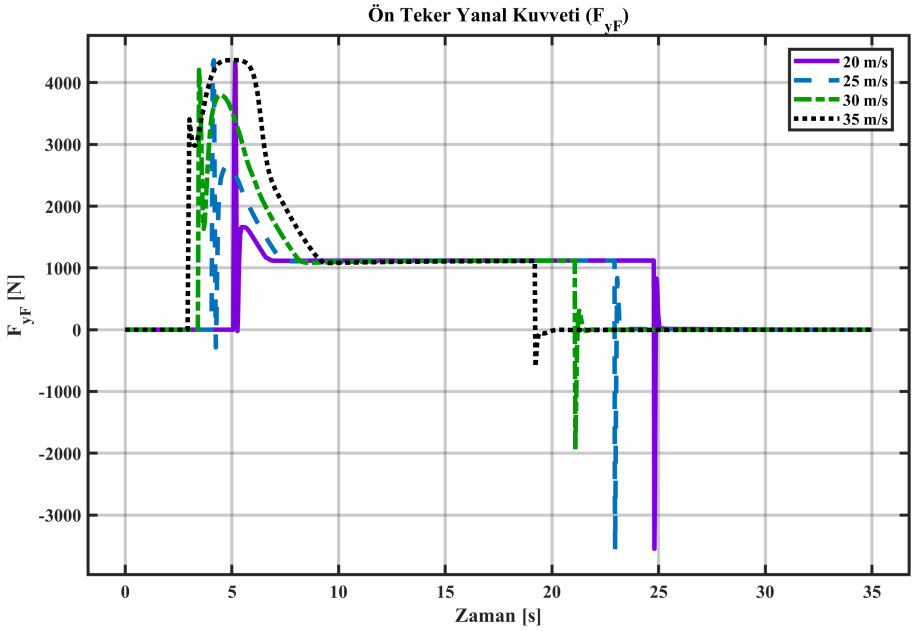
Senaryo 1 – Orta Eğrilik ($R = 100$ m)



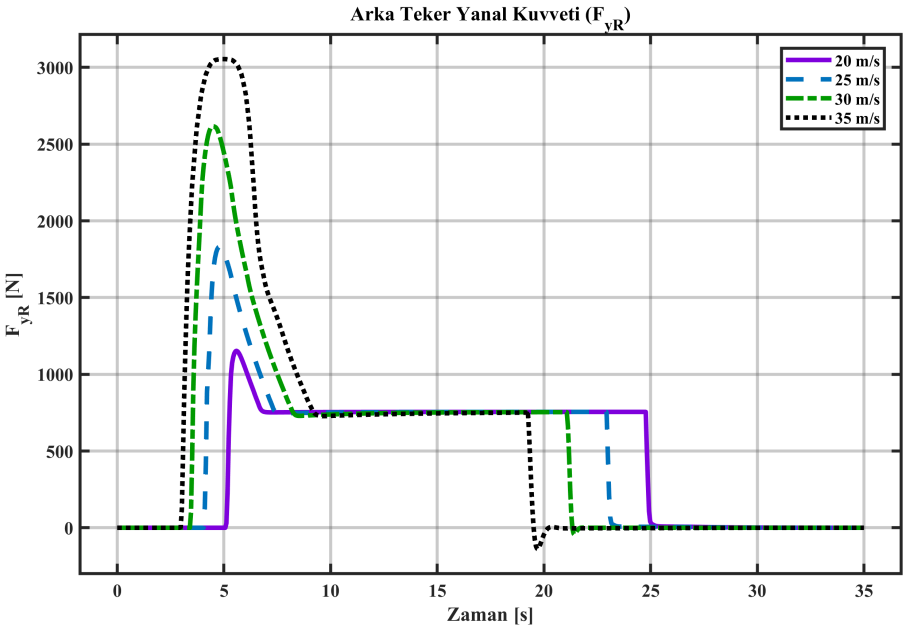
Şekil A.1 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (R = 100 m)



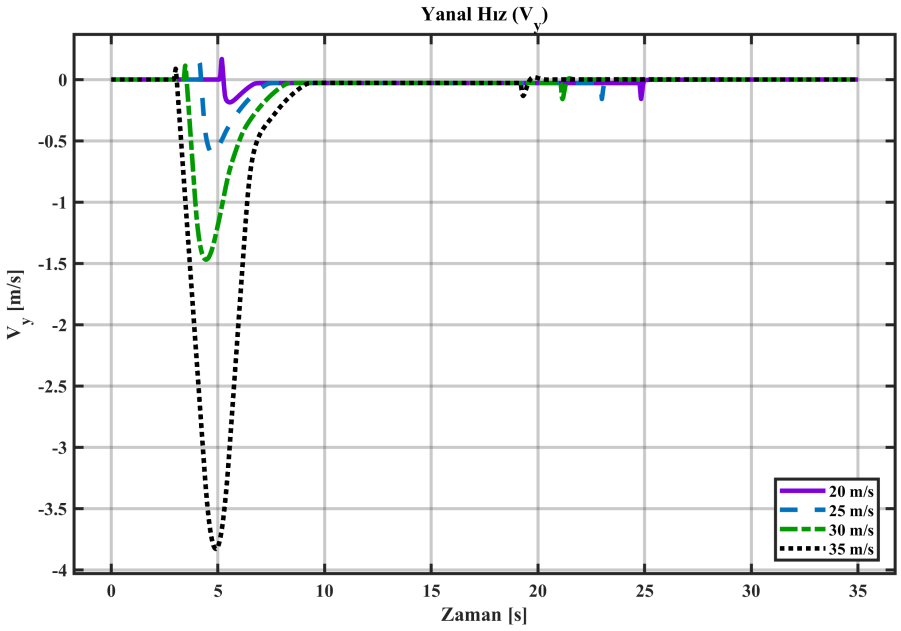
Şekil A.2 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (R = 100 m)



Şekil A.3 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (R = 100 m)

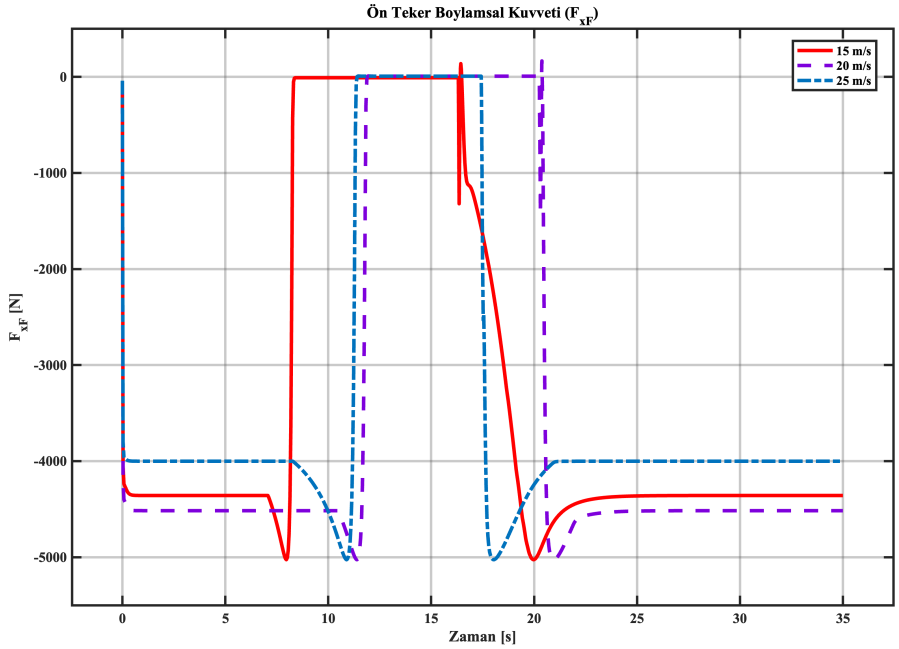


Şekil A.4 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (R = 100 m)

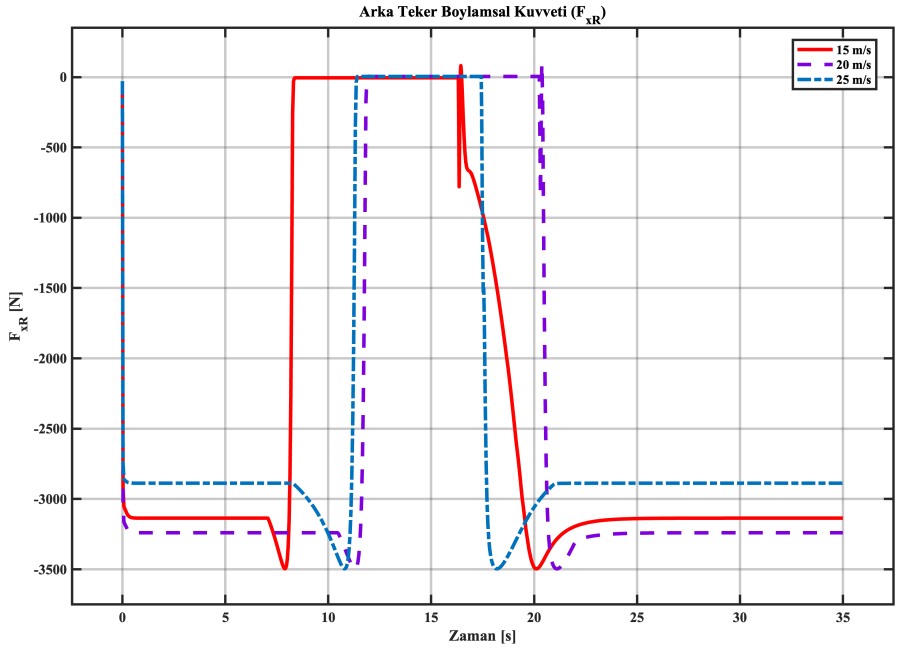


Şekil A.5 Önerilen öngörülü kontrol yöntemi – Taşıt yanal hızı v_y (R = 100 m)

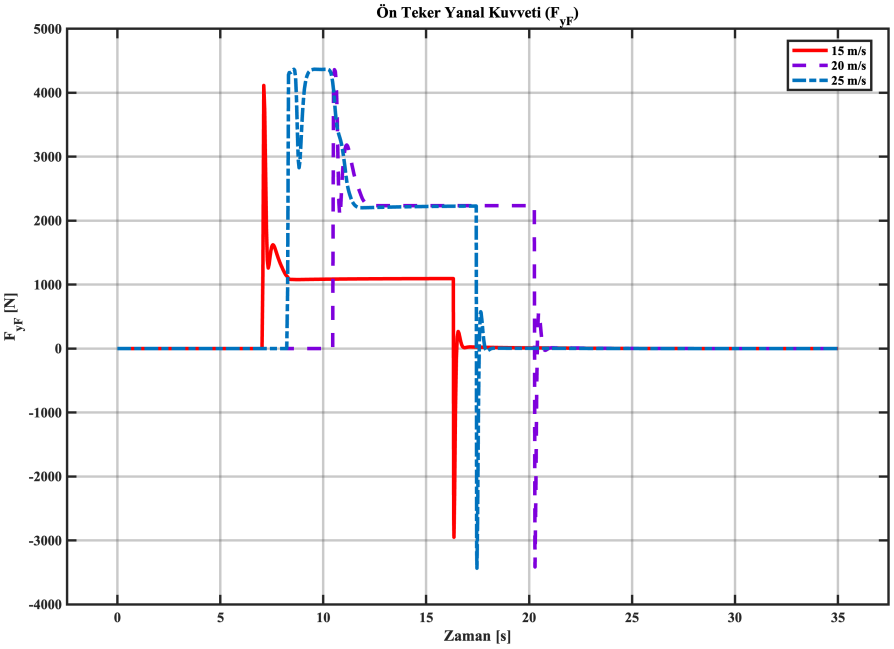
Senaryo 2 – Keskin Eğrilik ($R = 50$ **m)**



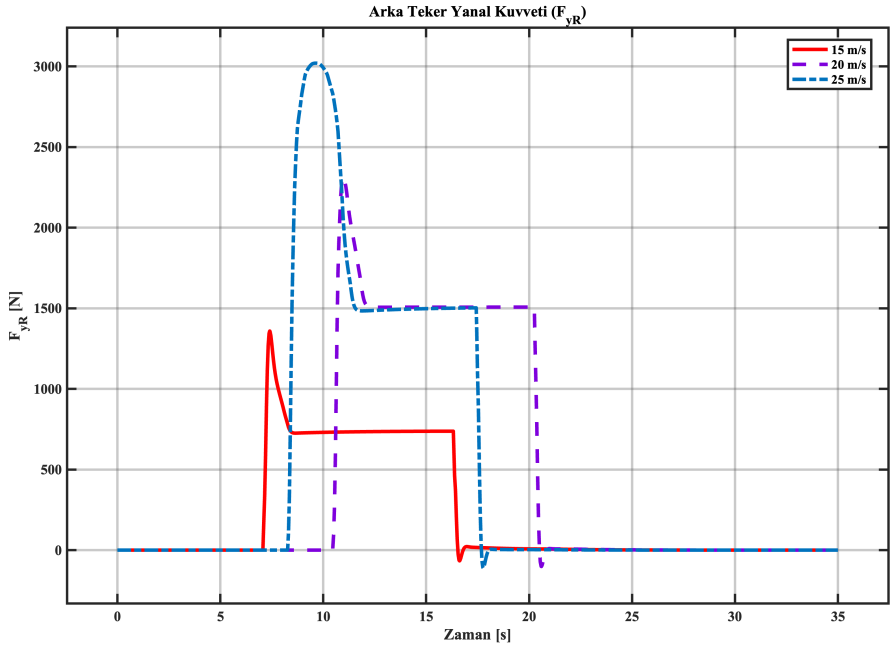
Şekil A.6 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (R = 50 m)



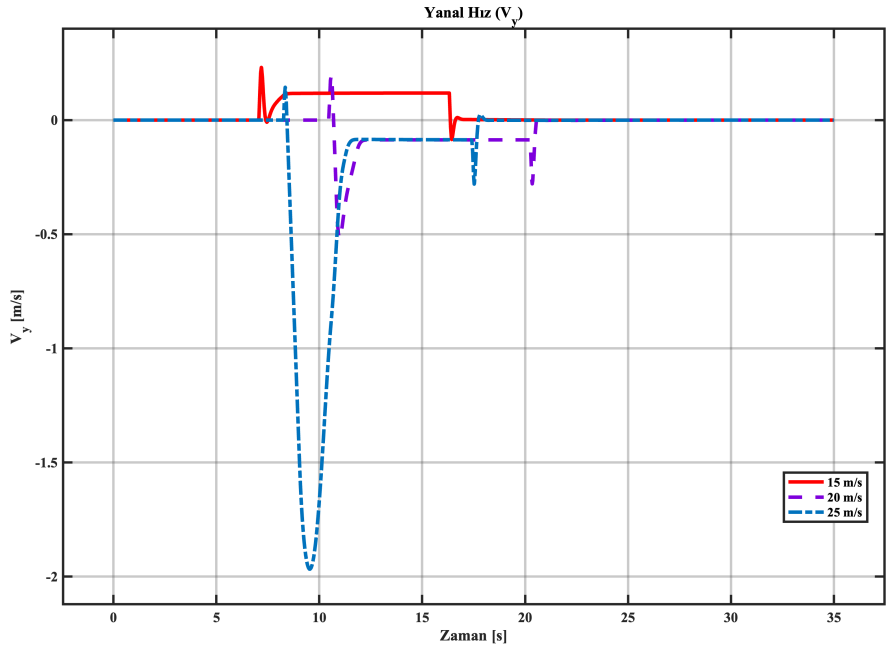
Şekil A.7 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (R = 50 m)



Şekil A.8 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (R = 50 m)

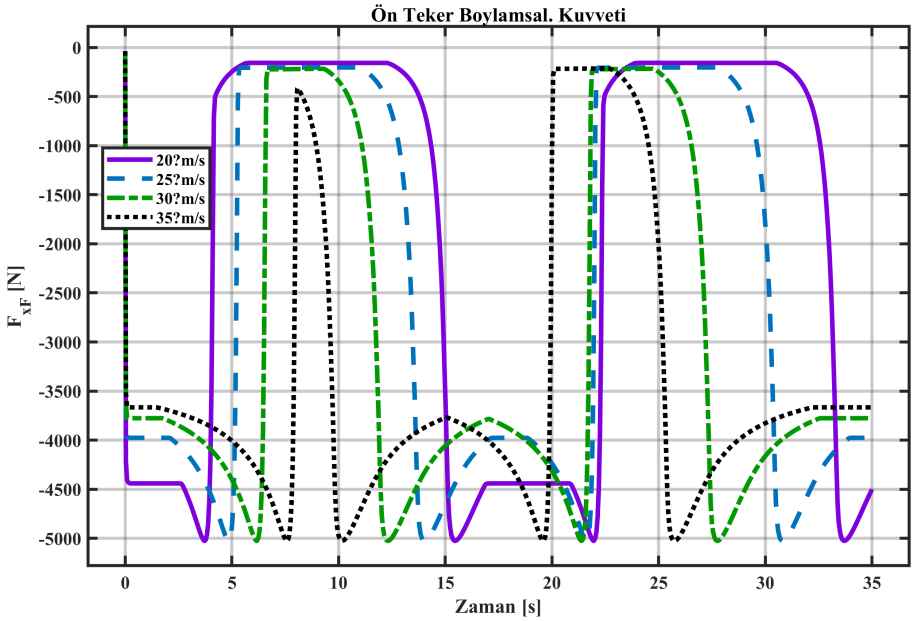


Şekil A.9 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (R = 50 m)

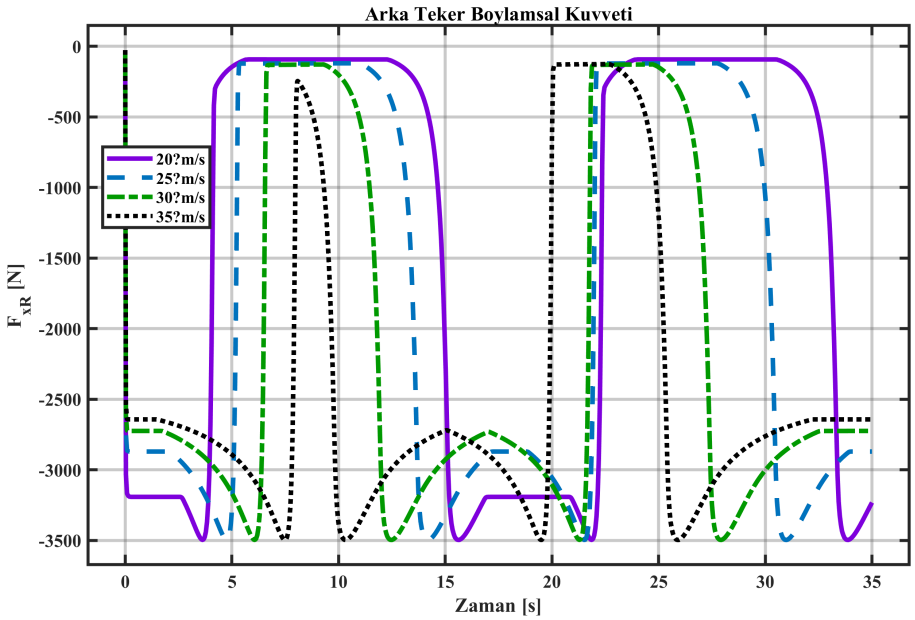


Şekil A.10 Taşıt yanal hızı v_y (R = 50 m)

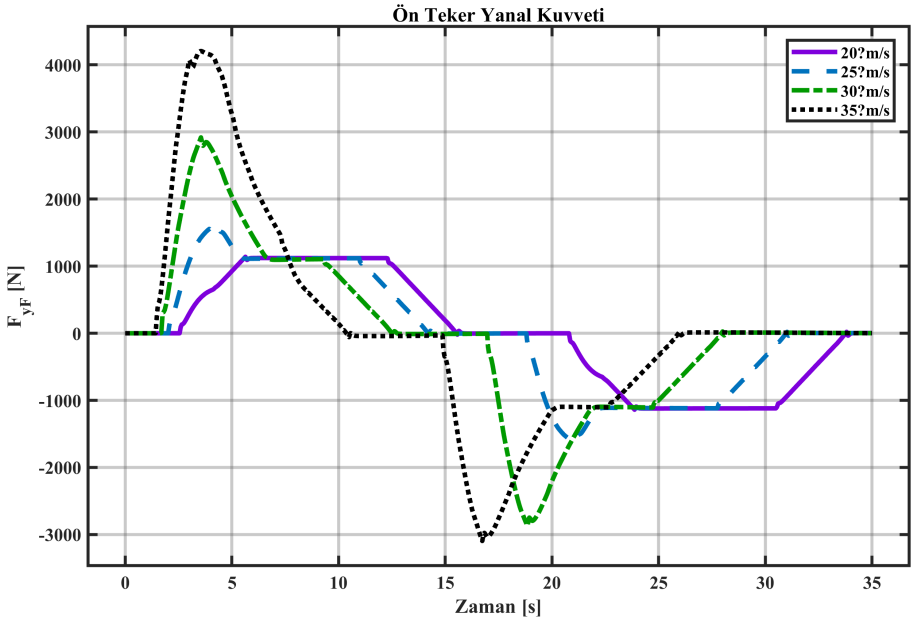
Senaryo 3 – Değişken Eğrilik



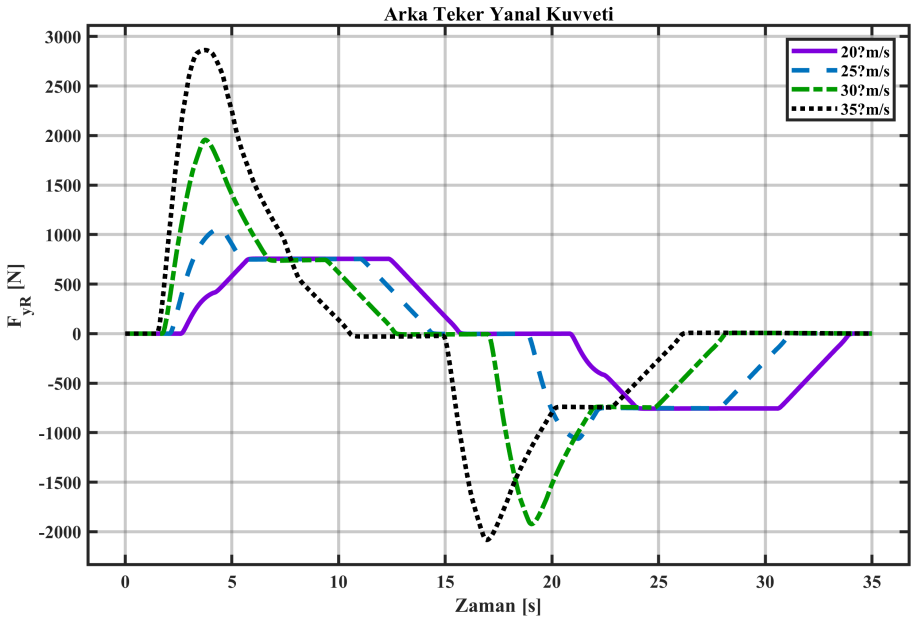
Şekil A.11 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (değişken ρ)



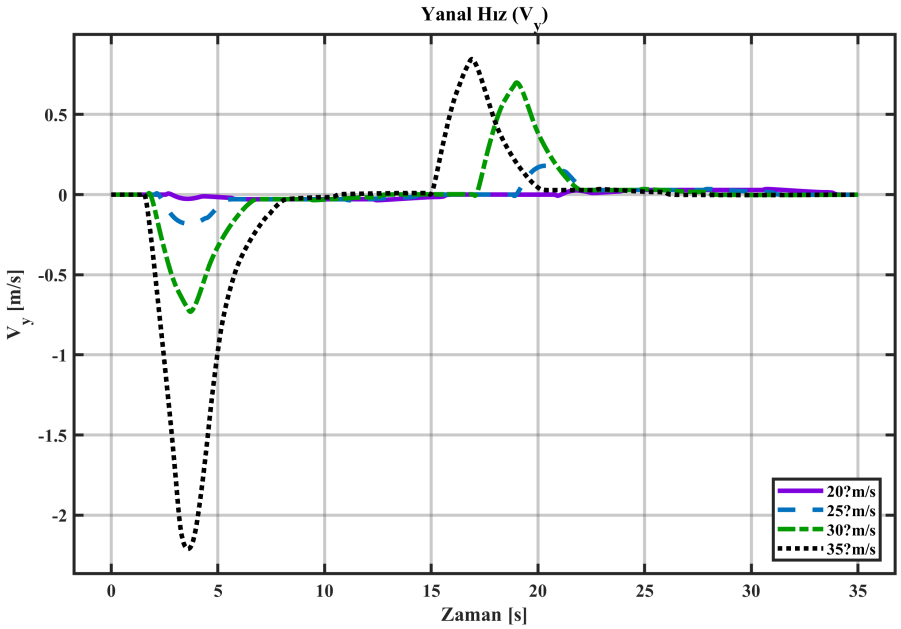
Şekil A.12 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (değişken ρ)



Şekil A.13 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (değişken ρ)



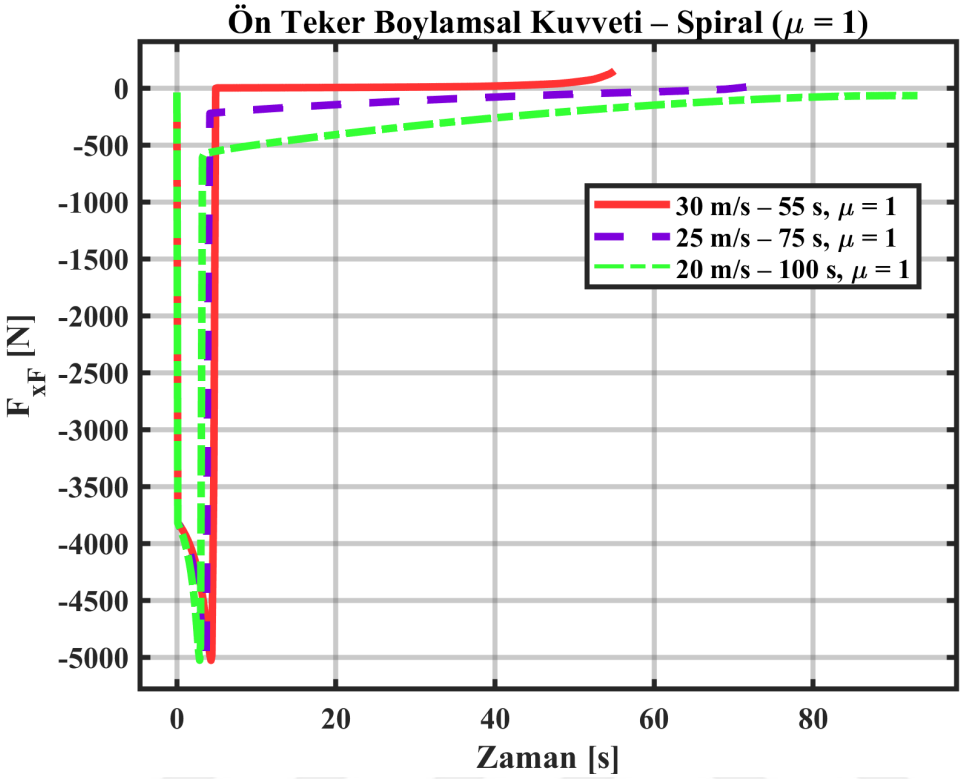
Şekil A.14 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (değişken ρ)



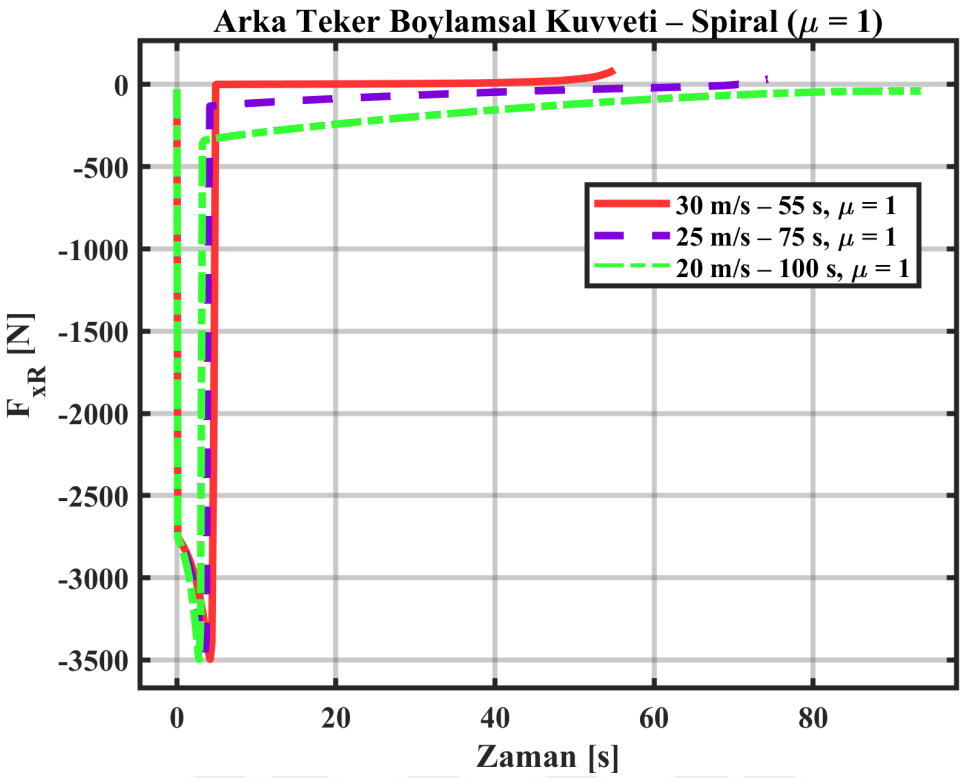
Şekil A.15 Taşıt yanal hızı v_y (değişken ρ)

Senaryo 4 – Spiral Eğrilik

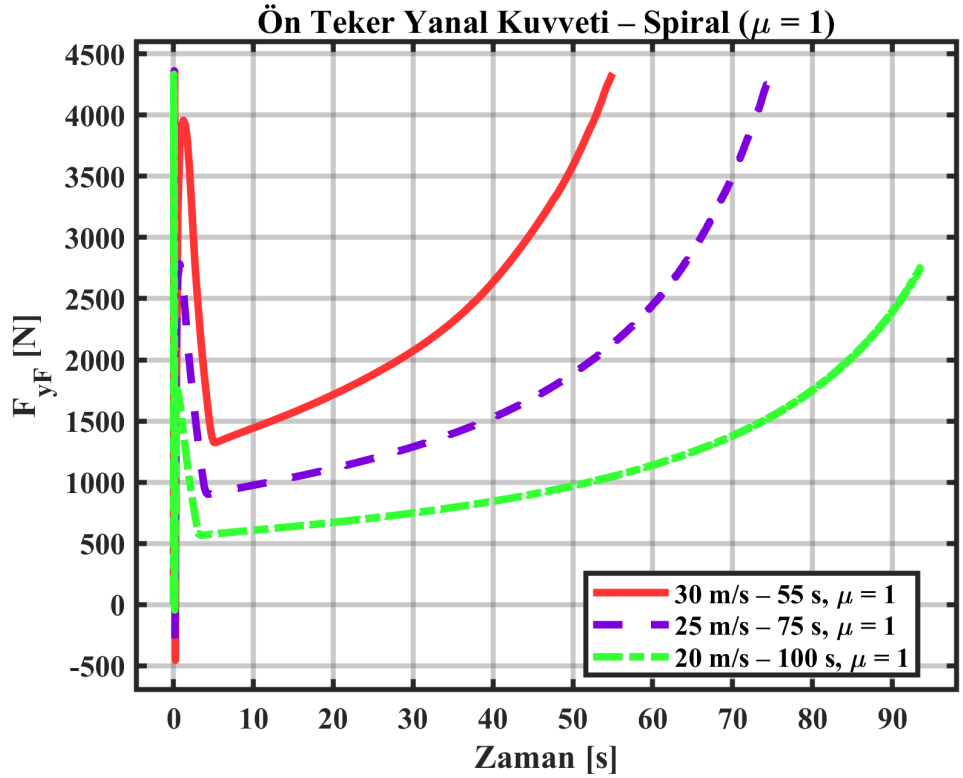
(a) Yüksek Sürtünme $\mu = 1$



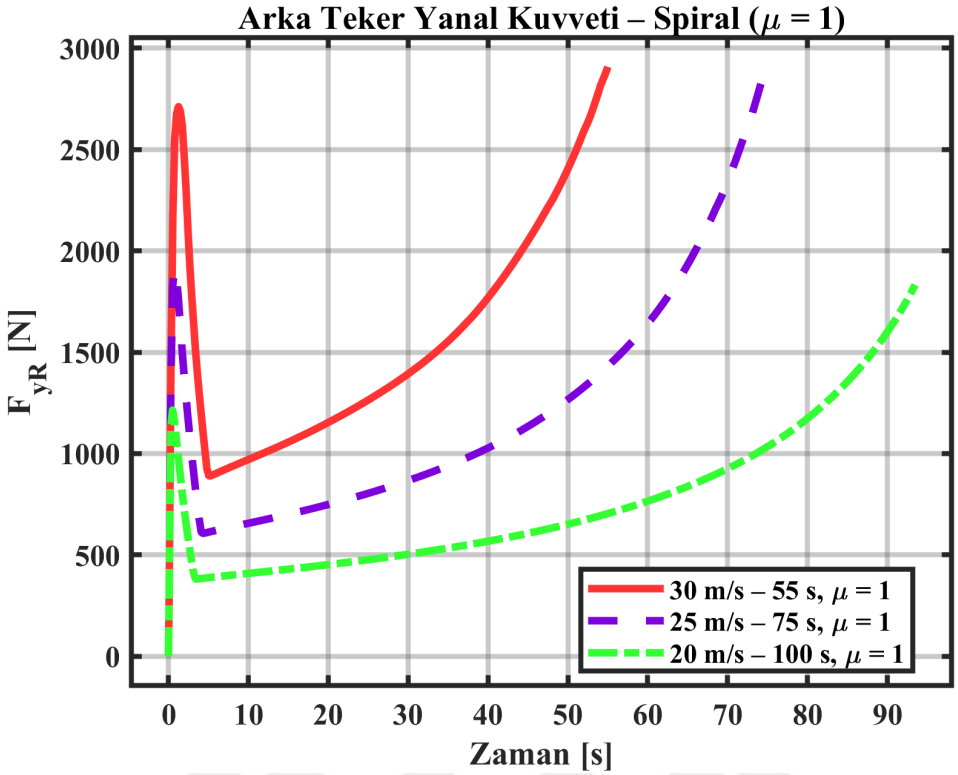
Şekil A.16 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (spiral, $\mu = 1$)



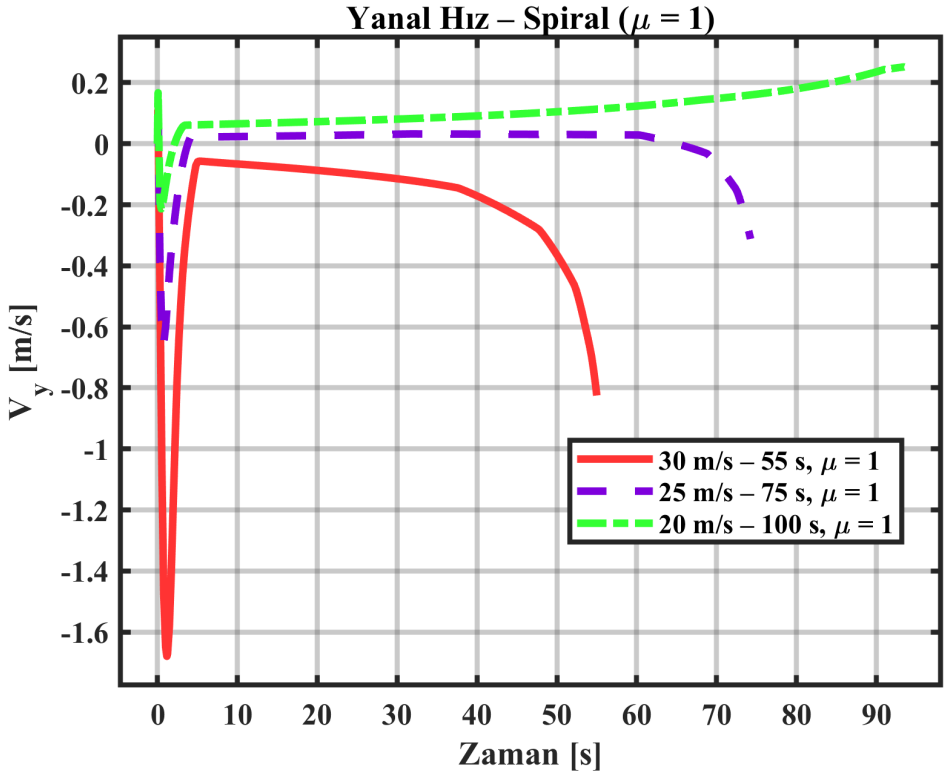
Şekil A.17 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (spiral, $\mu = 1$)



Şekil A.18 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (spiral, $\mu = 1$)

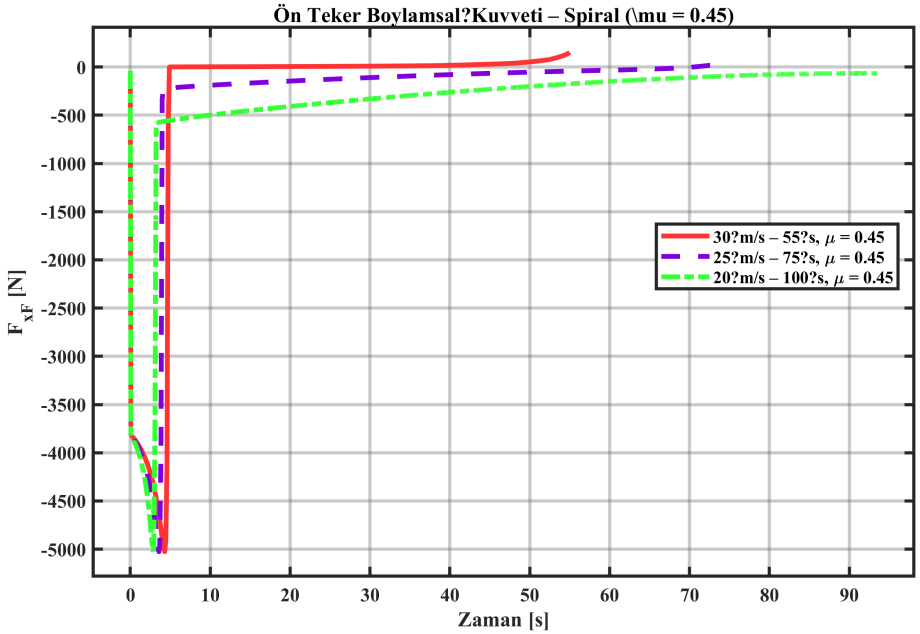


Şekil A.19 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (spiral, $\mu = 1$)

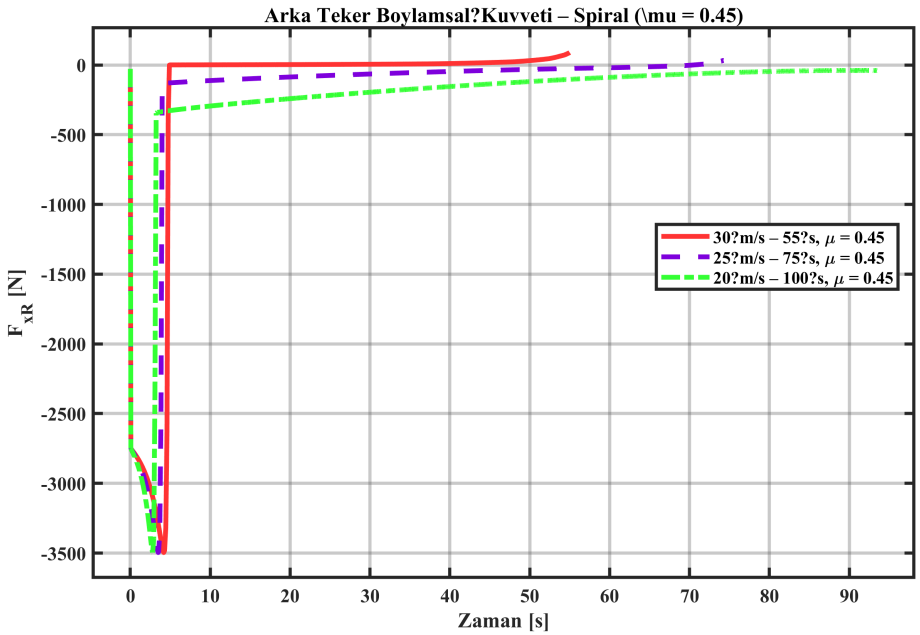


Şekil A.20 Taşıt yanal hızı v_y (spiral, $\mu = 1$)

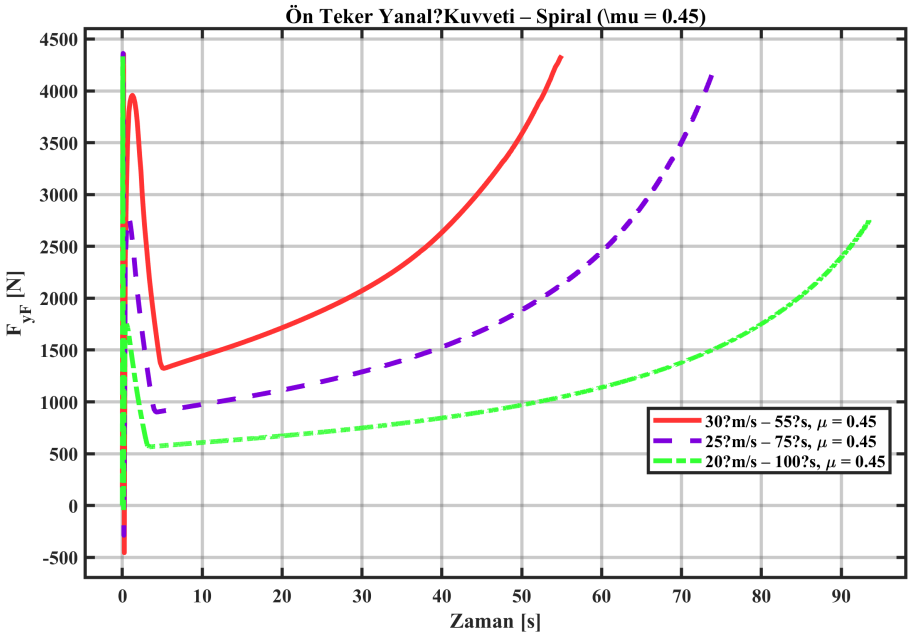
(b) Düşük Sürtünme $\mu = 0.45$



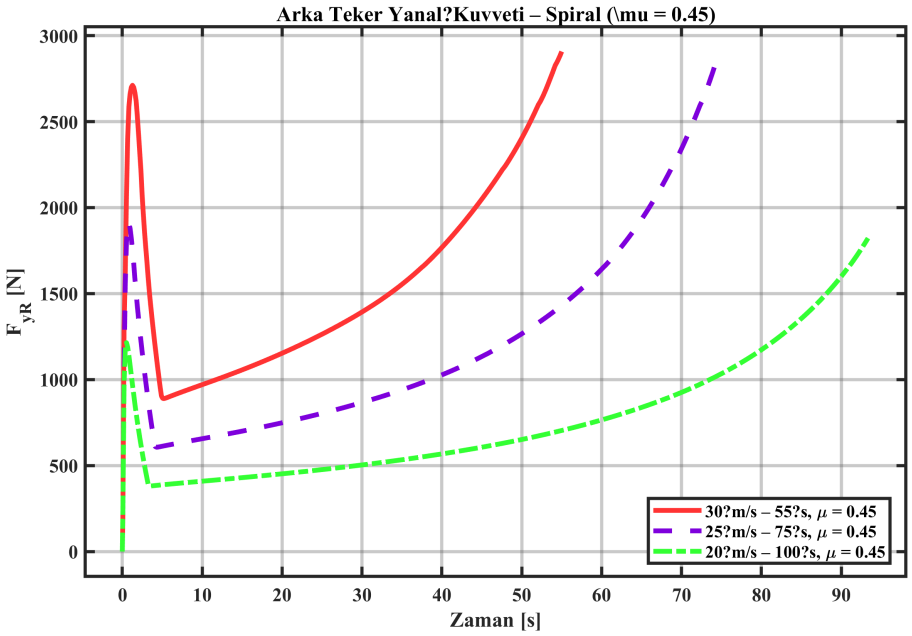
Şekil A.21 Ön teker boylamsal kuvvet F_{xF} (spiral, $\mu = 0.45$)



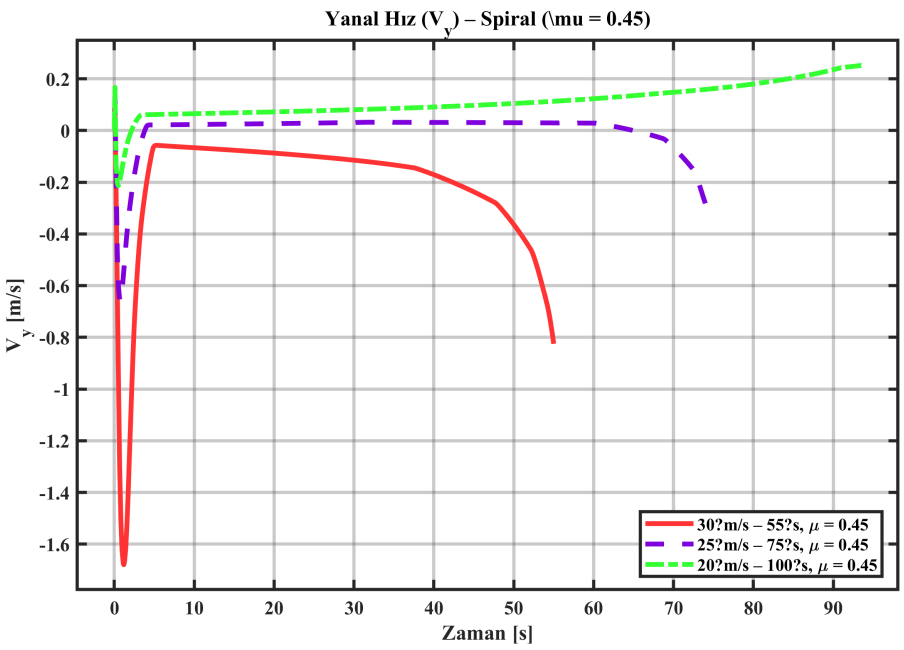
Şekil A.22 Arka teker boylamsal kuvvet F_{xR} (spiral, $\mu = 0.45$)



Şekil A.23 Ön teker yanal kuvvet F_{yF} (spiral, $\mu = 0.45$)



Şekil A.24 Arka teker yanal kuvvet F_{yR} (spiral, $\mu = 0.45$)



Şekil A.25 Taşıt yanal hızı v_y (spiral, $\mu = 0.45$)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. İ. A. Bay and M. S. Arslan, Development of Non-Linear Predictive Control for Autonomous Vehicles with Integrated Lateral and Longitudinal Control, 6. International Boğaziçi Scientific Research Congress, 2024, pp. 1306–1315.