



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR KARAVAN SİSTEMİNİN DİNAMİK
KARARLILIĞININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

Ali Tahir KARAŞAHİN

DOKTORA TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz - 2022

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali Tahir KARAŞAHİN tarafından hazırlanan "*Elektrik Tahrikli Bir Karavan Sisteminin Dinamik Kararlılığının Modellenmesi ve Kontrolü*" adlı tez çalışması 13/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Hulusi KARACA

Danışman

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Üye

Doç. Dr. İsmail ESEN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ali Tahir KARAŞAHİN

Tarih: 13/07/2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK TAHRİKLİ BİR KARAVAN SİSTEMİNİN DİNAMİK KARARLILIĞININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

Ali Tahir KARAŞAHİN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2022, 86 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Doç. Dr. İsmail ESEN

Doç. Dr. Hulusi KARACA

Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

Bu tez çalışmasında elektrik tahrikli bir karavan sisteminin modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Taşıt-karavan (TK) sistemleri kayma, osilasyona girme ve katlanma gibi kararsız durumları içermektedir. Belirtilen kararsız durumlardan dolayı aktif şasi kontrol tekniklerine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada TK sistemlerinde oluşan kararsız durumları engellemek için bulanık mantık (BM) kontrolcüsü geliştirilmiştir. TK sisteminin hareket denklemleri çıkartılmış ve 3 serbestlik derecesi ile modellenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında modellenen sistem CarSim eş zamanlı simülasyonu ile doğrulanmıştır. Simülasyon ortamında doğrusal karesel regülatör (DKR) ve BM kontrolcülerinin performansı çift şerit değiştirme testi ile incelenmiştir. BM kontrolcüsünün üyelik fonksiyonları, giriş ve çıkış parametrelerinin belirlenmesi simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamındaki çalışmalar tamamlandıktan sonra geliştirilen kontrolcü

karavan elektronik kontrol ünitesine (EKÜ) aktarılmıştır. Ardından TK sistemi için saha testleri uygulanmıştır. Elektrik tahrikli karavan için geliştirilen bulanık mantık tabanlı kontrolcü saha testlerinde yanal kararlılığı başarılı bir şekilde sağladığı deneysel olarak gösterilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde tez kapsamında gerçekleştirilen aktif karavan kontrol yöntemi elektrikli tahrikli bir sisteme uygulanmasıyla çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, kararlılık, taşıt dinamiği, taşıt-karavan sistemi.



ABSTRACT

Ph.D THESIS

MODELLING AND CONTROL OF DYNAMICS STABILITY OF AN ELECTRIC DRIVEN CARAVAN SYSTEM

Ali Tahir KARAŞAHİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHATRONICS
ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2022, 86 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Mehmet KARALI

Assoc. Prof. Dr. İsmail ESEN

Assoc. Prof. Dr. Hulusi KARACA

Asst. Prof. Dr. Barış GÖKÇE

Asst. Prof. Dr. Yusuf UZUN

In this thesis, modeling and control of an electrically driven caravan system is carried out. Vehicle-caravan (VC) systems include instability modes such as sway, oscillating and jackknifing. It needs active chassis control techniques due to the stated instability conditions. In this study, a fuzzy logic (FL) controller has been developed to prevent instability situations in VC systems. The equations of motion of the VC system are derived and modeled with 3 degrees of freedom. The system modeled in MATLAB/Simulink environment has been validated with CarSim simultaneous simulation. In the simulation environment, the performance of linear quadrature regulator (LQR) and FL controllers is investigated by double lane change test. Membership functions, input and output

parameters of the FL controller are determined in the simulation environment. After the studies in the simulation environment are completed, the developed controller is implemented to the caravan electronic control unit (ECU). Then, field tests are applied for the VC system. The fuzzy logic-based controller developed for the electric drive caravan has been experimentally shown to provide lateral stability in field tests successfully. When the studies in the literature are examined, the active caravan control method carried out within the scope of the thesis creates the originality of the study by applying it to an electrically driven system.

Keywords: Fuzzy logic, stability, vehicle dynamics, vehicle-caravan system.



ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü çalışmalarını beraber yapmaktan onur duyduğum, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet KARALI'ya teşekkür ederim. Tez izleme süreçlerindeki kıymetli katkılarıyla bu sürece yön veren kıymetli hocalarım sayın Doç. Dr. İsmail ESEN ve Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE'ye teşekkür ederim. Akademik çalışma disiplini ve bakış açısını kazanmama vesilen olan kıymetli babam sayın Doç. Dr. Muhammet KARAŞAHİN'e şükranlarımı sunarım. Crawler Karavan A.Ş. Ar-Ge birimi tarafından geliştirilen Türkiye'nin ilk Elektrikli Karavan projesine bizi de dahil edip tez çalışmasının ve geliştirilen teknolojinin bir katma değere dönüşme fırsatını veren sayın H. Üsâme KULLEMCİ ve M. Selami KULLEMCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Özellikle saha testlerindeki katkılarından dolayı Adem ADATEPE ve Ali İmran CEYHAN'a teşekkür ederim. Lisansüstü çalışmalarımda en büyük destekçilerimden birisi olan sevgili eşime, oğluma ve kızıma, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen annem, kardeşlerim ile aileme sevgi ve saygılarımı sunarım. Lisansüstü çalışmalarına her zaman destek olan bütün sevdiklerime teşekkürü borç bilirim.

Ali Tahir KARAŞAHİN

KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. TAŞIT-KARAVAN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	9
3.1. Taşıt-Karavan Modeli	10
3.2. Diferansiyel Frenleme	13
3.3. Modelin Doğrulanması	14
3.4. Farklı Serbestlik Dereceli Modellerin Karşılaştırılması	18
4. KARARLILIK ANALİZİ	20
4.1. Özdeğer Analizi	20
4.2. Sistem Parametrelerinin Etkisi	21
5. KONTROLCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ	25
5.1. Doğrusal Karesel Regülatör Kontrolcü Tasarımı	25
5.1.1. Genetik Algoritma İle Optimizasyon	27
5.2. Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı	32
5.3. Simülasyon Testleri	36
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	43
6.1. Deney Düzeneği	43
6.1.1. Saha Testinde Kullanılacak Kontrolcünün Belirlenmesi	44
6.2. Saha Testi	45
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
7.1. Sonuçlar	58

7.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR	62



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Çekme karavan örnekleri: (a) tek akslı [50] ve (b) çift akslı [51]	9
3.2 TK sisteminin serbest cisim diyagramı	10
3.3 TK sistemine uygulanan direksiyon açısı	14
3.4 Modellerin ürettiği taşıt yanal hızı ve sapma oranları sonuçlarının karşılaştırılması	16
3.5 Modellerin ürettiği bağlantı açısı ve karavan sapma oranı sonuçlarının karşılaştırılması	17
4.1 Sönümlleme oranı ve taşıtın boylamsal hızı arasındaki ilişki	21
4.2 (a) Karavan aks uzunluğunun ve (b) ağırlık merkezi değişiminin bağlantı açısı üzerine etkisi	23
4.3 (a) Karavan kütle değişiminin ve (b) atalet momenti değişiminin bağlantı açısı üzerine etkisi	24
5.1 Durum uzay formundaki bir sistemin kapalı çevrim gösterimi	26
5.2 GA akış şeması	28
5.3 (a) TK sistemine uygulanan direksiyon açısı, (b) taşıtta meydana gelen sapma oranı	30
5.4 (a) Taşıtta meydana gelen yanal hız, (b) TK arasında oluşan bağlantı açısı	31
5.5 Doğrusal karesel regülatör kontrolcülerinin uyguladığı frenleme torkları	32
5.6 Standart bir bulanık mantık kontrolcüsünün şematik gösterimi	33
5.7 TK sistemi için geliştirilen BM kontrolcüsünün blog diyagramı	34
5.8 BM kontrolcüsünün şematik gösterimi	34
5.9 BM kontrolcüsüne ait (a) üyelik fonksiyonları ve (b) giriş-çıkış üyelik fonksiyonları arasındaki ilişki	35
5.10 Çift şerit değiştirme manevrası için uygulanan direksiyon açısı	36
5.11 Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda meydana gelen sapma oranı	37
5.12 Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda oluşan yanal ivmelenme ...	38
5.13 Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda oluşan bağlantı açısı	39
5.14 Çift şerit değiştirme manevrası için uygulanan direksiyon açısı	40

5.15 Kontrolcü aktifken karavanda oluşan sapma oranı	41
5.16 Kontrolcü aktifken karavanda oluşan yanal ivmelenme	42
5.17 Kontrolcü aktifken karavanda oluşan bağlantı açısı	42
6.1 Elektrikli karavan deney düzeneği	43
6.2 Saha testinde kullanılan çekici araç ve elektrikli karavan	45
6.3 Çift şerit değiştirme manevrasında takip edilen güzergah	46
6.4 Saha testi sonucunda karavanda meydana gelen (a) sapma oranı ve (b) yanal ivmelenmesi	47
6.5 Saha testi sonucunda karavanda meydana gelen bağlantı açısı	48
6.6 Eşik kontrolcüsü aktifken (a) çekilen akım değeri ve (b) uygulanan frenleme zamanlaması	49
6.7 Eşik kontrolcüsü aktifken uygulanan frenleme tork değerleri	50
6.8 BM kontrolcüsü aktifken manevra sonrasında oluşan (a) sapma oranı ve (b) yanal ivmelenme değerleri	51
6.9 BM kontrolcüsü aktifken manevra sonrasında oluşan bağlantı açısı	52
6.10 Mamdani kontrolcüsüne ait (a) sapma oranı ve akım değerleri (b) frenleme zamanlaması	53
6.11 Mamdani kontrolcü aktifken uygulanan frenleme torku	54
6.12 Sugeno kontrolcüsüne ait (a) sapma oranı ve akım değerleri (b) frenleme zamanlaması	55
6.13 Sugeno kontrolcü aktifken uygulanan frenleme torku	56
6.14 (a) Kontrolcü kapalıyken gerçekleştirilen test esnasında destek tekerleğine temas edilmesi ve (b) saha testlerinden bir görüntü	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Parametreler ve değerleri	13
5.1 BM kural tabanı	36



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

m_1	: Taşıtın kütlesi
I_1	: Taşıtın atalet momenti
a	: Taşıtın ağırlık merkeziyle ön tekerlek arasındaki mesafesi
b	: Taşıtın ağırlık merkeziyle arka tekerlek arasındaki mesafesi
d	: Taşıtın ağırlık merkeziyle bağlantı noktası arasındaki mesafesi
m_2	: Karavanın kütlesi
I_2	: Karavanın atalet momenti
e	: Karavanın ağırlık merkeziyle bağlantı noktası arasındaki mesafesi
h	: Karavanın ağırlık merkeziyle tekerlek arasındaki mesafesi
C_1	: Taşıt ön tekerleğinin viraj alma sertliği
C_2	: Taşıt arka tekerleğinin viraj alma sertliği
C_3	: Karavan tekerleğinin viraj alma sertliği
δ	: Taşıt ön tekerleğinin direksiyon açısı
U	: Taşıtın boylamsal hızı
V	: Taşıtın yanal hızı
r	: Taşıtın sapma oranı
ψ	: Taşıt-karavan arasındaki bağlantı açısı
U'	: Karavanın boylamsal hızı
V'	: Karavanın yanal hızı
r'	: Karavanın sapma oranı
F_X	: Taşıt-karavan bağlantı noktasında X ekseninde oluşan kuvvetler
F_{X1}	: Taşıt ön tekerleğine ait sürtünme kuvveti
F_{X2}	: Taşıt arka tekerleğine ait sürtünme kuvveti
F_{X3}	: Karavan tekerleğine ait sürtünme kuvveti
F_X	: Taşıt-karavan bağlantı noktasında X ekseninde oluşan kuvvetler
F_Y	: Taşıt-karavan bağlantı noktasında Y ekseninde oluşan kuvvetler
f_1	: Taşıt ön tekerleğinde oluşan yanal kuvvet
f_2	: Taşıt arka tekerleğinde oluşan yanal kuvvet
f_3	: Karavan tekerleğinde oluşan yanal kuvvet
α_1	: Taşıt ön tekerleğinde oluşan kayma açısı

α_2 : Taşıt arka tekerleğinde oluşan kayma açısı
 α_3 : Karavan tekerleğinde oluşan kayma açısı
 M_Z : Aktif sapma momenti

Kısaltmalar

TK : Taşıt-Karavan
TV : Tork Vektörleme
AYK : Aktif Yönlendirme Kontrolü
AKDF : Aktif Karavan Diferansiyel Frenleme
ADF : Aktif Diferansiyel Frenleme
TR : Taşıt-Römork
DGY : Değişken Geometri Yaklaşımı
DKR : Doğrusal Karesel Regülatör
BM : Bulanık Mantık
MRAK : Model Referans Adaptif Kontrol
OİT : Oransal İntegral Türev
GA : Genetik Algoritma
YSA : Yapay Sinir Ağları
BSA : Bulanık Sinir Ağları
NB : Negatif Büyük
NK : Negatif Küçük
SF : Sıfır
PK : Pozitif Küçük
PB : Pozitif Büyük
EKÜ : Elektronik Kontrol Ünitesi
AÖÜ : Ataletsel Ölçüm Ünitesi
DAA : Denetleyici Alan Ağı

1. GİRİŞ

Taşıt-karavan (TK) sistemleri yakıt tasarrufu sağlaması, taşıma kapasitesini artırması gibi avantajlardan dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Taşıt ve arkasındaki ünite tek bir bağlantı noktasından birbirlerine bağlanmaktadır. Taşıtın çektiği ünite römork, karavan veya bir tekne olabilmektedir. Tez çalışmasında TK sistemleri üzerine odaklanılmıştır.

Elektrikli araçların hızla yaygınlaşmasıyla beraber otomotiv endüstrisi de bir dönüşüm içerisine girmiştir. Karavanlar içinde bu değişim kaçınılmaz olmuştur. İçten yanmalı motorlu araçlarla beraber karavanların kullanılması araçların daha fazla yakıt tüketimine neden olmaktadır. Karavanı çeken araç elektrikli ise yakıt tüketimi daha da önemli olmaktadır. Bu noktada hem karavan sisteminin kendinden tahrikli olması hem de aktif şasi kontrol yöntemine sahip olması önem arz etmektedir.

TK sistemlerinde kullanılan aktif şasi kontrol yöntemi incelendiğinde farklı tekniklerin uygulandığı gözlemlenmiştir. Öncelikle TK sistemi farklı serbestlik dereceleri ile modellenerek simülasyon ortamında sistemin modeli çıkartılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde 3 veya 5 serbestlik dereceli doğrusal model [1–4] ile 4 veya 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan modellerin [3, 5] sıklıkla kullanıldığı görülmüştür.

TK sisteminin öncelikle kullanım amacının belirlenmesi gerekmektedir. Ardından kullanım yerine göre serbestlik derecesine karar verilmelidir. Serbestlik derecesi göre elde edilen model üzerinde aktif şasi kontrol yöntemi geliştirilebilmektedir. Mevcut yöntemler incelendiğinde eklemli araçlardaki sürüş dinamiklerinin zorluğu aktif şasi kontrol tekniklerinin önemini göstermektedir. Karavan stabilizasyonunu sağlarken aynı zamanda aktif şasi kontrol teknikleri kayma, osilasyona girme ve katlanma gibi kararsız durumlar ile baş etmektedir [1, 2, 4, 6–9]. TK sistemlerindeki kontrol yöntemleri aktif karavan diferansiyel frenleme (AKDF) ve aktif yönlendirme kontrolü (AYK) olarak ifade edilmektedir. Literatürde TK sistemlerinde diferansiyel frenleme (DF) ve tork vektörleme (TV) yöntemlerini kullanarak taşıt yanal kararlılığını artıran çalışmalar bulunmaktadır [4, 5, 10–20].

TK sistemi için geliştirilen kontrol algoritmasının performansı ve dinamik kararlılık

analizi simülasyon ve saha testleriyle gösterilmiştir. TK sistemi 3 serbestlik derecesi ile modellenmiş ve CarSim ile model doğrulanmıştır. Sistem parametrelerinin dinamik kararlılık üzerine etkisinin gözlemlenebilmesi için farklı değişiklikler ile simülasyon ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Ardından MATLAB/Simulink ve CarSim eş zamanlı simülasyonu ile geliştirilen DKR ve BM kontrolcülerini test edilmiştir. BM kontrolcüsü için Takagi-Sugeno ve Mamdani bulanık çıkarım modelleri simülasyon ve saha testleriyle performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre elektrik tahrikli karavan için geliştirilen BM tabanlı kontrolcünün yanal kararlılığı başarılı bir şekilde sağladığı simülasyon ve deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir.

TK sistemlerinde hem tahrik mekanizmasının kendi üzerinde olması hem de aktif şasi kontrol yöntemine sahip olan bir çalışma bulunmamaktadır. Tez kapsamında yapılacak çalışmalar ile belirtilen bilgi boşluğunun doldurulması hedeflenmiştir. Ayrıca karavanın hem elektrik tahrikli olması hem de savrulma önleyici diferansiyel frenleme yöntemini kullanması tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

TK sisteminin 3 serbestlik derecesi ile modellenmesi ikinci bölümde bahsedilmiştir. Farklı serbestlik dereceleri ile modellenmesi durumunda oluşan avantajlar ve dezavantajlar ele alınmıştır. Taşıt ve karavan üzerinde oluşan kuvvet ve moment denklemleri ifade edilmiştir. Aktif şasi kontrol yöntemi için mevcut denklemlerin güncellenmesi gerçekleştirilmiştir. TK sistemi modellendikten sonra durum uzay formunda ifade edilmiştir.

TK sisteminde elde edilen hareket denklemlerine göre dinamik kararlılık analizi üçüncü bölümde gerçekleştirilmiştir. TK sistem parametrelerinden olan ağırlık merkezinin yeri, sistem kütlesi ve atalet momenti değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Belirlenen sistem parametrelerine göre TK sistemi için kritik hız sınırı tayin edilmiştir. Özellikle kritik hız sınırının tespit edilmesi hem kullanıcılar için hem de karavan üreticileri için önem arz etmektedir.

Durum uzay formunda ifade edilen sistem için MATLAB/Simulink ortamında DKR ve BM kontrolcülerini dördüncü bölümde geliştirilmiştir. İki farklı kontrolcünün simülasyon ortamında kullanılmasının sebebi, model bağımlı ve bağımsız sistemlerin uygulamaya yönelik kullanım kolaylıklarını tecrübe etmektir. Geliştirme süreçleri sonucunda saha testlerinde BM kontrolcüsünün kullanılmasına karar verilmiştir. Karar aşamasında etkili olan hususlar aynı bölüm içerisinde paylaşılmıştır.

TK sistemine yönelik geliştirilen aktif şasi kontrol yönteminin deneysel çalışmaları ve sonuçları beşinci bölümde paylaşılmıştır. BM çıkarım yöntemlerinden olan Takagi-Sugeno ve Mamdani modeliyle geliştirilen kontrolcülerin performansları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Çift şerit değiştirme testinde karavan üzerindeki sensörler vasıtasıyla elde edilen eklem açısı, yanal ivmelenme ve savrulma oranlarına ait elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre BM kontrolcüsünün yanal kararlılığı sağladığı ifade edilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Eklemlı araçlar yakıt tüketimlerini azalttıkları ve taşıma kapasitesini arttırdıkları için farklı konfigürasyon ve çeşitli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yakıt tüketimi özellikle elektrikli araçlarla beraber kullanılması durumunda önem arz etmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla beraber kendi donanımlarına uygun olarak aktif güvenlik sistemleri kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda aktif güvenlik sistemi olarak tork vektörleme (TV) yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir [21–27].

Eklemlı araçların avantajları olduğu gibi kullanım esnasında dikkat edilmesi gereken bazı durumlar mevcuttur. Eklemlı araçlar kendilerine has sürüş dinamiklerine sahip oldukları için kullanılması zor ve güvenlik sorunlarının ortaya çıktığı durumlar meydana gelmektedir [28–31].

Hac vd. (2008) doğrusal 3 serbestlik derecesi ile taşıt-römork (TR) sistemini modellemiştir. Elde edilen sistem modeli vasıtasıyla dinamik kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Yuvarlanma hareketinin dikkate alınmadığı model üzerinden yanal kararlılığın sağlanmasına yönelik simetrik ve asimetrik frenleme yöntemleri kullanılmıştır. Asimetrik uygulanan frenleme yönteminin daha başarılı sonuçlar ürettiği paylaşılmıştır [1].

He vd. (2013) farklı serbestlik dereceli modeller ile sistem davranışlarının ifade edilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. TR sistemi; doğrusal 3 serbestlik derecesi, doğrusal olmayan 4 ve 6 serbestlik derecesi ve CarSim modeli ile ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düşük ivmelenmeli manevralar altında doğrusal 3 serbestlik dereceli modelin diğer modellere yakın sonuçlar üretildiği paylaşılmıştır. Fakat yüksek ivmelenme meydana gelen manevralar esnasında 3 serbestlik dereceli modelin zayıf kaldığı ifade edilmiştir [3].

Sun (2013) 4 ve 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan TR modelini kullanmıştır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen testler ile sistem modellerinin doğrulukları gösterilmiştir [5].

Doğrusal olmayan yüksek serbestlik dereceli modeller ile ifade edilen sistem davranışları genellikle daha başarılı olmaktadır. Fakat doğrusal sistemler için kontrolcünün

geliştirilmesi hem basit hem de hesaplama yükünün az olmasından dolayı yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Eklemlı araçlara örnek olarak verebileceğimiz ve tez konusu kapsamında ele alınan TK sistemlerinde kararsız durumlar ile baş edebilecek aktif şasi kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kararsız durumlar; karavanın osilasyona girmesi, kayma hareketinin oluşması ve çekici aracın katlanması gibi ifade edilmektedir. Eklemlı araçlarda meydana gelen kararsız modları engellemek için aktif yönlendirme kontrolü (AYK) ve aktif diferansiyel frenleme (ADF) yöntemleri kullanılmaktadır.

Fernandez vd. (2001) TK sisteminde karavan üzerinde aktif kontrol yöntemini uygulamıştır. Sapma hareketinin meydana gelmesi durumunda karavan tekerleklerinde oluşturulan frenleme torku ile yanal kararlılık sağlanmıştır [17]. Williams vd. (2004) tarafından TK sisteminde yanal kararlılık için bağlantı noktasında meydana gelen açı değişimlerine göre çalışan bir aktif kontrol yöntemi önerilmiştir [14].

Zhao vd. (2011) aktif kontrol yöntemlerinin ADF ve AYK beraber kullanılmasına yönelik çalışılmıştır [31]. ADF ve AYK yönteminin beraber kullanılması durumunda AYK'ya göre daha başarılı sonuçlar elde edildiği paylaşılmıştır.

Shamim vd. (2011) aktif şasi kontrol tekniklerinin yanal kararlılık üzerine etkileri incelenmiştir. Aktif römork diferansiyel frenleme (ARDF), aktif römork yönlendirme kontrolü (ARYK) ve değişken geometri yaklaşımı (DGY) yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçları paylaşılmıştır. Aynı zamanda doğrusal karesel regülatör (DKR) kontrolcüsü geliştirilmiş ve aktif şasi kontrol yöntemi olmadığı durumlarla simülasyon ortamında karşılaştırması yapılmıştır [2].

Sun vd. (2012) aktif römork frenleme (ARF) yöntemini kullanarak TR sisteminde yanal kararlılığı iyileştirdiğini ve kararsız durumların engellendiğini göstermiştir. TR sistemi 3 serbestlik derecesi ile modellenmiştir. Bu sistem için bir DKR kontrolcüsü geliştirilmiştir. Simülasyon ortamında tek şerit değiştirme testleri gerçekleştirilerek yüksek hızlarda TR sisteminin kararlılığı tesis edilmiştir [16].

Sun vd. (2016) aktif şasi kontrol tekniğı olarak DF yöntemini kullanan eklemlı araçlara yönelik çeşitli dinamik analizler gerçekleştirmiştir. 6 serbestlik derecesi ile ifade edilen modelin kararlı olduğu aralıklar çıkartılmıştır. Ayrıca bulanık mantık (BM) kontrolcüsü geliştirilerek sistemin stabilizasyonuna yönelik yüksek hızlarda testler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen sistemin aktif güvenlik yöntemi olarak

kullanılabileceği paylaşılmıştır [18].

Abroshan vd. (2020) TR sisteminde çekici aracın elektrikli olduğu bir çalışma gerçekleştirmiştir. Model öngörülü kontrol (Model Predictive Control, (MÖK)) ile DF oranının belirlendiği çalışmada sistemin yanal kararlılığı uygulanan farklı testler ile denenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MÖK kontrolcüsünün kararsız durumların oluşmasını engellediği gösterilmiştir [32].

Zhao vd. (2021) DF tabanlı MÖK ile yüksek hızlarda farklı senaryolar için deneyler gerçekleştirmiştir. DF'nin sadece çekici araca, sadece römork veya her ikisine birden uygulandığı durumlar incelenmiştir. Eklemlı araçlarda sistem dinamiğini iyileştirmede sadece çekici araçta frenleme uygulamanın daha ekonomik olduğu belirtilmiştir [33].

Aktif yönlendirme kontrolü (AYK) yöntemi otomotiv endüstrisinde ve insansız otonom araçlarda olduğu gibi [34–38] taşıt-römork sistemlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır. DF yöntemiyle beraber veya sadece AYK yönteminin kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Kang vd. (2007) TR sistem dinamikleri ve kararlılık kontrollerine yönelik literatürde kullanılan yöntemleri incelemiştir. Taşıt arka tekerlek yönlendirme kontrolü ve römork yönlendirme kontrolü yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları paylaşılmıştır. Eklemlı araçların kendilerine özgü dinamikler içermesinden dolayı aktif kontrol sistemlerini barındırması gerektiği ifade edilmiştir [29].

Kageyama vd. (1995) yüksek hızlarda TR sisteminin stabilizasyonu üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çekici araçtaki 4 tekerin yönlendirilmesiyle, taşıtın arka teker yönlendirme kontrolünde elde edilen sonuçların benzer olduğu ifade edilmiştir. Durum uzay formunda ifade edilen sistem için geri besleme kontrolcü yöntemi geliştirilmiştir. Yüksek hızlarda sistemin kararlılık sorununun çözüldüğü paylaşılmıştır [39].

Ding vd. (2012) eklemlı ağır araçlar için aktif römork yönlendirme kontrolcüsü önermiştir. DKR ve BM kontrolcüleri aktif yönlendirme kontrol yöntemini kullanacak şekilde geliştirilmiştir. DKR kontrolcüsünün BM'a göre daha başarılı sonuçlar ürettiği paylaşılmıştır [40]. Wang vd. (2015) DKR ve model referans adaptif kontrol (MRAK) tekniklerini karşılaştırmalı olarak eklemlı ağır araçlar için geliştirmiştir. Model bağımlı kontrolcülerde sistem parametrelerinin değişmesi durumunda gösterdikleri tepkilerdeki kararsız olabilme ihtimaline karşı adaptif kontrol tekniği önerilmiştir. Uygulanan simülasyon testlerine göre MRAK tekniğinin DKR'ye göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir [41].

Abroshan vd. (2017) hem çekici aracın hem de römorkta bulunan bütün tekerleklerle direksiyon açısı verilebilen bir sistem üzerine çalışmıştır. Belirtilen sistem için BM ve oransal integral türevsel (OİT) kontrolcileri geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcüler sayesinde yanal tekerlek kuvvetlerinde azalma meydana geldiği gösterilmiştir. Ek olarak daha düşük direksiyon açılarıyla referans güzergahı takip edilebildiği paylaşılmıştır [42].

Keldani vd. (2019) TR sistemleri için gürbüz DKR tabanlı aktif römork yönlendirme kontrolcüsü geliştirmiştir. DKR tabanlı kontrolcü tasarlanırken sistem parametrelerinin sabit olduğu kabul edilmektedir. Fakat sistem parametreleri çeşitli sebeplerden dolayı değişimlere maruz kalmaktadır. Taşıt veya römorkun kütlesi, ağırlık merkezinin yeri zaman içerisinde değişebilmektedir. Bu değişim sistem davranışlarına doğrudan etki etmektedir. Bu durumla baş edebilmesi için gürbüz kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Önerilen kontrolcü yöntemiyle sistemin belirli sınırlar altında kararlılığını garanti edilebileceği gösterilmiştir [43].

Peng vd. (2021) ağır eklemli araçlarda aktif yönlendirme kontrolüne yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Aktif yönlendirme kontrol yöntemi kullanılmasıyla tekerleklerde meydana gelen yanal kuvvetlerde azalma olduğu gösterilmiştir. Ağır eklemli araca farklı yükler uygulanarak sistem davranışları incelenmiştir. Yanal kararlılığı artırmak için sistem parametrelerinin ve kullanılan kontrol yönteminin etkisi gösterilmiştir [44].

Lee vd. (2016) DKR ve H_∞ kontrolcülerini TK sistemlerinde yanal kararlılığı sağlamak için geliştirmişlerdir. TK sistemi 3 ve 5 serbestlik derecesi ile modellenmiştir. TK sistemindeki parametre değişimlerine karşı kararlılığı garanti altına almak için gürbüz kontrolcüsü geliştirilmiştir. Kontrolcü parametrelerinin optimizasyonunda ise genetik algoritma (GA) tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre TK sisteminde meydana gelen kararsız durumların engellendiği gösterilmiştir [4].

Sun vd. (2013) TK sistemi için farklı kontrol teknikleri üzerine çalışmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan modeller ile farklı serbestlik dereceleri ile modellenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında modellenen sistem üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin karşılaştırmalı sonuçları paylaşılmıştır. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre 0.5g'nin altında oluşan ivmelenmeli manevralar için 3 serbestlik dereceli modelin kabul edilebilir dinamikler gösterdiği paylaşılmıştır [5].

Abroshan vd. (2021) MÖK tekniğini kullanarak TK sistemindeki kararsız durumların engellenmesine yönelik testler gerçekleştirmiştir. Geliştirilen kontrolcü bağlantı

açısı ve sapma oranını kararlı sınırlar içinde tutmayı hedeflemiştir. Şerit değiştirme ve katlanma hareketini oluşturacak manevralar ile sistemin performansı incelenmiştir. TK sisteminde kararlılığı sağlamak için MÖK kontrolcüsü ile DF tekniğinin uygulanabilirliği gösterilmiştir [32].

BM kontrolcüsü son zamanlarda taşıt güvenlik sistemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [45–49]. Sun vd. (2016) ADF yöntemini BM kontrolcüsüyle beraber kullanarak TK sisteminin yanal kararlılığını geliştirmiştir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen testlerde sapma ve yuvarlanma hareketleri incelenmiştir. Doğrusal olmayan kararlılık analizleri sonuçlarına göre sistemin kararlılık sınırları belirtilmiştir [18].

Tez çalışması kapsamında tahrik sistemi üzerinde bulunan elektrikli karavan için BM kontrolcüsüyle sapma stabilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Karavan sisteminin elektrikli olması ve arazi karavanı kullanılarak saha testlerinin gerçekleştirilmesiyle literatüre özgün bir katkı sunulmuştur. Ek olarak, TK sistemlerinde sapma stabilizasyonu için tekerlek içi elektrik motorlarıyla frenleme torku uygulanmasına yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Sapma stabilizasyonu tekerlek içi elektrik motorlarında üretilen frenleme torkuyla sağlanmıştır. Geliştirilen BM tabanlı kontrolcü karavan elektronik kontrol ünitesi içerisine aktarılmıştır. TK sistemi MATLAB/Simulink ortamında 3 serbestlik derecesi ile modellenmiştir. Geliştirilen modele göre DKR kontrolcüsü tasarlanmıştır. CarSim ortamında geliştirilen kontrolcünün kararlılığı test edilmiştir. DKR ve BM tabanlı kontrolcülerinin performansları simülasyon ortamında karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Saha testlerinde kullanılacak olan BM kontrolcüsü Chevrolet Avalanche çekici araç ve kendinden tahrikli elektrikli karavan ile test edilmiştir.

3. TAŞIT-KARAVAN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Eklemlı araçların taşıt harıcinde kalan kısımları kullanım yerine göre değışmektedir. Çekici araçlarla beraber karavan, römork veya tekne gibi üniteler kullanılabilir. Tez çalışması kapsamında tek akslı çekme karavanların taşıtlarla beraber kullanılması incelenmiştir. Farklı akslara sahip çekme karavanlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.1. Çekme karavan örnekleri: (a) tek akslı [50] ve (b) çift akslı [51]

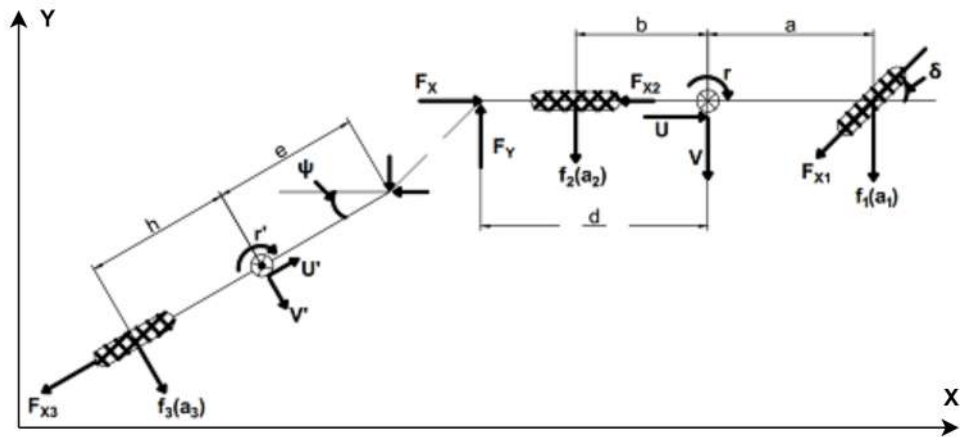
Doğrusal karesel regülatör (DKR) ve bulanık mantık (BM) kontrolcileri karşılaştırmalı olarak test edileceği için taşıt-karavan (TK) sisteminin matematiksel modeli elde edilmiştir. DKR ve BM kontrolcileri taşıt ve elektrikli karavan sisteminde sapma stabilizasyonunu sağlamak için tasarlanmıştır. Bu bölümde ilk olarak TK sisteminin dinamik hareket denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemler belirlenen varsayımlar altında doğrusallaştırılmıştır. Sistem modeli simülasyon ortamında kullanılmak ve kontrolcü performanslarını karşılaştırmak üzere çıkartılmıştır. Ek olarak, saha testlerine geçilmeden önce kontrolcü geliştirme faaliyetlerinde simülasyon ortamları kullanıldığından sistem modeline ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1. Taşıt-Karavan Modeli

TK sistemi 3 serbestlik dereceli doğrusal model kullanılarak ifade edilmiştir [2] ve dinamik davranışları açıklanmıştır. Kullanılan doğrusal modelin 3 serbestlik derecesi:

- V - taşıt yanal hızı (m/s)
- r - taşıt sapma oranı (rad/s)
- ψ - karavan bağlantı açısı (rad)

TK sisteminin serbest cisim diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. TK sisteminin serbest cisim diyagramı

Hareket denklemleri elde edilirken aynı aksta bulunan tekerleklerin aynı kayma açısına sahip olduğu varsayılmıştır. Bu durumda taşıtın X ekseninde oluşan hareket denklemleri,

$$m_1(\dot{U} - V.r) = -F_{X1}.cos\delta - F_{X2} + F_X \quad (3.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Yanal lastik kuvvetlerini de içeren taşıtın Y ekseninde oluşan hareket denklemleri,

$$m_1(\dot{V} + U.r) = f_1(a_1) + f_2(a_2) + F_{X1}.sin\delta - F_Y \quad (3.2)$$

şeklinde belirtilmektedir. Taşıtın ağırlık merkezi etrafından oluşan momentler,

$$I_1\dot{r} = a.f_1(a_1) - b.f_2(a_2) + a.F_{X1}sin\delta + d.F_Y \quad (3.3)$$

şeklindedir. Karavanın X ekseninde oluşan hareket denklemleri,

$$m_2(\dot{U}' - V'.r') = -F_{X3} - F_X.cos\psi - F_Y.sin\psi \quad (3.4)$$

olarak belirtilmektedir. Karavanın Y ekseninde meydana gelen kuvvetler,

$$m_2(\dot{V}' + U'.r') = f_3(a_3) - F_X.sin\psi + F_Y.cos\psi \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Karavanın ağırlık merkezi etrafında oluşan momentler,

$$I_2\dot{r}' = -h.f_3(a_3) - e.F_X.sin\psi + e.F_Y.cos\psi \quad (3.6)$$

olarak ifade edilmektedir. Taşıt ve karavan sistemi birbirlerine tek bir bağlantı noktasından bağlıdır ve bağlantı noktasındaki hızları ve ivmeleri eşittir. Karavan hareket denklemleri elde edilirken taşıtın ağırlık merkezini referans alan sabit bir koordinat sistemi kullanılmıştır. Bu durumda, karavanda oluşan boylamsal ve yanal hız değerleri,

$$U' = U.cos\psi - (V - d.r)sin\psi \quad (3.7)$$

$$V' = U.sin\psi + (V - d.r)cos\psi - e.r' \quad (3.8)$$

Denklem (3.7) ve (3.8) ile ifade edilebilmektedir. Taşıt ve karavan sisteminin Denklem (3.1) - (3.6) arasındaki hareket denklemlerine bakıldığında doğrusal olmayan ifadelerin bulunduğu görülmektedir. Belirtilen modelin doğrusallaştırılabilmesi için:

- Taşıtın boylamsal hızı U sabit olarak alınmaktadır. Bundan dolayı Denklem (3.1) ihmal edilmiştir.

- Küçük açı yaklaşımıyla: $\cos\psi = 1$, $\sin\psi = \psi$ olarak kabul edilmektedir.
- Bütün bağımlı değişkenler ihmal edilmiştir.

Yanal tekerlek kuvveti, her bir tekerlek için doğrusal denklem takımı kullanılarak ifade edilirse,

$$f_i(a_i) = C_i a_i \quad (3.9)$$

olarak yazılabilmektedir. Taşıtın ön, arka ve karavan tekerleğinde oluşan kayma açısı için,

$$a_1 = (V + ra)/U - \delta_f \quad (3.10)$$

$$a_2 = (V - rb)/U \quad (3.11)$$

$$a_3 = [V - r(d + e + h) + (e + h)\dot{\psi}]/U + \psi \quad (3.12)$$

belirtilen denklem takımları kullanılabilmektedir. Modelin serbestlik derecelerini elde edebilmek için Denklem (3.7) - (3.9)'da belirtilen ifadeler, Denklem (3.1) - (3.6) arasında belirtilen denklemlerde yerlerine yazılması gerekmektedir. Hareket denklemleri yukarıda belirtilen varsayımlar altında doğrusallaştırıldığında, aşağıda verilen durum-uzay formu ile ifade edilebilmektedir.

$$M\{\dot{x}\} + D\{x\} + F\delta = 0 \quad (3.13)$$

Durum değişkenleri olarak,

$$\{x\} = \{Vr\dot{\psi}\psi\} \quad (3.14)$$

belirtilebilmektedir. Denklem (3.13)'de kullanılan M, D ve F matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & -m_2 d & -m_2 e & 0 \\ -m_2 d & I_1 + m_2 d^2 & m_2 e d & 0 \\ -m_2 e & m_2 e d & I_2 + m_2 e^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_1 a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D(:, 1 : 2) = \frac{1}{u} \begin{bmatrix} -c_1 - c_2 - c_3 & -c_1 a + c_2 b + c_3 d + (m_1 + m_2)u^2 \\ -c_1 a + c_2 b + c_3 d & -c_1 a^2 - c_2 b^2 - c_3 d^2 - m^2 du^2 \\ c_3(h + e) & -c_3 d(h + e) - m_2 eu^2 \\ 0 & -u \end{bmatrix}$$

$$D(:, 3 : 4) = \frac{1}{u} \begin{bmatrix} c_3(h + e) & -c_3 u \\ -c_3 d(h + e) & c_3 du \\ -c_3(h + e)^2 & c_3(h + e)u \\ u & 1 \end{bmatrix}$$

3 serbestlik dereceli modelde kullanılan taşıt ve karavana ait parametreler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Parametreler ve değerleri

Taşıt kütlesi	m_1	2034 kg
Taşıt atalet momenti	I_1	4605 kgm^2
Taşıt ölçüsü	a	1.835m
Taşıt ölçüsü	b	1.385m
Taşıt ölçüsü	d	2.37m
Karavan kütlesi mass	m_2	1175 kg
Karavan atalet momenti	I_2	2496 kgm^2
Karavan ölçüsü	e	3.193m
Karavan ölçüsü	h	0.063m
Taşıt ön teker viraj alma direnci	C_1	-75000 Nm/rad
Taşıt arka teker viraj alma direnci	C_2	-75000 Nm/rad
Karavan teker viraj alma direnci	C_3	-60000 Nm/rad

3.2. Diferansiyel Frenleme

TK sisteminin hareket denklemleri 3 serbestlik derecesi ile modellenmiştir. Hareket denklemleri diferansiyel frenleme (DF) için yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. DF sistemi için Denklem (3.6)’da güncelleme gerçekleştirilmesi yeterli olacaktır. Karavan ağırlık merkezi etrafında oluşacak ΔM_z frenleme momentinin denklem takımına eklenmesi gerekmektedir.

$$I_2 \dot{r}' = -hf_3(a_3) - eX \sin\psi + eY \cos\psi + \Delta M_z \quad (3.15)$$

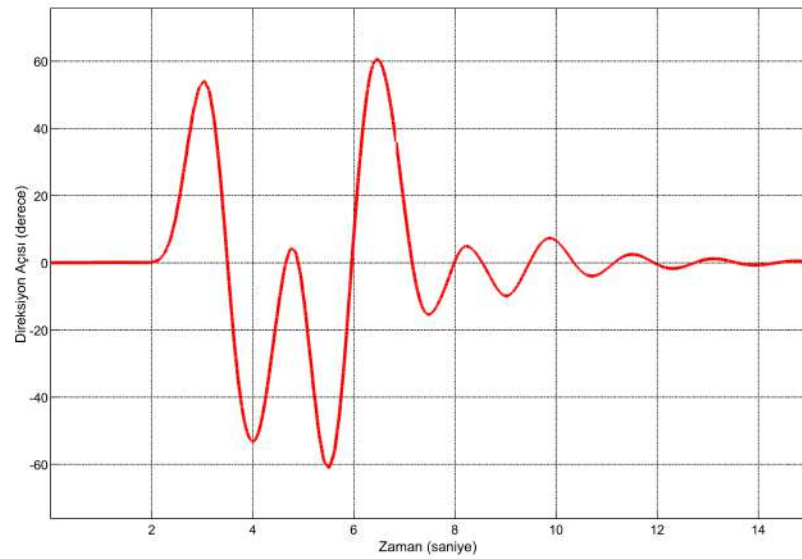
DF sistemi için hareket denkleminin güncellenmesinden dolayı durum uzay gösteriminde de değişiklik yapılması gerekmektedir. Denklem (3.16)'de belirtilen M , D , F ve C_b matrisleri bir önceki başlık içerisinde paylaşılmıştır.

$$M\{\dot{x}\} + D\{x\} + C_b u + F\delta = 0 \quad (3.16)$$

$$u = \Delta M_z \quad (3.17)$$

3.3. Modelin Doğrulanması

TK sistemi 3 serbestlik derecesi doğrusal model ile ifade edilmiştir. Elde edilen denklem takımlarının kontrolcü tasarımında kullanılabilmesi için doğrulanması gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bu noktada CarSim gibi yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılım üzerinden MATLAB/Simulink ortamı içerisine verilerin aktarılabilirdiği eş zamanlı bir simülasyon ortamı oluşturulabilmektedir. MATLAB/Simulink ortamında TK sisteminin modeli oluşturulup şerit değiştirme manevrasında sistem davranışları CarSim ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilecektir. MATLAB/Simulink ortamında TK sistemine uygulanan direksiyon manevrası Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. TK sistemine uygulanan direksiyon açısı

MATLAB/Simulink ortamında ve CarSim eş zamanlı simülasyonu için TK sistemine çift şerit değiştirme manevrası uygulanmıştır. Test manevrası için taşıtın hızı 80 km/h olarak ayarlanmıştır. TK sistemine direksiyon açısı uygulandıktan sonra 3 serbestlik dereceli modelden ve CarSim yazılımından alınan sonuçlar Şekil 3.4a, 3.4b, 3.5a ve 3.5b’de gösterilmiştir.

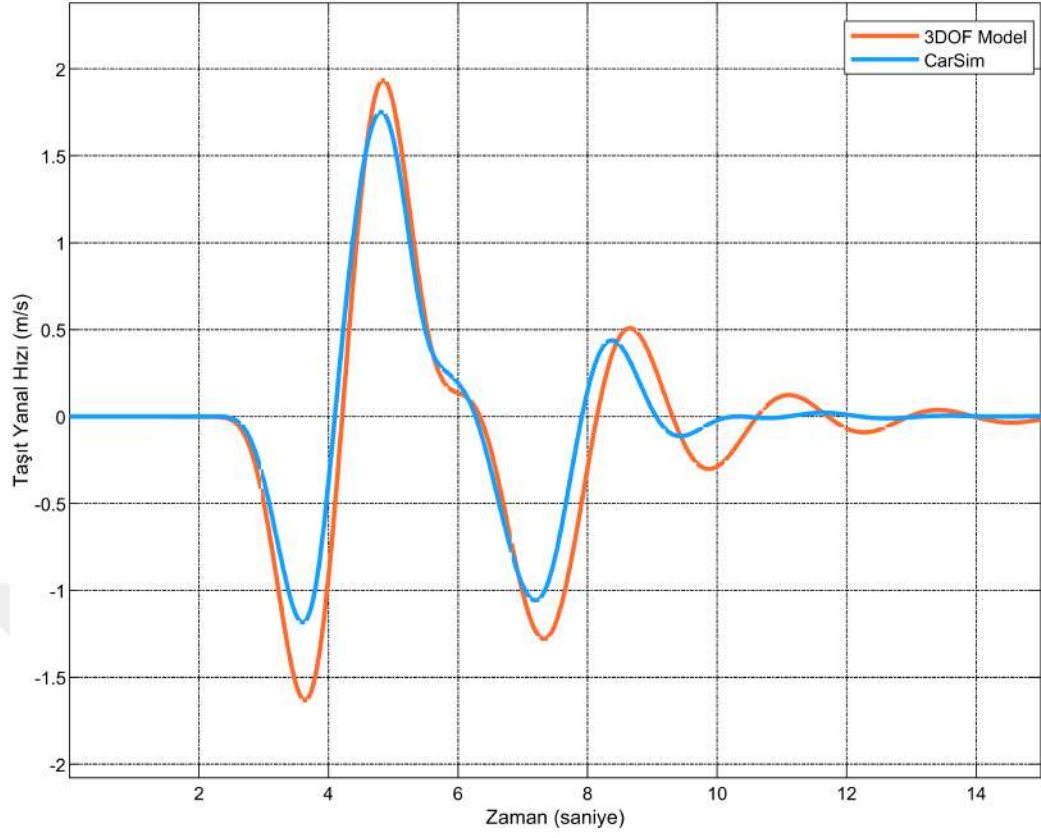
Şekil 3.4a incelendiğinde CarSim yazılımından elde edilen taşıt yanal hızı maksimum 1.75 m/s iken, 3 serbestlik dereceli modelin ürettiği tepki 1.9 m/s olarak gözlemlenmiştir.

Taşıtta oluşan savrulma oranı Şekil 3.4b’de gösterilmiştir. CarSim yazılımında elde edilen sonuçlara göre maksimum 12.6 derece/s’lik bir değer gözlemlenirken, 3 serbestlik dereceli model 15.4 derece/s’lik sonuç üretmiştir.

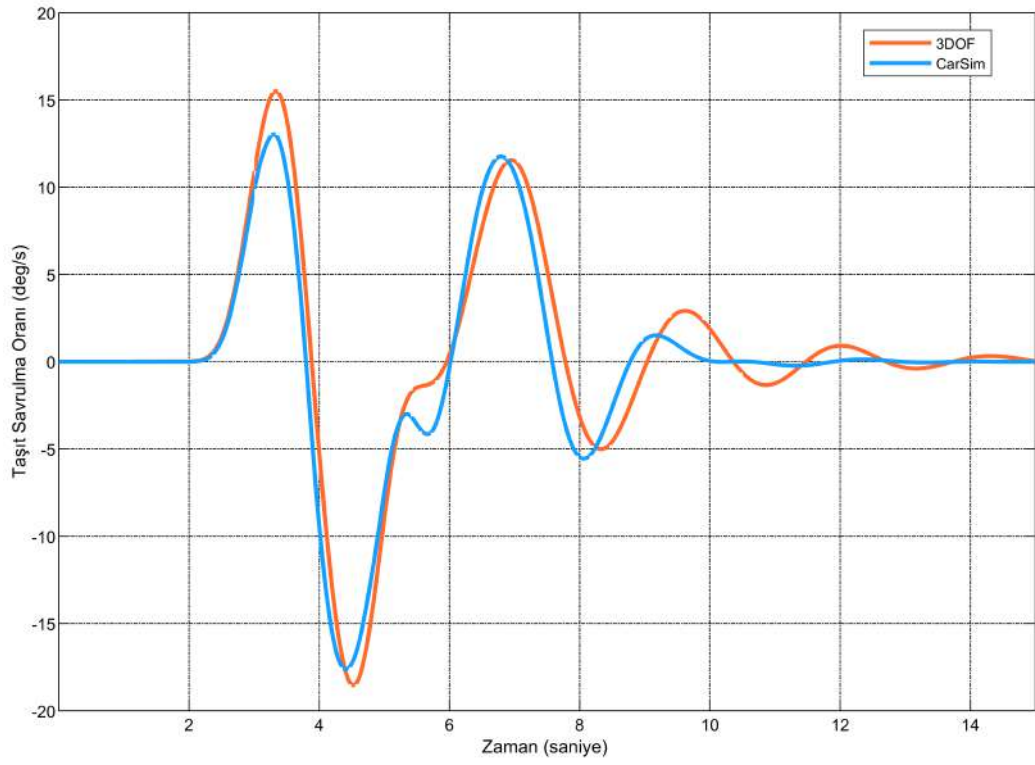
TK sisteminin bağlantı açısında oluşan sonuçlar Şekil 3.5a’da gösterilmiştir. CarSim yazılımından elde edilen bağlantı açısı değeri maksimum 8.7 derece olurken, 3 serbestlik dereceli model maksimum 10.6 derece olarak elde edilmiştir.

Karavanda oluşan savrulma oranları Şekil 3.5b’de gösterilmiştir. CarSim yazılımı maksimum 32.4 derece/s’lik bir sonuç üretirken, 3 serbestlik dereceli model maksimum 29.7 derece/s’lik bir tepki üretmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre 3 serbestlik dereceli model ile CarSim üzerinden alınan sonuçların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, 3 serbestlik dereceli modelin kontrolcü tasarımında kullanılabileceği de gösterilmiştir.

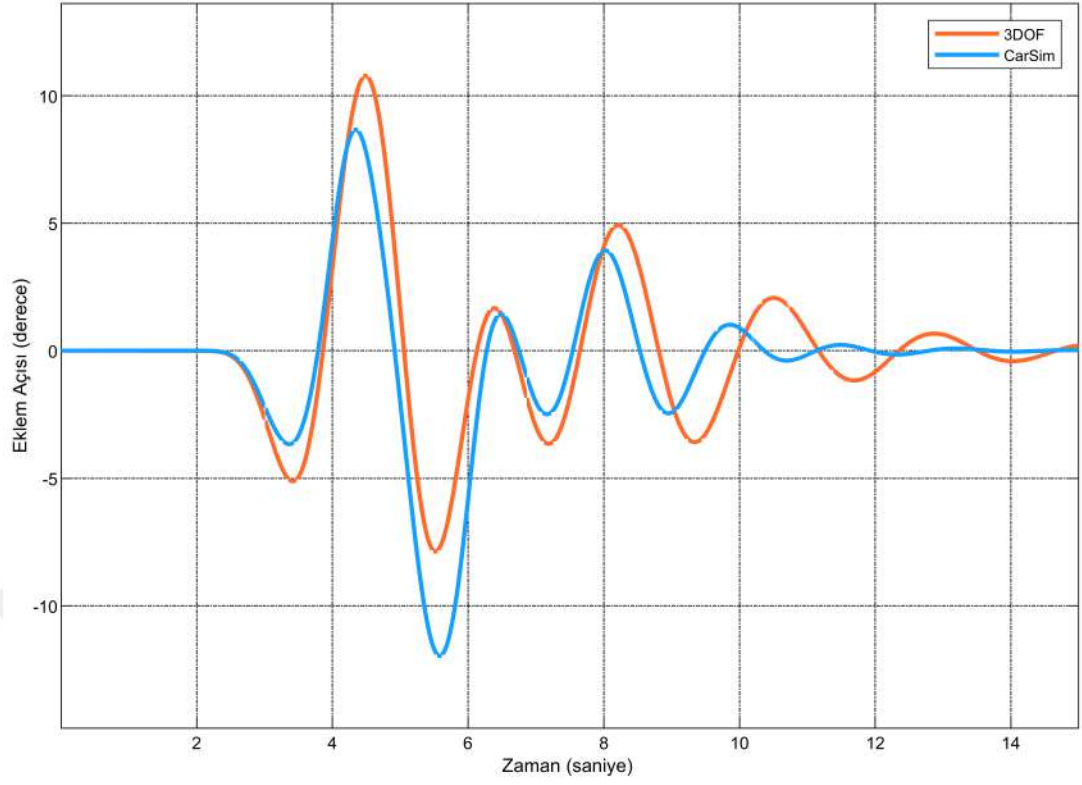


(a)

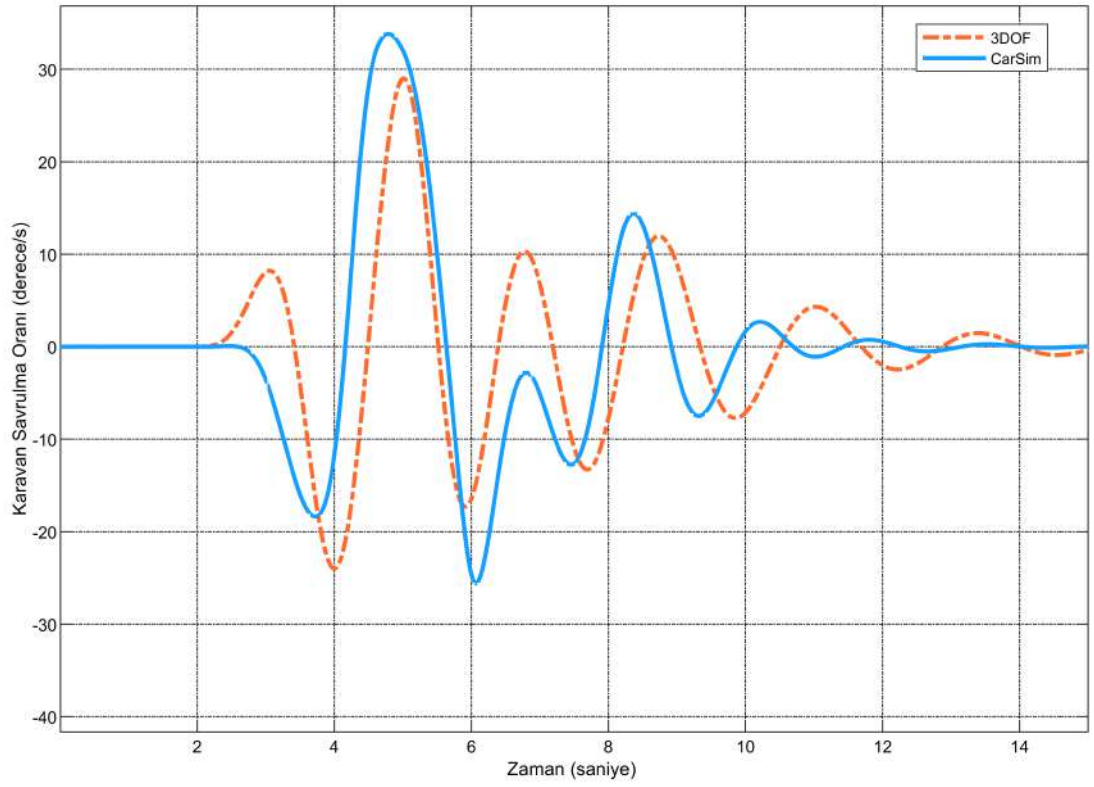


(b)

Şekil 3.4. Modellerin ürettiği taşıt yanal hızı ve sapma oranları sonuçlarının karşılaştırılması



(a)



(b)

Şekil 3.5. Modellerin ürettiği bağlantı açısı ve karavan sapma oranı sonuçlarının karşılaştırılması

3.4. Farklı Serbestlik Dereceli Modellerin Karşılaştırılması

TK sistemleri için kontrolcü geliştirme ve dinamik kararlılık analizlerinin gerçekleştirildiği çalışmalar incelendiğinde farklı serbestlik dereceli modellerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Sistem modelinin çıkarılma sebebi ve dikkat edilmesi gereken sistem parametrelerine göre model seçiminde bulunulması gerekmektedir. Bu başlık altında doğrusal 3 ve 5 serbestlik dereceli model ile doğrusal olmayan 4 ve 6 serbestlik modeller karşılaştırılacaktır. Her modele ait avantaj ve dezavantaj belirtilecektir.

Doğrusal 3 serbestlik dereceli model; V - taşıt yanal hızı (m/s), r - taşıt savrulma oranı (rad/s), ψ - bağlantı açısı (rad) belirtilen serbestlik derecelerinden oluşmaktadır. Modelin avantajları:

- Modellenmesi kolay,
- Savrulma kontrolü için uygun,
- Durum değişkenlerinin ölçülmesi kolay,

olarak belirtilebilmektedir. Modelin dezavantajları ise:

- Yüksek ivmelenmelerden etkilenmesi,
- Sadece savrulma hareketinin izlenebilmesi

olarak ifade edilebilmektedir. Doğrusal olmayan 4 serbestlik dereceli model; V - taşıt yanal hızı (m/s), $\dot{U}$ - taşıt boylamsal hızı (m/s), r_c - taşıt sapma hızı (rad/s), r_t - karavan sapma hızı (rad/s) belirtilen serbestlik derecelerinden oluşmaktadır. Modelin avantajları:

- Yüksek ivmelenmelere karşı duyarlı,
- Yanal lastik kuvvet doygunluğunun dikkate alınması

olarak belirtilebilmektedir. Modelin dezavantajları ise:

- Serbestlik derecelerinin ölçülebilmesi için ilave sensör ihtiyacı,
- Sadece savrulma hareketinin izlenebilmesi

olarak ifade edilebilmektedir. Doğrusal 5 serbestlik dereceli model; V - taşıt yanal hızı (m/s), r_c - taşıt sapma hızı (rad/s), r_t - karavan sapma hızı (rad/s), ϕ_c - taşıt yuvarlanma açısı (rad), ϕ_t - karavan yuvarlanma açısı (rad) belirtilen serbestlik derecelerinden oluşmaktadır. Modelin avantajları:

- Savrulma ve yuvarlanma eksen kontrolü için uygun

olarak belirtilebilmektedir. Modelin dezavantajları ise:

- Serbestlik derecelerinin ölçülebilmesi için ilave sensör ihtiyacı

olarak ifade edilebilmektedir. Doğrusal olmayan 6 serbestlik dereceli model; V - taşıt yanal hızı (m/s), $\dot{U}$ - taşıt boylamsal hızı (m/s), r_c - taşıt sapma hızı (rad/s), r_t - karavan sapma hızı (rad/s), ϕ_c - taşıt yuvarlanma açısı (rad), ϕ_t - karavan yuvarlanma açısı (rad) belirtilen serbestlik derecelerinden oluşmaktadır. Modelin avantajları:

- Yüksek ivmelenmelere karşı duyarlı,
- Yanal lastik kuvvet doygunluğunun dikkate alınması,
- Savrulma ve yuvarlanma eksen kontrolü için uygun

olarak belirtilebilmektedir. Modelin dezavantajları ise:

- Serbestlik derecelerinin ölçülebilmesi için ilave sensör ihtiyacı

olarak ifade edilebilmektedir.

4. KARARLILIK ANALİZİ

Bu bölümde, TK sistemlerinin 3 serbestlik dereceli modeli kullanılarak kararlılık analizleri incelenmiştir. TK sistemlerinin dinamik kararlılık karakteristiklerini incelemek için özdeğer analizi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre TK sistemlerinin kritik hız sınırı ortaya çıkarılmıştır. Kritik hız sınırı tespiti hem karavan üreticileri hem de kullanıcılar için bilinmesi gereken bir değerdir. Eklemleri araçların kendine has dinamikleri olduğundan sürücülerin de buna göre davranması gerekmektedir. Kritik hız sınırının bilinmesi ve elde edilen bilgiye göre kullanılması önem arz etmektedir.

4.1. Özdeğer Analizi

Özdeğer analizi TK sistemlerinde meydana gelen kararsız durumların tanımlamada ve tahmin etmede farklı serbestlik dereceli modeller ile kullanılmaktadır. Lee (2016) 5 serbestlik dereceli doğrusal model kullanarak ifade edilen sistemin kararlılık karakterizasyonu için özdeğer analizi yöntemini kullanmıştır [4]. Kullanılan sistemin kritik hız sınırı tespit edilmiş ve sistem parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Sun (2016) eklemleri araçların dinamik analizleri için doğrusal olmayan yöntemleri kullanmıştır. Taşıt-römork (TR) sistemi 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan model ile ifade edilmiştir. Sistemin yuvarlanma dinamikleri de incelendiği için 3 serbestlik dereceli model kullanılmamıştır. Doğrusal olmayan kararlılık analizinde faz düzlemi ve Lyapunov kararlılık analiz teorisi temelli olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre TR sistem parametreleri için kararlılık sınırları gösterilmiştir [18].

Kararlılık analizi sonuçlarına göre TK sisteminde kritik hız sınırı ortaya çıkmaktadır. Farklı hızlarda TK sisteminin sönümleme oranı da aynı analiz sonucuna göre gösterilmektedir. Denklem (3.13)'e göre 3 serbestlik dereceli model için tanımlanan sistem matrisi A,

$$A = -M^{-1}D \quad (4.1)$$

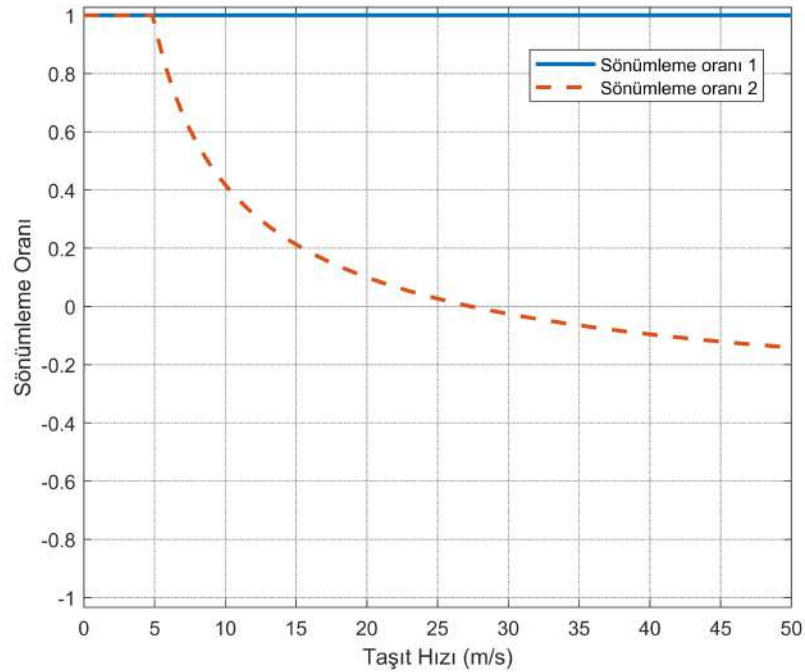
eşitliği yazılabilmektedir. Bu durumda, $S_{1,2}$ kompleks sayısını tespit edebilmek için sistem matrisi A 'nın özdeğerini almak gerekmektedir.

$$S_{1,2} = R_e + j\omega_d \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de R_e reel kısmını ifade ederken, $j\omega_d$ imajiner kısmını oluşturmaktadır. İfade edilen denklem takımı kullanılarak sönümleme oranı aşağıdaki gibi tespit edilebilmektedir.

$$\zeta = \frac{-R_e}{\sqrt{R_e^2 + \omega_d^2}} \quad (4.3)$$

Şekil 4.1'de TK sistemine ait tespit edilen sönümleme oranı ve kritik hız sınırı gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sönümleme oranı ve taşıtın boylamsal hızı arasındaki ilişki

Elde edilen sonuçlara göre sistemin kritik hız sınırı 27.4 m/s olarak tespit edilmiştir. Bu hızın üzerinde gerçekleşen ani şerit değiştirmesi sonucunda oluşan ivmelenme sistem tarafından sönümlenemez. Bu durumda TK sistemindeki kararsız durumlar oluşacaktır. Bundan dolayı TK sistemine ait kritik hız sınırının bilinmesi ve bu değere göre hareket edilmesi gerekmektedir. Bu sınırın hem kullanıcılar tarafından hem de karavan üreticileri tarafından bilinmesi önem arz etmektedir.

4.2. Sistem Parametrelerinin Etkisi

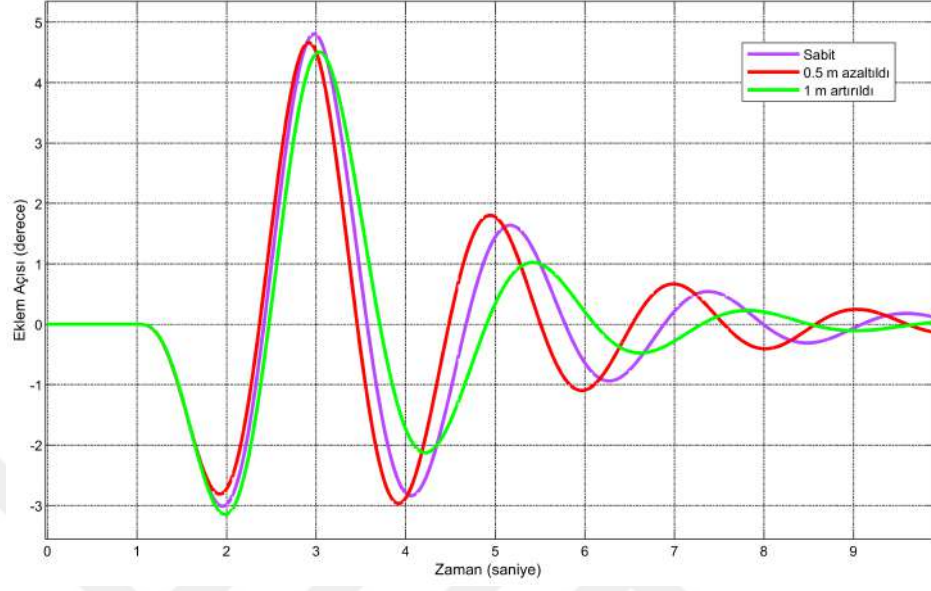
Taşıt ve karavan için elde edilen hareket denklemleri 3 serbestlik derecesi ile ifade edilmiştir. Bu bölümde ise sistem parametrelerinin kararlılık üzerine etkisi incelenmiştir. TK sistemine ait ağırlık merkezinin, aks pozisyonunun, karavan kütle ve atalet momenti değişiminin etkileri şerit değiştirme manevrasıyla MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir. Belirtilen değişimlerin TK sisteminde bağlantı açısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Şekil 4.2a'da TK sisteminde karavan aks uzunluğunun sistem dinamiklerine etkisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karavan aks uzunluğunun 1 metre artırılması mevcut duruma göre bağlantı açısının daha erken oturma süresine ulaştığı gözlemlenmiştir. Aks uzunluğunun 0.5 m azaltılması ise oturma süresini belirli bir miktarda daha uzattığı gösterilmiştir.

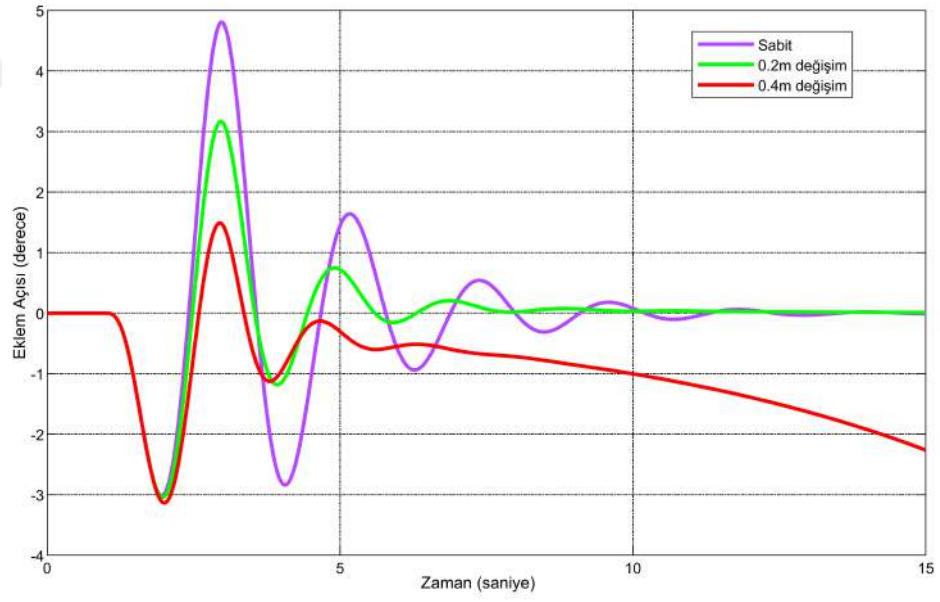
Şekil 4.2b'de karavan ağırlık merkezi değişiminin bağlantı açısı üzerindeki etkisi paylaşılmıştır. Karavan ağırlık merkezindeki değişim ile ifade edilmek istenilen ağırlık merkezinin karavandan taşıta doğru kaymasıdır. Elde edilen sonuçlara göre ağırlık merkezinin belirli bir sınırdan sonra kararsız durumların oluşabileceğini göstermektedir. Ağırlık merkezinin 0.2 m taşıta doğru kayması oturma ve aşım miktarında iyileşmeye sebep olmuştur. Fakat 0.4 m taşıta doğru kayması TK sistemindeki kararsız durumların oluşmasına yol açtığı gösterilmiştir.

Şekil 4.3a'da karavan kütle değişiminin sistem dinamikleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. TK sisteminde karavan kütlelerinin 200 kg azaltılmasıyla aşım ve oturma sürelerinde iyileşme sağlandığı gösterilmiştir. Karavan kütlelerinin 200 kg artırılmasının ise ilk duruma göre olumsuz etkide bulunduğu gözlemlenmiştir. Mevcut duruma göre aşım ve oturma süresinde gerilemenin olduğu gösterilmiştir.

Şekil 4.3b'de karavan atalet momenti değişiminin etkisi gösterilmiştir. Karavan kütle değişiminde elde edilen sonuçlara benzer olarak atalet momenti değişimi de aynı tepkileri üretmiştir. Atalet momentinin %20 azaltılması sistemde iyileşmeye sebep olurken, %20 artırılması oturma ve aşım miktarlarında olumsuz etkiye sebep olduğu yapılan simülasyon testleri sonucunda gösterilmiştir.

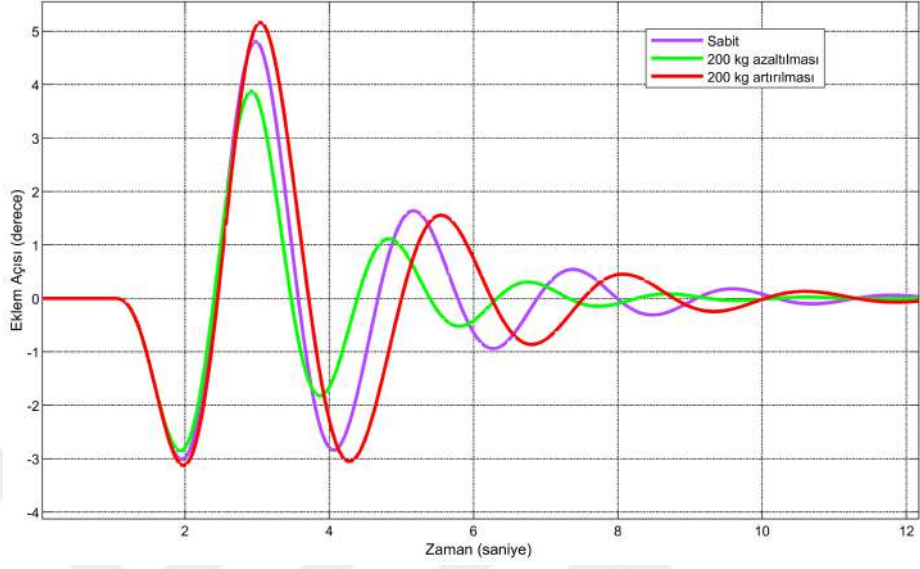


(a)

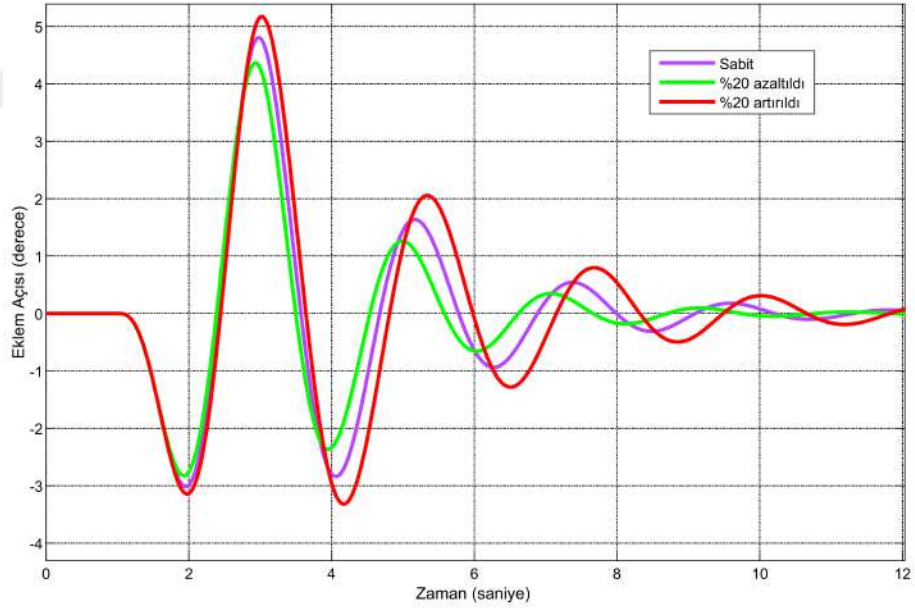


(b)

Şekil 4.2. (a) Karavan aks uzunluğunun ve (b) ağırlık merkezi değişiminin bağlantı açısı üzerine etkisi



(a)



(b)

Şekil 4.3. (a) Karavan kütle değişiminin ve (b) atalet momenti değişiminin bağlantı açısı üzerine etkisi

5. KONTROLCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

TK sisteminde yanal kararlılığı geliştirmek için aktif şasi kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler; aktif taşıt frenleme (ATF), aktif karavan frenleme (AKF), aktif taşıt yönlendirme (ATY) ve son olarak aktif karavan yönlendirme (AKY) olarak sınıflandırılmaktadır. ATF yönteminde sadece çekici araçta frenlemenin uygulanmasıyla yanal kararlılığın iyileştirilmesi ve savrulmanın engellenmesi hedeflenmektedir. Zhang vd. (2020) sadece taşıtta frenlemenin uygulanmasıyla kararsız durumların engellenebildiğini göstermiştir [52]. AKF yönteminde ise savrulmanın meydana gelmesi durumunda sadece karavan üzerinde frenleme uygulanmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışma için bu yöntem tercih edilmiştir. ATY yönteminde ise kontrolcünün devreye girmesi durumunda savrulmanın engellenebilmesi için taşıt tarafında bulunan tekerleklerle direksiyon açısı verilmektedir. Ardından tekerlekler üzerinde oluşan yanal kuvvet ile savrulma engellenmektedir [44]. AKY yönteminde ise savrulmanın meydana gelmesi durumunda sadece karavan tekerleğine yönlendirme açısı uygulanmaktadır. Karavan tekerleğinde oluşan yanal kuvvet ile savrulmanın engellenmesi ve yanal kararlılıkta iyileşme sağlanmaktadır [2].

Aktif karavan diferansiyel frenleme yöntemi (AKDF) için geliştirilecek kontrolcü için doğrusal karesel regülatör (DKR) ve bulanık mantık (BM) teknikleri kullanılmıştır. Bundan dolayı bu bölümde model bağımlı ve modelden bağımsız kontrol tekniklerinden bahsedilmiştir.

5.1. Doğrusal Karesel Regülatör Kontrolcü Tasarımı

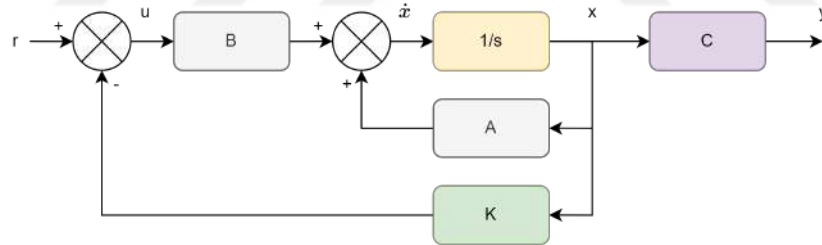
TK sisteminde yanal kararlılığı artırmak için DKR tasarımı gerçekleştirilmiştir. DKR kontrolcüsü tek bir kontrol giriş tepkisiyle birden fazla durum değişkeninin kontrol edilebildiği bir optimal kontrol yöntemidir. Tek girişli çok çıkışlı sistemlerin kontrol edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [53–57]. Otonom araçların yörünge takibi için tasarlanan DKR kontrolcüsü tek bir kontrol girişiyle sapma açısı ve yanal pozisyon

referansını başarıyla gerçekleştirildiği ifade edilmiştir [56]. Model tabanlı bir kontrolcü yöntemi olmasından dolayı bazı avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Sistem modelinde gerçekleşen değişimlere karşı duyarsız olması dezavantajlarından sayılabilmektedir. Belirtilen problemin çözümünde ise gürbüz DKR kontrolcileri geliştirilmektedir. Sistem parametrelerinin belirli sınırlar içerisindeki değişimlerine gürbüz tepkiler üretecek şekilde tasarlanan kontrolcüler ile bu problemin çözülmesi gerçekleştirilmektedir.

Kontrolcü geliştirilebilmesi için TK sistemi daha önceki bölümlerde durum uzay formunda ifade edilmiştir. AKDF sistemi için mevcut denklem takımları Denklem (3.15)'de belirtilmiştir. DKR tekniğinin kullanılabilmesi için durum uzay formunda ifade edilen sistemin, durum değişkenlerine ihtiyaç duymaktadır. DKR kontrolcü tekniğinde sürekli zamanlı sistemler için kullanılan karesel maliyet fonksiyon Denklem (5.1)'de gösterilmiştir.

$$J = \int_0^{\infty} (x^t(t)Qx(t) + u^t(t)Ru(t))dt \quad (5.1)$$

$u(t)$ kontrolcü girişini, $x(t)$ Denklem (3.14)'de gösterilen durum değişkenlerini, Q ve R ağırlık matrislerini ifade etmektedir. Kapalı çevrim bir sistem Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Durum uzay formundaki bir sistemin kapalı çevrim gösterimi

Denklem (3.16)'da belirtilen TK sistemini durum uzay formunda edebilmek için,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.2)$$

DKR kontrolcü girişi için bütün durum değişkenlerinin K matrisiyle çarpılması olarak ifade edildiği için,

$$u = -Kx \quad (5.3)$$

Denklem (5.3), Denklem (5.2) içerisinde yazılırsa,

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (5.4)$$

olarak yazılabilmektedir. Durum uzay formunda ifade edilecek TK'nın sistem matrisi,

$$A = -M^{-1} - D \quad (5.5)$$

Durum uzay formunda ifade edilecek TK'nın giriş matrisi,

$$B = -M^{-1} - C_b \quad (5.6)$$

olarak kullanılabilmektedir. MATLAB içerisinde tanımlı olan fonksiyonlar üzerinden K matrisi aşağıdaki komut kullanılarak belirlenmiştir.

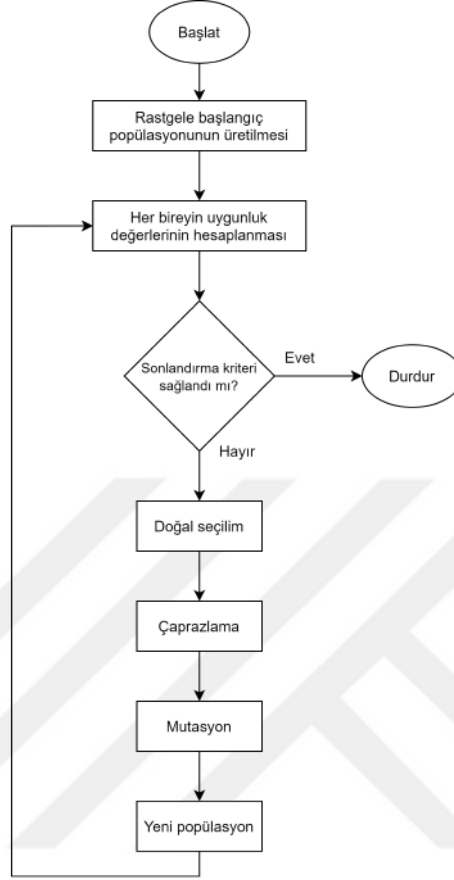
$$[K, S, e] = LQR(A, B, Q, R) \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de belirtilen K matrisi durum geri besleme kazancını, S Riccati eşitliğiyle ilişkili çözümü, $e = eig(A - B * K)$ kapalı çevrim özdeğerlerini ifade etmektedir. Q ve R matrisleri Denklem (5.1)'de gösterilen denklem incelediğinde Q matrisinin durum vektörleriyle ilgili olduğunu, R matrisinin ise kontrolcü tepkisine etki ettiğini görülmektedir. Q ve R matrislerinin belirlenmesi genellikle deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum ise kontrolcünün optimum parametrelerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu noktada optimizasyon algoritmaları, DKR kontrolcüsünün Q ve R parametrelerini belirlemede kullanılmaktadır [4].

5.1.1. Genetik Algoritma İle Optimizasyon

1975'te John Holland tarafından önerilen Genetik Algoritma (GA), optimizasyon problemlerinde sıklıkla tercih edilen bir arama algoritmasıdır. En iyi sonucu bulmadaki performansından dolayı literatürde yer bulmuştur. GA operatörlerine bakıldığında seleksiyon, mutasyon ve çaprazlama yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanım yerine göre kullanıcı tarafından bir uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Ardından belirlenen fonksiyonu optimize edecek şekilde çalışmaktadır. Popülasyon içerisindeki güçlü bireylerin bir sonraki nesile aktarılabilmesi için çaprazlama operatörlerini kullanmaktadır.

Bu sayede en iyi sonuca ulaşma başarısını elde edebilmektedir. GA akış şeması Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. GA akış şeması

TK sistemi için DKR kontrolcüsünün optimum parametrelerinin belirlenmesinde GA; jenerasyon sayısı 20, popülasyon büyüklüğü 10, çaprazlama oranı 0.9 ve mutasyon oranı 0.15 olarak ayarlanan konfigürasyon ile kullanılmıştır. GA akış şeması incelendiğinde ise gerekli işlemlerin yapılabilmesi için tasarımcı tarafından bir uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. GA uygunluk fonksiyonu olarak 3 serbestlik dereceli modelin serbestlik dereceliyle bir ilişki kurulmuştur. GA uygunluk fonksiyonu Denklem (5.8)’de gösterilmiştir.

$$f_{uygunluk} = \frac{\psi_1}{\psi_1^p} + \frac{\psi_2}{\psi_2^p} + \frac{\psi_3}{\psi_3^p} \quad (5.8)$$

DKR kontrolcü aktif olduğunda gerçekleştirilen manevralar esnasında elde edilen ölçüm sonuçları ψ_1 , ψ_2 ve ψ_3 sırasıyla taşıt yanal hızını (m/s), taşıt sapma hızını (rad/s) ve bağlantı açısını (rad) ifade etmektedir. Aktif şasi kontrol yöntemi kullanılmadığında ise elde

edilen ölçüm sonuçları sırasıyla ψ_1^p , ψ_2^p ve ψ_3^p değerlerini ifade etmektedir. DKR kontrolcüsünün daha az salınım göstermesi GA uygunluk fonksiyonunu minimum değerlere göndereceğinden pay kısmında aktif kontrolcü değerleri, payda kısmında ise kontrolcünün kapalı olduğu zaman elde edilen değerler yerleştirilmiştir. DKR kontrolcüsüne ait Q ve R matrisleri için,

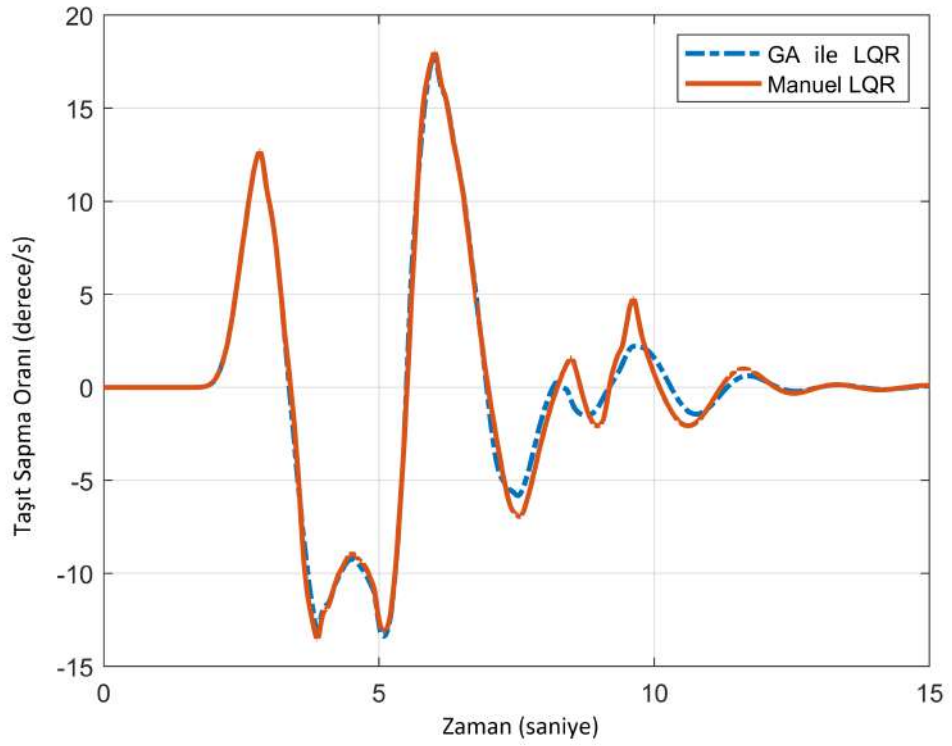
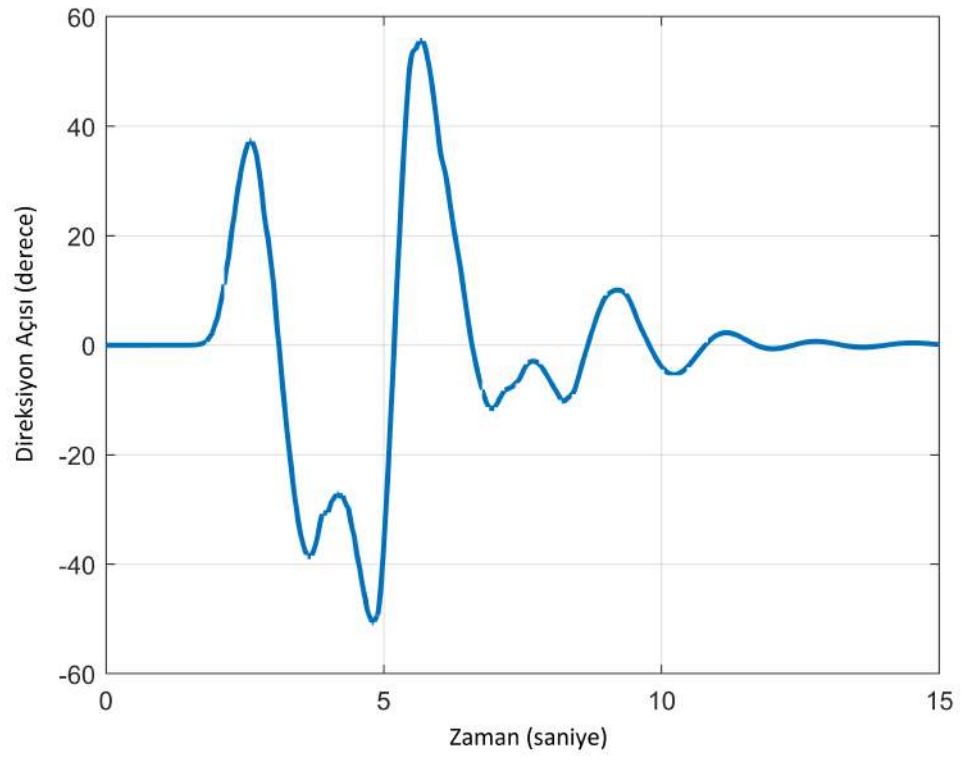
$$Q = \text{diag}([q_1 q_2 q_3 q_4]), R = [r] \quad (5.9)$$

olacak şekilde belirlenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında GA algoritmasının kodu yazılmış ve CarSim eş zamanlı simülasyonu ile test edilmiştir. GA ile optimizasyonu gerçekleştirilen DKR kontrolcüsü, deneme yanılma yöntemiyle tespit edilen DKR kontrolcüsüyle karşılaştırılmıştır. TK sistemine çift şerit değiştirme testi 90 km/h hızda uygulanmıştır. TK sistemine uygulanan direksiyon açısı Şekil 5.3a'da ve buna karşılık olarak taşıtta oluşan sapma oranı Şekil 5.3b'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen çift şerit değiştirme manevrası sonucunda taşıtta maksimum 18.05 derece/s sapma oranı meydana gelmiştir. Deneme yanılma yöntemiyle belirlenen DKR kontrolcüsü ve GA ile tespit edilen DKR kontrolcülerinin performansları incelendiğinde, GA ile tespit edilen kontrolcü daha kısa sürede oturma süresine ulaştığı gösterilmiştir. Deneme yanılma ve GA ile tespit edilen geri besleme kontrol kazanç matrisi Denklem (5.10) ve (5.11)'de paylaşılmıştır.

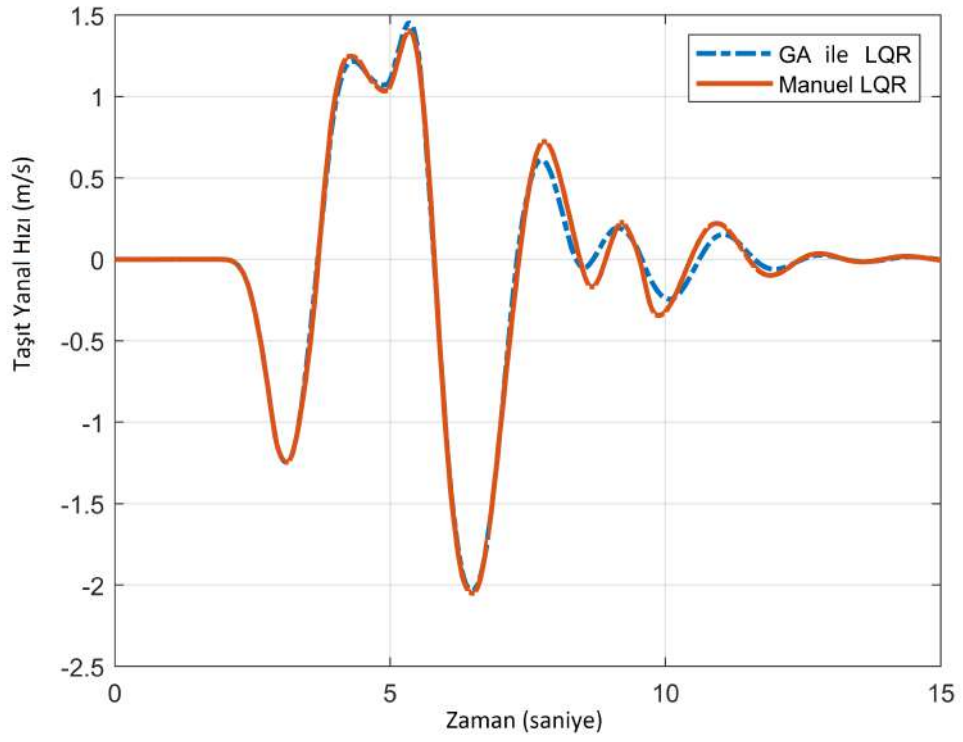
$$K_{man} = 1.0e + 03 * [-0.4569, 3.6058, -1.6029, 1.2321] \quad (5.10)$$

$$K_{GA} = 1.0e + 03 * [-0.4779, 2.3416, -0.2545, 1.9084] \quad (5.11)$$

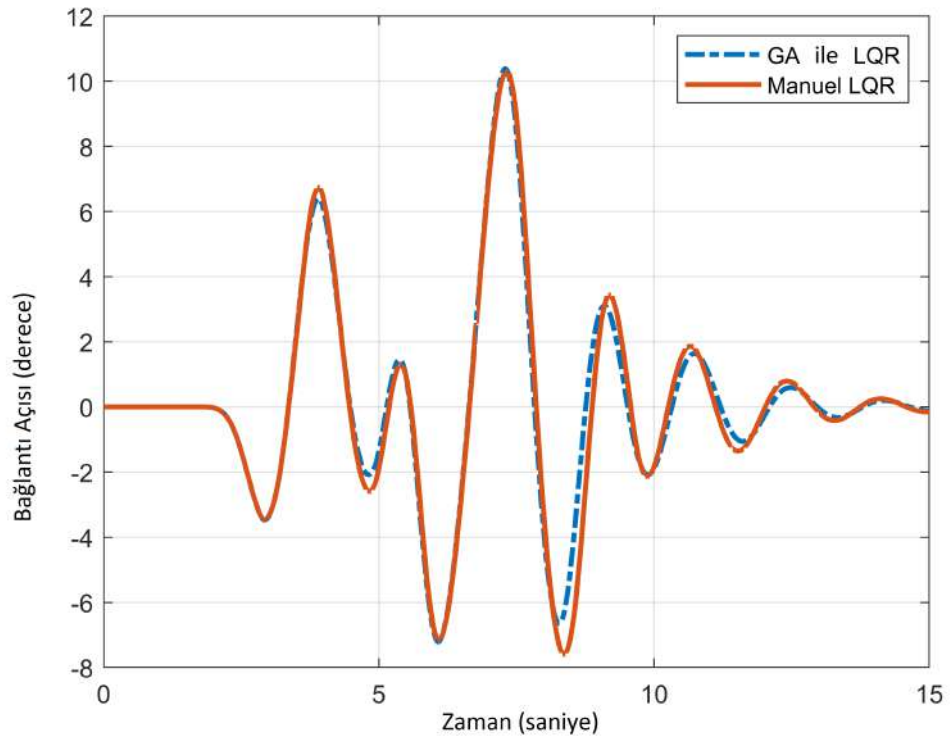
TK sisteminde meydana gelen yanal hız ve bağlantı açısı tepkileri Şekil 5.4a ve Şekil 5.4b'de gösterilmiştir. Çift şerit değiştirme manevrası sonucunda taşıtta meydana gelen yanal hız maksimum 2.07 m/s olarak tespit edilmiştir. TK sisteminde oluşan maksimum bağlantı açısı değeri ise 10.05 derece olarak gözlemlenmiştir. TK sistemine uygulanan çift şerit değiştirme girişine karşılık aktif şasi kontrol yöntemi diferansiyel frenlemenin kontrolcü vasıtasıyla belirlediği frenleme tork tepkisi Şekil 5.5'de paylaşılmıştır. Gerçekleştirilen testlerde uygulanan frenleme tork üst limiti 600 N.m olarak sınırlandırılmıştır. Bu değer saha testlerinde uygulanabilecek frenleme tork değerine göre belirlenmiştir. MATLAB/Simulink ve CarSim ortamlarında gerçekleştirilen çift şerit değiştirme manevra test sonuçlarına göre, GA ile optimizasyonu gerçekleştirilen DKR kontrolcüsünün daha kısa oturma süresi elde ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. (a) TK sistemine uygulanan direksiyon açısı, (b) taşıtta meydana gelen sapma oranı

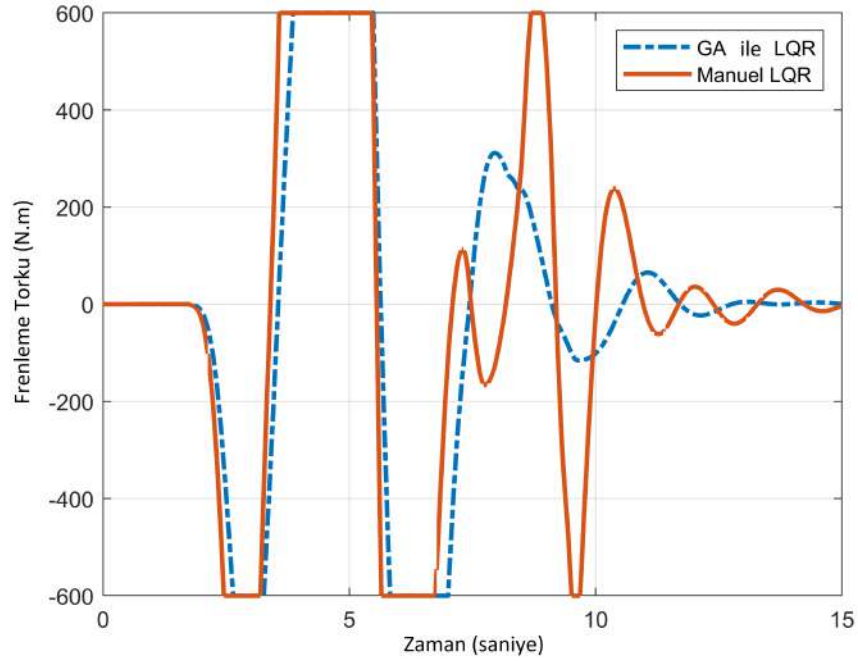


(a)



(b)

Şekil 5.4. (a) Taşıtta meydana gelen yanal hız, (b) TK arasında oluşan bağlantı açısı



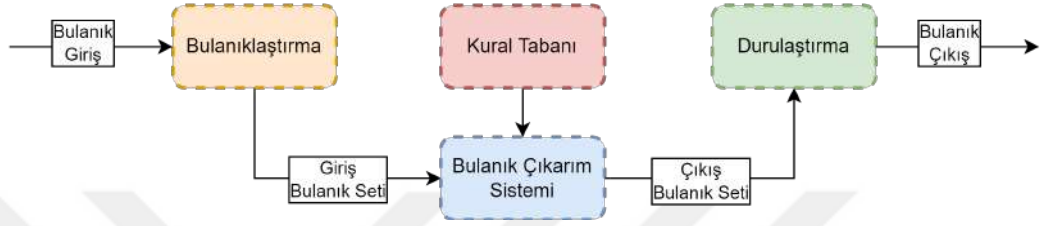
Şekil 5.5. Doğrusal karesel regülatör kontrolcülerinin uyguladığı frenleme torkları

5.2. Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

BM yöntemi model bağımsız kontrolcü olarak tanımlanabilmektedir. BM kontrolcüsünün tasarlanabilmesi için kontrol edilecek sistemin modeline ihtiyaç duyulmamaktadır. Bundan dolayı özellikle doğrusal olmayan ve modellenmesi zor sistemlerin kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır [58–62]. Eklemlı araçlarda olduğu gibi sistem parametrelerinde meydana gelen değişimlere karşı modelden bağımsız kontrol yöntemlerinin kullanılması gürbüzlük avantajı kazandırabilmektedir.

Lotfi A. Zadeh 1965 yılında BM yaklaşımını geliştirmiştir [63]. Ortaya atıldığı günden beri kullanım alanı bulduğu her çalışmaya ciddi katkılar sunan bir mantık yapısı olmuştur. Klasik yaklaşıma göre 0 veya 1 ihtimalinden birisi olması gerekirken, BM burada farklı bir yaklaşım sergilemektedir. Geliştirilen bu önerme birçok farklı alanda yeniliklerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Model tabanlı kontrolcülerde farklı problemlerle karşılaşırken, modelden bağımsız BM kontrolcülerini de bekleyen birtakım problemler bulunmaktadır. BM kontrolcüsü kullanıldıkları sistemlere düşük hesaplama yükü getirmesine karşın üyelik fonksiyonlarının ve değerlerinin belirlenmesinde bir uzman bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Manuel olarak bu parametrelerin ayarlanması hem çok

zaman almaktadır hem de iyi sonuç olması zor bir durumdur. Bu problemi çözmek için yapay sinir ağları (YSA) ve BM kontrolcüsü beraber kullanılması önerilmiştir. YSA'nın sisteme ait veriler arasındaki ilişkiyi öğrenme becerisiyle bulanık sistemlerin ortaya çıkardığı avantajlar birleştirilmiştir. Bu şekilde kullanılan sistemlere bulanık sinir ağları (BSA) olarak literatürde isimlendirilmektedir. BSA kontrolcüsünün beraber kullanılması durumunda elde edilen başarılı sonuçlar yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [64–67]. BM kontrolcüsüne ait şematik gösterim Şekil 5.6'da paylaşılmıştır.

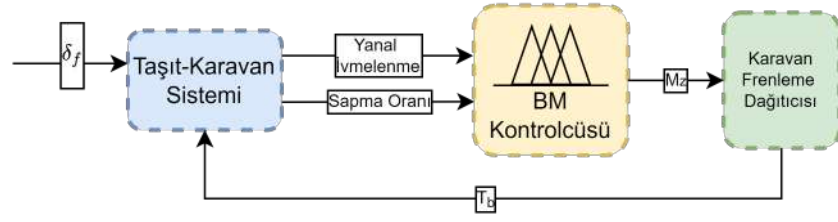


Şekil 5.6. Standart bir bulanık mantık kontrolcüsünün şematik gösterimi

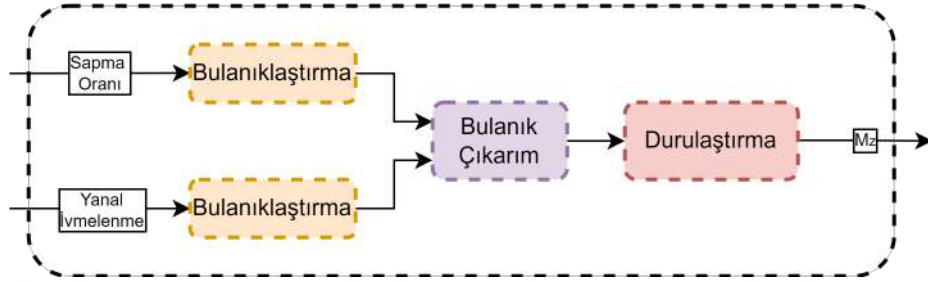
BM kontrolcüsü; bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırma operatörlerinden oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bulanık çıkarım operatörü olarak Mamdani [68] ve Takagi-Sugeno-Kang [69] modellerinin sıklıkla kullanıldığı belirtilmiştir. Mamdani bulanık çıkarım yönteminde, kural tabanını oluşturan uzman tarafından dilsel kontrol kurallarını kullanılarak oluşturulabilmektedir. Mamdani kural çıkarım modelinde her kuralın çıktısı bir bulanık küme olarak ifade edilmektedir. Takagi-Sugeno-Kang bulanık çıkarım modelinde ise durulaştırma operatörü olarak kullanılan çıkış üyelik fonksiyonu olarak doğrusal bir fonksiyon kullanıldığı için Mamdani yöntemine göre hesaplama avantajı elde etmektedir.

TK sisteminin sapma stabilizasyonu, BM kontrolcüsü tarafından belirlenen frenleme oranının tekerlek içi elektrik motorları üzerinden rejeneratif frenleme uygulanarak sağlanmıştır. Bu çalışmada BM kontrolcüsüne ait çıktı üyelik fonksiyonunun değeri ilave bir kontrolcü katmanı olmadan ilgili elektrik motorlarına uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tek bir kontrolcü katmanı ile tekerlek içi elektrik motorlarına farklı frenleme oranı aktarılmasıyla sapma stabilizasyonu sağlanması gerçekleştirilmiştir. TK sistemi için tasarlanan BM kontrolcü şeması Şekil 5.7 'de gösterilmiştir. BM kontrolcüsünün şematik gösterimi ise Şekil 5.8'de paylaşılmıştır.

BM kontrolcüsü iki giriş üyelik fonksiyonundan ve tek bir çıkış üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. Giriş üyelik fonksiyonuna ait değerler karavan üzerinde

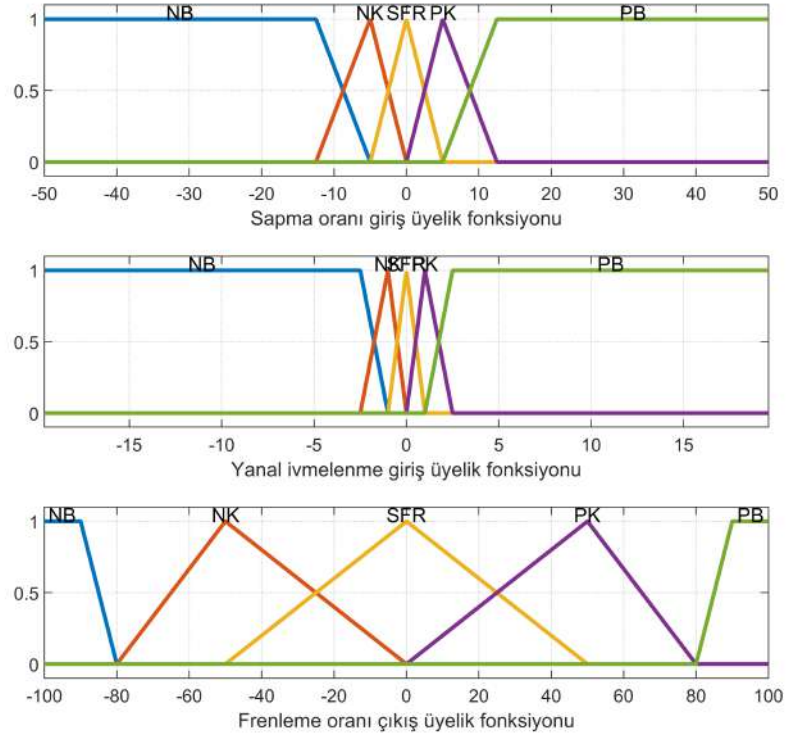


Şekil 5.7. TK sistemi için geliştirilen BM kontrolcüsünün blog diyagramı

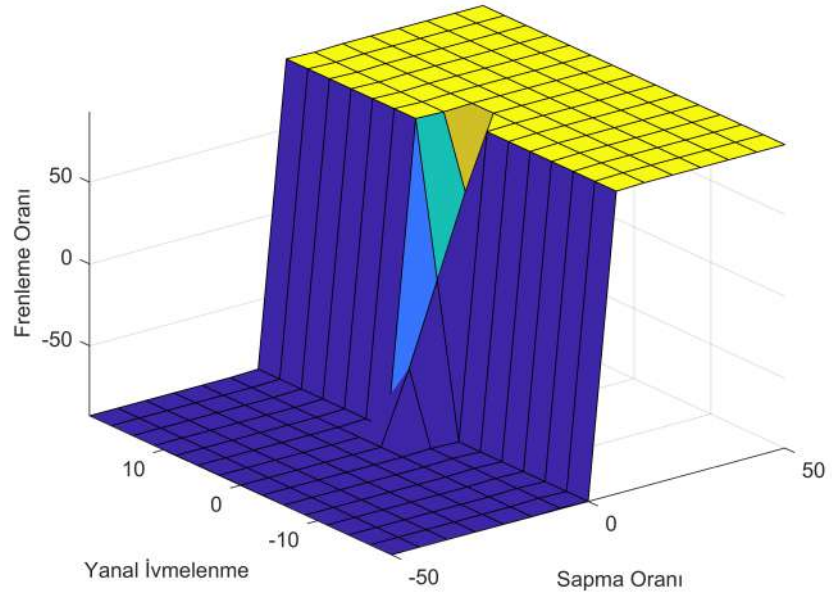


Şekil 5.8. BM kontrolcüsünün şematik gösterimi

bulunan ataletsel ölçüm ünitesi (AÖÜ) vasıtasıyla elde edilmektedir. Çıkış üyelik fonksiyonu ise tekerlek içi elektrik motorlara uygulanacak olan frenleme yüzdesini ifade etmektedir. BM kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında iki farklı bulanık çıkarım yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BM tasarımı giriş üyelik fonksiyonlarının bulanıklaştırılması, uzman kişi tarafından kural tabanının oluşturulması ve durulama aşamalarından oluşmaktadır. Giriş üyelik fonksiyonlarını ifade etmede 5 farklı dilsel değişken kullanılmıştır. Bunlar; negatif büyük (NB), negatif küçük (NK), sıfır (SFR), pozitif küçük (PK), pozitif büyük (PB) olarak tanımlanmıştır. Tez kapsamında geliştirilen BM kontrolcüsünde çıkarım yöntemi olarak hem Mamdani hem de Takagi-Sugeno-Kang modelleri kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının aralıkları ve limitleri Şekil 5.9a'da gösterilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları arasındaki ilişkiyi gösteren tepki yüzeyi Şekil 5.9b'de paylaşılmıştır. Tepki yüzeyinin temsil edilmesi bulanık çıkarım sisteminin kurulmasında ve giriş-çıkış üyelik fonksiyonları arasındaki ilişkinin gösterilmesi adına oldukça kullanışlı bir sunum şekli olarak belirtilmektedir. Tablo 5.1'de Mamdani bulanık çıkarım modelinde kullanılan kural tabanı paylaşılmıştır.



(a)



(b)

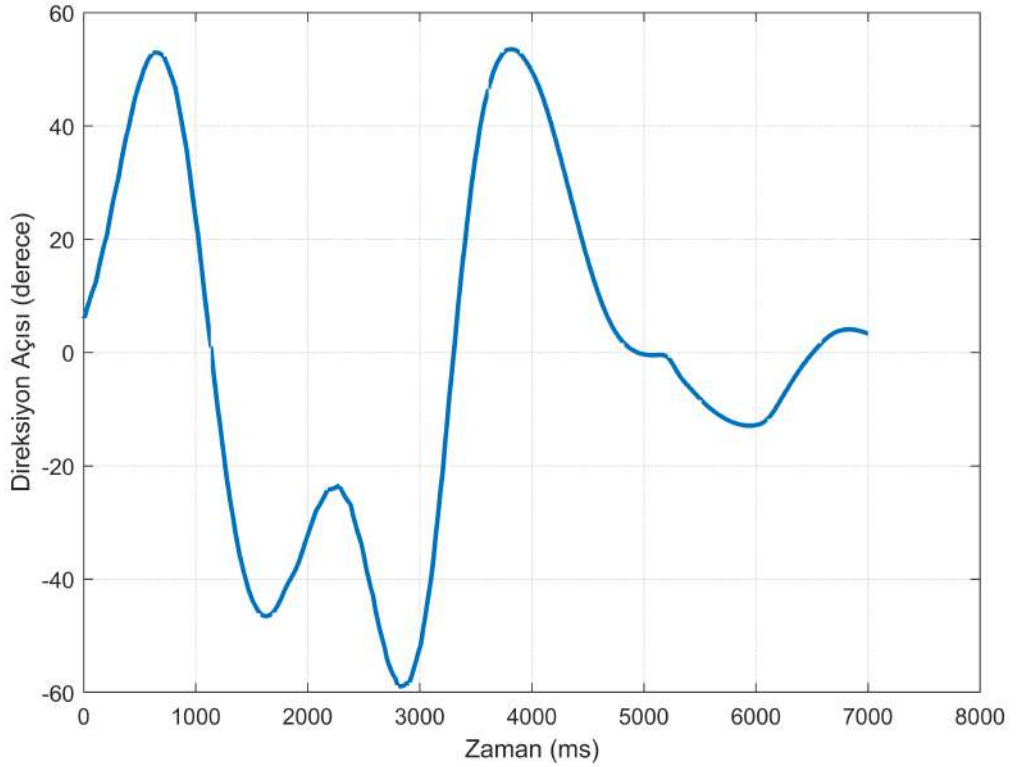
Şekil 5.9. BM kontrolcüsüne ait (a) üyelik fonksiyonları ve (b) giriş-çıkış üyelik fonksiyonları arasındaki ilişki

Tablo 5.1. BM kural tabanı

Sapma Oranı	Yanal İvmelenme				
	NB	NK	SFR	PK	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NK	NB	NB	NK	NB	NB
SFR	NB	NK	SFR	PK	PB
PK	PB	PB	PK	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

5.3. Simülasyon Testleri

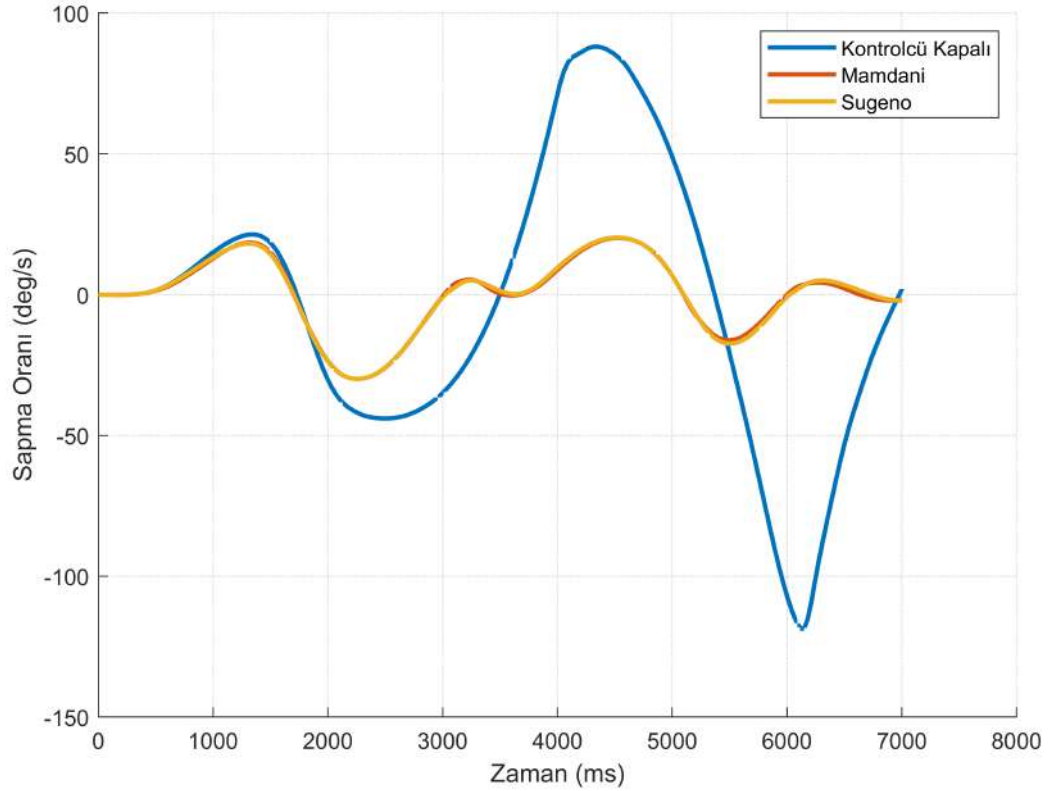
MATLAB/Simulink ortamında BM tabanlı sapma stabilizasyonu sağlamak için geliştirilen kontrolcünün ilk denemeleri simülasyon ortamında test edilmiştir. DKR kontrolcüsü, BM-Sugeno, BM-Mamdani kontrolcüsü ve aktif şasi kontrolcüsünün olmadığı durumlar karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde MATLAB/Simulink ve CarSim araçları kullanılmıştır. Sapma stabilizasyonu için geliştirilen kontrolcünün performansı çift şerit değiştirme testiyle değerlendirilmiştir. Çift şerit değiştirme testi için taşıttan uygulanan direksiyon açısı Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Çift şerit değiştirme manevrası için uygulanan direksiyon açısı

TK sistemine bir giriş uygulanarak aktif şasi kontrol tekniğinin buna karşılık bir tepki üretmesi beklenmektedir. Üretilen bu tepki TK sistemlerinde oluşan kararsız durumların engellenmesi için uygulanmaktadır. TK sistemlerin kendilerine has dinamikleri olduklarından dolayı aktif güvenlik sistemlerini üzerlerinde barındırması önem arz etmektedir. Geliştirilen kontrolcünün ürettiği tepkiyi gözlemlemek için uygulanan çift şerit değiştirme manevrası çekici araç hızının 90 km/h olarak ayarlandığı durumda uygulanmıştır.

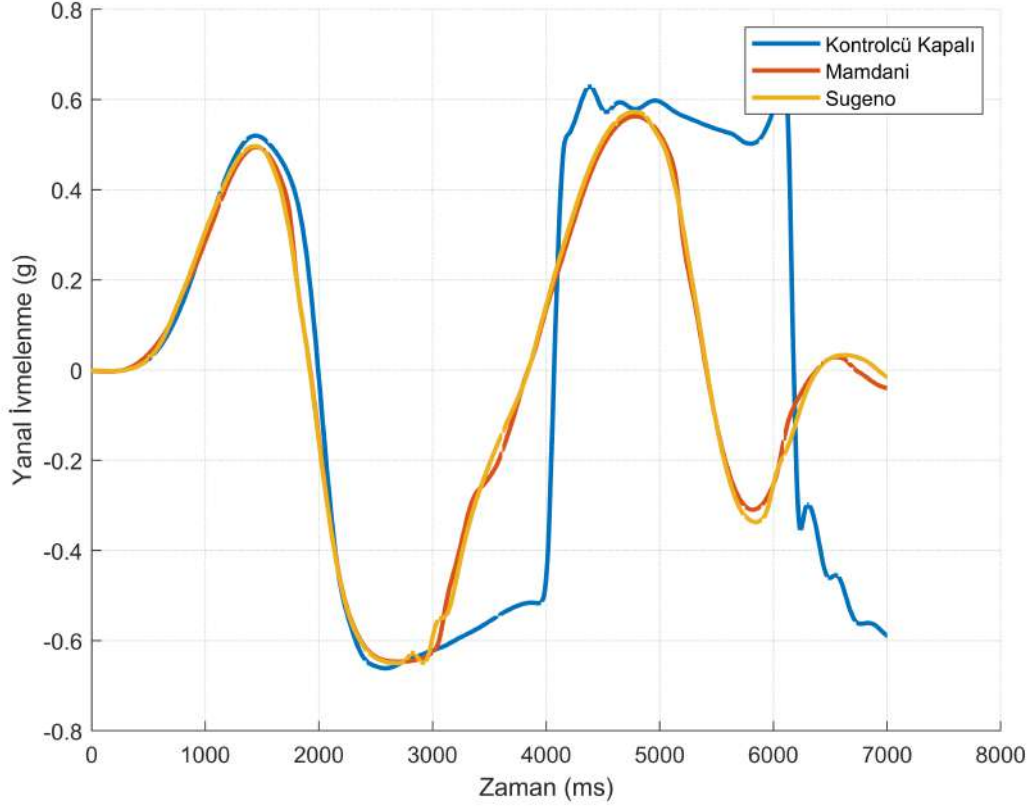
İlk olarak kontrolcünün kapalı olduğu ve BM tabanlı kontrolcülerinin karşılaştırmalı sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 5.11’de karavan üzerinde oluşan sapma oranı gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda meydana gelen sapma oranı

Aktif şasi kontrolcüsünün kapalı olduğu durumda, kararsız modun oluştuğu ve sönümlenemeyen bir tepkinin üretildiği gözlemlenmiştir. Aynı testin uygulandığı BM tabanlı kontrolcülerde ise bu durum oluşmamıştır. BM tabanlı kontrolcüler tarafından gerekli tepki üretilerek kararsız durumun oluşmasını engellemiştir. Kontrolcünün kapalı olduğu durumda maksimum 88.01 derece/s sapma oranı oluşurken, BM tabanlı kontrolcülerde ise maksimum 20.27 derece/s sapma oranı tespit edilmiştir. İki durum

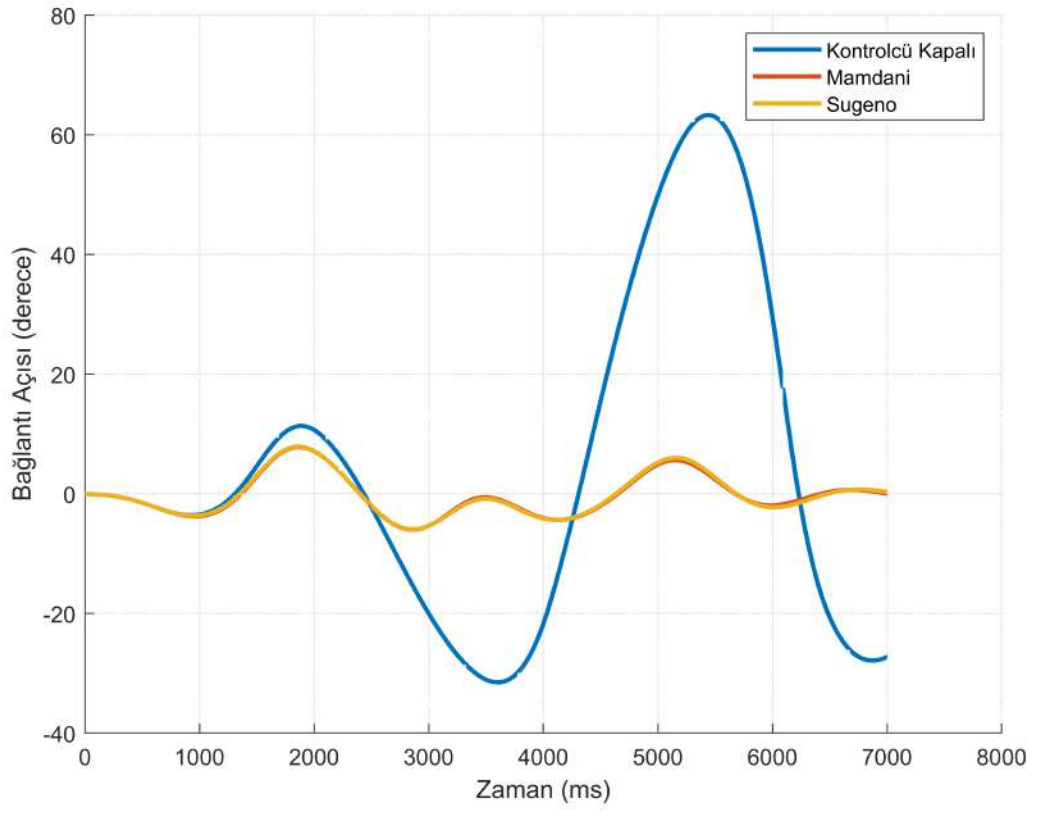
arasında yaklaşık 4.34 kat fark olduğu paylaşılmıştır. Çift şerit değiştirme manevrasında karavan üzerinde oluşan yanal ivmelenme Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda oluşan yanal ivmelenme

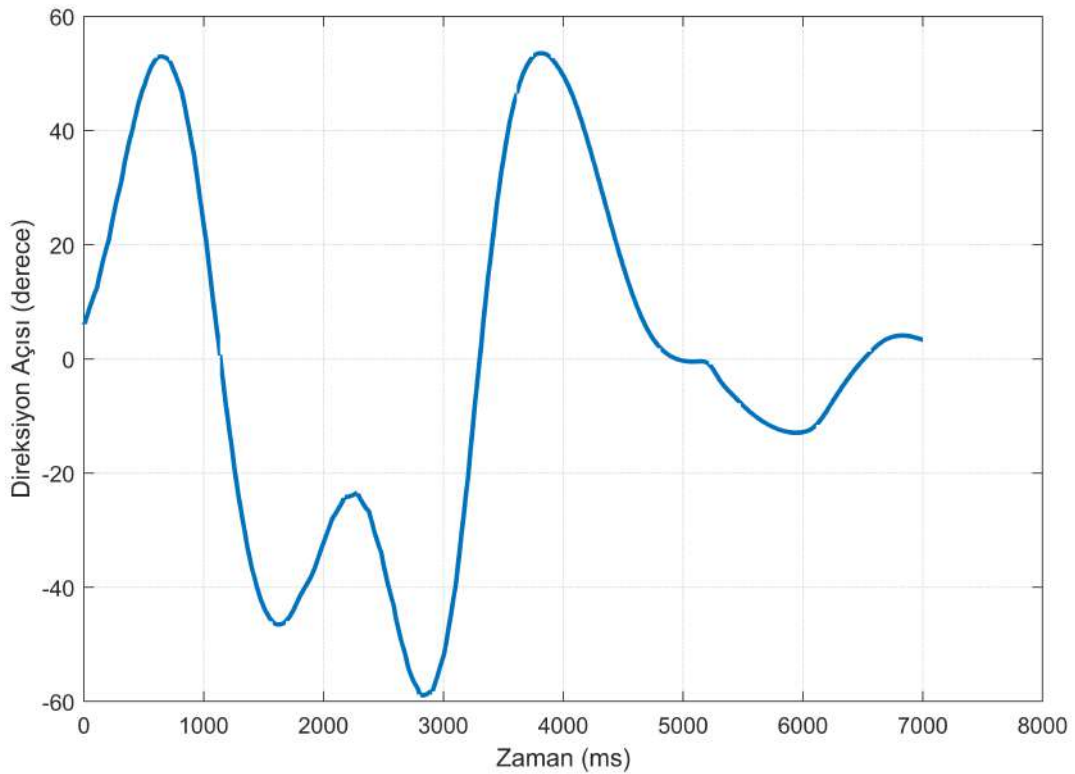
Çift şerit değiştirme manevrasından sonra karavan üzerinde oluşan etkiler incelendiğinde, kontrolcünün kapalı olduğu durumda 0.4 saniye içerisinde 1.134g’lık gibi yüksek bir değişim gözlemlenmiştir. BM tabanlı kontrolcünün aktif durumda olduğu test verisinde ise 0.4 saniye içerisinde 0.32g’lık bir değişim ölçülmüştür. İki durum karşılaştırıldığında yaklaşık 3.543 kat fark olduğu kaydedilmiştir. Karavan üzerinde oluşan sapma sonuçlarıyla karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbirlerini destekler durumda olduğu gözlemlenmiştir. TK sistem modellenmesinde kullanılan bir diğer serbestlik derecesi olan bağlantı açısı sonuçları Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

TK arasındaki bağlantı açısının durumu incelendiğinde, kontrolcünün kapalıyken maksimum 63.26 derece bir yöne savrulma meydana gelirken, BM tabanlı kontrolcülerde ise maksimum 7.88 derece değişim olmuştur. Bağlantı açılarında meydana gelen sonuçlar karşılaştırıldığında elde edilen diğer sonuçlarla paralel çıkarımlarda yapmak mümkün olmuştur. BM tabanlı kontrolcülerin kararsız durumları engellediği gerçekleştirilen testler



Şekil 5.13. Çift şerit değiştirme manevrası sonrasında karavanda oluşan bağlantı açısı

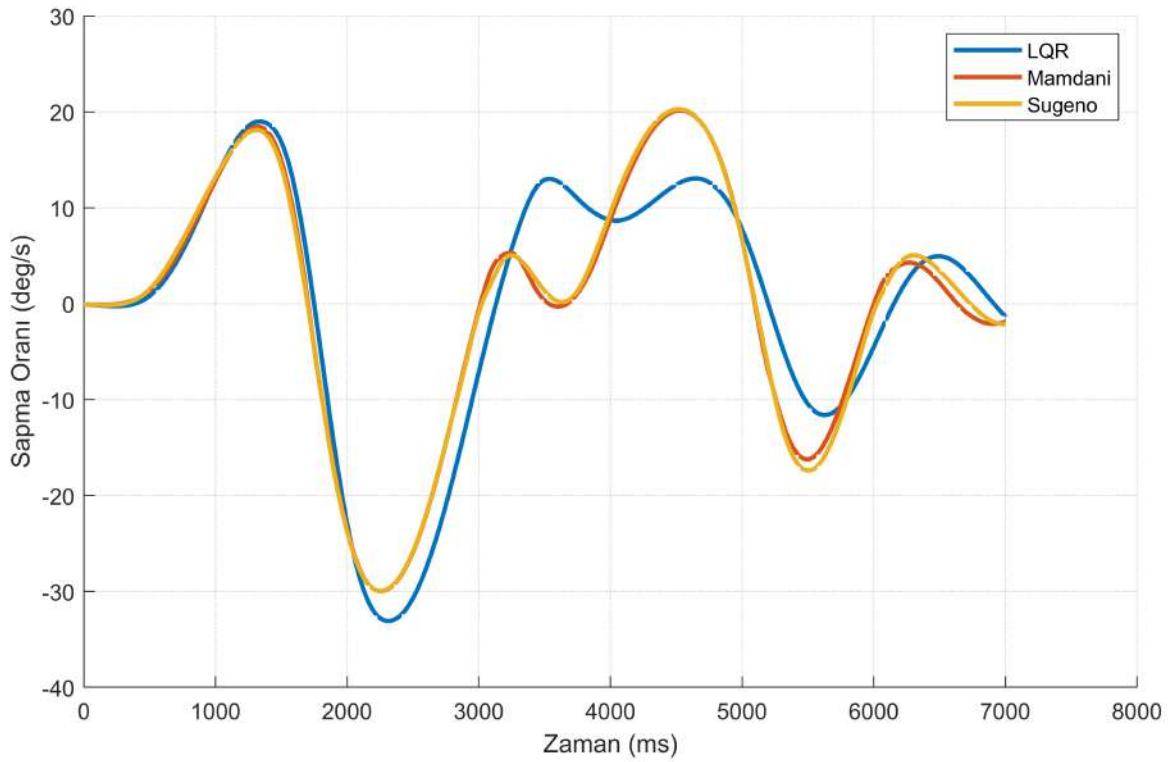
üzerinden gösterilmiştir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen diğer testte DKR ve BM tabanlı kontrolcüler karşılaştırılmıştır. Saha testlerine geçilmeden önce model tabanlı ve model bağımsız kontrolcüler karşılaştırılmıştır. İki ayrı kontrolcünün de donanıma bağlılıkları birbirinden farklıdır. DKR kontrolcüsünde sistemin modellendiği serbestlik derecelerinin ölçülmesi veya kestirim yöntemleriyle elde edilmesi gerekmektedir. BM tabanlı kontrolcüsünde ise bu durum değişmektedir. Sistemi ifade edebilecek verilerin ölçülmesi genellikle yeterli olmaktadır. Benzer koşullar altında DKR ve BM tabanlı kontrolcülerinin karşılaştırılabilmesi için çift şerit değiştirme manevrası uygulanmıştır. Bu manevra için uygulanan direksiyon açısı Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Çift şerit değiştirme manevrası için uygulanan direksiyon açısı

Çift şerit değiştirme manevrası kontrolcüler aktifken uygulandıktan sonra karavanda oluşan sapma oranı Şekil 5.15’de paylaşılmıştır.

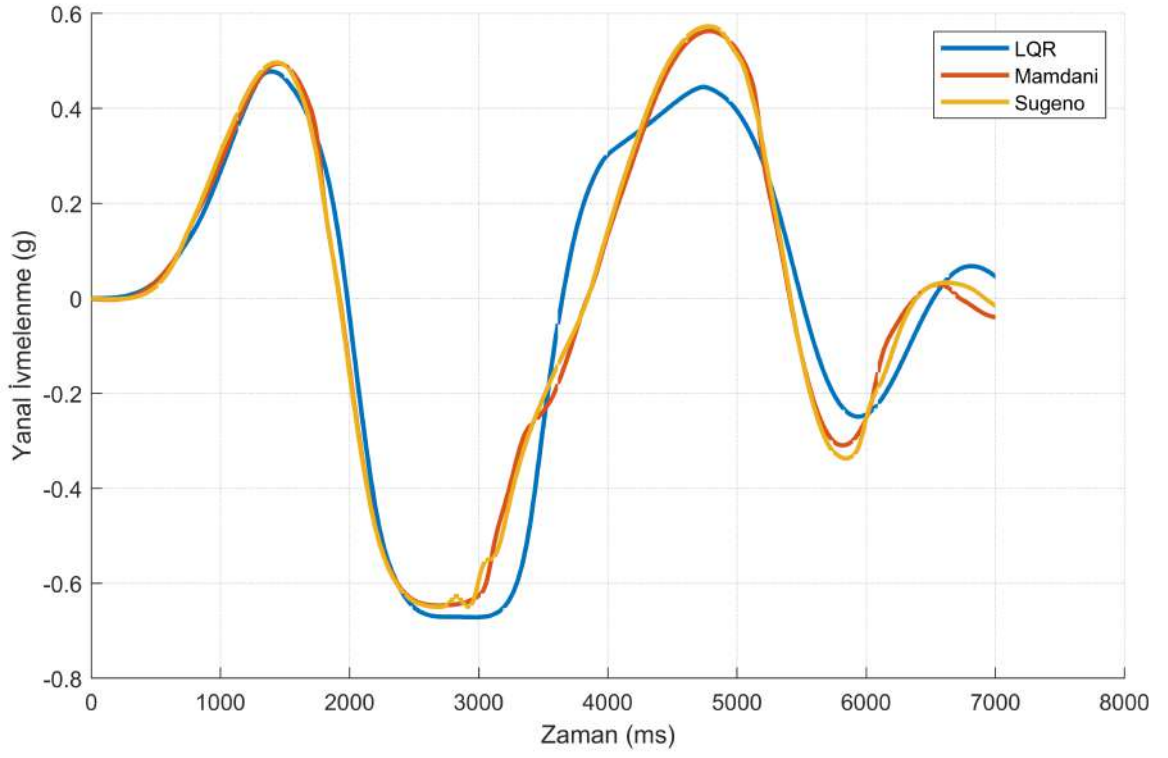
Karavanda meydana gelen sapma oranı DKR kontrolcüsünde maksimum 33.05 derece/s olarak gerçekleşmiştir. BM tabanlı Mamdani ve Sugeno kontrolcülerinde ise 29.94 derece/s olarak ölçülmüştür. Sapma oranları karşılaştırıldığında %10.38 BM tabanlı kontrolcülerin daha başarı gösterdiği gözlemlenmiştir. Karavanda oluşan yanal ivmelenme



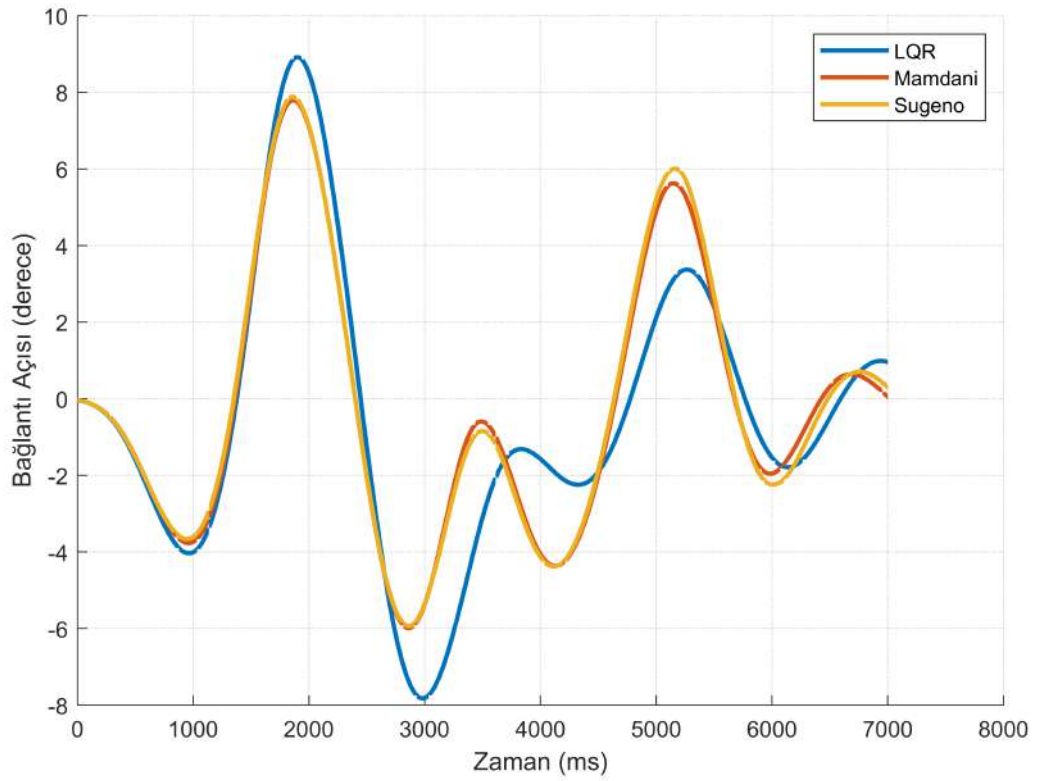
Şekil 5.15. Kontrolcü aktifken karavanda oluşan sapma oranı

değişimi Şekil 5.16’da gösterilmiştir. DKR kontrolcü aktifken 0.4 saniye içerisinde gerçekleşen ivme değişimi 0.598g olarak ölçülmüştür. BM tabanlı kontrolcüsünde ise 0.4 saniye içerisinde meydana gelen ivme değişimi 0.332g olarak tespit edilmiştir. BM tabanlı kontrolcülerinin sapma oranında gösterdikleri kararlılık yanıl ivmelenme değişiminde de devam etmiştir. İncelenmesi gereken bir diğer parametre ise TK sistemindeki bağlantı açısının değişimidir. Uygulanan manevra sonucunda TK sisteminde meydana gelen eklem açısının değişimi Şekil 5.17’de paylaşılmıştır.

90 km/h hızda gerçekleştirilen çift şerit değiştirme manevrası sonrasında kontrolcü kapalıyken karavanda meydana gelen bağlantı açısı 63.26 derece olarak kaydedilmiştir. DKR kontrolcüsü için gerçekleştirilen test sonucunda bağlantı açısı 8.91 derece olarak ölçülmüştür. Aynı değer BM tabanlı Sugeno çıkarım modelinde 7.88 derece olarak gözlemlenmiştir. BM tabanlı Mamdani çıkarım yönteminde ise 7.8 derece olarak ölçülmüştür. Aktif şasi kontrol yöntemleri ile elde edilen sonuçlara göre kararsız durumların engellendiği gösterilmiştir. Kontrolcüler arasında gerçekleştirilen karşılaştırmalı test sonuçlarına göre BM tabanlı kontrol yönteminin daha başarılı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.16. Kontrolcü aktifken karavanda oluşan yanal ivmelenme



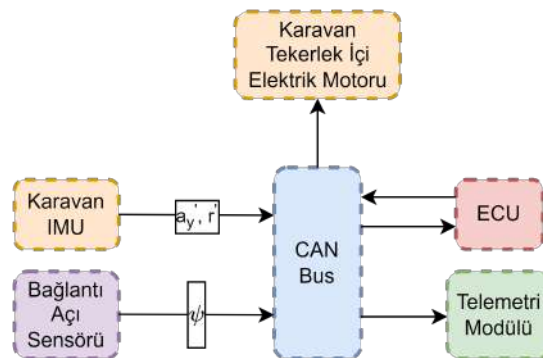
Şekil 5.17. Kontrolcü aktifken karavanda oluşan bağlantı açısı

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

TK sistemi öncelikle 3 serbestlik derecesiyle modellenmiştir. Elde edilen denklem takımları durum uzay formunda ifade edilerek sisteme ait kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. TK sisteminin kritik hız sınırı, belirtilen parametreler çerçevesinde ortaya çıkarılmıştır. Sistemin dinamik davranışları ve sistem parametrelerinin kararlılık üzerine etkileri incelenmiştir. Bu aşamadan sonra aktif şasi kontrolcüsü geliştirme süreçleri başlatılmıştır. Model bağımlı ve modelden bağımsız kontrolcü yöntemleri kullanılarak iki farklı kontrolcü geliştirilmiştir. Model bağımlı sistem olarak doğrusal karesel regülatör (DKR), modelden bağımsız sistem olarak bulanık mantık (BM) tabanlı kontrolcüler tasarlanmıştır. BM tabanlı kontrolcü Mamdani ve Takagi-Sugeno-Kang bulanık çıkarım modellerine göre ayrı ayrı geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcüler MATLAB/Simulink ve CarSim simülasyon ortamında çift şerit değiştirme manevrasıyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir önceki bölümde incelenmiş ve deneysel çalışmalara geçilmiştir. Bu bölümde kendinden tahrikli elektrikli karavan sistemine ait test deney düzeneğinden, gerçekleştirilen saha testlerinden ve elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

6.1. Deney Düzeneği

Saha testlerinde kullanılan elektrikli karavan donanımları ve donanımlar arasındaki bağlantı şeması Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Elektrikli karavan deney düzeneği

Yanal kararlılığı artırmak ve kararsız durumları engellemek için kontrolcülerin geliştirildiği elektrikli karavan deney düzeneği farklı donanımlardan oluşmaktadır. Bu donanımlar; aktif kontrol yöntemi yazılımının üzerinde çalıştığı elektronik kontrol ünitesinden, karavan ile yer kontrol istasyonu arasında veri akışının gerçekleştirildiği telemetri modülünden, taşıt ile karavan arasındaki bağlantı açısını ölçen açı sensöründen, karavan üzerinden meydana gelen dinamikleri ölçmek için kullanılan ataletsel ölçüm ünitesinden, karavana itki gücünü üreten elektrik motorundan ve motora güç sağlayan batarya paketinden oluşmaktadır.

Karavan elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) olarak otomotiv endüstrisinde kullanılan ticari bir donanım kullanılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen ve simülasyon ortamında test edilen BM tabanlı Mamdani ve Sugeno kontrolcüler EKÜ için tekrar yazılmıştır. Karavan EKÜ'sü Şekil 6.1'de gösterildiği üzere donanımlar ile denetleyici alan ağı (DAA) (controller area network (CAN)) üzerinden haberleşmektedir. Ataletsel ölçüm ünitesi (AÖÜ) (inertial measurement unit (IMU)) karavan üzerinde meydana gelen sapma oranı ve yanal ivmelenmenin tespit edilmesinde kullanılmıştır. Bağlantı sensörü TK sistemi arasında meydana gelen değişimi tespit etmek için kullanılmıştır. Model bağımlı kontrolcü geliştirilmesi durumunda meydana gelen bu değişim değerinin ölçülmesi gerekmektedir. Tekerlek içi elektrik motoru ise karavan sisteminin güç ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Deney düzeneğinde yer alan bir diğer donanım ise telemetri modülüdür. Bu modül, karavan EKÜ'sü vasıtasıyla elde edilen bilgilerin yer kontrol istasyonuna iletilmesini sağlamıştır.

6.1.1. Saha Testinde Kullanılacak Kontrolcünün Belirlenmesi

Kontrolcü geliştirme bölümü içerisinde model bağımlı ve modelden bağımsız kontrolcülerin tasarım süreçlerinden bahsedilmiştir. Bu başlık altında saha testlerinde kullanılan kontrolcünün tercih nedenleri anlatılmıştır. Elektrikli karavanda yanal kararlılığı sağlamak ve kararsız durumların oluşmasını engellemek için BM tabanlı kontrolcü kullanılmıştır. BM tabanlı kontrolcü; karavana yerleştirilen AÖÜ donanımı ile geliştirilebilir olması başlıca tercih sebebi olmuştur. Model bağımlı bir DKR kontrolcüsü tercih edilmesi durumunda sistemin tüm serbestlik derecelerine ait ölçüm veya kestirim bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı ilave sensör ihtiyacı oluşmaktadır. Ayrıca

sistem parametrelerinde meydana gelen değişimlerden de etkilenme durumu olduğu için model bağımlı kontrolcülerden ziyade modelden bağımsız bir kontrolcü tercih edilmiştir.

6.2. Saha Testi

TK sistemlerinde yanal kararlılığı artırmak ve kararsız durumları önlemek için geliştirilen BM tabanlı kontrolcülerin performansları saha testleriyle incelenmiştir. Saha testinde çekici araç olarak Chevrolet Avalanche, karavan olarak ise Crawler firması tarafından Türkiye’de ilk defa geliştirilen elektrikli karavanı e-Trail kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde karavan ünitesi olarak genellikle boş şasi üzerine eklenen ağırlıkların kullanıldığı tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında hem arazi tipi bir karavan kullanılması hem de karavanın elektrikli olması çalışmanın özgünlüğünü oluşturmuştur. Saha testinde kullanılan çekici araç ve elektrikli karavan Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



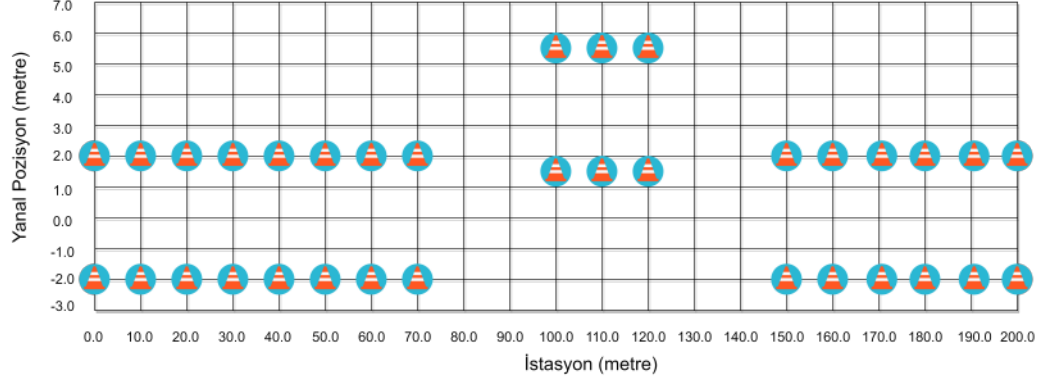
(a)



(b)

Şekil 6.2. Saha testinde kullanılan çekici araç ve elektrikli karavan

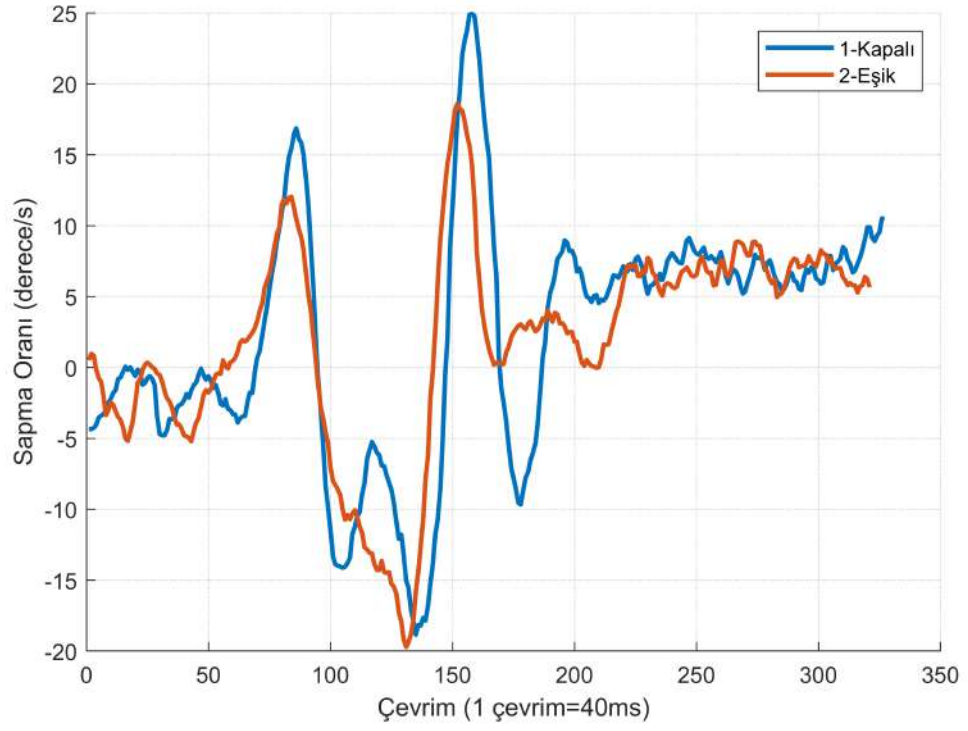
Simülasyon ortamında olduğu gibi saha testleri de çift şerit değiştirme manevrasına göre gerçekleştirilmiştir. Çift şerit değiştirme manevrasının yerleşim planı Şekil 6.3’de paylaşılmıştır.



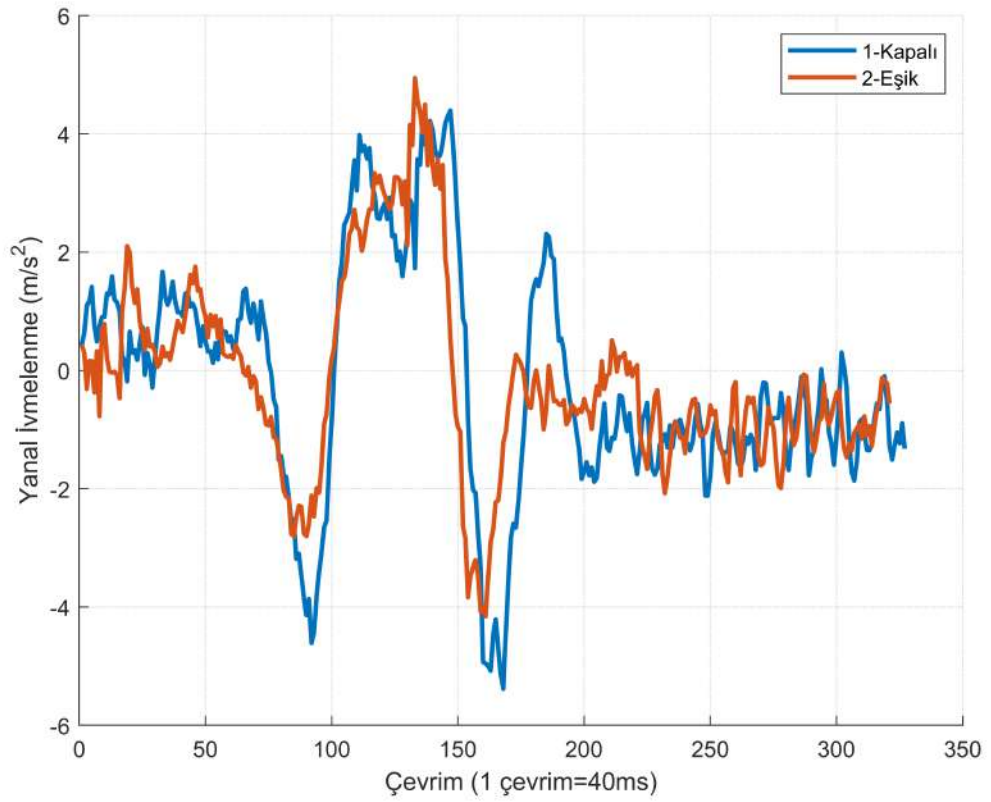
Şekil 6.3. Çift şerit değiştirme manevrasında takip edilen güzergah

Çift şerit değiştirme manevrasının yerleşim planı incelendiğinde, test üç bölüme ayrılmıştır. Birinci kısım test için gerekli olan hızlanma bölümü olarak belirtilebilmektedir. İkinci bölüm 4 metre yanal yer değiştirmenin gerçekleştirildiği aşamadır. Üçüncü kısım ise başlangıçta bulunulan yanal pozisyona geri dönülmesi olarak ifade edilmektedir. Eklemlili araçların dinamiklerini incelemek veya taşıtların manevra kabiliyetlerinin ortaya çıkarılmasında çift şerit değiştirme manevrası sıklıkla kullanılmaktadır.

Farklı kontrolcülerin performansları çift şerit değiştirme senaryosu altında 50 km/h hızda test edilmiştir. TK sisteminin dinamik davranışları 50 km/h hızda ifade edilebildiği için testler bu hızda gerçekleştirilmiştir. İlk başta kontrolcünün kapalı olduğu ve belirli bir eşik değerine (± 5 derece/s karavan sapma oranına) göre çalışan kontrolcünün karşılaştırmalı sonuçları paylaşılmıştır. Şerit değiştirme manevrasından sonra karavan üzerinde meydana gelen sapma oranları Şekil 6.4a’da gösterilmiştir. Aktif şasi kontrol yöntemi kapalı olduğunda sapma oranı tepeden tepeye 43.77 derece/s olarak değişim meydana gelmiştir. Belirli bir eşik değerinin aşılmasıyla devreye giren kontrolcü yöntemi açıkken tepeden tepeye ölçülen sapma oranı 38.31 derece/s olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde eşik değerine göre çalışan kontrolcü %12.5 oranında başarılı olmuştur. Şekil 6.4b’de gösterilen yanal ivmelenme sonuçları değerlendirildiğinde, kontrolcünün kapalı olduğu durumda 9.571 m/s^2 değişim gözlemlenmiştir. Eşik değeri kontrolcüsü aktifken gerçekleştirilen manevra sonrasında yanal ivmelenmede oluşan değişim ise 8.345 m/s^2 olarak kaydedilmiştir.



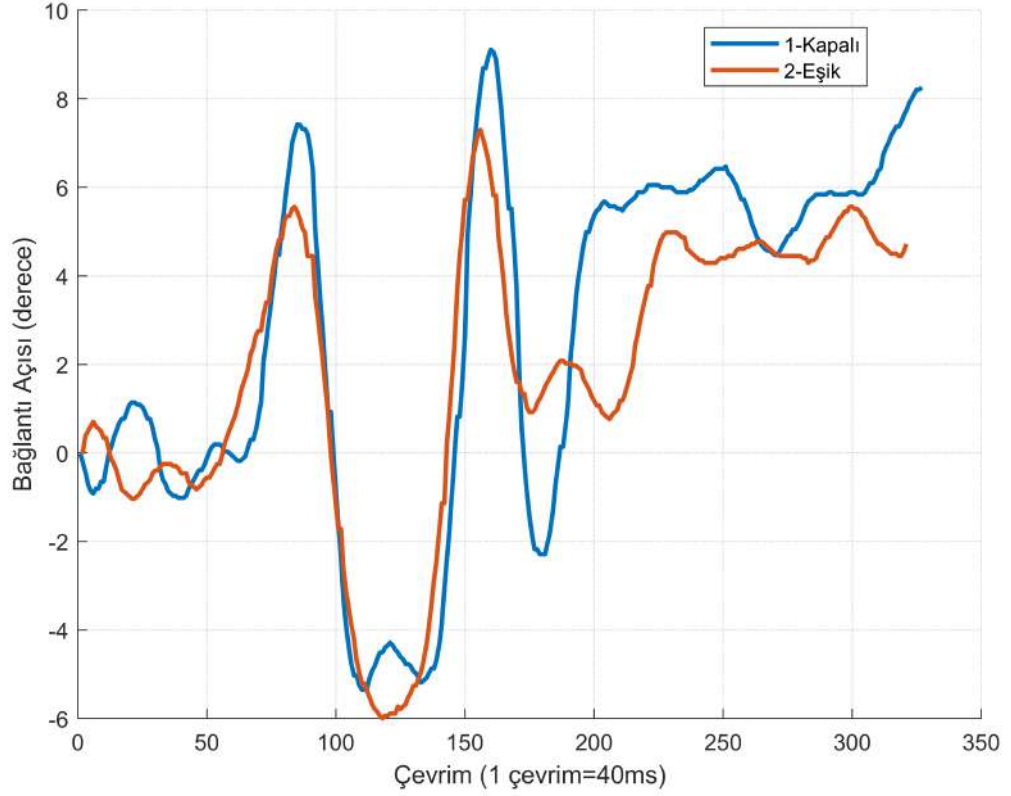
(a)



(b)

Şekil 6.4. Saha testi sonucunda karavanda meydana gelen (a) sırtma oranı ve (b) yanall İvmelenmesi

Hem sapma oranı hem de yanal ivmelenme sonuçları incelendiğinde eşik değerine göre çalışan kontrolcünün devreye girerek yanal kararlılığı artırdığı gösterilmiştir. Şerit değiştirme manevrası sonucunda bağlantı açısında oluşan değişim Şekil 6.5’de gösterilmiştir.

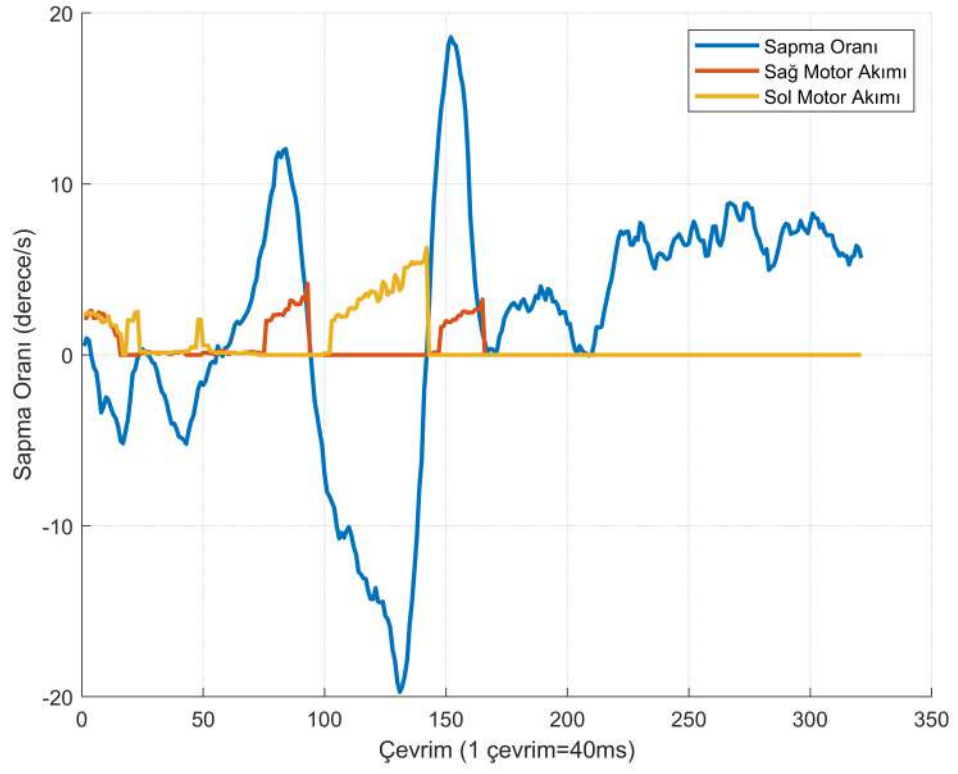


Şekil 6.5. Saha testi sonucunda karavanda meydana gelen bağlantı açısı

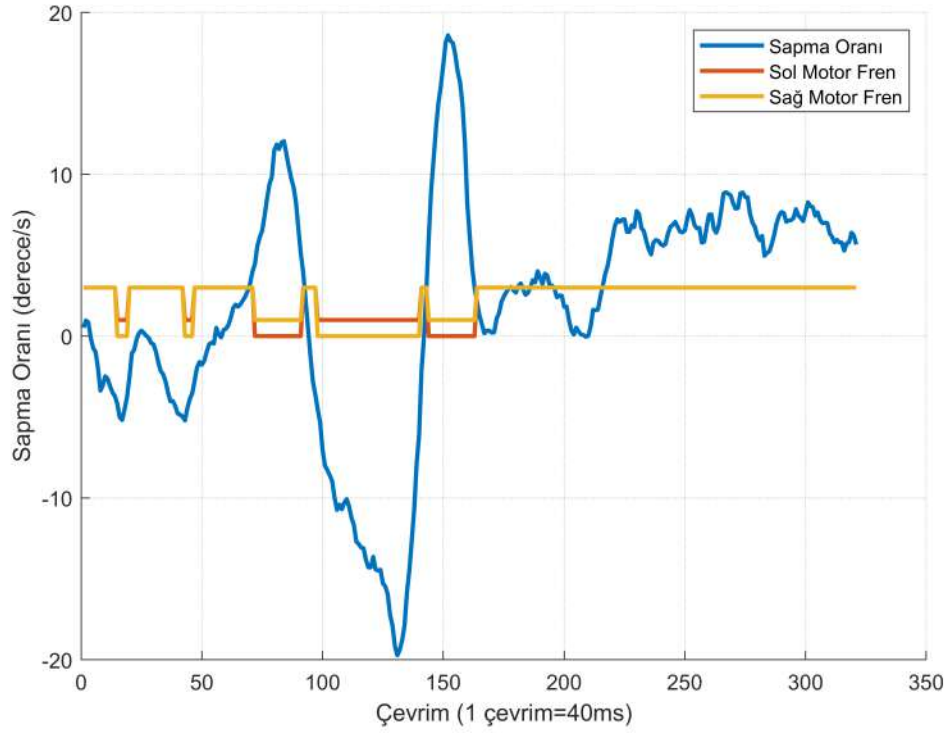
Kontrolcünün kapalı olduğu durumda bağlantı açısı 14.42 derece değişim göstermiştir. Eşik değerine göre çalışan kontrolcü aktifken meydana gelen değişim ise 13.24 derece olarak ölçülmüştür. Kontrolcünün aktif olduğu durumlarda; sapma oranı, yanal ivmelenme ve bağlantı açısında oluşan değişimler incelendiğinde yanal kararlılıkta iyileşmenin sağlandığı gösterilmiştir.

Eşik değeri kontrolcüsünün sapma oranına göre frenleme oranı, frenleme zamanlaması ve frenleme tork değerleri Şekil 6.6’da gösterilmiştir.

Karavan çift şerit değiştirme manevrasının ilk aşamasında sola geçiş yaptıktan sonra sağa doğru savrulacağından sağ tarafta bulunan elektrik motoruna frenleme yaptırılması gerekmektedir. Belirtilen durumun saha testlerinde uygulandığı gösterilmiştir. Sapma oranının pozitif değerde olması sola doğru manevra gerçekleştiğini, sapma oranının negatif



(a)

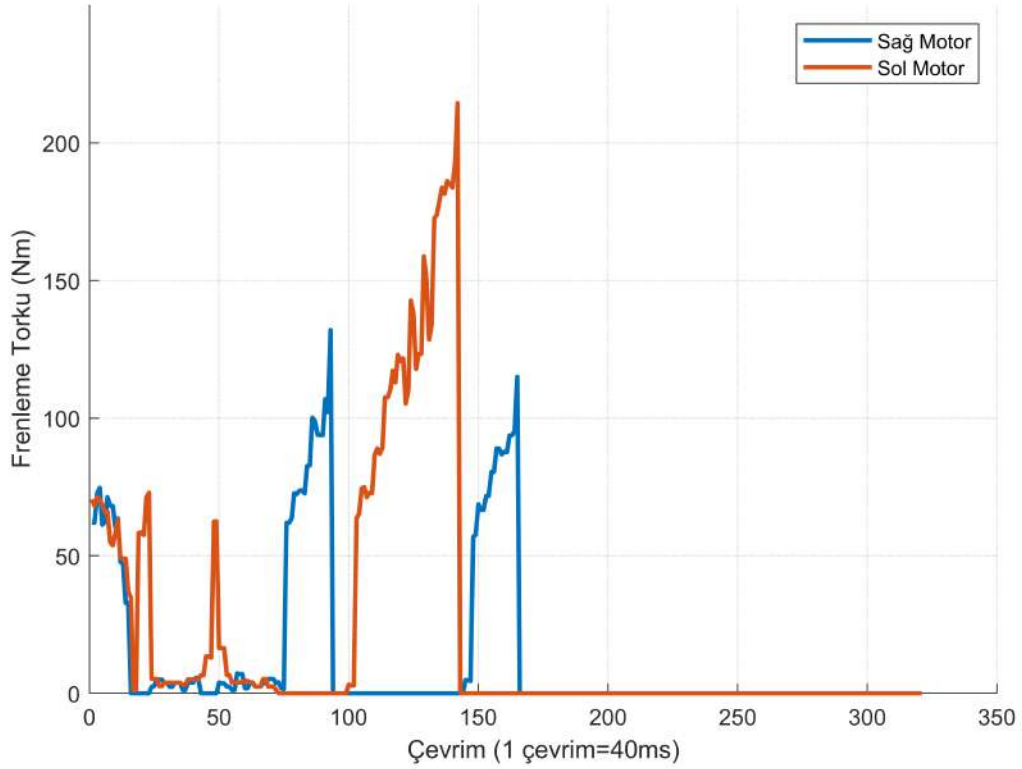


(b)

Şekil 6.6. Eşik kontrolcüsü aktifken (a) çekilen akım değeri ve (b) uygulanan frenleme zamanlaması

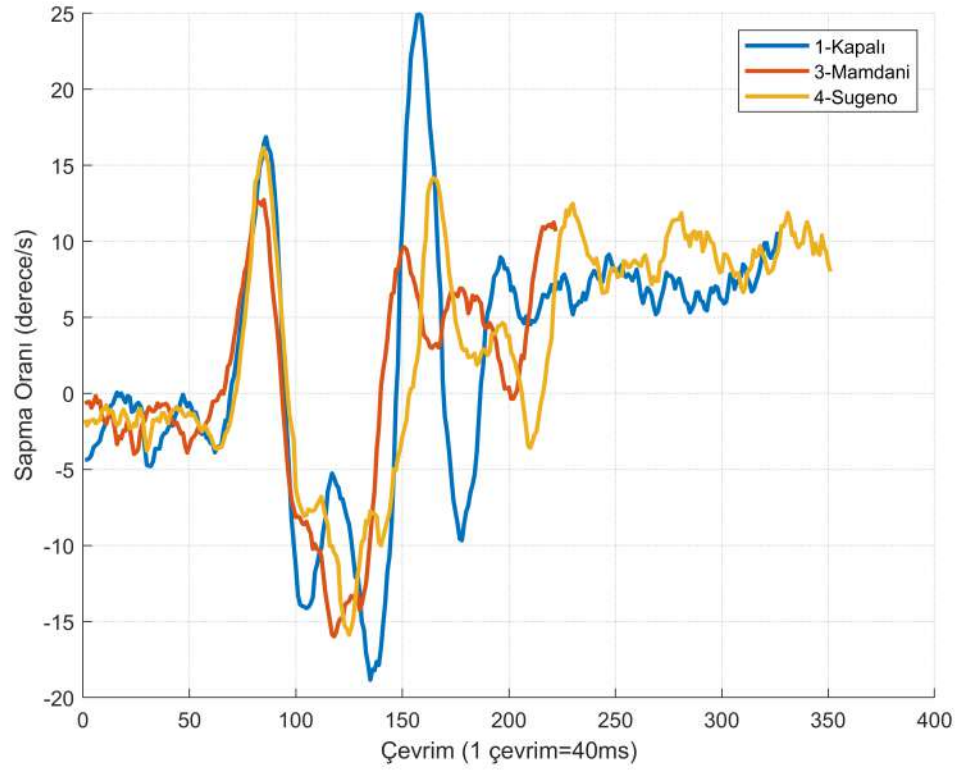
değerde olması ise sağa doğru manevra oluştuğunu ifade etmektedir.

Yanal kararlılığı artırmak için kontrolcü tarafından uygulanan komut setlerinin doğru zamanda ve doğru yönde gerçekleştirildiği gösterilmiştir. Manevraların gerçekleştirildiği sırada elektrik motorları üzerinden TK sistemine uygulanan frenleme torkları Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

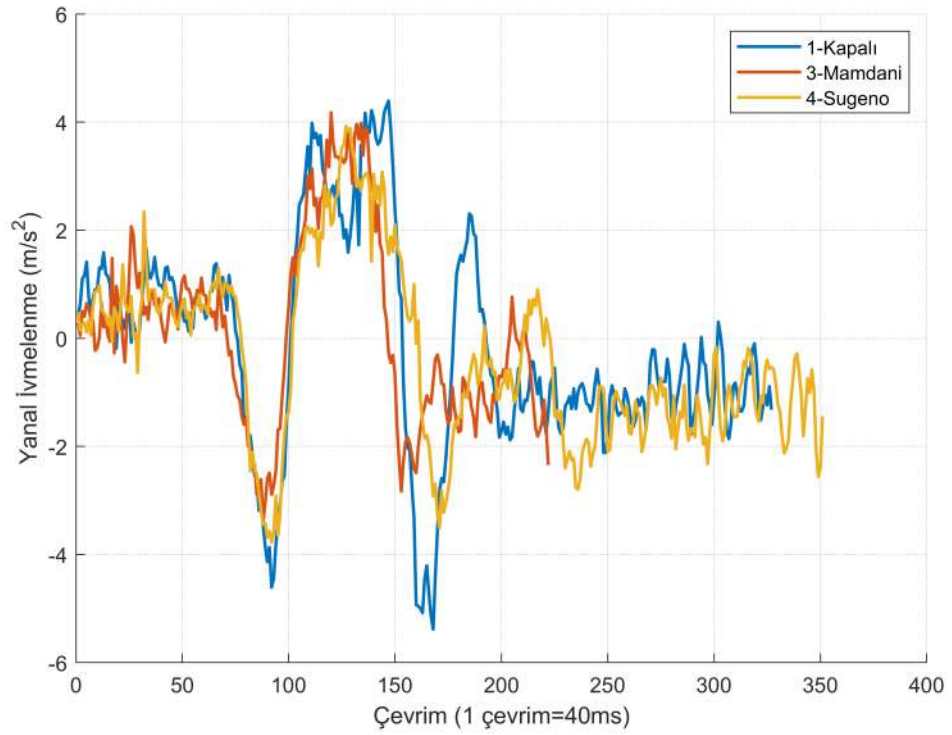


Şekil 6.7. Eşik kontrolcüsü aktifken uygulanan frenleme tork değerleri

Frenleme torkları incelendiğinde frenleme zamanlamasına paralel şekilde tork değerinin üretildiği gözlemlenmiştir. TK sisteminde yanal kararlılığı artırmak ve kararsız durumların engellenmesi için geliştirilen BM tabanlı Mamdani ve Sugeno çıkarım modelini kullanan kontrolcülerinin karşılaştırılmasına ait saha test sonuçları Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Kontrolcü kapalıyken meydana gelen tepeden tepeye sapma oranı 43.77 derece/s olarak ölçülmüştür. BM tabanlı Mamdani kontrolcüsünde bu değer 25.6 derece/s olurken Sugeno kontrolcüsünde ise 30.3 derece/s olarak tespit edilmiştir. Kontrolcünün kapalı olduğu durum ile BM tabanlı Mamdani kontrolcüsü karşılaştırıldığında %41.5 oranında başarılı olduğu gösterilmiştir. BM tabanlı Sugeno kontrolcüsüyle karşılaştırıldığında ise %31.4 oranında başarı elde edildiği paylaşılmıştır.



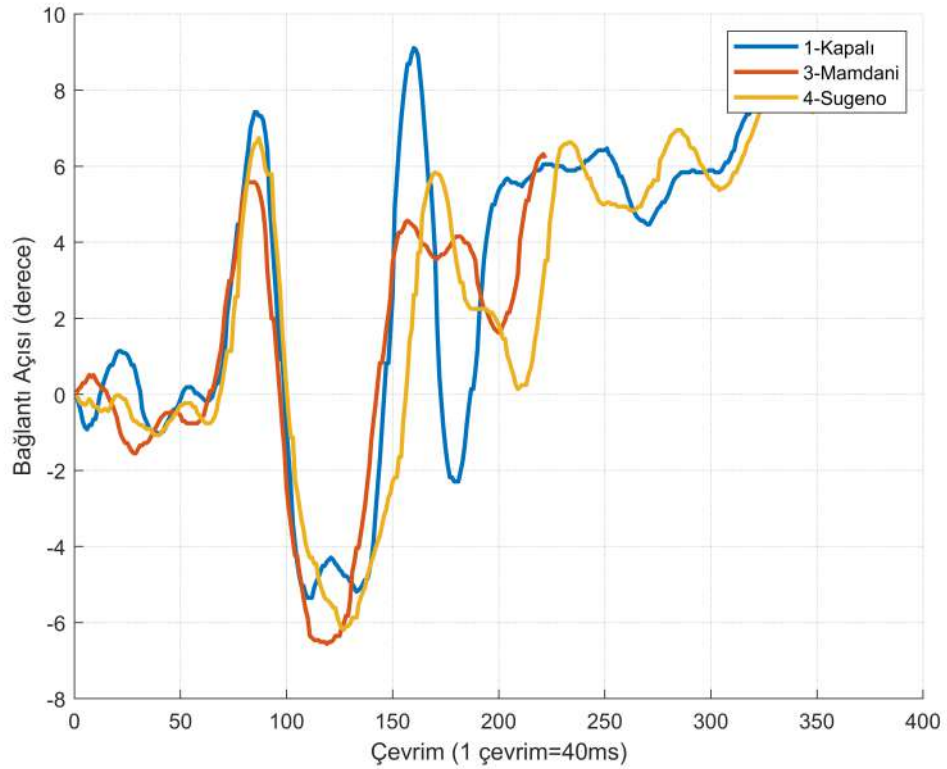
(a)



(b)

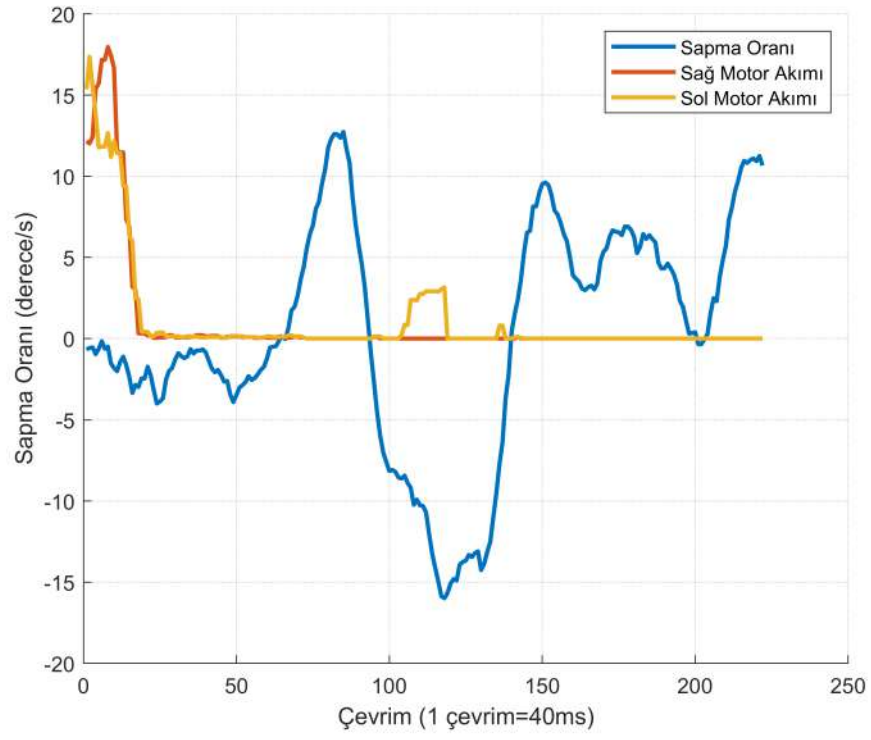
Şekil 6.8. BM kontrolcüsü aktifken manevra sonrasında oluşan (a) sapma oranı ve (b) yanıl İvmelenme değeri

Yanal ivmelenme değerlerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kontrolcünün kapalı olduğu durumda 9.571 m/s^2 'lik bir değişim meydana gelmiştir. BM tabanlı Mamdani kontrolcüsünde oluşan yanal ivmelenme değişimi 6.668 m/s^2 iken BM tabanlı Sugeno kontrolcüsünde ise 6.571 m/s^2 'lik bir değişim oluşmuştur. Sapma oranında olduğu gibi BM tabanlı Mamdani ve Sugeno kontrolcülleri aktif şasi yönteminin kapalı olduğu duruma göre %31.3 oranında daha başarılı performans gösterilmiştir. Şekil 6.9'da bağlantı açısında oluşan değişim gösterilmiştir.

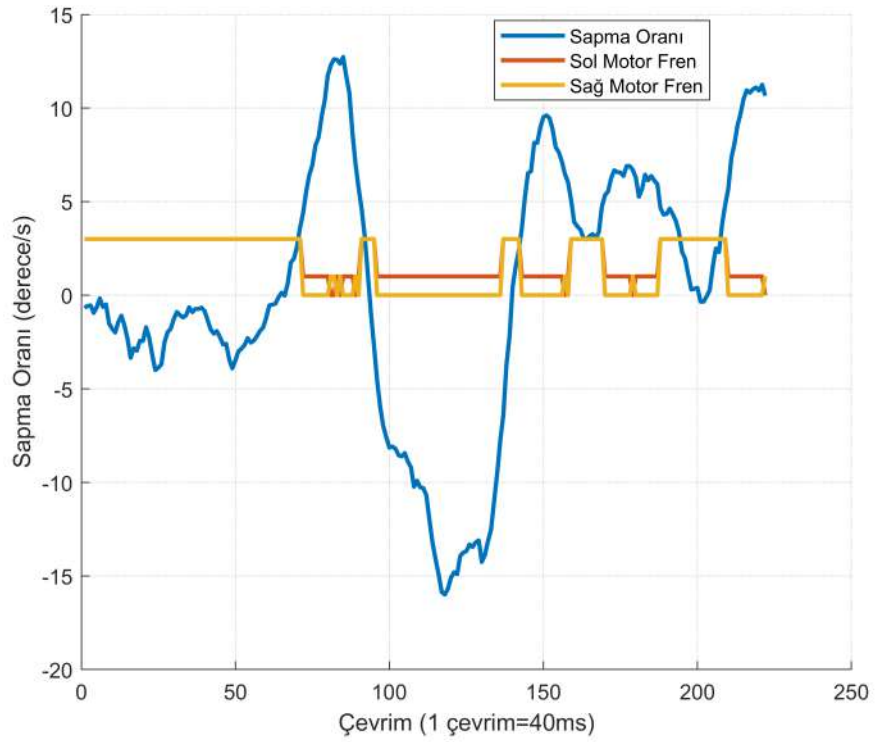


Şekil 6.9. BM kontrolcüsü aktifken manevra sonrasında oluşan bağlantı açısı

Çift şerit değiştirme manevrası sonucunda bağlantı açısında elde edilen sonuçlara göre, kontrolcünün kapalı durumunda bağlantı açısı 13.9 derecelik bir değişim oluşmuştur. BM tabanlı Mamdani kontrolcüsünde 10.4 derecelik bir değişim kaydedilirken Sugeno kontrolcüsünde ise 11.9 derecelik bir değişim meydana gelmiştir. BM tabanlı kontrolcülerin sapma oranı, yanal ivmelenme ve bağlantı açısı değişim verilerine göre yanal kararlılığı artırdığı yapılan saha testleri sonucunda gösterilmiştir. BM tabanlı Mamdani kontrolcüsünün test manevrasında ürettiği tepkiler Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Mamdani kontrolcüsü tarafından uygulanan tepkiler incelendiğinde frenleme zamanlamasının giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarına göre gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.



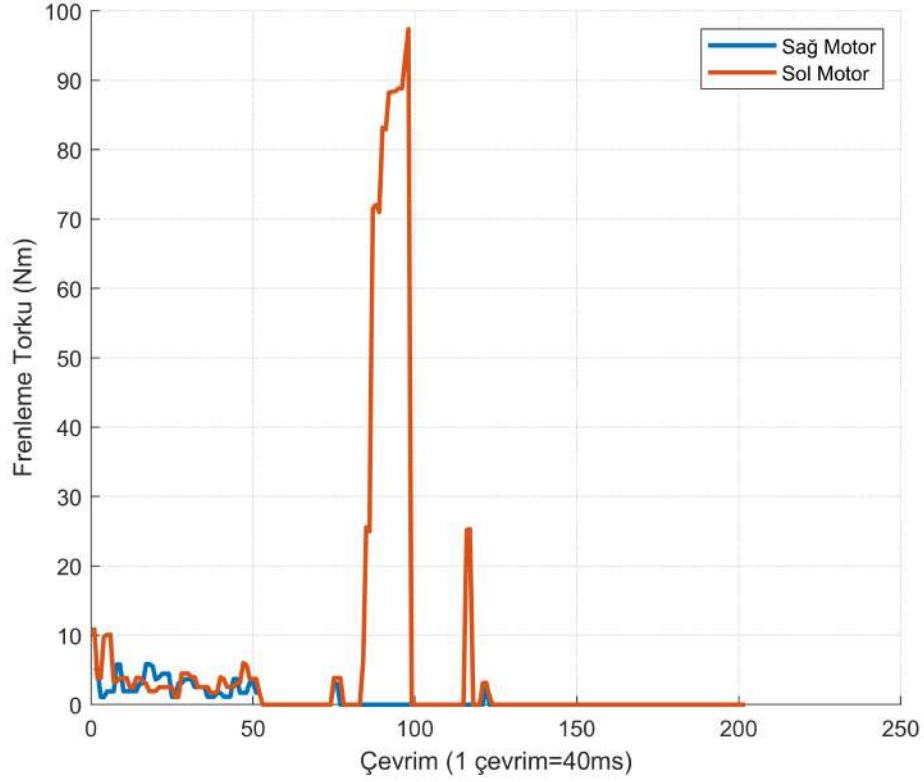
(a)



(b)

Şekil 6.10. Mamdani kontrolcüsüne ait (a) sapma oranı ve akım değerleri (b) frenleme zamanlaması

Mamdani kontrolcüsü aktifken gerçekleştirilen manevraya karşılık üretilen frenleme tepkisi Şekil 6.11’de gösterilmiştir.

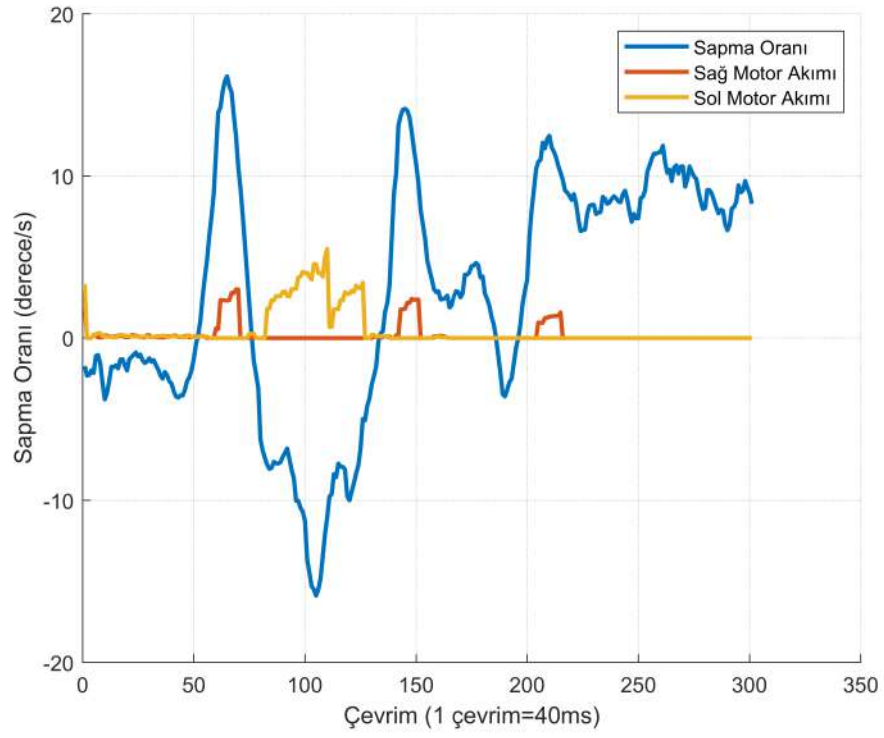


Şekil 6.11. Mamdani kontrolcü aktifken uygulanan frenleme torku

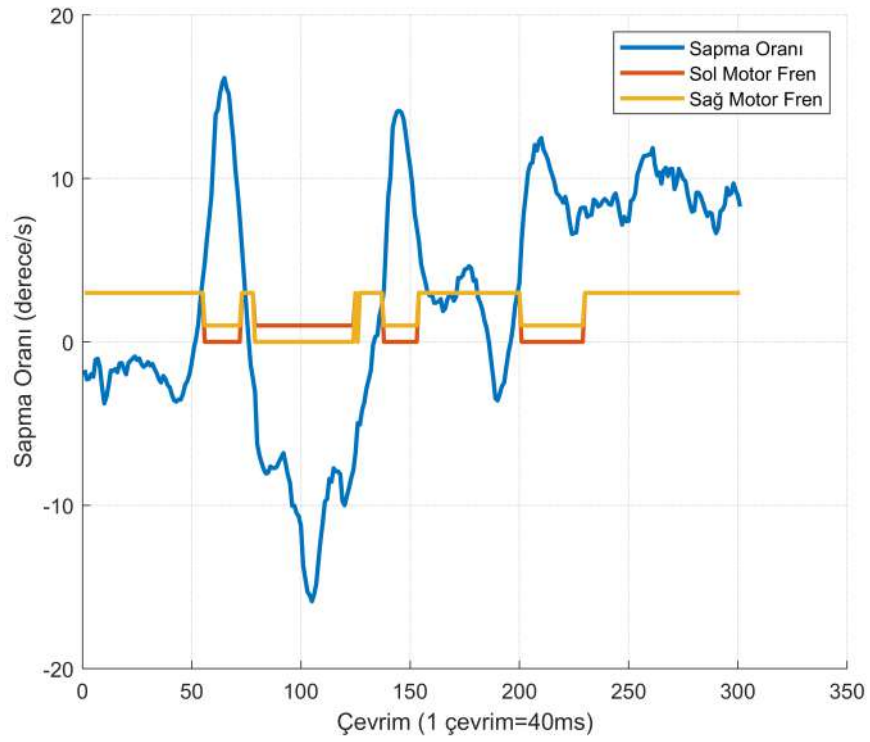
Frenleme zamanlamasıyla senkron olacak şekilde frenleme torkunun üretildiği gözlemlenmiştir. BM tabanlı kontrolcüsünün çıkış üyelik fonksiyonu olarak belirlenen frenleme oranı doğrudan elektrik motor sürücüsüne DAA üzerinden aktarılmıştır.

BM tabanlı Sugeno kontrolcüsü aktifken gerçekleşen manevra esnasında oluşan sapma oranı ile motorlarda rejeneratif frenleme esnasında üretilen akım değerleri arasındaki ilişki ve manevraya karşılık kontrolcü tarafından üretilen frenleme zamanlaması Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Şekil 6.12a’da paylaşılan akım değerleri 1:10 oranıyla paylaşılmıştır. Çift şerit değiştirme manevrasıyla beraber aktif şasi kontrolcü yöntemi buna karşılık set halinde gerekli tepkileri zamanında uyguladığı gösterilmiştir. Kontrolcü tarafından uygulanan tepkiler sayesinde karavanın yanal kararlılığı artırılmıştır.

BM tabanlı Sugeno kontrolcüsünün yanal kararlılığı sağlamak için gerçekleştirilen manevralara karşı ürettiği frenleme tork tepkisi 6.13’de gösterilmiştir. BM tabanlı kontrolcülerin saha testlerindeki manevraları karşı ürettikleri tepkiler incelendiğinde



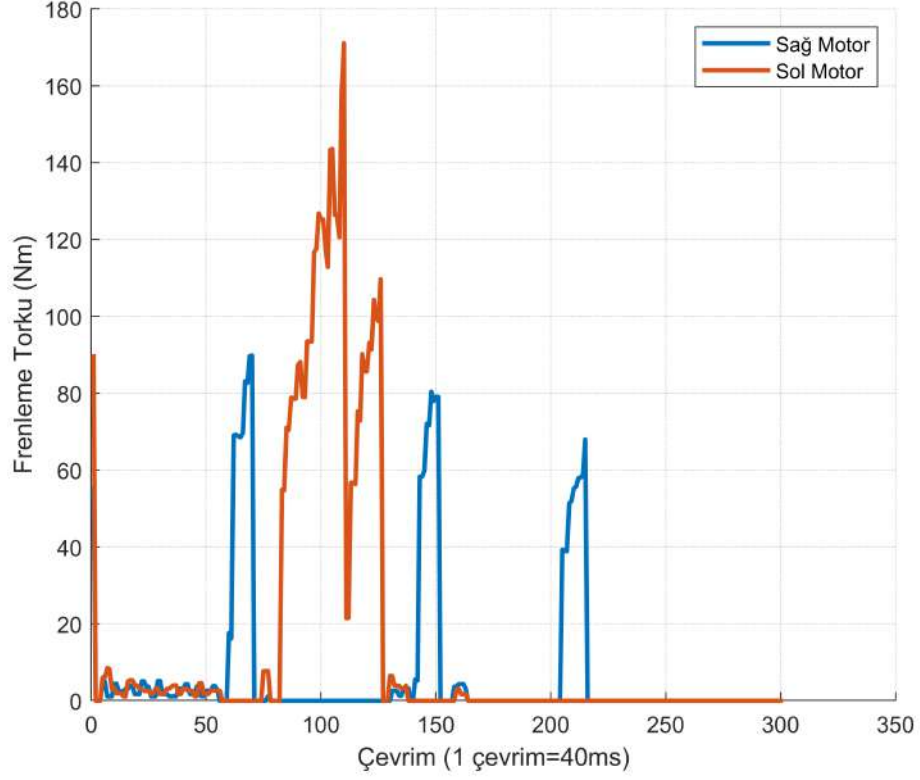
(a)



(b)

Şekil 6.12. Sugeno kontrolcüsüne ait (a) sapma oranı ve akım değerleri (b) frenleme zamanlaması

yerinde ve zamanında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Aktif şasi kontrol yönteminin kullanılması durumunda yanal kararlılığın artırıldığı gerçekleştirilen saha testleriyle ifade edilmiştir.



şekil 6.13. Sugeno kontrolcü aktifken uygulanan frenleme torku

Gerçekleştirilen saha testlerinde meydana gelebilecek olumsuz durumlara karşı karavana destek tekerleri eklenmiştir. Karavan üzerinde kararsız modların oluşması durumunda destek tekerleği sayesinde devrilme dinamiğine karşı önlem alınmıştır. Kontrolcü kapalıyken gerçekleştirilen test sırasında destek tekerleklere temasın sağlandığı durum şekil 6.14a'da gösterilmiştir. Aynı test görüntüsünde çift şerit değiştirme manevrasının güzergahını belirlemede kullanılan trafik konisinin de devrildiği gözlemlenmiştir. Karavanın şerit dışına bir miktar taşması, koninin devrilmesinden anlaşılmıştır. Çift şerit değiştirme manevrası gerçekleştirilirken havadan çekilen bir görüntü şekil 6.14b'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.14. (a) Kontrolcü kapalıyken gerçekleştirilen test esnasında destek tekerleğine temas edilmesi ve (b) saha testlerinden bir görüntü

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında elektrikli karavan sistemi için yanal kararlılığı artıran ve kararsız modların oluşmasını engelleyen aktif güvenlik kontrolcüsü geliştirilmiştir. Hem arazi karavanı kullanılması hem de elektrikli bir karavan ile tez çalışmasının gerçekleştirilmesi çalışmanın özgünlüğü oluşturmuştur.

Bölüm 3’de TK sistemlerinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Literatürde kullanılan farklı serbestlik dereceli modeller incelenmiştir. Geliştirilecek kontrolcü ve aktif güvenlik kontrolcüsünün geliştirilme amacına uygun olarak serbestlik derecesinin belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Tez çalışması kapsamında yanal kararlılığın sağlanması için 3 serbestlik dereceli modelin kullanılması uygun olacağı belirlenmiştir. TK sistemi doğrusal 3 serbestlik derecesi ile modellenmiş ve durum uzay formunda ifade edilmiştir. Elde edilen hareket denklemleri, tercih edilen aktif karavan diferansiyel frenleme (AKDF) yöntemine uygun olacak şekilde güncellenmiştir. Geliştirilen modelin doğrulanması için CarSim yazılımı kullanılmıştır. TK sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir ve doğrulama çalışmaları CarSim eş zamanlı simülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model üzerinden elde edilen sonuçlar incelenmiştir. CarSim yazılımının ürettiği sonuçlara kabul edilebilir sınırlar içerisinde yaklaşıldığı gösterilmiştir.

Bölüm 4’de TK sistemi için elde edilen hareket denklemleri kullanılarak dinamik kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Özdeğer analiz yöntemi kullanılmasıyla TK sisteminin kritik hız sınırı ortaya çıkartılmıştır. TK sistemleri kendilerine has dinamikleri olmasından dolayı, sürücülerin buna göre davranmaları gerekmektedir. Kritik hız sınırının belirlenmesi hem karavan üreticileri hem de kullanıcılar için önem arz etmektedir. TK sistem parametrelerinin kararlılık üzerine etkileri de incelenmiştir. Ağırlık merkezinin, aks pozisyonunun, kütle ve atalet momenti değişiminin etkileri simülasyon ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yanlış tasarlanan bir sistemde kararsız modların

ortaya çıktığı gösterilmiştir. TK sisteminde belirtilen parametrelerin yanal kararlılığı artırmadaki etkileri paylaşılmıştır.

Bölüm 5’de TK sistemi için geliştirilen kontrolcü yöntemleri ifade edilmiştir. TK sisteminin hareket denklemleri durum uzay formunda elde edildikten sonra simülasyon ortamında kontrolcü geliştirme faaliyetlerine geçilmiştir. AKDF yöntemi kullanılarak DKR ve BM tabanlı kontrolcüler geliştirilmiştir. DKR kontrolcüsünde ağırlık matrislerinin belirlenmesinde GA optimizasyon yöntemi kullanılarak deneme yanılma yöntemiyle tespit edilen parametrelere göre avantaj elde edilmiştir. Model bağımlı ve modelden bağımsız kontrolcü yöntemleri tercih edilerek karşılaştırmalı sonuçları simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen şerit değiştirme manevralarına göre aktif güvenlik sistemlerinin gereklilikleri ortaya konmuştur. BM tabanlı kontrolcü ise Mamdani ve Sugeno çıkarım modelleri kullanılarak geliştirilmiştir. Her iki çıkarım modellerinin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Geliştirilen kontrolcüler MATLAB/Simulink ve CarSim ortamında uygulanan çift şerit değiştirme manevralarıyla karşılaştırılmıştır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre saha testlerinde kullanılacak yöntemlere yönelik ön çalışmalar tamamlanmıştır.

Bölüm 6’da TK sistemi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Tez çalışması kapsamında kullanılan deney düzeneği ve donanımları ifade edilmiştir. Tez çalışması hem arazi karavanı kullanılması hem de elektrikli tahrik sistemini üzerinde bulundurmasıyla literatürdeki diğer çalışmalardan farklılaşmıştır. Saha testlerinde BM tabanlı kontrolcü, donanım gereksinimleri ve parametre değişimlerine karşı daha gürbüz olmasından dolayı tercih edilmiştir. Çift şerit değiştirme manevrası; kontrolcünün kapalı olması, eşik değerine göre çalışması ve BM tabanlı kontrolcülerinin performanslarını karşılaştırmak için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre kontrolcülerin devrede olduğu durumlarda yanal kararlılığı artırdığı gösterilmiştir. BM tabanlı kontrolcülerin ise eşik değerine göre çalışan kontrolcüye göre daha başarılı performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon testlerine göre geliştirilen kontrolcüler ile TK sisteminde yanal kararlılığının sağlandığı ve kararsız durumların oluşması engellendiği gösterilmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilenleri aşağıdaki maddeler şeklinde özetleyebiliriz:

1. TK sistemine ait aktif kontrol yöntemleri incelenmiştir,

2. TK sisteminde oluşan hareket denklemleri çıkartılmış ve sistem 3 serbestlik derecesiyle modellenmiştir,
3. MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model, CarSim yazılımıyla doğrulanmıştır,
4. Sistem modeline ait kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir,
5. TK sisteminde yanal kararlılığı artırması ve kararsız durumların oluşmasını engellemek için kontrolcüler geliştirilmiştir,
6. Geliştirilen kontrolcüler simülasyon ve deneysel çalışmalar ile test edilmiştir,
7. Saha testlerinde elde edilen verilere göre BM tabanlı kontrolcülerin yanal kararlılığı artırdığı gösterilmiştir.

7.2. Öneriler

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde TK sistemleri için çeşitli aktif şasi kontrol yöntemlerinin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Tez çalışması kapsamında AKDF tekniği kullanılmıştır. TK sistemleri için yanal kararlılığı artırmada hem diferansiyel frenleme hem de yönlendirme tekniğinin beraber kullanılmasıyla bazı avantajlar kazanılabileceği düşünülmektedir.

TK sistemlerinde çekici aracın elektrikli olduğu çalışmalar mevcuttur. Tez çalışması kapsamında ise karavan kısmında tahrik mekanizması bulunmaktadır. Mevcut çalışmalar incelendiğinde hem çekici aracın hem de karavanın elektrikli olduğu bir çalışma görülmemiştir. Her iki sisteminde elektrikli olarak kullanılması bir öneri olarak sunulabilir.

Gerçekleştirilen test sayısının artırılabilmesi için iç ortamda test düzeneğinin kurulmasıyla düşünülebilir. Böylelikle saha testlerinde ortaya çıkan eksikliklerin daha kolay gözlemlenebilmesi sağlanabilir.

TK sistemlerinde kullanılan model bağımlı kontrolcülerin ihtiyacı olan serbestlik derecesine ait sensör ölçümlerinde kestirim algoritmaları veya yapay zeka teknikleri kullanılabilir. Özellikle taşıt veya karavana ait yanal hızın tespit edilmesinde yapay zeka yöntemlerinin kullanılması düşünülebilir.

Yanal kararlılığı artırmada ve kararsız durumların engellenmesi için geliştirilen kontrolcü yöntemlerinde farklı teknikler kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında saha

testlerinde BM tabanlı kontrolcü tercih edilmiştir. Model öngörülü kontrol (MÖK) yöntemi elektrikli karavan sistemi için saha testlerinde kullanılabilir. Bu şekilde model bağımlı ve modelden bağımsız kontrol yöntemleri hakkında saha testleri altında karşılaştırma gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] A. Hac, D. Fulk, and H. Chen, “Stability and control considerations of vehicle-trailer combination,” *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, vol. 1, no. 2008-01-1228, pp. 925–937, 2008.
- [2] R. Shamim, M. M. Islam, and Y. He, “A comparative study of active control strategies for improving lateral stability of car-trailer systems,” *SAE Technical Paper*, no. 2011-01-0959, 2011.
- [3] Y. He and J. Ren, “A comparative study of car-trailer dynamics models,” *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, vol. 6, no. 2013-01-0695, pp. 177–186, 2013.
- [4] E. Lee, *Design optimization of active trailer differential braking systems for car-trailer combinations*. [PhD dissertation], Oshawa (ON): University of Ontario Institute of Technology, 2016.
- [5] T. Sun, “Design synthesis of car-trailer systems with active trailer differential braking strategies,” [MsC dissertation], Oshawa (ON): University of Ontario Institute of Technology, 2013.
- [6] J. Catterick, T. Botha, and P. Els, “Stability control of articulated vehicles using brake-based torque vectoring,” *Southern African Transport Conference 2021*, 2021.
- [7] M. Aripin, Y. Md Sam, K. A. Danapalasingam, K. Peng, N. Hamzah, and M. Ismail, “A review of active yaw control system for vehicle handling and stability enhancement,” *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2014, 2014.
- [8] X. Yang, J. Song, and J. Gao, “Fuzzy logic based control of the lateral stability of tractor semitrailer vehicle,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015.
- [9] S. Vempaty and Y. He, “A review of car-trailer lateral stability control approaches,” *SAE Technical Paper*, no. 2017-01-1580, 2017.

- [10] M. Abroshan, “Integrated stability and tracking control system for autonomous vehicle-trailer systems,” 2021.
- [11] N. Zhang, J.-h. Wu, T. Li, Z.-q. Zhao, and G.-d. Yin, “Influence of braking on dynamic stability of car-trailer combinations,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 235, no. 2-3, pp. 455–464, 2021.
- [12] E. Lee, S. Kapoor, T. Sikder, and Y. He, “An optimal robust controller for active trailer differential braking systems of car-trailer combinations,” *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, vol. 12, no. 1-2, pp. 72–93, 2017.
- [13] C. R. Carlson and J. C. Gerdes, “Optimal rollover prevention with steer by wire and differential braking,” in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 37130, pp. 345–354, 2003.
- [14] J. M. Williams and F.-W. Mohn, “Trailer stabilization through active braking of the towing vehicle,” *SAE Technical Paper*, no. 2004-01-1069, 2004.
- [15] H. Zheng, L. Wang, J. Zhang, *et al.*, “Comparison of active front wheel steering and differential braking for yaw/roll stability enhancement of a coach,” *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, vol. 2, no. 2018-01-0820, pp. 267–283, 2018.
- [16] T. Sun, Y. He, E. Esmailzadeh, and J. Ren, “Lateral stability improvement of car-trailer systems using active trailer braking control,” *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, vol. 2, no. 9, pp. 555–562, 2012.
- [17] M. A. Fernandez and R. Sharp, “Caravan active braking system-effective stabilisation of snaking of combination vehicles,” *SAE Technical Paper*, no. 2001-01-3188, 2001.
- [18] T. Sun, E. Lee, and Y. He, “Non-linear bifurcation stability analysis for articulated vehicles with active trailer differential braking systems,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 9, no. 3, pp. 688–698, 2016.

- [19] M. Zanchetta, D. Tavernini, A. Sorniotti, P. Gruber, B. Lenzo, A. Ferrara, K. Sannen, J. De Smet, and W. De Nijs, "Trailer control through vehicle yaw moment control: Theoretical analysis and experimental assessment," *Mechatronics*, vol. 64, p. 102282, 2019.
- [20] D. Kasinathan, A. Kasaiezadeh, A. Wong, A. Khajepour, S.-K. Chen, and B. Litkouhi, "An optimal torque vectoring control for vehicle applications via real-time constraints," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4368–4378, 2015.
- [21] L. De Novellis, A. Sorniotti, and P. Gruber, "Wheel torque distribution criteria for electric vehicles with torque-vectoring differentials," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1593–1602, 2013.
- [22] V. Scheuch, G. Kaiser, M. Korte, P. Grabs, F. Kreft, and F. Holzmann, "A safe torque vectoring function for an electric vehicle," in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pp. 1–10, IEEE, 2013.
- [23] L. De Novellis, A. Sorniotti, P. Gruber, L. Shead, V. Ivanov, and K. Hoeppeing, "Torque vectoring for electric vehicles with individually controlled motors: State-of-the-art and future developments," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 617–628, 2012.
- [24] T. Goggia, A. Sorniotti, L. De Novellis, A. Ferrara, P. Gruber, J. Theunissen, D. Steenbeke, B. Knauder, and J. Zehetner, "Integral sliding mode for the torque-vectoring control of fully electric vehicles: Theoretical design and experimental assessment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 1701–1715, 2014.
- [25] A. Parra, A. Zubizarreta, J. Pérez, and M. Dendaluce, "Intelligent torque vectoring approach for electric vehicles with per-wheel motors," *Complexity*, vol. 2018, 2018.
- [26] D. Yin, J. Wang, J. Du, G. Chen, and J.-S. Hu, "A new torque distribution control for four-wheel independent-drive electric vehicles," in *Actuators*, vol. 10, p. 122, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.

- [27] S. Taherian, S. Kuutti, M. Visca, and S. Fallah, “Self-adaptive torque vectoring controller using reinforcement learning,” in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 172–179, IEEE, 2021.
- [28] Y. He, H. Elmaraghy, and W. Elmaraghy, “A design analysis approach for improving the stability of dynamic systems with application to the design of car-trailer systems,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 11, no. 12, pp. 1487–1509, 2005.
- [29] X. Kang and W. Deng, “Vehicle-trailer handling dynamics and stability control - an engineering review,” *SAE Technical Paper*, no. 2007-01-0822, 2007.
- [30] J. Darling, D. Tilley, and B. Gao, “An experimental investigation of car—trailer high-speed stability,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 223, no. 4, pp. 471–484, 2009.
- [31] Y. Zhao, S. Chen, and T. Shim, “Investigation of trailer yaw motion control using active front steer and differential brake,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 4, no. 1, pp. 1057–1067, 2011.
- [32] M. Abroshan, R. Hajiloo, E. Hashemi, and A. Khajepour, “Model predictive-based tractor-trailer stabilisation using differential braking with experimental verification,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 59, no. 8, pp. 1190–1213, 2021.
- [33] Z.-q. ZHAO, N. ZHANG, J.-h. WU, and G.-d. YIN, “Model predictive control of car-trailer combinations based on differential braking,” in *2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, vol. 5, pp. 2419–2424, IEEE, 2021.
- [34] G.-D. Yin, N. Chen, J.-X. Wang, and L.-Y. Wu, “A study on μ -synthesis control for four-wheel steering system to enhance vehicle lateral stability,” 2011.
- [35] H. Wang, Z. Zuo, Y. Wang, and H. Yang, “Composite nonlinear path-following control for unmanned ground vehicles with anti-windup eso,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021.

- [36] B. B. Jan and H. Tomáš, “Decoupling of vehicle lateral dynamics using four-wheel steering system,” in *2021 23rd International Conference on Process Control (PC)*, pp. 243–248, IEEE, 2021.
- [37] P. Hang and X. Chen, “Towards autonomous driving: Review and perspectives on configuration and control of four-wheel independent drive/steering electric vehicles,” in *Actuators*, vol. 10, p. 184, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.
- [38] X. Tan, D. Liu, and H. Xiong, “Optimal control method of path tracking for four-wheel steering vehicles,” in *Actuators*, vol. 11, p. 61, MDPI, 2022.
- [39] I. Kageyama and R. Nagai, “Stabilization of passenger car-caravan combination using four wheel steering control,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, no. 4-5, pp. 313–327, 1995.
- [40] X. Ding, Y. He, J. Ren, and T. Sun, “A comparative study of control algorithms for active trailer steering systems of articulated heavy vehicles,” in *2012 American Control Conference (ACC)*, pp. 3617–3622, IEEE, 2012.
- [41] Q. Wang, S. Zhu, and Y. He, “Model reference adaptive control for active trailer steering of articulated heavy vehicles,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2015.
- [42] M. Abroshan, M. Taiebat, A. Goodarzi, and A. Khajepour, “Automatic steering control in tractor semi-trailer vehicles for low-speed maneuverability enhancement,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of multi-body dynamics*, vol. 231, no. 1, pp. 83–102, 2017.
- [43] M. Keldani, K. Qureshi, Y. He, and R. Liscano, “Design and optimization of a robust active trailer steering system for car-trailer combinations,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2019.
- [44] D. Peng, K. Fang, J. Kuang, M. A. Hassan, and G. Tan, “Conflict and sensitivity analysis of articulated vehicle lateral stability based on single-track model,” *Shock and Vibration*, vol. 2021, 2021.

- [45] M. Bauer and M. Tomizuka, "Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems," *Vehicle System Dynamics*, vol. 25, no. 4, pp. 277–303, 1996.
- [46] F. Tahami, S. Farhangi, and R. Kazemi, "A fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 41, no. 3, pp. 203–221, 2004.
- [47] B. Boada, M. Boada, and V. Diaz, "Fuzzy-logic applied to yaw moment control for vehicle stability," *Vehicle System Dynamics*, vol. 43, no. 10, pp. 753–770, 2005.
- [48] M. Mirzaei and H. Mirzaeinejad, "Fuzzy scheduled optimal control of integrated vehicle braking and steering systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2369–2379, 2017.
- [49] A. Alfi and M. Farrokhi, "Hybrid state-feedback sliding-mode controller using fuzzy logic for four-wheel-steering vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, no. 3, pp. 265–284, 2009.
- [50] "Crawler İzz 458 - Çekme karavan." <https://www.almiracars.com/arac-filomuz>, 2022. (Erişim Tarihi:11.06.2022).
- [51] "Crawler batu 535 - Çekme karavan." <https://www.crawler.com.tr/urunler/crawler-offroad-cekme-karavan-modelleri/crawler-batu-535>, 2022. (Erişim Tarihi:11.06.2022).
- [52] Y. Zhang, A. Khajepour, E. Hashemi, Y. Qin, and Y. Huang, "Reconfigurable model predictive control for articulated vehicle stability with experimental validation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 308–317, 2020.
- [53] H. Liu, G. Lu, and Y. Zhong, "Robust lqr attitude control of a 3-dof laboratory helicopter for aggressive maneuvers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4627–4636, 2012.

- [54] S. K. Pandey and V. Laxmi, “Optimal control of twin rotor mimo system using lqr technique,” in *Computational Intelligence in Data Mining-Volume 1*, pp. 11–21, Springer, 2015.
- [55] A. Riofrio, S. Sanz, M. J. L. Boada, and B. L. Boada, “A lqr-based controller with estimation of road bank for improving vehicle lateral and rollover stability via active suspension,” *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2318, 2017.
- [56] C. Piao, X. Liu, and C. Lu, “Lateral control using parameter self-tuning lqr on autonomous vehicle,” in *2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*, pp. 913–917, IEEE, 2019.
- [57] T. Yang, Z. Bai, Z. Li, N. Feng, and L. Chen, “Intelligent vehicle lateral control method based on feedforward+ predictive lqr algorithm,” in *Actuators*, vol. 10, p. 228, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.
- [58] E. Kayacan, E. Kayacan, H. Ramon, O. Kaynak, and W. Saeys, “Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 287–298, 2014.
- [59] E. Kayacan and R. Maslim, “Type-2 fuzzy logic trajectory tracking control of quadrotor vtol aircraft with elliptic membership functions,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 339–348, 2016.
- [60] F. L. Silva, L. C. Silva, J. J. Eckert, R. Y. Yamashita, and M. A. Lourenço, “Parameter influence analysis in an optimized fuzzy stability control for a four-wheel independent-drive electric vehicle,” *Control Engineering Practice*, vol. 120, p. 105000, 2022.
- [61] F. L. Silva, L. C. Silva, J. J. Eckert, and M. A. Lourenço, “Robust fuzzy stability control optimization by multi-objective for modular vehicle,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 167, p. 104554, 2022.
- [62] M. A. Khan, S. Haroon, E. Ahmad, B. Hayat, and I. Youn, “Active slip control of a vehicle

- using fuzzy control and active suspension,” *Automatika*, vol. 62, no. 3-4, pp. 386–396, 2021.
- [63] L. A. Zadeh, “Information and control,” *Fuzzy sets*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [64] E. Kayacan, E. Kayacan, H. Ramon, and W. Saeys, “Adaptive neuro-fuzzy control of a spherical rolling robot using sliding-mode-control-theory-based online learning algorithm,” *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 43, no. 1, pp. 170–179, 2012.
- [65] E. Kayacan and O. Kaynak, “Sliding mode control theory-based algorithm for online learning in type-2 fuzzy neural networks: application to velocity control of an electro hydraulic servo system,” *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 26, no. 7, pp. 645–659, 2012.
- [66] M. A. Khanesar, M. A. Shoorehdeli, and M. Teshnehlab, “Hybrid training of recurrent fuzzy neural network model,” in *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2598–2603, IEEE, 2007.
- [67] M. A. Khanesar, E. Kayacan, M. Reyhanoglu, and O. Kaynak, “Feedback error learning control of magnetic satellites using type-2 fuzzy neural networks with elliptic membership functions,” *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 45, no. 4, pp. 858–868, 2015.
- [68] E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975.
- [69] M. Sugeno, *Industrial applications of fuzzy control*. Elsevier Science Inc., 1985.