



Design and performance analysis of a novel coordinated intervention configuration for lane departure assistance system

Emir Kutluay^{1*}, Mesut Düzgün², Morteza Dousti¹

¹Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara, 06800, Turkey

²Automotive Engineering Department, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

Highlights:

- Coordination of front axle steering with rear axle braking for increasing the LKAS performance
- Comparison of only steering, only braking with coordinated intervention method
- System performance is examined with step response tests

Keywords:

- LKAS
- Lateral Control
- Step Response
- Wheel Force Potential

Article Info:

Research Article
Received: 26.11.2019
Accepted: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.651255

Acknowledgement:

Hacettepe University
Gazi University
TÜBİTAK

Correspondence:

Author: Morteza Dousti
e-mail:
morteza.doosti@gmail.com
phone: +90 537 549 9976

Graphical/Tabular Abstract

Although considerable amount of literature has been published on steering angle and braking torque intervention configurations for Lane Keeping Assistance System (LKAS), few studies have focused on coordinated methods. This paper proposes a coordinated steering and braking configuration as an intervention method for LKAS. A Linear-Quadratic Regulator (LQR) is designed for different configurations and integrated in non-linear CarMaker modelling environment using Matlab software. Comparisons between the configurations were made using constant radius of curvature, angular and lateral distance step response tests (Figure A).

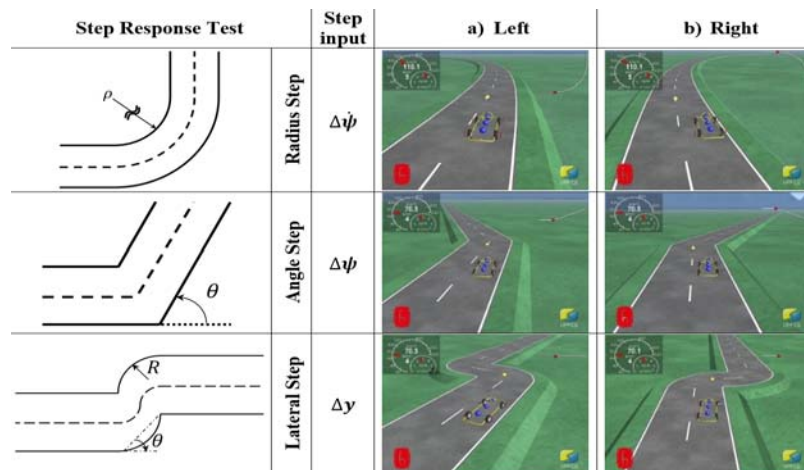


Figure A. Yaw rate, yaw angle and lateral distance step response experiments

Purpose: This study aims to examine the performance of lane departure intervention configurations of only steering (S), only braking (B) with the proposed coordinated steering and braking (S+B) method.

Theory and Methods:

A LQR controller is designed using single track vehicle model. In order to observe the performance of the system yaw rate, yaw angle and lateral distance step response tests were prepared. Simulations were realized using Simulink and CarMaker software.

Results:

Test results show that the (S+B) control configuration provided the best performance with the lowest control input compared to the other two configurations. (S+B) intervention configuration improved the lane tracking system's response time by at least 16% and 20% in constant radius of curvature and lateral distance tests, respectively. In addition, the angular step response test's performance is increased by at least 8 degrees.

Conclusion:

Coordinated Steering angle with braking torque applied to the rear wheels (depends on the situation to selected wheel) utilizes the lateral force potential of three wheels and increases the system robustness and performance in the lateral control of the vehicle.



Şerit takip sistemi için yenilikçi eşgüdümlü müdahale konfigürasyonunun tasarımı ve performans analizi

Emir Kutluay^{1*}, Mesut Düzgün², Morteza Dousti¹

¹Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06500 Teknikokullar, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- LKAS performansını eşgüdümlü direksiyon ve frenleme müdahale ile artırılması
- Sadece direksiyon ve sadece frenleme ile eşgüdümlü müdahale yöntemlerinin karşılaştırılması
- Sistem performansı basamak cevabı testleri ile sınanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.11.2019
Kabul: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.651255

Anahtar Kelimeler:

Şerit takip sistemi,
savrulma,
müdahale konfigürasyonu,
eşgüdümlü direksiyon,
fren müdahalesi

ÖZ

Bu çalışmada şerit takip sistemleri için yenilikçi bir müdahale konfigürasyonu sunulmuştur. Amacı taşıtın yanal kontrol gübüzlüğünü arttırmak olan bu yeni konfigürasyon, ön aksa verilen direksiyon açısı ile eşgüdümlü olmak üzere taşıtın arka tekerleklerinden birine uygulanan frenleme torku ile üç tekerleğin kuvvet potansiyelinden faydalanmaktadır. Bunun için tek izli taşıt modeli kullanılarak bir Doğrusal Karesel Regülatör (LQR) kontrolcüsü tasarlanmış, Simulink ve CarMaker programları kullanılarak simülasyon ortamında test edilmiştir. Sistemin performansını gözlemek amacıyla savrulma hızı, savrulma açısı ve yanal mesafe değişkenleri test girdisi olarak kullanılmıştır. Geliştirilen müdahale konfigürasyonunun performansı yalnızca direksiyon ve yalnızca fren konfigürasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, direksiyon ve fren kontrol konfigürasyonu en düşük kontrol girdisini vermeyi başarmış, diğer iki konfigürasyona kıyasla en yüksek performansı göstermiştir. Bu yeni konfigürasyon, şerit takip sisteminin tepki süresinde önemli ölçüde geliştirme sağlamaktadır.

Design and performance analysis of a novel coordinated intervention configuration for lane departure assistance system

HIGHLIGHTS

- Coordination of front axle steering with rear axle braking for increasing the LKAS performance
- Comparison of only steering, only braking with coordinated intervention method
- System performance is examined with step response tests

Article Info

Research Article
Received: 26.11.2019
Accepted: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.651255

Keywords:

Lane keeping assistance,
yaw,
intervention configuration,
coordinated steering,
braking intervention

ABSTRACT

In this study a novel intervention configuration for lane keeping assistance system is presented. The goal of the new configuration is to increase the robustness of the lateral control of the vehicle through utilizing the force potential of three wheels by applying braking torque to one of the rear wheels in coordination with a steering angle input to the front axle. An LQR (Linear-Quadratic Regulator) controller is designed using a single-track vehicle model and then tested in simulation environment using Simulink and CarMaker software. In order to observe the performance of the system three test cases were designed in which yaw rate, yaw angle and lateral error are used as test inputs. Performance of the proposed intervention configuration was compared with only steering and only braking configurations. Test results show that the coordinated steering and brake control configuration provided the best performance with the lowest control input compared to other two configurations. The new intervention configuration improved the response speed of the lane keeping considerably.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / Corresponding Author / Authors: kutluay@hacettepe.edu.tr, mduzgun@gazi.edu.tr,

*morteza.doosti@gmail.com / Tel: +90 537 549 9976

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye istatistik kurumu [1] raporuna göre trafik kazalarının büyük bir kısmı sürücünün sürüş esnasında yaptığı hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu kazaların sayısını düşürmek için sürücü ile eşgüdümlü halde çalışabilen, sürüş kararlılık ve motivasyonunu düşürmeden sürücü iş yükünün azaltılmasını sağlayan sistemler geliştirilmektedir [2].

Günümüz taşıtlarında bulunan Şerit Takip Destek Sistemi (*Lane Keeping Assistance System, LKAS*) normal sürüş koşullarında, taşıtın yoldan ayrılmamasına yardım etmek amacıyla geliştirilmiş bir sürüş destek sistemidir. Şerit takip sistemleri ilk adımda Şerit Takip Uyarı Sistemi (*Lane Departure Warning System, LDWS*) olarak ortaya çıkmıştır. İstemsiz şeritten ayrılma (*Unintended Lane Departure, ULD*) durumunda bu sistem sayesinde sürücü sesli (alarm sesi), görsel (uyarı ışığı) ve/veya dokunsal (koltuk veya direksiyon titreşimi) olarak uyarılmaktadır [3]. Şerit Takip Destek Sistemi ise istemsiz şeritten çıkmaya yaklaşma veya çıkma durumunda taşıtın dinamiğine müdahale ederek taşıtın tekrar şeride dönmesini sağlamaktadır [4, 5]. Bu müdahale direksiyon açısı [6, 7], fren basıncı [8] veya çekiş torku [9] değişim ve kontrolleri ile sağlanabilmektedir. Kawazoe vd. [10], şerit destek sisteminin sürücü iş yükü üzerindeki etkisini araştırmak için bir üretim modeli üzerinde geliştirdikleri sistemi test etmişlerdir. Çalışmada hız sabitleyicisi 100 km/saat'e ayarlanarak, ikişer saat süre ile LKAS açık ve kapalı durumları için test pistinde belirli bir rotada testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sistem açıkken sürücü iş yükü yaklaşık yarıya düşürülmüştür.

Alleyne [11], 1997 yılında farklı müdahale konfigürasyonlarının performansını karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, Dört Tekerlektan Direksiyon Açısı (*Four Wheel Steering, 4WS*), Ön Akstan Direksiyon Açısı (*Front Wheel Steering*), Dört Tekerlektan Frenleme (*Four Wheel Braking, 4WB*), Ön Akstan Frenleme (*Front Wheel Braking*) ve Arka Akstan Frenleme (*Rear Wheel Braking*) konfigürasyonları incelenmiştir ve müdahale esnasında sürücü tarafından sisteme uygulanan bir girdi olmadığı varsayılmıştır. Fren eyleyicisini kullanan müdahalelerin sonuçlarına göre en iyi performans dört tekere uygulanan frenleme metodu ile elde edilmiştir. Buna karşılık bu metodun (4WB) performansının direksiyon girdisi uygulanan müdahale metodundan daha düşük olduğu görülmüştür. Ön ve arka aks tekerleklerle uygulanan fren girdisi konfigürasyonları ise neredeyse aynı performansla sahip olmuştur. Bir başka çalışmada, ön aks direksiyon müdahale konfigürasyonu, Liu vd. [12] tarafından kolonlu elektrikli direksiyon müdahale metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada tasarlanan şerit takip sistemi, viraj yarıçapı 250 metreden büyük olan virajlarda taşıtı etkin bir şekilde şeritte tutmayı başarmıştır. Bir aracın sanal ortamda ön tekerlek direksiyon açısı kontrolü ile şerit takibi Kamat [6] tarafından incelenmiştir. Ayrıca, Wu vd. [13] aktif Ön Direksiyon kontrolü ile bir müdahale kriteri geliştirmiştir. Arka aks direksiyon açısı kontrolü ile şerit takip sistemi, Williams

[7,14] tarafından 2015 yılında incelenmiştir. Önerilen kontrolcüde düşük hızlarda karşı etkili direksiyon (*counter-steer*) ve yüksek hızlarda yengeç etkili direksiyon (*crab-steer*) uygulanmıştır. Bu müdahale stratejisi ile düşük hızlarda taşıt daha yüksek manevra kabiliyeti ve daha az hata ile şerit izleme yeteneklerine sahip olmuştur. Wagner vd. [15], ön, arka, ön ve arka aks (FWS, RWS ve AWS) direksiyon müdahale konfigürasyonu stratejilerini karşılaştırmıştır. Nagai, Shino vd. [9] tarafından 2006 yılında yapılan bir araştırmada ise elektrikli taşıt dinamikleri düşünülerek doğrudan sapma momenti kontrolü (*Direct Yaw Moment Control, DYC*) girdisi ile şerit takip kontrol stratejisi araştırılmıştır. Bunun için her bir tekere küçük bir elektrik motoru yerleştirilip birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmiştir. Düz ve virajlı yolda elde edilen test ve simülasyon sonuçları tatmin edici derecede tutarlı bulunmuştur. Rödöny ve Bokor [16] bir kamyon modeli kullanarak ön tekerleği frenleyerek aracı yönlendiren kontrolcü geliştirmişlerdir. Hayakawa vd. [17] fren basıncı değişimi ile şerit takip sistem geliştirmesini araştırmışlardır. İstemsiz şeritten ayrılma durumu gerçekleştiğinde, sistem taşıtın sağ ve sol, ön ve arka tekerleklerindeki fren basınçlarını kontrol ederek taşıtı tekrar şeritte tutmaya çalışılmıştır. Fren sistemi, sol ve sağ tekerleklerinin fren basıncı değişimleri sayesinde frenleme kuvvetlerini bağımsız olarak ön ve arka akslarda kontrol edebilmekte, ancak müdahale esnasında sadece sol veya sağ tarafa fren basıncı uygulamaktadır. Direksiyon açısı ve fren basıncının bir arada kullanımı ise Bedner ve Chen [18] tarafından 2004 yılında araştırılmıştır. Burada 4WS ile Frenleme Tabanlı Taşıt Denge Artırımı (*Brake-Based Vehicle Stability Enhancement, VSE*) sistemlerinin bir arada kullanımı ile ikisinin güçlü olduğu noktalar birleştirilerek etkinliği daha yüksek bir sistem oluşturulmuştur. Falcone vd. [19] MPC kontrolcü metodunu kullanarak ön direksiyon açısını ve dört tekerlekteki frenleri bağımsız kontrol ederek belirli bir yolu en iyi şekilde takip etmeyi amaçlamışlardır. Benzer bir şekilde Wang vd. de [28] fren ve direksiyon açısı müdahale konfigürasyonlarını CarSim yazılımını kullanarak test etmişlerdir. Çalışmada bir karar mekanizması aracılığı ile fren veya direksiyon kontrolü girdisi sürücü tarafından gelen girdiye destek vererek aracı şeritte tutmaya çalışmaktadır.

İstemsiz yoldan ayrılma durumlarında şerit takibi için farklı kontrolcü metotları da araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Peng ve Tomizuka [21] araştırmasında FSLQ (*frequency-shaped linear quadratic*) kontrol metodunu uygulamışlardır. Bu çalışmada geri beslemeli ve ileri beslemeli terimlerini ön izleme denetim kontrol algoritmasına uygulamışlardır. Alleyne [11], Lineer İkinci Dereceden Regülatör (*Linear Quadratic Regulator, LQR*) kontrolcü tasarlamıştır. Burada basitleştirilmiş iki serbestlik derecesine sahip tek izli taşıt modeli kullanılarak kontrolcü tasarlanmıştır, daha sonra kontrolcüyü yedi serbestlik derecesine sahip doğrusal olmayan taşıt modeli ile test etmiştir. Mammam vd. [22], kontrolcü tasarımında tek izli model kullanmış ve yol eğriliğinin etkisini ihmal etmişlerdir. Sistem girdileri olarak sürücü torku ve yönlendirme asistanı torku kullanılmış ve

kontrolcü doğrusal matris eşitsizliği (*Linear Matrix Inequalities*, LMI) tekniği ile Lyapunov Teorisi üzerine kurulmuştur. Freeman vd. [23], taşıtın yol dışına çıkma ve yola tekrar dönme (*Vehicle Run-off-Road and Return*) kontrolü üzerine yaptıkları araştırmada optimizasyon yaparak tasarladıkları kontrolcüler ile taşıt dinamik kontrolünü incelemişlerdir. Bu çalışmada, SL (*Sliding*), LQ (*Linear Quadratic*) ve klasik kontrol teorisine dayanan kontrolcü metotları araştırılmıştır. LQ ve SL kontrolcü metotlarının, taşıt kararlılığını diğer kontrolcülere göre çok daha iyi muhafaza ettiği görülmüştür. Ayrıca Sherif vd. [24] ayarlanmış LQR geri beslemeli kazanımları, gerçek zamanlı kontrol için yüksek kaliteli bir araba dinamiği simülatörü olan TORCS üzerinde test etmiştir.

Bu makalede, LKAS sistemine yönelik daha yüksek uygulanabilirliğe sahip bir müdahale konfigürasyonu geliştirilmiştir. İncelenen müdahale konfigürasyonlarında genel olarak ön aks direksiyon açısı veya taşıtın terk edilen şerit çizgisinin ters tarafında bulunan iki (ön ve arka) tekerleğini frenleyerek müdahale gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla herhangi bir müdahale anında en fazla iki tekerlek taşıtı şeride yerleştirmek için yanal kuvvet üretmektedir. Ayrıca 4WS ve 4WB metotları karmaşık eyleyici kontrol yapılarına ihtiyaç duymaktadır. Özellikle 4WS metodu her taşıta uygulanamayan arka akstan direksiyon kontrolüne ihtiyaç duymaktadır. Çalışmada eşgüdümlü bir şekilde ön aks direksiyon açısı (D) ve arka aks tekerleklerinin birine (terk edilen şerit çizgisinin ters tarafında kalan tekerlek) fren (F) uygulayarak müdahale yapılması hedeflenmiştir. Böylece ekstra bir eyleyiciye ihtiyaç duymadan uygulanabilen bir konfigürasyon elde edilmiştir. Ayrıca, her tekerlek sadece bir eyleyici tarafından kontrol edilmiştir ve eyleyicilerin kontrolü karmaşık olmamıştır. Bu yaklaşım (D+F) sayesinde üç tekerleğin kuvvet potansiyelinden faydalanmış ve böylece etkinliği daha yüksek bir müdahale konfigürasyonu elde edilmiştir. Eşgüdümlü ve diğer bahsi geçen müdahale konfigürasyonların performansı Simulink ve CarMaker yazılımları kullanılarak oluşturulan çeşitli manevralar ile test edilmiştir. Bunun için basamak cevabı (*Step Response*) testleri [25]'de sunulan metodolojiye uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Araştırmalarda LQR metodu diğer metotlara göre daha üstün başarıya sahip olmuştur ve bu çalışmada kontrolcü yapısı olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, D+F müdahale konfigürasyonunun diğer metotlara göre daha iyi performans sağladığı ortaya konulmuştur.

2. TEORİK METOT (THEORETICAL METHOD)

Kontrolcü tasarımında tek izli taşıt modeli kullanılmış ve daha sonra IPG firmasının CarMaker yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan bir benzetim modeli üzerinde test edilmiştir. Bu yazılım yol, sürücü ve taşıt modellerinden oluşmaktadır ve gerçek hayatta sergilenen davranışları sanal olarak yansıtabilmektedir. Diğer bir özelliği ise hareket denklemleri, kinematik özellikler ve diğer taşıt dinamiklerini bir arada çalıştırabilmesidir. Ayrıca Matlab-Simulink programı ile eşgüdümlü çalışabilmesinden dolayı istenilen basit ve karmaşık manevralar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sürücü tarafından bir müdahale yapılmayacağı

varsayıldığı için sürücü modeli devre dışı bırakılmış ve kontrolcü yapısının taşıtı kontrolü sağlanmıştır. Taşıt ve yol modelleri bu kısımda ele alınmıştır.

2.1. Kontrolcü Tasarımı (Controller Design)

Kontrolcü tasarımı için yanal dinamik modeli [21] direksiyon ve fren girdileri, viraj eğimi bozucu etki ve kontrolcü hataları sistem durumları olarak belirlenerek tanımlanmıştır:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \int e \\ e \\ \dot{e} \\ \Delta\psi \\ \Delta\dot{\psi} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_{af}+C_{ar}}{mU} & -\frac{C_{af}+C_{ar}}{m} & \frac{aC_{af}-bC_{ar}}{mU} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{aC_{af}-bC_{ar}}{I_z U} & -\frac{aC_{af}-bC_{ar}}{I_z} & \frac{a^2 C_{af}+b^2 C_{ar}}{I_z U} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \int e \\ e \\ \dot{e} \\ \Delta\psi \\ \Delta\dot{\psi} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{C_{af}}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{aC_{af}}{I_z} & -\frac{d}{r_{\omega} I_z} \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} \delta_f \\ T_{BS} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{aC_{af}-bC_{ar}}{m} - U^2 \\ 0 \\ \frac{a^2 C_{af}+b^2 C_{ar}}{I_z} \end{bmatrix}}_F \frac{1}{d} \quad (1)$$

Eş. 1'de m taşıt kütleini, I_z taşıt atalet momentini, C_{af} ve C_{ar} sırasıyla ön ve arka tekerlekler için toplam dönüş sertliğini, a taşıt ağırlık merkezi ile ön aks arasındaki mesafeyi, b taşıt ağırlık merkezi ile arka aks arasındaki mesafeyi, d taşıt izlerinin arasındaki mesafenin yarısı, U Taşıt boylamasına hızı, r_{ω} tekerlek etkin yarıçapını göstermektedir. Parametrelerin sayısal değerleri Eş. 2'de verilmiştir.

$$m = 1572 \text{ kg}, I_z = 2140 \text{ kgm}^2, C_{af} = 60000 \frac{N}{\text{rad}}, C_{ar} = 50000 \frac{N}{\text{rad}}, a = 1,365 \text{ m}, b = 1,41 \text{ m}, d = 0,78 \text{ m}, U = 70 \frac{\text{km}}{\text{h}}, r_{\omega} = 0,09 \quad (2)$$

Eş. 1'deki e terimi yanal mesafe hatasını ifade etmektedir ve taşıtın ağırlık merkezi ile şeridin orta çizgisi arasındaki dik uzaklığa eşittir. $\Delta\psi$, sapma açısı hatası olup yol çizgisinden geçen teğet ile taşıtın uzunlamasına ekseninin izdüşümünün arasındaki açı farkını ifade etmektedir. Kontrol girdileri direksiyon açısı (δ_f) ve fren torku (T_{BS}) olarak seçilmiştir. Direksiyon açısı ön aksa uygulanarak taşıtın yanal konumunu ve sapma hızını doğrudan etkilemektedir. Ancak arka aks fren kuvveti uzunlamasına olduğu için sadece sapma hızını doğrudan etkileyerek, taşıtın yanal konumunu dolaylı olarak etkilemektedir. Pozitif ve negatif direksiyon açısının yönü sırasıyla sola ve sağa tekabül etmektedir. Pozitif ve negatif fren torku sırasıyla arka sol ve sağ tekerleğin frenlemesini ifade etmektedir. Fren torkunun işareti, oluşan sapma momentinin yönünü ifade etmektedir. Yol viraj yarıçapı (*Radius of Curvature*, ρ) sistem için bir bozucu etki (*Disturbance*) girdisi gibi davranmaktadır.

Bu çalışmada, şerit takip sistemi için LQR kontrolcüsü tasarlanmıştır. Maliyet fonksiyonu ve geri beslemeli lineer ve zamandan bağımsız kontrol kazançları aşağıda verilmiştir.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3)$$

$$u = -(R^{-1} B^T H) x \quad (4)$$

Eş. 3 ve 4'de, x, u sırasıyla durum ve kontrol girdisi matrisleri, Q ve R ise simetrik yarı-kesin pozitif matrislerdir. Regülasyonun hızlı olması yani durumun sifıra gitmesi için geçen zamanın az olması ve kullanılan kontrolcü girişinin küçük olması için sırasıyla Q ve R matrisleri ayarlanmıştır. Q matrisi ağırlık kazançları sırasıyla, yanıl mesafe hata integrali ($q_{11} = 0,1$), yanıl mesafe hatası ($q_{22}=1$), yanıl mesafe hata değışim hızı ($q_{33}=1$), sapma açısı hatası ($q_{44}=100$) ve sapma açısı hatası değışim hızı ($q_{55}=100$) için seçilmiştir. Kontrolcü girdilerinin minimize edilmesi için R matrisi ağırlık kazançları sırasıyla, direksiyon açısı ($r_{11}=2$) ve fren torku ($r_{22}=10^{-4}$) için seçilmiş ve kontrolcü ($K_{FB} = R^{-1} B^T H$) kazançları hesaplanmıştır.

2.2. Taşıt Modeli (Vehicle Model)

Çalışmada Pacejka'nın [26] Magic Formula denklemlerini temel alan doğrusal olmayan bir lastik modeli kullanılmıştır. Müdahale konfigürasyonunun yapısından dolayı taşıt fren modülünün sadece arka aksının dinamikleri modellenmiştir. Basamak cevabı testleri gerçekleştirerek pedal girdisi ile oluşan fren torku arasında en az ikinci derece ve kritik veya aşırı sönümlenmiş bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. Fren basamak cevabı testlerinde tespit edilen zaman sabiti 0,0577s'dir. Fren hidrolik sistemi dinamikleri bu zaman sabitini kullanarak birinci derece filtre şeklinde modellenmiştir.

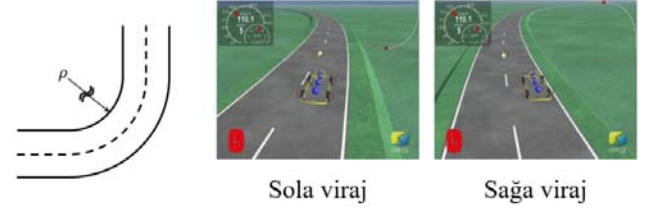
Sinüs taraması testi kullanılarak direksiyon açısı bant genişliği 2 Hz mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak testlerde direksiyon modelinin frekans cevabının 1 Hz olması yeterli olarak değerlendirilmiştir. Direksiyon sistemi dinamikleri 0,1s zaman sabitine sahip birinci derece filtre olarak modellenmiştir.

2.3. Yol Modeli ve Şerit Geometrisi (Road Model and Lane Geometry)

Bu çalışmada Karayolu Geometrik Standartları Esaslarına [27] uygun bir şekilde her şeridin genişliği 3,5 metre ve yol banketlerinin genişliği 2,5 metre olarak tanımlanmıştır, viraj yarıçapı 400 metre araç hızı saatte 72 km'dir.

2.4. Test Metodolojisi ve Simülasyonlar (Test Methodology and Simulations)

Sistem değışkenlerinin tepkilerini mümkün olduğunca birbirinden bağımsız inceleyebilmek adına basamak cevabı testleri kullanılmıştır. Basamak girdileri, sistemin eyleyicilerine değil, yol viraj eğimine uygulanmıştır ve farklı konfigürasyonların aynı yol şartlarındaki performansları gözlemlenmiştir. Sapma açısı değışim hızı ($\Delta\psi$), sapma açısı değışimi ($\Delta\psi$) ve yanıl mesafe hatası (Δy) için sırasıyla Sabit Yarıçaplı Viraj (ψ Step Response), Açısıl (ψ Step Response) ve Yanıl Mesafe (Δy Step Response) basamak cevabı testleri tasarlanmıştır (Şekil 1-Şekil 3).



Şekil 1. Sabit yarıçaplı viraj testi (Constant radius of curvature maneuver)



Şekil 2. Açısıl basamak cevabı testi (Angular step response maneuver)



Şekil 3. Yanıl mesafe basamak cevabı testi (Lateral distance step response maneuver)

Sabit yarıçaplı viraj testinde taşıt ve yol orta çizgisi arasında Fiden geçiş yapmıştır. Böylece sapma açısı ($\Delta\psi$) aniden sıfırdan θ değerine (basamak gibi) zıplamıştır. Yanıl mesafe basamak cevabı testinde ise taşıt düz bir yoldan belirli yanıl mesafe farkı (Δy) ile bağlanan aynı doğrultudaki ikinci bir düz yola geçiş yapmıştır. Böylece yanıl mesafe hatası aniden sıfırdan bir metreye (basamak gibi) yükselmiştir.

Testlerin hepsinde taşıt hızı mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Müdahale konfigürasyonları sola ve sağa virajlı yollarda test edilmiştir. Sola virajlı yolda taşıtın bankette ve sağa virajlı yolda taşıtın karşı şeritte seyir ettiği zamanı en aza düşürmek hedeflenmiştir. Manevra esnasında kontrolcünün yetersiz kalması durumunda test başarısız sayılmıştır. Sola doğru virajda taşıtın banketten yolun dışına sapması ve sağa doğru virajda taşıtın seyir ettiği şeridin dışına çıkarak yolun dışına sapması testin başarısız olmasına sebep olmuştur.

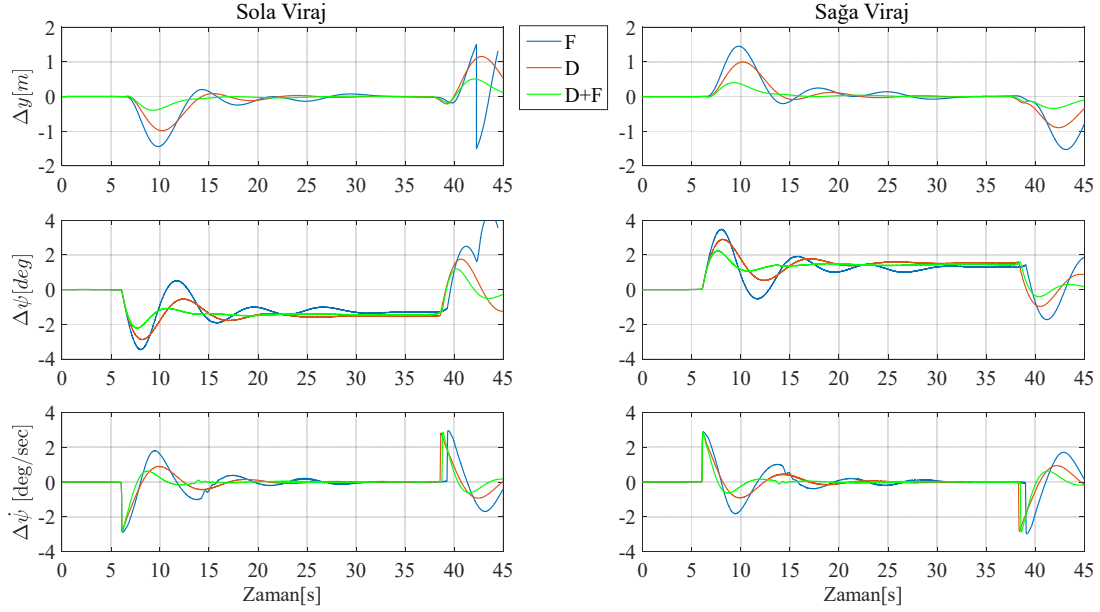
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Sabit Yarıçaplı Viraj Testi (Constant Radius of Curvature Maneuver)

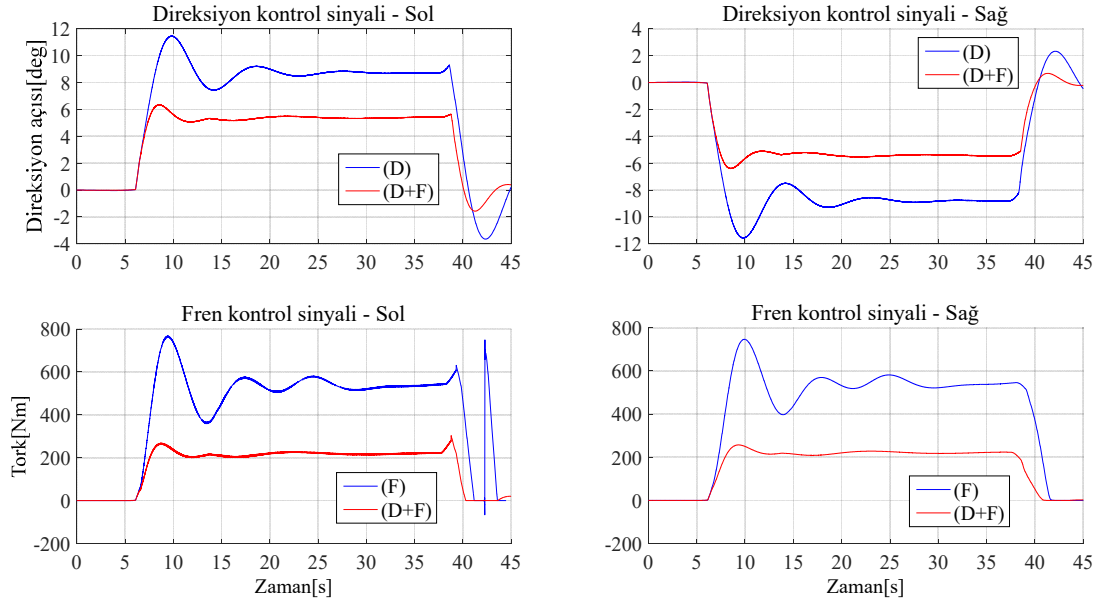
Testte viraj yarıçapı (ρ) aniden sonsuzdan dört yüz metreye düşmüştür ve doksan derecelik bir dönüşten sonra tekrar sonsuz olmuştur. Düz bir yolda viraj yarıçapı sonsuzdur ve yarıçap düştükçe viraj daha keskin bir hale gelmektedir. Elde

edilen sonuçlardan Tablo 1 ve Tablo 2’de türetilerek gösterilmiştir. Tablo 1’de kontrol girdilerinin maksimum sapma (M_{os} , overshoot) ve tepki zamanı (t_{os}) değerleri verilmiştir. Burada elde edilen sonuçlara göre (D+F) konfigürasyon metodu diğer iki metoda göre daha hızlı tepki zamanına sahip olmuş (Şekil 4) ve daha düşük kontrol girdisine ihtiyaç duymuştur (Şekil 5). Bunun sebebi ise (D+F) konfigürasyonunun iki eyleyiciye eşgüdümlü bir şekilde kullanmasından kaynaklanmaktadır. (D+F)

konfigürasyonu 3 tekerin kuvvet potansiyelinden faydalanırken (D) ve (F) metotları maksimum 2 tekerleğin potansiyelinden faydalanmaktadır. Sonuçlara göre (D+F) konfigürasyonu şeridi takip etmek için (D) metoduna göre %40’tan daha az direksiyon girdisine ve (F) metoduna göre %65’e kadar daha az fren torku girdisine ihtiyaç duymuştur. Daha düşük kontrol girdisi ile aynı virajı alabilmek, bilhassa keskin virajlarda veya yüksek sapma açısı değerine sahip manevralarda taşıtın uygulayabildiği



Şekil 4. Sabit yarıçaplı viraj testinde konfigürasyonların hata miktarları
(Error values of all configurations for constant radius of curvature maneuver)



Şekil 5. Sabit yarıçaplı viraj testinde konfigürasyonların sağladığı kontrol girdileri (
Control input values of all configurations for constant radius of curvature maneuver)

Tablo 1. Kontrol girdileri performans tablosu, Sabit yarıçaplı viraj
(Control input performance, constant radius of curvature maneuver) ($\rho=400\text{m}$, $\theta=90^\circ$, $U=19,45\text{ m/s}$)

Kontrol girdisi	Müdahale Konfigürasyon	Sola viraj		Sağa viraj	
		t_{os} [s]	M_{os}	t_{os} [s]	M_{os}
Direksiyon	(D)	3,741	11,46°	3,754	11,57°
	(D+F)	2,452	6,349°	2,451	6,399°
Fren Torku	(D)	3,317	684Nm	3,788	689,119Nm
	(D+F)	2,668	239,2Nm	3,169	241,883Nm

Tablo 2. Model çıktıları performans parametreleri tablosu, Sabit yarıçaplı viraj
(Model output performance parameters, constant radius of curvature maneuver) ($\rho=400\text{m}$, $\theta=90^\circ$, $U=19,45\text{ m/s}$)

Hata türü	Müdahale Konfigürasyonu	Sola viraj			Sağa viraj		
		t_{os} [s]	M_{os}	$t_{s(0,05)}$ [s]	t_{os} [s]	M_{os}	$t_{s(0,05)}$ [s]
Yanal (Δy)	(F)	3,2	1,44m	24,37	3,151	1,451m	24,314
	(D)	3,63	0,983m	14,62	3,534	1m	14,544
	(D + F)	2,687	0,394m	8,2	2,576	0,4m	8,164
Savrulma ($\Delta \psi$)	(F)	1,937	3,457°	26,546	1,935	3,476°	22,916
	(D)	2,116	2,882°	16,616	2,1	2,901°	16,646
	(D + F)	1,562	2,222°	7,016	1,589	2,235°	7,036
Savrulma Oranı ($\Delta \dot{\psi}$)	(F)	0,185	2,901°/s	24,362	0,1	2,822°/s	18,632
	(D)	0,101	2,822°/s	18,462	0,184	2,902°/s	24,372
	(D + F)	0,132	2,856°/s	11,332	0,128	2,856°/s	8,042

maksimum kontrol sinyali değerinin altında kalınması açısından (D+F) kontrolcüye avantaj sağlamaktadır. Sistemin uygulayabileceği maksimum fren torkunun 700 Nm ve maksimum direksiyon açısının 15 derece olduğu varsayıldığında diğer iki metod performans limitlerine ulaştıkları için daha keskin virajlarda etkisiz kalacakları görülmektedir (Şekil 4). Buna karşılık (D+F) metodunda fren veya direksiyon kontrol sinyallerinden birisi maksimum değerine ulaşsa dahi diğer kontrol sinyali taşıtı kontrol etme şansına sahip olmakta ve daha güvenli bir kontrol metodu haline gelmektedir.

Tablo 2’de hata ve model çıktıların performansını incelenmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi (D + F) metodu diğer metotlara göre daha hızlı tepki zamanı (t_{os}) ve oturma zamanına (t_s) sahiptir. (D+F) müdahale konfigürasyonu en az 7 saniyelik bir fark ile (D)’den ve en az 16 saniyelik bir fark ile (F) metodundan daha hızlı bir oturma zamanına sahip olmuştur. Oturma zamanı taşıtın karşı şeritte veya bankette geçirdiği zamanı temsil etmektedir. Önerilen (D+F) konfigürasyonu, azami bir şekilde yanal mesafe hatası değerini ve oturma zamanını düşürerek istemsiz şeritten ayrılma durumundaki kazaları önleyebilme potansiyeline sahiptir.

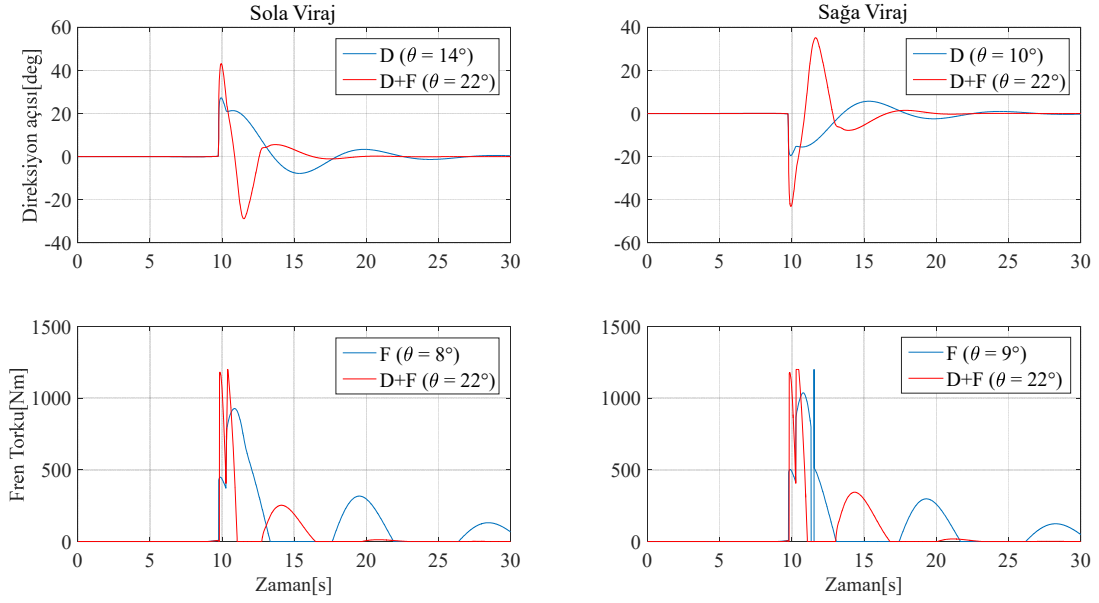
3.2. Açısal basamak cevabı testi (Angular step response maneuver)

Açısal basamak cevabı testinde basamak açısı beş dereceden başlayarak ve beşer derece artırılarak uygulanmıştır. Açık değeri arttıkça şerit takibi daha zor olmaktadır. Testler esnasında şerit koruması sağlanamayan açı tespit edilmiş ve bu açıdan birer derece azaltarak şerit koruması sağlanabilen en büyük tam sayı savrulma açısı (θ) elde edilmiştir. Kullanılan yazılımın yol yarıçapı limitinden dolayı açı

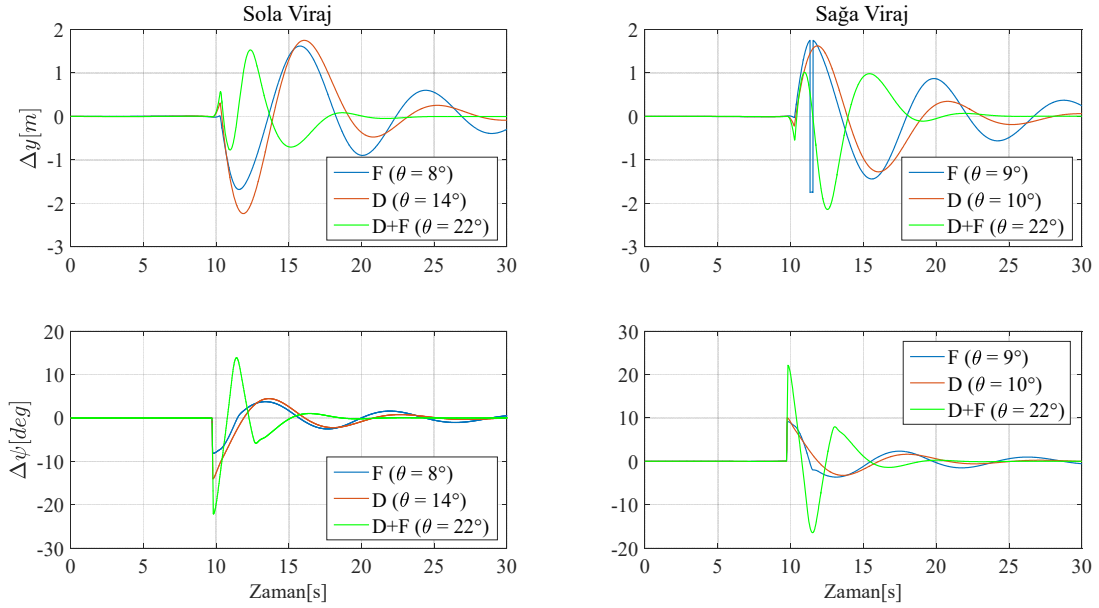
basamağının viraj yarıçapı dört metre ($R=4$) olarak seçilmiştir. Farklı müdahale konfigürasyonları için tespit edilen azami açı performansları değerlendirilmiştir ve tüm test setlerinde en düşük performansı (F) konfigürasyonu (sola 8° ve sağa 9°), orta performansı (D) metodu (sola 14° ve sağa 10°) ve en iyi performansı (D+F) metodu (sola ve sağa 22°) sağlamıştır (Şekil 6). Tablo 3’te tüm müdahale konfigürasyonları ve farklı yol değişim açıları için girdi miktarları sunulmuştur. Her bir kontrolcü için o kontrolcünün performans sınırında yapılan testlerden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi (D+F) konfigürasyonu (D) metoduna göre 16 derecelik direksiyon açısı farkı ile %55’ten daha büyük bir savrulma açısı performansı sağlamıştır. (D+F) konfigürasyonu (F) metodu ile karşılaştırınca neredeyse aynı fren torku girdisi ile %145 daha iyi savrulma açısı kontrolü sağlamıştır. Tablo 4’te ise her bir müdahale konfigürasyonu için o konfigürasyonun performans sınırında yapılan testlerde elde edilen performans metrikleri sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi (D+F) konfigürasyonu diğer metotlara göre 8 dereceden daha büyük bir savrulma açısı kontrol performansı sergilemesine rağmen en düşük yanal mesafe hata sapma değerine sahiptir (Şekil 7). Sistemin uygulayabileceği maksimum fren torkunun 700Nm ve maksimum direksiyon açısının 15 derece olduğu varsayıldığında diğer iki metodun manevrayı gerçekleştirebilmek için gerçekçi değerlerin üzerinde girdi vermek zorunda kaldıkları gözlemlenmektedir.

3.3. Yanal Mesafe Basamak Cevabı Testi (Lateral Distance Step Response Maneuver)

Yanal mesafe basamak cevabı testi iki adet paralel yol ve bir adet birleşme (birleşme açısı, θ ve yarıçapı, R) parçasından oluşmaktadır. İki yol parçası arasındaki yanal mesafe $\Delta y=1\text{ m}$ ’dir.



Şekil 6. Açısal basamak cevabı testinde konfigürasyonların sağladığı kontrol girdileri
(Control input values of all configurations for angular step response maneuver)



Şekil 7. Açısal basamak cevabı testinde konfigürasyonların sağladığı performans
(Performance of all configurations for angular step response maneuver)

Tablo 3. Kontrol girdileri performans tablosu, açısal basamak cevabı testi
(Control input performance, angular step response maneuver) (U=19,45 m/s)

Kontrol girdisi	Müdahale Konfigürasyon	Sola viraj			Sağa viraj		
		t_{os} [s]	M_{os}	θ [°]	t_{os} [s]	M_{os}	θ [°]
Direksiyon açısı	(D)	0,202	27,26°	14	0,192	19,48°	10
	(D + F)	0,203	43,09°	22	0,203	43,06°	22
Fren torku	(F)	1,139	927,6Nm	8	1,014	1037Nm	9
	(D + F)	0,117	1181Nm	22	0,036	1179Nm	22

Tablo 5'te kontrol girdilerinin maksimum sapma değerleri verilmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi kontrol girdilerinin değerleri farklı senaryolar için birbiri ile benzerlik göstermektedir. Bunun sebebi, testlerde yanal mesafe 1 m tanımlanmıştır ve sadece iki parça yolun birleşme noktasındaki birleşme açısı ve viraj yarıçapı yazılım limitleri dahilinde seçilerek basamak cevabı testi farklı geçiş süreleri ile hazırlanmıştır.

Testlerde elde edilen yanal mesafe hatasının sapma (M_{os} , overshoot) değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda sapma zamanı (t_{os}) ve oturma zamanı ($t_{s(0,05)}$) yerine sapma mesafesi (X_{os}) ve oturma mesafesi ($X_{s(0,05)}$) parametreleri incelenmiştir

(Şekil 8). Tabloda verilen test metriklerine göre (D+F) metodunun tepe noktalarının değeri (D) metoduna göre %10, (F) metoduna göre ise %50'den daha az olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre (D+F) metodu (D) metoduna göre yaklaşık 150 metre daha az oturma mesafesine sahiptir. (F) metodu ise testte kullanılan zaman çerçevesinde oturma sürecine sahip olmadığı görülmektedir. Tüm testlerde en hızlı oturma süresi (D+F) konfigürasyonu tarafından elde edilmiştir ki bu, karşı şeride geçmeli kazaları önlemede en önemli faktörlerden birisidir. Yol üzerinde yanal mesafe geçiş parçasını oluşturan kısmı taşıt takriben 0,15 saniyede geçmektedir. Bu sırada açı farkı ve sapma açısı hızı farkı testin ilk 0,5 saniyesindeki zıplamalara sebep olmaktadır.

Tablo 4. Model çıktıları performans parametreleri tablosu, açısal basamak cevabı testi
(Model output performance parameters, angular step response maneuver) (U=19,45 m/s)

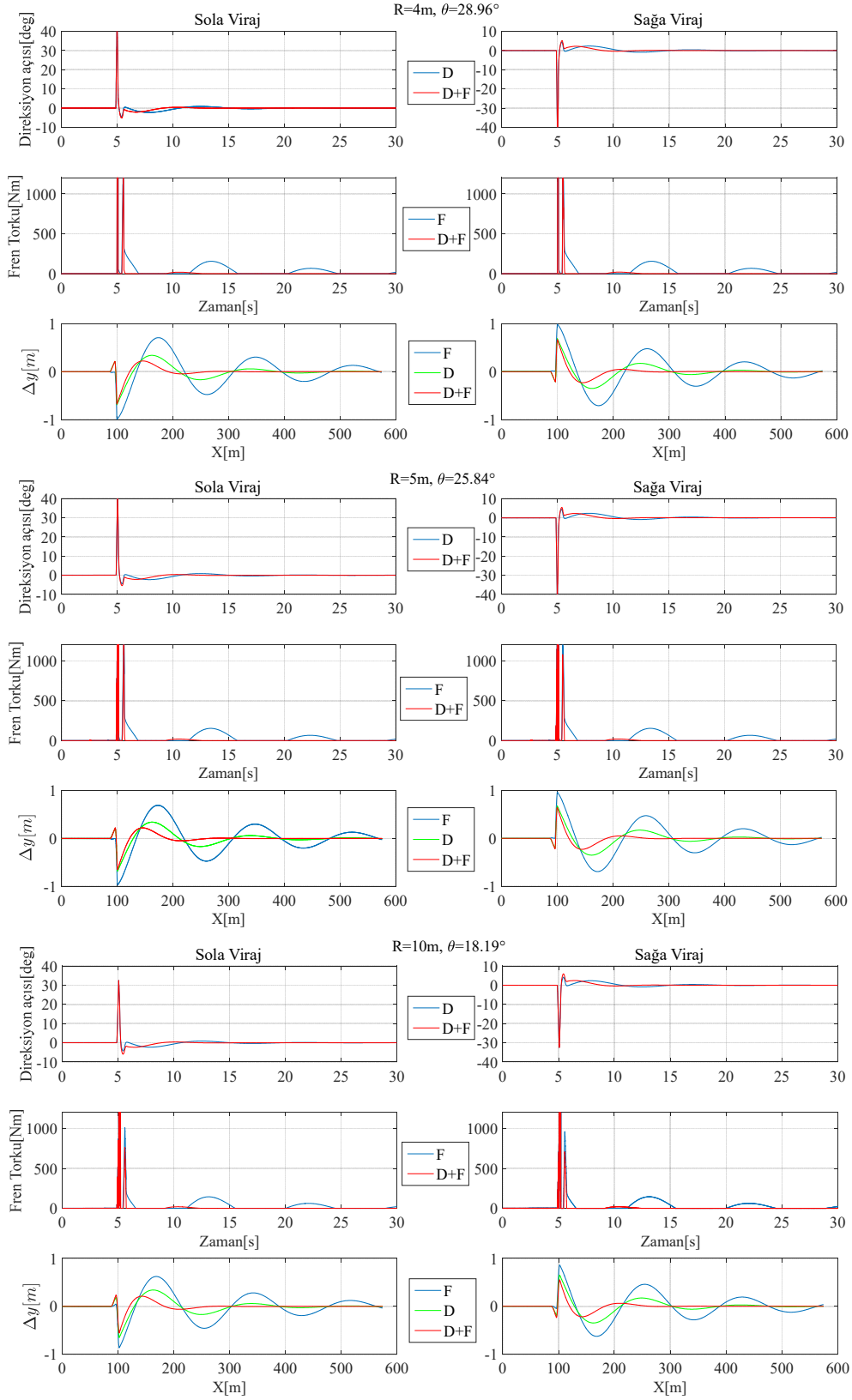
Hata türü	Müdahale Konfigürasyonu	Sola viraj			Sağa viraj		
		t_{os} [s]	M_{os}	θ [°]	t_{os} [s]	M_{os}	θ [°]
Yanal (Δy)	(F)	1,849	1,678m	8	1,617	1,75m	9
	(D)	2,149	2,233m	14	2,107	1,623m	10
	(D + F)	2,637	1,529m	22	2,807	2,138m	22
Savrulma ($\Delta \psi$)	(F)	0,095	8,146°	8	0,095	9,146°	9
	(D)	0,052	14,04°	14	0,035	10,04°	10
	(D + F)	1,677	13,88°	22	0,081	22,14°	22

Tablo 5. Kontrol girdileri performans tablosu, Yanal mesafe basamak cevabı testi
(Control input performance, lateral distance step response maneuver) (U=19,45 m/s)

Kontrol girdisi	Müdahale Konfigürasyon	Sola viraj		Sağa viraj		Test	
		t_{os} [s]	M_{os}	t_{os} [s]	M_{os}	θ [°]	R[m]
Direksiyon	(D)	0,104	50,55°	0,104	50,56°	28,96	4
	(D + F)	0,105	50,04°	0,105	50,04°		
Fren torku	(F)	0,02	1178Nm	0,02	1178Nm	25,84	5
	(D + F)	0,02	1175Nm	0,02	1175Nm		
Direksiyon	(D)	0,116	45,49°	0,116	45,49°	18,19	10
	(D + F)	0,117	45,03°	0,117	45,03°		
Fren torku	(F)	0,01	1167Nm	0,01	1167Nm	18,19	10
	(D + F)	0,02	1165Nm	0,02	1165Nm		
Direksiyon	(D)	0,167	32,51°	0,167	32,51°	18,19	10
	(D + F)	0,168	32,48°	0,168	32,48°		
Fren torku	(F)	0,01	1182Nm	0,01	1182Nm	18,19	10
	(D + F)	0,02	1178Nm	0,02	1178Nm		

Tablo 6. Model çıktıları performans parametreleri tablosu, Yanal mesafe basamak cevabı testi
(Model output performance parameters, lateral distance step response maneuver) (U=19,45 m/s)

Test	Müdahale Konfigürasyon	Sola viraj Yanal hata (Δy)			Sağa viraj Yanal hata (Δy)		
		X_{os} [m]	M_{os} [m]	$X_{s(0,05)}$ [m]	X_{os} [m]	M_{os} [m]	$X_{s(0,05)}$ [m]
R=4m $\theta=28,96^\circ$	(F)	75,5	0,713	>500	75,1	0,714	>500
	(D)	63,7	0,342	255,1	63	0,352	255,8
	(D + F)	48	0,225	82,9	47,1	0,234	81,8
R=5m $\theta=25,84^\circ$	(F)	74,5	0,696	> 500	73,5	0,697	>500
	(D)	64	0,341	254,9	64,3	0,35	255,8
	(D + F)	47,3	0,223	81	45,6	0,231	109,6
R=10m $\theta=18,19^\circ$	(F)	69,7	0,626	> 500	69,4	0,629	>500
	(D)	64	0,341	254,9	63,5	0,347	255
	(D + F)	44	0,213	127	42,9	0,22	127,7



Şekil 8. Yanal mesafe basamak cevabı testinde konfigürasyonların sağladığı kontrol girdileri ve performans (Control input performance of all configurations for lateral distance step response maneuver)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada şerit destek sistemi için geliştirilmiş (D+F) müdahale konfigürasyonu sunulmuş ve literatürdeki en çok uygulanan diğer konfigürasyonlar ((D) ve (F)) ile karşılaştırılmıştır. Sözü edilen konfigürasyonlar için tasarlanan LQ kontrolcüsü doğrusal olmayan ve çok-cisimli yapıya sahip CarMaker ortamında Matlab yazılımı kullanılarak entegre edilmiştir. Şerit takip durumuna yönelik basamak cevabı testleri hazırlanmış ve konfigürasyonlar benzetimler ile test edilmiştir. Bahsi geçen testler sırasıyla sabit yarıçaplı viraj, açılmalı ve yanal mesafe basamak cevabı testleridir. Viraj yarıçapı basamak testinde (D+F) konfigürasyonu diğer iki metoda ((D) ve (F)) göre bütün testlerde daha düşük kontrol girdisine ihtiyaç duymuştur. Ayrıca açılmalı ve yanal mesafe hatalarında (D+F) diğer konfigürasyonlara göre tepki hızında en az %16 ve en çok %34 oranında, maksimum hatada en az %37, en çok %73 oranında, oturma zamanında ise en az %44 ve en fazla %66 oranında iyileşme sağlamıştır.

Açılmalı basamak cevabı testinde (D+F) metodu diğer konfigürasyonlara göre en iyi performansı sağlamıştır. (F) konfigürasyonu sağa virajda maksimum 9 dereceye kadar, (D) metodu ise sola virajda maksimum 14 dereceye kadar taşıtı kontrol edebilmiştir. (D+F) konfigürasyonu ise sağa ve sola virajda maksimum 22 dereceye kadar performans göstermiştir. Yanal mesafe basamak cevabı testinde (D+F) diğer metotlara ((D) ve (F)) göre tüm benzetimlerde daha düşük kontrol girdisine ihtiyaç duymuştur. (D+F) konfigürasyonu diğerlerine göre tepki hızında en az %20 ve en çok %37 oranında, maksimum hatada en az %33, en çok %68 oranında, oturma zamanında ise (D) kontrolcüsüne göre en az %50 ve en fazla %68 oranında iyileşme sağlamıştır. (F) metodunun ise testte kullanılan zaman çerçevesinde oturma sürecine sahip olmadığı görülmüştür.

Bu makalede Direksiyon ve Fren (D+F) sistemlerinin eşgüdümlü kullanımı ile iki sistemin güçlü olduğu durumları birleştirilerek daha gürbüz bir müdahale konfigürasyonu elde edilmiştir. Böylece bu müdahale konfigürasyonlarının başarısız olduğu durumlar bertaraf edilmiştir. Sonuç olarak (D+F) müdahale metodu, çok hızlı tepki ve oturma zamanına sahip olmasının yanı sıra, taşıtın boylamasına hızının muhafaza edilmesi ve taşıtın şeritte kalmasında da üstün başarı sergilemiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

114M816 numaralı araştırma projesi kapsamında çalışmaların gerçekleştirilmesini mümkün kılan TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Türkiye istatistik kurumu, Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, <https://tuikweb.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?jsessionid=39y7fJBXnWkJv1w1MSnpK96Z2Wjv7tlvcCxFx>

- FcTLrBfPNhMx3Fy!1015833369?id=24606#., Yayın tarihi Haziran 21, 2017. Erişim tarihi Kasım 11, 2017.
2. Dousti, M., ve Kutluay, E., Binek Taşıtlara Yönelik Şerit Koruma Algoritmalarının Tartışılması ve Yenilikçi Bir Algoritmanın Tanıtımı, 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON 2016), Bursa -Türkiye, 23 - 24 Mayıs 2016.
 3. Küçükmanisa, A., ve Urhan, O., Real-time lane departure warning system on an embedded platform, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1287-1300, 2017.
 4. Enache, N. M., Mammari, S., Netto, M., ve Lusetti, B., Driver steering assistance for lane-departure avoidance based on hybrid automata and composite lyapunov function, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1 (1), 28-39, March 2010.
 5. Cerone, V. , Milanese, M., ve Regruto, D., Combined automatic lane-keeping and driver's steering through a 2-dof control strategy, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 17 (1), 135-142, 2009.
 6. Kamat, S., Lane keeping of vehicle using model predictive control, IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Bombay, 2019.
 7. Williams, D. E., Improved lane-keeping with rear axle steer, SAE International Journal of Commercial Vehicles, 8 (1), 137-146, 2015.
 8. BRAITMAN, K., MCCARTT, A., ZUBY D., ve SINGER, J., Volvo and Infiniti drivers' experiences with select crash avoidance technologies, Traffic Injury Prevention, 11 (3), 270-278, 2010.
 9. Raksincharoensak, P., Nagai, M., Shino, M., Lane keeping control strategy with direct yaw moment control input by considering dynamics of electric vehicle, Vehicle System Dynamics, 44 (1), 192-201, 2006.
 10. Kawazoe, H., Murakami, T., Sadano, O., Suda, K., ve Ono, H., Development of a lane-keeping support system, SAE Technical Paper, Detroit, Michigan, 2001.
 11. Alleyne, A., A comparison of alternative intervention strategies for unintended roadway departure (URD) control, Vehicle System Dynamics, 27, 157-186, 1997.
 12. Liu, J. F., Wu, J. H., ve Su, Y. F., Development of an interactive lane keeping control system for vehicle, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, TX, USA, 2007.
 13. Wu, X., Zhou, B., Wen, G., Lefei, L., ve Cui, Q., Intervention criterion and control research for active front steering with consideration of road adhesion, Vehicle System Dynamics, 56 (4), 553-578, 2017.
 14. Williams, D. E. , Lane-keeping benefits of practical rear axle steer, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility , 52 (4), 504-521, 2014.
 15. Wagner, S., Schilling, J. M., Braun, J. L., ve Prokop, G., Design and assessment of optimal feedforward control for active steering configurations in passenger vehicles, Vehicle System Dynamics, 55 (8), 1123-1142, 2017.
 16. Rödonyi, G., ve Bokor, J., Identification of an LPV vehicle model based on experimental data for brakesteering control, IFAC Proceedings Volumes, 38 (1), 380-385, 2005.

17. Hayakawa, Y., ve Iwasaka, T., Lane departure prevention apparatus and method, United States Patent: US 2007/0255474 A1, 1 November 2007.
18. Bedner E., Chen H., A supervisory control to manage brakes and four-wheel- steer systems, SAE World Congress, Detroit, 2004.
19. Falcone, P., Borrelli, F., Tseng, H. E., Asgari J., ve Hrovat, D., Integrated braking and steering model predictive control approach in autonomous vehicles, 5th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 40 (10), 273-278, 2007.
20. Wang, H., Wang, Q., Chen, W., Tan D., ve Zhao, L., Multi-mode human-machine cooperative control for lane departure prevention based on steering assistance and differential braking, Intelligent Transport Systems, 14 (6), 578-588, 2020.
21. Peng, H., Tomizuka, M., Preview control for vehicle lateral guidance in highway automation, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 115 (4), 679-686, 1993.
22. Enache, N. M., Netto, M., Mammar, S., ve Lusetti, B., Driver steering assistance for lane departure avoidance, Control Engineering Practice, 17(6), 642-651, 2009.
23. Freeman, P., Jensen, M., Wagner, J., ve Alexander, K., A comparison of multiple control strategies for vehicle run-off-road and return, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64 (3), 901-911, 2015.
24. Sherif, M. M., Ahmed, A. M., Moustafa, A. M., ve Moness, M., Optimal control of lane keeping system using simulated annealing and linear quadratic regulator, 15th International Computer Engineering Conference (ICENCO), Egypt, 2019.
25. Kutluay, E., Development and demonstration of a validation methodology for vehicle lateral dynamics simulation models, Darmstadt: fzd.tu, 2012.
26. Pacejka H., Tire and vehicle dynamics, Oxford: Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2012.
27. Kiper, T., Proje Mühendisleri için Karayolu Geometrik Standartları Esasları, Karayolları Genel Müdürlüğü, ANKARA, 1988.
28. Plankermann, K., Human Factors as causes for road traffic accidents in the sultanate of oman under consideration of road construction designs, University of Regensburg, Regensburg, 2013.