



**İKİ AKSTAN YÖNLENDİRMELİ  
ELEKTRONİK DİFERANSİYEL SİSTEMİN  
BULANIK MANTIK İLE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe Nur ÖZTÜRK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2025

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İKİ AKSTAN YÖNLENDİRMELİ ELEKTRONİK**  
**DİFERANSİYEL SİSTEMİN BULANIK MANTIK İLE KONTROLÜ**

**Tuğçe Nur ÖZTÜRK**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Temmuz 2025**

## TEZ ONAY SAYFASI

Tuğçe Nur ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “Çok Akstan Yönlendirmeli Elektronik Diferansiyel Sistemin Bulanık Mantık İle Kontrolü” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 04/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Halit ARAT  
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi **İmza**

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL  
Giresun Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi **İmza**

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL  
Afyon Kocatepe Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi **İmza**

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Bekir YALÇIN  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

### Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**04 / 07 / 2025**

**İmza**

**Tuğçe Nur ÖZTÜRK**

**ÖZET**  
Yüksek lisans Tezi

**İKİ AKSTAN YÖNLENDİRMELİ ELEKTRONİK DİFERANSİYEL SİSTEMİNİN  
BULANIK MANTIK İLE KONTROLÜ**

Tuğçe Nur ÖZTÜRK  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
**Danışman:** Dr Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

Bu tezde, çok akstan yönlendirmeli elektrikli taşıtlarda kullanılan elektronik diferansiyel sistemlerinin kontrolü için klasik PID ve bulanık mantık tabanlı PID kontrol stratejileri incelenmiştir. Çalışmada, farklı aks konfigürasyonlarına sahip 4x4 ve 6x6 yapıda taşıt modelleri oluşturulmuş ve Ackermann direksiyon geometrisi esas alınarak tekerlek yönlendirmeleri hesaplanmıştır. Geliştirilen matematiksel modeller MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiş ve kontrolör performansları analiz edilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre, fuzzy PID kontrolcü, klasik PID kontrolcüye kıyasla yaklaşık %98.79 daha kısa yerleşme süresi, %57.3 oranında daha düşük maksimum aşım ve yaklaşık %39.37 oranında daha düşük Ortalama Mutlak Hata değeri ile daha iyi sistem kararlılığı sağlamıştır.

Bu kapsamda geliştirilen kontrol sistemi, yüksek manevra kabiliyeti gerektiren taktiksel insansız kara araçlarında kullanılmaya uygundur. Elde edilen bulgular, çok akstan yönlendirmeli EDS sistemlerinin kontrolünde bulanık mantığın önemli bir avantaj sunduğunu göstermekte ve bu alandaki literatüre katkı sağlamaktadır.

**2025, xii + 163 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Ackerman Geometrisi, Bulanık Mantık, Çok akstan yönlendirme, Elektronik Diferansiyel, MATLAB/Simulink, Taşıt dinamiği

**ABSTRACT**  
M.Sc. Thesis

**FUZZY PID CONTROL OF TWO AXLE  
ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM**

Tuğçe Nur ÖZTÜRK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechatronics Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Faruk Emre AYSAL

In this thesis, classical PID and fuzzy logic-based PID control strategies were investigated for the control of electronic differential systems used in multi-axle steered electric vehicles. Vehicle models with 4x4 and 6x6 configurations were developed, and wheel steering angles were calculated based on the Ackermann steering geometry. The developed mathematical models were simulated in the MATLAB/Simulink environment, and the performance of the controllers was analyzed.

According to the simulation results, the fuzzy PID controller achieved approximately 98.79% shorter settling time, 57.3% lower maximum overshoot, and about 39.37% lower Mean Absolute Error (MAE) compared to the classical PID controller, resulting in improved system stability.

In this context, the developed control system is suitable for tactical unmanned ground vehicles that require high maneuverability. The findings demonstrate that fuzzy logic offers a significant advantage in the control of multi-axle steered electronic differential systems, contributing to the existing literature in this field.

**2025, xiii + 163 pages**

**Keywords:** Ackermann Geometry, Electronic Differential, Fuzzy Logic, MATLAB/Simulink, Multi-Axle Steering, Vehicle Dynamics

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanma süreci boyunca göstermiş olduğu sabır, özveri ve yapıcı yaklaşımıyla her türlü soruma içtenlikle yanıt veren; akademik gelişimime olduğu kadar düşünsel ufkuğun genişlemesine de anlamlı katkılarda bulunan, rehberliği ve desteğiyle bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez sürecinde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak çalışmanın şekillenmesine katkı sağlayan Sayın Arş. Gör. İbrahim ÇELİK ve Sayın Arş. Gör. M.Mustafa KELEK hocalarıma da teşekkür ederim. Değerli katkıları ve kıymetli destekleri bu çalışmanın ilerlemesinde önemli rol oynamıştır.

Tüm eğitim ve çalışma hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda yanımda olan kıymetli aileme de en derin şükranlarımı sunarım.

Tuğçe Nur ÖZTÜRK

Afyonkarahisar 2025

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	9
2.1 İki Tekerlekten Tahrikli Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar.....	9
2.2 Dört Tekerlekten Tahrikli Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar .....	12
2.3 Dört Tekerlekten Tahrikli İki Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar.....	17
3. MATERYAL VE METOT .....	19
3.1 Elektrikli Taşıtlar .....	21
3.2 Elektronik Diferansiyel.....	27
3.2.1 Tek Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıtlar için EDS .....	29
3.2.2 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıtlar için EDS.....	36
3.2.2.1 Negatif Yönlendirme .....	37
3.2.2.2 Pozitif Yönlendirme.....	39
3.2.3 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Taşıtlar için EDS.....	43
3.3 EDS Modellerinde Kullanılan DC Motor Modeli .....	48
3.4 Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	49
3.4.1 PID Kontrol.....	50
3.4.2 Fuzzy PID (Bulanık PID) Kontrol .....	53
4. BULGULAR.....	63
4.1 Tek Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıtlar için Sonuçlar .....	63
4.2 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıtlar için Sonuçlar .....	75
4.3 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Taşıtlar için Sonuçlar .....	86

5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	101
6. KAYNAKLAR .....	104
7. ÖZGEÇMİŞ .....	119
8. EKLER .....	120



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

CO	Karbon Monoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
HC	Hidrokarbonlar
NO <sub>x</sub>	Azot Oksitler
SO <sub>x</sub>	Kükürt Oksitler

### Kısaltmalar

---

4WD	Dört Tekerlekten Çekiş
4WS	Dört Tekerlekten Direksiyon
AC	Alternatif Akım
BLDC	Fırçasız Doğru Akım Motorlar
BSC	Brake System Controller
CAN	Controller Area Network
CAN-Bus	Controller Area Network
DC	Doğru Akım
DSP	Dijital Sinyal İşleme
DTFC	Doğrudan Tork Kontrolü
DYC	Doğrudan Yaw Moment Kontrolü
ED	Elektrik Diferansiyeli
EDS	Elektronik Diferansiyel Sistemi
EV	Elektrikli Taşıt
FPGA	Alanda Programlanabilir Mantık Dizisi
HEVPT	High Efficiency Vehicle Powertrain
HV	Yüksek Gerilim Hattı
IM	Motor Sürücü
İKA	İnsansız Kara Aracı
İYM	İçten Yanmalı Motor
LFP	Lityum Demir Fosfat
LQI	Linear Quadratic Integrator
MPC	Model Predictive Control
NEDC	New European Driving Cycle
NEV'	Yeni Enerji Taşıtlar
PI	Oransal-İntegral
PID	Oransal-İntegral-Türevsel
PMSM	Kalıcı Miknatıslı Senkron Motor
PV panel	Fotovoltaik Panel
RBNN	Radyal Temelli Sinir Ağı
RWS	Tekerlek Dönüş Açısı

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 İçten Yanmalı Taşıtın Genel Yapısı .....	3
Şekil 1.2 Elektrikli taşıtın genel yapısı .....	4
Şekil 3.1 Yapılan Çalışmanın Akış Diyagramı .....	20
Şekil 3.2 Elektrikli Taşıt Tarihsel Gelişimi .....	22
Şekil 3.3 2025 Yılına Kadar Piyasaya Sürülen Bazı Elektrikli Taşıtlar .....	24
Şekil 3.4 Bir Elektrikli Taşıtın Güç Aktarımı ve Kontrol Mimarisi.....	26
Şekil 3.5 Mekanik Diferansiyel Sistemi ve Organları .....	28
Şekil 3.6 Arkadan yönlendirmeli Bir Taşıt.....	29
Şekil 3.7 İç ve Dış Tekerleklerin Açısal Hızını Kullanan Bir Önden Direksiyonlu Taşıtın Kinematik Durumu .....	31
Şekil 3.8 4x4 Tek Akstan Yönlendirilen Bir Taşıtın Matematiksel Modelleme MATLAB/Simulink Gösterimi .....	34
Şekil 3.9 4x4 Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink gösterimi .....	35
Şekil 3.10 İki Akstan Negatif Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıt.....	37
Şekil 3.11 İki Akstan Pozitif Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıt .....	39
Şekil 3.12 İki Akstan Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıtın Matematiksel Modelleme Simulink Gösterimi .....	42
Şekil 3.13 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Bir Taşıt.....	43
Şekil 3.14 6x6 İki Akstan Yönlendirmeli ED için Matematiksel Modelleme.....	48
Şekil 3.15 DC Motor Modellemesi.....	49
Şekil 3.16 Referans Alınan PID Kontrolör Sistem.....	51

Şekil 3.17 Simulink Üzerinde Modellenen PID Modellemesi .....	53
Şekil 3.18 Bulanık Mantık Kontrolü Temel Algoritması .....	55
Şekil 3.19 MATLAB/Simulink üzerinde Fuzzy PID Modellenmesi .....	57
Şekil 3.20 $K_p$ 'nin Üyelik Fonksiyonları .....	59
Şekil 3.21 $K_i$ 'nin Üyelik Fonksiyonları .....	61
Şekil 3.22 $K_d$ 'nin Üyelik Fonksiyonları .....	62
Şekil 4.1 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n1</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	64
Şekil 8.1 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Bir Elektrikli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink Gösterimi .....	120
Şekil 8.2 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Bir Elektrikli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink Gösterimi .....	121
Şekil 8.3 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n2</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	122
Şekil 8.4 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n3</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	123
Şekil 8.5 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n4</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	124
Şekil 8.6 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n1</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	125
Şekil 8.7 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n2</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	126
Şekil 8.8 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için $8^\circ$ Direksiyon Açısında <b>n3</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği .....	127

Şekil 8.9 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n4</b> Tekerleğinin Fuzzy PID Kontrol Grafiği.....	128
Şekil 8.10 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n1</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	129
Şekil 8.11 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n2</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	130
Şekil 8.12 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n3</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	131
Şekil 8.13 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n4</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	132
Şekil 8.14 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n5</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	133
Şekil 8.15 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında <b>n6</b> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği.....	134

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 4x4 Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıt için 30 km/h- 8° Direksiyon Açısında Yerleşme Süreleri (s) .....	68
Çizelge 4.2 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları .....	69
Çizelge 4.3 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları .....	71
Çizelge 4.4 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları .....	73
Çizelge 4.5 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları .....	73
Çizelge 4.6 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları .....	80
Çizelge 4.7 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları .....	81
Çizelge 4.8 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları .....	83
Çizelge 4.9 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları .....	84
Çizelge 4.10 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel Sonuçları .....	93
Çizelge 4.11 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan PID Kontrol Sonuçları.....	93
Çizelge 4.12 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrol Sonuçları .....	95

Çizelge 4.13 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel Sonuçları .....	97
Çizelge 4.14 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan PID Kontrolör Sonuçları .....	98
Çizelge 4.15 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları .....	98
Çizelge 8.1 4x4 Tek Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	135
Çizelge 8.2 4x4 Tek Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	136
Çizelge 8.3 4x4 Tek Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	137
Çizelge 8.4 4x4 Tek Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	138
Çizelge 8.5 4x4 Tek Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	139
Çizelge 8.6 4x4 Tek Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	140
Çizelge 8.7 4x4 Tek Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler ...	141
Çizelge 8.8 4x4 Tek Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler .....	142
Çizelge 8.9 4x4 İki Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	143
Çizelge 8.10 4x4 İki Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	144
Çizelge 8.11 4x4 İki Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	145
Çizelge 8.12 4x4 İki Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	146
Çizelge 8.13 4x4 İki Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	147
Çizelge 8.14 4x4 İki Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	148
Çizelge 8.15 4x4 İki Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler ...	149
Çizelge 8.16 4x4 İki Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler .....	150
Çizelge 8.17 6x6 İki Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	151

Çizelge 8.18 6x6 İki Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler .....	152
Çizelge 8.19 6x6 İki Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	154
Çizelge 8.20 6x6 İki Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler .....	155
Çizelge 8.21 6x6 İki Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	157
Çizelge 8.22 6x6 İki Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler .....	158
Çizelge 8.23 6x6 İki Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler ....	160
Çizelge 8.24 6x6 İki Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler .....	162



## 1. GİRİŞ

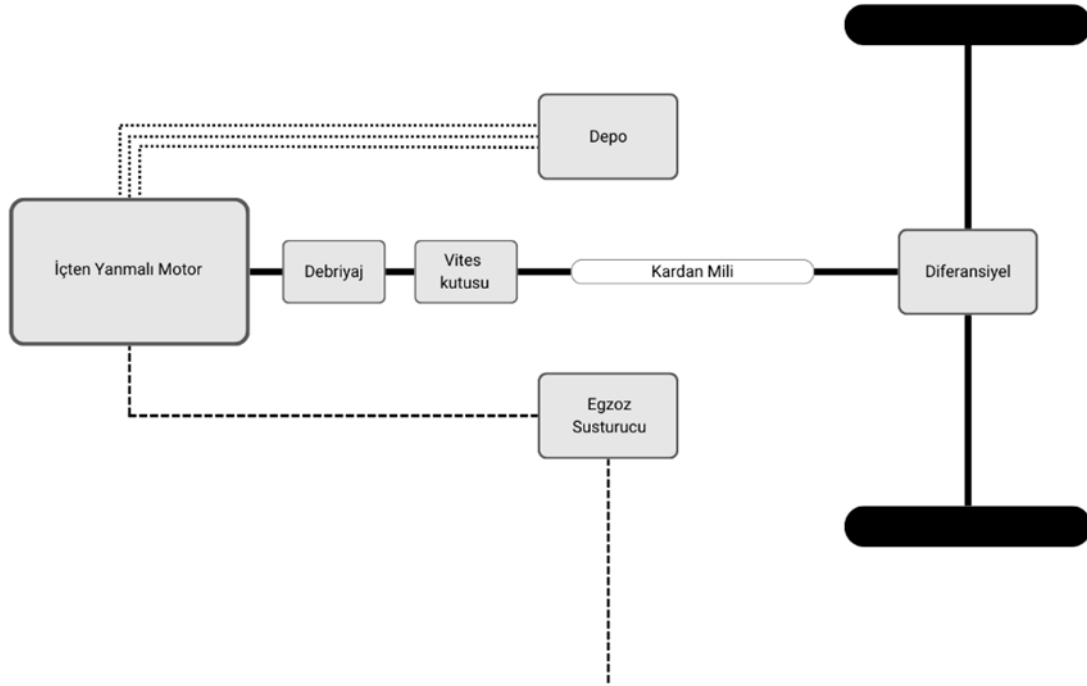
Globalleşen dünyada hızla artan nüfus ve sanayileşmenin etkisiyle enerji tüketimi büyük bir ölçüde artmıştır. Bu durum hem ekonomik maliyetleri artırmış hem de çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. Enerjiye olan talebin artması, ağırlıklı olarak fosil yakıtların kullanılmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtlarının kullanımıyla birlikte küresel ısınmayı tetikleyen sera gazı emisyonları ciddi şekilde yükselişe geçmektedir. Küresel ısınmanın etkileri, yalnızca iklim değişiklikleri ile sınırlı kalmamaktadır. Aynı zamanda doğal kaynakların tükenmesine, ekosistemlerin bozulmasına ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. (Kerem 2014, Aykaç C vd. 2021, Demir vd. 2018, Wei vd. 2020, Gökçe vd. 2010, Gürbüz vd. 2016, Yoong vd. 2010, Kaymaz 2018, Chang vd. 2018, Sayın 2011)

Şehir içi ulaşımda yoğun trafik, enerji tüketimini ve fosil yakıt kullanımını en üst seviyeye çıkarmaktadır. Bu durum, karbondioksit (CO<sub>2</sub>), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde gibi kirletici emisyonların atmosfere salınımını artırarak hava kalitesini düşürmekte ve çevresel tahribata yol açmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir bölümü, yaklaşık %70 oranında fosil yakıtlar (petrol, kömür gibi) kullanılarak karşılanırken, geri kalan %30'luk kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji gibi) elde edilmektedir. Fosil yakıtlar arasında, enerji üretiminde en yaygın kullanılan kaynak ise petrol ve türevleridir. Petrol ve türevlerinin kullanımına bağlı olarak enerji üretimi sırasında atmosfere salınan NO<sub>x</sub> CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> (kükürt oksitler), CO (karbon monoksit) ve HC (hidrokarbonlar) gibi zararlı emisyonlar, küresel ısınma, asit yağmurları ve hava kirliliği gibi ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. (Hubka 2019, Tören 2022, Xu vd. 2021, Mollahasanoğlu vd. 2021, Karabasoğlu 2021, Gökkozan 2020) Bu durum, yalnızca enerji üretim süreçlerini değil, aynı zamanda insan sağlığını, ekosistemleri ve genel olarak çevresel sürdürülebilirliği de olumsuz etkilemektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı yenilenebilir ve çevre dostu alternatif yakıtların geliştirilmesi ve enerji üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması, küresel enerji politikalarının ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu bağlamda, temiz enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmaz hale gelmiştir. Elektrikli taşıtlar, yenilenebilir enerjiyle desteklenen şarj altyapıları ve biyoyakıtlar gibi alternatif

enerji kaynakları, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve emisyonları minimize etmek için umut verici çözümler arasında yer almaktadır. Örneğin, hidrojen yakıt hücreleri, yalnızca su buharı salınımı yaparak hem çevre dostu hem de yüksek verimli bir enerji alternatifi sunmaktadır. Bunun yanı sıra güneş, rüzgar ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım sektöründe entegrasyonu, hem karbon ayak izinin azaltılmasına hem de enerji maliyetlerinin düşürülmesine olanak tanımaktadır. Enerji tüketimindeki artışı ve kirletici emisyonların çevresel etkilerini kontrol altına alabilmek için temiz kaynaklı yakıtlar ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri hayati bir öneme sahiptir. Bu dönüşüm, yalnızca çevrenin korunmasına katkı sağlamakla kalmayıp, uzun vadede ekonomik refah ve enerji güvenliği için de stratejik bir yatırım niteliği taşımaktadır. Buna ek olarak hibrit ve elektrikli taşıtların kullanılması da kirletici emisyonları ve fosil kaynaklı yakıtların kullanımını azaltacağı için taşıt teknolojisi alanındaki çalışmalar elektrikli taşıtlar üzerine daha çok yoğunlaşmaya başlamıştır (Seddiek ve Elgohary, 2014, İnce 2024, Abas vd. 2015, Çelik 2018, Erbaş 2013, Aykaç vd. 2021, Sazak 2019, Gürbüz vd. 2016). Bu nedenle Hibrit ve elektrikli taşıtların çevreye etkilerini incelemek için tasarlanmış bir sürüş döngüsü olan NEDC (New European Driving Cycle) ile farklı ortam koşullarına uyum sağlanmıştır. Taşıtlarda kullanılan hibrit ve elektrik motorları düşük üretim maliyetine sahiptir. Buna rağmen düzgün tork çıkışı sağlar. Bundan yola çıkarak özgün bir sargı yapısı oluşturulmuştur. Bu yaklaşımla senkron motorların elektrikli taşıt uygulamaları için tasarım ve modellemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar çoğunlukla MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve çeşitli taşıt modelleri oluşturulmuştur (Suvak 2016, Bayram 2019, Demir 2021, Awali 2021, Körpe 2022, Çelik 2019, Karabasoglu 2021, Wei vd. 2020, Muratoğlu vd. 2016, Hubka 2019, Yıldırım 2022, Muratoğlu vd. 2016, Kıyaklı 2018).

Geleneksel içten yanmalı bir taşıtın genel yapısı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Geleneksel içten yanmalı motorlara sahip taşıtların verimlerinin elektrik motoru tahrikli taşıtlara nazaran çok düşük olması ve ekonomik olmayışı sebebiyle günümüzde elektrikli taşıtlar her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Elektrikli taşıtlarda otomotiv üreticileri tarafından neredeyse bütün elektrik motoru tipleri denenmiştir ve denenmeye devam etmektedir. Bunların arasında asenkron motor, senkron relüktans motoru, anahtarlamalı relüktans motoru, fırçasız doğru akım motoru, sabit mıknatıslı senkron motor

bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan birçok çalışmada Fırçasız Doğru Akım Motorlar (BLDC) yaygın olarak ele alınmıştır (Demir vd. 2018, Kıyak vd. 2020, Muratoğlu vd. 2016, Schaltz 2011, Al-Fiky vd. 2019).



Şekil 1.1 İçten Yanmalı Taşıtın Genel Yapısı (Çelik 2019)

Elektrikli taşıtların çalışma prensibi, elektrik enerjisinin hareket enerjisine dönüştürülmesine dayanır. Bu taşıtların en temel bileşeni olan bataryalar, genellikle lityum-iyon teknolojisiyle üretilir ve elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolar. Sürüş sırasında, bataryalarda depolanan enerji elektrik motoruna iletilir. Elektrik motoru, bu enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek aracın tekerleklerini döndürür. Motor tipine bağlı olarak doğru akım (DC) ya da alternatif akım (AC) kullanılır. Elektrik motorunun performansı, taşıtta bulunan güç elektroniği ünitesi tarafından yönetilir. Bu ünite, motorun hızını ve torkunu düzenlerken enerji tüketimini optimize eder. Taşıtta yer alan kontrol sistemi, sürücünün gaz ve fren pedallarından gelen komutları ve çeşitli sensör verilerini işleyerek elektrik motorunu ve diğer sistemleri yönetir. Çoğu elektrikli taşıt, elektrik motorunun doğrudan tekerleklere bağlı olması sayesinde şanzıman sistemlerine ihtiyaç duymamaktadır. Ancak bazı modellerde hareketin optimize edilmesi için basit



tutuğu korunmakta ve sũrũđ gũvenliđi artırılmaktadır. Ancak bu sistemin dezavantajları arasında ekstra ağırlık, mekanik karmaşıklık ve sũrtũnme kayıpları yer almaktadır. Elektrikli taşıtlarda, bu ihtiyaç bũyũk Ȗlçũde ortadan kalkmakta çũnkũ her bir tekerlek bağımsız bir elektrik motoruyla tahrik edilmektedir. Bu tasarımı, mekanik diferansiyelin yerini alan ve yazılım tabanlı bir çȖzũm olan Elektronik Diferansiyel Sistemini (EDS) gerekli kılmaktadır.

EDS, her bir tekerleğin hızını ve torkunu bağımsız olarak kontrol ederek virajlarda tekerlekler arasında gereken hız farkını elektronik olarak sağlamaktadır. Bu sistem, çeşitli sensȖrler ve kontrol algoritmaları aracılığıyla çalışmaktadır. Ȗrneđin, taşıt dinamiği sensȖrleri (tekerlek hız sensȖrleri, dȖnme açısı sensȖrleri ve ivmeȖlçerler), gerçek zamanlı veri sağlayarak kontrol Ȗnitesine bilgi gȖndermektedir. Bu veriler, tekerlekler arasındaki hız farkını ve tork dağılımını optimize etmek için kullanılmaktadır. (Kerem 2014, Schaltz 2011, Kıyaklı 2018, Khan-Ngern vd. 2018, Hartini vd. 2009, Yin vd. 2017, Uysal vd. 2017, Daya vd. 2016, Tian vd. 2020).

EDS'nin bazı Ȗnemli avantajları şunlardır:

**Ağırlık ve Mekanik Basitlik:** Mekanik diferansiyelin olmadığı bir yapı, aracın toplam ağırlığını azaltmakta ve enerji verimliliğini arttırmaktadır.

**Enerji Verimliliği:** Elektrik motorlarının hassas kontrolũ sayesinde sũrtũnme kayıpları en aza indirilmektedir.

**Dinamik Performans:** EDS, her bir tekerlek Ȗzerindeki torku ayrı ayrı kontrol ederek çekiş gũcũnũ optimize etmektedir. Bu, Ȗzellikle kaygan zeminlerde veya yũksek performans gerektiren durumlarda avantaj sağlayabilir.

**Esneklik ve Uyarlanabilirlik:** Farklı yol ve hava koşullarına, farklı sũrũđ modlarına veya taşıt dinamiği ihtiyaçlarına uyum sağlamak için EDS yazılımını kolayca gũncellenebilmektedir. Ȗrneđin, elektrikli bir taşıt viraja yũksek hızda girdiğinde, EDS sistemi dış tekerleklere daha fazla tork uygularken i tekerleklerde torku azaltmakta ve stabilizeyi koruyarak hareketi koruyabilmektedir. Aynı zamanda viraj alma kabiliyetini

de arttırmaktadır. Ayrıca, tork vektörlere olarak bilinen bu kontrol stratejisi, aracın dönüş kabiliyetini arttırmakta ve sürüş keyfini iyileştirmektedir (Sharma vd. 2015, Khan-Ngern vd. 2018, Hartini vd. 2009, Karaşahin 2022). Bu durumda EDS, elektrikli taşıtların daha verimli, hafif ve performans odaklı olmasını sağlayan modern bir teknoloji olarak ifade edilebilmektedir. Bu sistemlerde iki adet elektrik motoruna mekanik diferansiyelin yaptığı iş yaptırılarak taşıtın stabil olarak yol alabilmesi sağlanmaktadır. (Cebeci 2020, Ozkop vd. 2015). Bununla birlikte elektrikli taşıtların tamamen elektrikle çalışır hale getirilmesi de stratejik bir amaç olarak öne çıkmaktadır (Uysal vd. 2017). Bu hedefe ulaşmak için, özellikle elektrikli taşıtların hareket kabiliyetini ve sürüş güvenliğini artırmayı amaçlayan elektronik diferansiyel sisteminin detaylı bir şekilde modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen araştırmalarda tekerlek içi BLDC'nin kullanıldığı taşıtlar için EDS kontrolü üzerine birçok farklı çalışma gerçekleştirilmiştir (Maozan vd. 2014, Yavuz vd. 2020, Wu vd. 2014, Draou vd. 2013, Sahoo 2016, Berbar vd. 2022, Gürmeriç 2015). Çalışmalarda doğrusal ve yanal taşıt dinamiğinden yararlanılarak elde edilen iki izli taşıt modeli yaygın olarak kullanılmıştır. Oluşturulan taşıt modelleri genellikle arka tekerleklere yerleştirilmiş elektrik motorları ile tahrik edilmektedir. Çoğunlukla simülasyonla kontrol sonucunda EDS yapısının ne şekilde davrandığı belirlenmektedir. Tekerleklere yerleştirilmiş BLDC'nin uygun sürücü ile denetlenerek sensörler yardımı ile kapalı çevrim sistemi oluşturulmuştur. Bu sayede elektrikli taşıtlar için daha güvenli bir sürüşe katkı sağlanmaktadır. (Alaca 2023, Kahveci 2013, Yıldırım 2016, Gürmeriç 2015, Eren 2019, Çelik 2019).

Taşıtlarda yönlendirme genellikle tek bir aks üzerinden gerçekleştirilmekte ve bu aks çoğunlukla ön aks olarak tercih edilmektedir. Ön aksın yönlendirme için seçilmesinin temel nedeni, taşıt dinamikleri açısından daha kolay kontrol edilebilir bir yapı sunmasıdır. Literatürde yapılan çalışmalar bu yaklaşıma paralel olarak, EDS ile yönlendirme kabiliyetinin artırılmasına odaklanmıştır. Çoğunlukla tek aks üzerinden yönlendirme yapılan çalışmalarda, özellikle ön aksın dinamik kontrolü üzerine çeşitli modelleme ve simülasyon analizleri yer almaktadır. Bu durum, sistemin mekanik karmaşıklığını azaltmaktadır. Aynı zamanda kontrol algoritmalarının optimize edilmesine olanak tanımaktadır. EDS'nin bu bağlamda yönlendirme sistemine entegrasyonu, yalnızca aracın stabilizesini ve manevra kabiliyetini artırmakla kalmamaktadır. Aynı zamanda enerji

verimliliği ve çekiş performansı açısından da önemli avantajlar sağlar. (A.Bahri vd. 2014, L. Zhai vd. 2011, Drau 2013, Sahoo 2016, Berbar vd. 2022, To vd. 2018, Çelik 2019, Maozen vd. 2016, Gürmeriç 2015, Yıldırım 2016).

Ağır taşıtlarda örneğin otobüs, tır vs. veya taktiksel savunma sanayii taşıtlarında birden fazla akstan yönlendirme manevra kabiliyetini arttırmak için kullanılmaktadır. Bu yönlendirme sistemleri mekanik olarak çalışmaktadır. Taşıtların çok akstan yönlendirilmesi ile birlikte yüksek manevra kabiliyeti meydana gelmektedir. Taşıtların dar alanlarda kolayca manevra yapma yeteneğini sağlamaktadır. Her bir aksın bağımsız kontrolü, aracın keskin dönüşler, yan kaydırma ve yanal hareket gibi karmaşık manevraları gerçekleştirebilmesini sağlamaktadır. (Burha 2010, Maozen ve Sabahi 2014, Zhai ve Dong 2011, Çelik 2019, Yıldırım 2015, Draou 2013, Hartani vd. 2009, Gair vd. 2004, Yıldırım 2020). Bununla birlikte çok akstan yönlendirme yapılan mekanik sistemler, standart yönlendirme mekanizmalarına göre daha karmaşık sistemlere sahiptir. Bu mekanizmaların tasarımı, üretimi ve bakımı daha fazla mühendislik becerisi ve kaynak gerektirebilir. (Burha 2010, Çelik 2019, Aykaç 2021, Yavuz ve Özek 2020). Bununla birlikte çok akstan yönlendirme sağlayan EDS modellerinin geliştirilmesi üzerine literatürdeki çalışmalar oldukça kısıtlıdır. (Burha 2010, Kahveci 2013, Tural 2014, Çelik 2019, Ordonez vd. 2018, Yıldırım 2015, Zhai ve Dong 2011). Özellikle askeri alanda kullanılan taktiksel İnsansız Kara Araçları (İKA) gibi taşıtlarda çok akstan yönlendirmeyi sağlayan EDS modellerinin geliştirilmesi önemli bir çalışma konusu olarak güncelliğini korumaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen bu çalışma, özellikle askeri alanlarda kullanılan taktiksel İKA gibi taşıtlar için önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasının temel hedefi birden fazla akstan yönlendirmeyi sağlayan EDS yapılarının matematiksel modelinin geliştirilmesi ve kontrol edilmesidir. Çalışma kapsamında geliştirilen EDS yapısının matematiksel modeli Ackerman Geometrisi prensiplerine dayalı olarak tasarlanmıştır. Elektrikli taşıtların yaygınlaşmasıyla birlikte, bu taşıtların farklı koşullarda ve kullanım senaryolarında etkili bir şekilde yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da ancak doğru ve detaylı matematiksel modellerin kullanılmasıyla mümkün olacaktır. Dolayısıyla MATLAB/Simulink ortamında kapsamlı bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon çalışmasında, elektrikli taşıtlar için EDS üzerine PID tabanlı bir kontrol stratejisi gerçekleştirilmiştir. PID tabanlı kontrol

stratejisi, çeşitli girdi parametrelerini hesaba katarak, en iyi çıkışı üretebilmektedir. MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilmiş olan bu simülasyon çalışması, farklı senaryolarda taşıtın davranışını öngörmek ve analiz etmek için bir platform sunmuştur. PID tabanlı kontrol stratejisinin etkinliği, belirlenen birden çok viraj ve manevra durumu için test edilerek değerlendirilmiştir.



## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 İki Tekerlekten Tahrikli Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar

Ordenez ve arkadaşları (2018) elektronik diferansiyel sistemi direksiyon açısı veya özel hız sensörlerini kullanmadan uygulayabilmiştir. Sistem, standart BLDC motorlarına, kontrolörlere ve bir Arduino platformuna dayanmış ve bu da çoklu tahrik tekerleklerine sahip hafif elektrikli taşıtlar için ideal olan hafif ve düşük maliyetli bir kurulumla sonuçlanmıştır. Kapsamlı bir değerlendirme için daha yüksek hızlarda ve tekerlek kayması koşullarında daha fazla test yapılması planlanarak bu testlerin yeni geliştirilen dört tekerlekli bir taşıtta yapılması önerilmiştir.

Emhemed ve arkadaşları (2012), DC motor hız kontrolü için bulanık-PI denetleyicisini tanıtarak MATLAB ile tasarlamıştır. Simülasyon sonuçları, bulanık-PI denetleyicisinin klasik PI denetleyicisine kıyasla daha iyi performans gösterdiğini; daha hızlı yanıt süresi, düşük aşım ve sıfır kararlı durum hatası sağladığını göstermiştir.

Gürmeriç (2015) çalışmasında, tamamen elektrikli taşıtlar için elektronik diferansiyel tasarımı ve kontrolü hedeflemiştir. Elektrikli taşıtlarda mekanik diferansiyel yerine tekerlek hızlarını dengelemek için elektronik diferansiyel sistemi kullanmıştır. Bu sistem, tekerlek hızlarını kontrol ederek aracı dönüş anında güvenli bir şekilde yönlendirmektedir. Çalışmada, Matlab/Simulink kullanılarak iki senaryo simüle edilmiştir: Birinci senaryoda elektronik diferansiyel kontrolü ile hız ve tork değişimleri incelenmiş, ikinci senaryoda ise motor, evirici ve bataryalar birlikte değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, elektronik diferansiyelin etkili bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

De Castro ve arkadaşları (2007), NEV'ler (Yeni Enerji Taşıtlar) için düşük maliyetli bir FPGA (Alanda Programlanabilir Mantık Dizisi) üzerinde çalışan yeni bir kontrol sistemi tanıtmaktadır. Elektronik diferansiyel, parametrik tanımlama ve AC motor kontrolü tek bir çipte entegre edilmiştir. Deneysel testler, sistemin doğruluğunu ve performansını doğrulamıştır. Elektronik diferansiyel farklı yük koşullarında test edilirken, parametrik tanımlama yüksek doğrulukla çevrimdışı uygulanabilmiştir.

Magallan ve arkadaşları (2008), mekanik diferansiyel kullanılmadan, her iki çekiş motorunun bağımsız kontrolünü mümkün kılan bir NEV tahrik sistemi sunmuştur. Uygulanan eşit tork diferansiyel kontrolü, aracın düz ve dönüş hareketlerinde tekerleklerde sürtünme ve şasi üzerinde aşırı zorlanma olmaksızın hareket etmesini sağlamaktadır. Tek bir DSP (Dijital Sinyal İşleme) kullanılarak, her iki motorun kontrol değişkenleri aynı hafızada toplanmış ve bu da aracın çekiş, enerji yönetimi gibi fonksiyonlarının genel kontrolünü kolaylaştırmıştır.

Haddoun ve arkadaşları (2010), elektrikli taşıtlar için bir elektrik diferansiyelinin tasarımı ve uygulanmasını ele almıştır. Sistem, hızlı prototipleme ortamı kullanılarak test edilmiş ve direksiyon ile kararlılık gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Tek bir çipte, hem elektrik diferansiyeli hem de indüksiyon motorlarının kontrolü entegre edilmiştir. Deneyleerde, iki 0.9 kW indüksiyon motoru ile sistemin başarıyla çalıştığı doğrulanmıştır.

Gair ve arkadaşları (2004), 4 anahtarlı 3 fazlı inverter için elektronik diferansiyel ve kayma modu denetleyicisinin tasarımını sunmuştur. İki bağımsız arka tekerlek motorunu kontrol eden sistem, testlerde başarılı sonuçlar vermiştir. Güç elektronik denetleyici, 8 anahtarlama cihazıyla sanal diferansiyel etkisini verimli bir şekilde gerçekleştirmiştir.

Hartani ve arkadaşları, iki elektronik diferansiyel ile kontrol edilen arka tekerlekten tahrikli elektrikli bir aracın simülasyonunu sunmaktadır. Taşıtta, kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) sürücüleri kullanılmıştır. Önerilen kontrol yapısı, elektronik diferansiyel üzerinden bağımsız motorların hız kontrolüne olanak tanır. PMSM için Doğrudan Tork Kontrolü (DTFC) stratejisi uygulanmış ve simülasyon sonuçları, hem sabit hem de dinamik koşullarda iyi performans elde edildiğini göstermiştir.

Koç (2023) çalışmasında, elektrikli otomobillerde iki elektrik motoruyla arka tekerleklerin savrulma dinamiğinin kontrolünü incelemiştir. Üst kontrolcü için D-stabil PI kontrolcü ve dayanıklı PI kontrolcü tasarımları yapılmış, alt kontrolcü ise motorlara

uygulanacak torku hesaplamıştır. Kontrol sistemi MATLAB/Simulink ortamında test edilmiş ve PID Tuner ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çelik (2019) çalışmasında, elektronik diferansiyel sisteminin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi ve bir elektrikli taşıt prototipi üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmasını gerçekleştirmiştir. Sistem, STM32F103 mikroişlemcisi kullanılarak kodlanmış ve tekerlek hızları Ackermann-Jeantand modeline dayalı olarak kontrol edilmiştir. Elektrikli aracın arka tekerleklerine doğrudan bağlanan doğru akım motorları ile aktarma organlarından kaynaklı kayıplar minimize edilmiştir. Farklı yol koşullarında yapılan testlerde, yüksek zemin sürtünme katsayısının motor akım kararlılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Suvak (2016) çalışmasında, güneş enerjisi destekli hibrit elektrikli bir taşıtın tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simulink kullanılarak oluşturulan modelde DC motor, İYM, batarya ve PV panel enerji kaynakları olarak kullanılmıştır. Güç ve tork değerleri farklı sürüş çevrimlerinde hesaplanmış, enerji tüketimi, fren esnasında harcanan enerji bataryaya geri dönüştürülerek rejeneratif enerji üretimi ve maliyet analizi yapılmıştır.

Draou çalışmasında (2013), iki kalıcı mıknatıslı tekerlek içi senkron motor tahrikli elektronik diferansiyel tarafından kontrol edilen bir elektrikli aracın uygulamasını sunmuştur. Simülasyonla elde edilen sonuçlar, bu yapının elektronik diferansiyelin gerçekleştirilmesine izin verdiğini ve iyi dinamik ve statik performanslar sağladığını göstermektedir. Elektronik diferansiyel, düz yollarda veya kavisli yollarda sürüş tekerleklerinin hızlarını yüksek doğrulukla kontrol etmektedir.

Yıldırım ve arkadaşları (2016), elektrikli taşıtların ön tekerlekleri için bir Elektronik Diferansiyel Sistemi (EDS) tasarlamıştır. Tekerlek hızları, direksiyon açısına göre Ackermann-Jeantand modelinden elde edilen denklemlerle hesaplanmış ve CAN-Bus (Controller Area Network) üzerinden IM (motor sürücülerine) aktarılmıştır. Simülasyonlar Matlab/Simulink ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle

karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Direksiyon açısının artmasıyla iç tekerlek hızının azalıp dış tekerlek hızının arttığı gözlemlenmiştir.

Ju-Sang ve arkadaşları (2000), elektrikli taşıtlarda bir elektrik diferansiyel sistemi oluşturmak için yapay sinir ağı modelinin kullanılabileceğini göstermektedir. taşıt virajlı bir yolda sürülerek direksiyon açısı ve tekerlek hızları ölçülmüş, bu verilerle yapay sinir ağı kullanılarak elektrik diferansiyeli tasarlanmıştır. Sonuçlar, modelin doğrusal olmayan karakteristiklere sahip olduğunu ve taşıt sürüş konforu ile güvenliğini artırabileceğini ortaya koymuştur.

Yıldırım (2015), çalışmasında ön tekerlekler için elektronik diferansiyel sistem tasarlanmış ve CoDeSys V2.3 yazılımında geliştirilmiştir. Ackermann-Jeantand modeliyle ön tekerlek hızları matematiksel olarak belirlenmiş, MATLAB/Simulink'te modellenerek test edilmiştir. Sistem, CAN-BUS protokolü üzerinden haberleşerek, direksiyon açısı ve hız bilgisine göre asenkron motor sürücülerini kontrol etmiştir. Direksiyon açılarına bağlı olarak motor hızları deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış, gelecekte güvenlik ve konfor için sensör ve kamera verilerinin de entegre edilebileceği önerilmiştir.

## **2.2 Dört Tekerlekten Tahrikli Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar**

Zhou ve arkadaşları yaptığı çalışmada (2010), dört tekerlek içi motorlu elektrikli taşıtlarda, geleneksel (elektronik diferansiyel sistemlere) EDS'lere kıyasla mekanik yapılar azaltılarak aracın kütlesi önemli ölçüde düşürülmüş ve motor verimliliği artırılmıştır. Tasarlanan denetleyici, dört motoru aynı anda kontrol ederek motor hızlarının tutarlı olmasını ve aracın sürekli kararlı çalışmasını sağlamıştır. Simülasyonlar, önerilen kontrol stratejisinin her tekerleğin hızını düzenleyerek EDS kontrolünü etkili bir şekilde sağladığını doğrulamıştır.

Moazen ve arkadaşları yaptığı çalışmada (2014), dört bağımsız tahrik motoruna sahip elektrikli bir taşıt için bir elektrik diferansiyeli (ED) önerilmiştir. Önerilen ED'nin simülasyonu yapılmış, sistemin bozuk yol koşullarda ve düz ile eğri yol takibi sırasında

çalışması incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, ED'nin hem güvenilirliği hem de iyi yol takibini sağladığını göstermektedir.

Yavuz ve arkadaşları yaptığı çalışmada (2020), elektrikli taşıtlarda elektronik diferansiyelin avantajları incelenmiş ve Matlab/Simulink ile bir taşıt modeli oluşturulmuştur. Farklı viraj çapları ve sürtünme katsayılarına göre maksimum taşıt hızları belirlenmiş, sürtünme arttıkça tahrik tekerlekleri arasındaki hız farkının arttığı tespit edilmiştir. Ackerman geometrisi kullanılarak viraj performansı analiz edilmiştir.

Wu ve arkadaşları çalışmalarında (2014), dört tekerlekten bağımsız sürüşe sahip elektrikli taşıtlar için diferansiyel direksiyon kontrol stratejisi önermektedir. Strateji, tekerlek içi motorların hızlı hız kontrol yeteneğinden yararlanarak her tekerleği referans hıza göre ayarlamaktadır. Ackermann-Jeantand direksiyon modeliyle entegre edilen kinematik model sayesinde lastik aşınması azaltılırken taşıt dengesi iyileştirilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlarla stratejinin etkinliği kanıtlanmıştır.

Zhai ve arkadaşı çalışmasında (2011), dört tekerlekten bağımsız motor tahrikli bir aracın direksiyon dinamiklerini iyileştirmek için yapay sinir ağı tabanlı PID kontrol ve elektronik diferansiyel hız-tork stratejisi geliştirilmiştir. taşıtta kullanılan dört tekerlek motorunun torkları bu strateji ile koordineli şekilde dağıtılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol yönteminin aracın direksiyon özelliklerini iyileştirdiğini ve sistemin doğrusal olmayan yapısına rağmen uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Motor ve motor kontrol sistemlerinin yüksek performansa sahip olması, aracın direksiyon yetenekleri üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmıştır.

Draou (2013) yaptığı çalışmada, dört tekerlek içi kalıcı mıknatıslı senkron motora sahip bir elektrikli taşıt için bir elektrikli tahrik sistemi (EDS) tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirmiştir. Literatürde genellikle yalnızca bir çift tekerlek için EDS çalışmaları bulunurken, bu çalışmada tüm tekerlekler için bir tasarım yapılmıştır. Codesys yazılımında Ackermann-Jeantand geometrisine dayalı olarak dört tekerleğin hızları hesaplanmış, CAN-Bus protokolü ile hızlı ve güvenilir haberleşme sağlanmıştır. MATLAB/Simulink kullanılarak elektrikli taşıtın dinamik modeli oluşturulmuş ve

simülasyon sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sistem, eğimli yollarda stabilite ve güvenlik sağlamış, tork ve güç dört tekerleğe eşit dağıtılmıştır.

Sahoo çalışmasında (2016), dört tekerlekten çekiş (4WD) ve dört tekerlekten direksiyon (4WS) özelliklerine sahip bir elektrikli taşıt için Elektronik Diferansiyel (ED) tasarlanmış ve performansını doğrulamıştır. MATLAB/Simulink tabanlı çevrimdışı simülasyon ve TMS320F2812 DSP kiti ile çevrimiçi simülasyonlar yapılmıştır. ED, referans sinyali etkili bir şekilde üretmiş ve bu sinyal, CAN tabanlı ağ iletişim sistemi aracılığıyla çekiş motorlarına başarıyla iletilmiştir. Her iki simülasyon sonucu da uyumlu olup, sistemin tasarımı başarılı bulunmuştur.

Berbar ve arkadaşları çalışmasında (2022), dört bağımsız tekerlek direksiyonuna sahip bir aracın simülasyonu için kullanılabilir bir MATLAB/Simulink sistem modeli önermektedir. Bu model, bir kontrolör geliştirmek ve kontrolörün işlevselliğini doğrulamak için kullanılmaktadır. Dört tekerlek direksiyonunun uygulanmasıyla elde edilen en büyük avantaj, aracın çok daha dar bir alanda dönebilmesidir. Bu, şehir içi ulaşım ve hareketlilikte büyük bir talep olup, aynı zamanda daha verimli dönüş yetenekleri ve şerit değiştirme kolaylığı sağlamaktadır.

To ve arkadaşları araştırmasında (2018), otonom taşıtlar için Autodriver algoritmasının uygulanması ele alınmıştır. Teori başlangıçta dört tekerlekten direksiyonlu taşıtlar için geliştirilmiş olsa da, bu çalışmada ön tekerlekten direksiyonlu taşıtlar üzerinde uygulanmıştır. Taşıt verilen bir yolu takip etmek için, aracın dönüş merkezi yol eğriliği merkezi ile örtüştürülerek ayarlanmıştır. Aracın dinamik davranışı sonucu oluşan yan kayma, taşıtın yönünü verilen direksiyon açısı ve hıza göre beklenen yoldan sapmıştır. Taşıttaki dinamik etkilerden kaynaklanan hatalar belirlenmiş ve bu hataların giderilmesi için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir.

Fu çalışmasında (2014), elektrikli taşıtlar için bağımsız sürüş motorlarına sahip Doğrudan Yaw Moment Kontrolü (DYC) sistemleri ele almış ve yaw hızı ile yan kaymayı temel alan üç farklı DYC kontrol yöntemi geliştirmiştir. taşıt dinamikleri ve denklemlerine dayanarak, her iki değişkenin etkilerini kontrol eden DYC sistemleri modellenmiş ve

simülasyonlar ile test edilmiştir. taşıt dinamik denklemlerinden yola çıkarak yaw hızı temelli bir DYC sistemi tasarlanmış ve aracın istenen yaw hızını başarılı bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir. Yan kaymayı en aza indirmeyi amaçlayan bir DYC sistemi önerilmiş ve simülasyonlarda aracın yan kaymasının minimuma indirildiği görülmüştür. Hem yaw hızı hem de yan kaymayı aynı anda kontrol eden entegre bir kayma modu kontrolü geliştirilmiştir. Bu entegre sistem, iki değişkenin de sifıra yakınsamasını sağlayarak taşıt yol tutuşunu ve stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır. Yapılan çalışmalar, önerilen DYC sistemlerinin çeşitli sürüş koşullarında aracın manevra kabiliyeti ve güvenliğini büyük ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Marzbani ve arkadaşları (2019), otonom taşıtlarda Autodriver algoritmasının yol eğrilik merkezini izleyerek aracın dinamik dönüş merkezini optimize etmesi üzerine odaklanılmıştır. taşıt hareket halindeyken yol eğrilik merkezi ile dinamik dönüş merkezini örtüştürmek için direksiyon açısına ve çekiş kuvvetine düzeltmeler uygulanmıştır. Başlangıçta dört tekerlekten direksiyonlu sistemler için tasarlanan bu algoritma, ön tekerlekten direksiyonlu taşıtlara da uyarlanmıştır. Yan kayma gibi dinamik etkiler nedeniyle oluşan sapmalar, “Kararlı-Durum Dinamik Direksiyon” yöntemi ile minimum hata ile hesaplanmıştır. Bu yöntem, aracın dinamik tepkisini diferansiyel denklemleri çözmeye gerek kalmadan kabul edilebilir bir mühendislik doğruluğunda hesaplamayı sağlar. Çeşitli senaryolarda test edilen bu yöntemin hata oranları çok düşük çıkmış olup, önerilen geri besleme kontrol sistemi bu küçük sapmaları da azaltabilmektedir.

Jain ve arkadaşı çalışmasında (2009), elektrikli taşıtlar için tekerlek içi motor doğrudan tahrik sistemleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu yapı, gelecekteki tam elektrikli, plug-in hibrit elektrikli (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle) ve yakıt hücreli elektrikli taşıtlar için en umut verici topoloji olarak öne çıkmaktadır. Çeşitli motor tipleri değerlendirilmiş ve eksenel akı kalıcı mıknatıslı motorların bu tür doğrudan tahrik motorları için en uygun çözüm olduğu görülmüştür. Düşük anahtar sayısına sahip, maliyet etkin yenilikçi inverterler tartışılmıştır. Son olarak, iki ve dört tekerlek tahrikli taşıtlar için elektrik diferansiyel kontrol stratejileri değerlendirilmiştir. Anti-lock Braking System (ABS - Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemi) ve Electronic Stability Program

(ESP- Elektronik Stabilite Programı) gibi tekerlek içi tahriklerin en faydalı özelliklerini içeren genel bir kontrol yapısı sunulmuştur.

He çalışmasında (2022), sanal bir taşıtta aktif Tekerlek Dönüş Açısı (RWS) kontrol algoritması geliştirmeyi hedeflemiştir. Araştırma, RWS sistemlerinin otomotiv endüstrisindeki artan popülaritesine dayanarak, farklı kontrol yöntemlerini incelemiş ve MATLAB/Simulink ortamında uygulanmıştır. Öncelikle, doğrusal bir tek izli taşıt modeli oluşturulmuş ve bu model, belirli bir altviraj davranışını temsil eden bir referans model ile ilişkilendirilmiştir. İstenilen yaw hızı, taşıtın uzunlamasına hızı ve direksiyon açısı ile hesaplanmıştır. Hata sinyali, üç farklı kontrolör (Proportional-Integral (PI), Linear Quadratic Integrator (LQI) ve Model Predictive Control (MPC)) tarafından işlenmiş ve her biri, hata sinyaline dayanarak aktif RWS açısı üretmiştir. Simülasyon sonuçları, ramp steer, step steer ve sine sweep steer gibi standart manevralar üzerinde değerlendirilmiş, her kontrolörün taşıt dinamiklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Önerilen kontrolörler, RWS sisteminin etkinliğini artırarak güvenlik ve sürüş dinamikleri açısından olumlu etkiler sağlamıştır. PI kontrolörünün, basitliği ve tatmin edici performansı ile en iyi sonuçları sunduğu belirtilmiştir.

Nok çalışmasında (2020), otonom taşıt kontrolü için geliştirilmiş bir autodriller algoritmasının uygulamasını ele almıştır. Algoritma, taşıt konumunu istenen yolda ayarlamak için besleme ileri-besleme geri kontrol yöntemini kullanmaktadır. Dikey yan tepki, direksiyon performansını artırmak için kullanılırken, geçici hatalar geri besleme kontrolü ile ortadan kaldırılmıştır. Uzunlamasına hata, Ghost-Car konsepti ile belirlenmiş ve taşıt hızı geri besleme kontrolü ile ayarlanmıştır. Algoritmanın, sekiz şekilde ve şerit değiştirme manevraları gibi farklı sürüş koşullarında iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Simülasyonlar, taşıt rol modelini de içerecek şekilde yapılmış ve bu sayede hem yol takibi hem de yolcu konforu açısından algoritmanın verimliliği kanıtlanmıştır. taşıt, rol oranını minimize ederek yolcu konforunu sağlamak amacıyla kontrol edilmiştir.

Yıldırım ve arkadaşları çalışmasında (2016), elektrikli bir aracın (EV) ön tekerlekleri için EDS (Elektronik Diferansiyel Sistemi) modelleme ve tahmin parametreleri gerçekleştirilmiştir. Ackermann-Jeantand modelinden elde edilen matematiksel

denklemler kullanılarak, CoDeSys yazılımı ile direksiyon açısı ve taşıt hızına göre dört tekerleğin hızları hesaplanmıştır. Matlab/Simulink ile EDS modellemesi yapılmış, direksiyon açısı  $1^\circ$  ile  $15^\circ$ , taşıt hızı ise 0 km/h ile 50 km/h arasında değiştirilerek tekerlek hızları Simulink ile hesaplanmıştır. Direksiyon açısı ve taşıt hızına farklı seviyelerde beyaz gürültü eklenmiş ve hız tahmini için RBNN (Radyal Temelli Sinir Ağı) kullanılmıştır. RBNN sonuçları, Simulink, deneysel ve CoDeSys sonuçları ile doğrulanmış ve farklı seviyelerdeki gürültüye karşı dayanıklılığı test edilmiştir. Sonuç olarak, RBNN'in EDS parametrelerinin tahmininde düşük hata oranı ve sensör gürültüsüne karşı yüksek dayanıklılık sağladığı gösterilmiştir.

### **2.3 Dört Tekerlekten Tahrikli İki Akstan Yönlendirmeli Taşıtlar**

Moazen ve arkadaşları (2016) yaptığı çalışmada, dört bağımsız motorla çalışan elektrikli taşıtlar için bir elektronik diferansiyel (ED) sistemi önermiştir. ED, aracın hem ön hem de arka tekerleklerine güç vererek, iki tekerlekten çekiş sistemine göre daha yüksek sürüş performansı sunar. Geliştirilmiş Kurgusal Ana Tekniği ile tekerleklerin senkronizasyonu sağlanırken, Ackerman prensibi koşullar değiştikçe kendi performansını optimize ederek en iyi performans için tekerlek hızı hesaplamasında kullanılmıştır. MATLAB/Simulink simülasyonları, sistemin güvenilir ve etkili yol takibi sağladığını göstermektedir.

Literatür taraması kapsamında incelenen çalışmalar göstermektedir ki, elektrikli taşıtların hareket kabiliyetini ve sürüş güvenliğini artırmaya yönelik kontrol sistemleri üzerine yapılan araştırmalara yoğunlaşmış olsa da özellikle iki akstan yönlendirmeli ve taktiksel insansız kara taşıtları gibi özel kullanım senaryolarına yönelik çalışmalar sınırlıdır. Elektrikli taşıtlar için kullanılan elektronik diferansiyel sistemlerinin modellenmesi ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda genellikle tek akstan yönlendirmeli veya basit senaryolar ele alınmıştır. Mevcut literatürde, iki akstan yönlendirmeli elektrikli taşıtların karmaşık yol koşullarında etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayacak bulanık mantık tabanlı adaptif kontrol sistemleri üzerine yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu tezde geliştirilen matematiksel model, Ackerman Geometrisi prensiplerine dayalı olarak tasarlanmıştır. Elektrikli taşıtların yaygınlaşmasıyla birlikte, bu taşıtların farklı yol koşullarında, hava koşullarında ve

kullanım senaryolarında etkili bir şekilde yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da ancak doğru ve detaylı matematiksel modellerin kullanılmasıyla mümkün olacaktır. MATLAB/Simulink ortamında kapsamlı bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon çalışması, taşıtların elektronik diferansiyel sistemi üzerinde bulanık mantık tabanlı bir kontrol stratejisi ile yönetilmektedir. Bu yaklaşım, günümüzün karmaşık sürüş koşullarında en uygun performansı elde etmek için uygun bir kontrol mekanizması sunmaktadır. Bulanık mantık tabanlı kontrol stratejisi, çeşitli girdi parametrelerini (örneğin hız, yol durumu, yüzey koşulları) ve bu parametrelerin arasındaki belirsiz ilişkileri hesaba katarak, en iyi çıkışı üretebilmektedir. MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilen bu simülasyon çalışması, farklı senaryolarda taşıtın davranışını öngörmek ve analiz etmek için bir platform sunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmanın akış diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Problem tanımı ve literatür taraması aşamada, elektrikli taşıtlarda yönlendirme ve diferansiyel ihtiyacının neden ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, geleneksel diferansiyel sistemlerin sınırlılıkları ve EDS’nin bu alanda sunduğu çözümler literatür taramalarıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca iki akstan yönlendirme sistemlerinin manevra kabiliyeti gibi avantajları ve sistem karmaşıklığı gibi zorlukları irdelenmiştir.

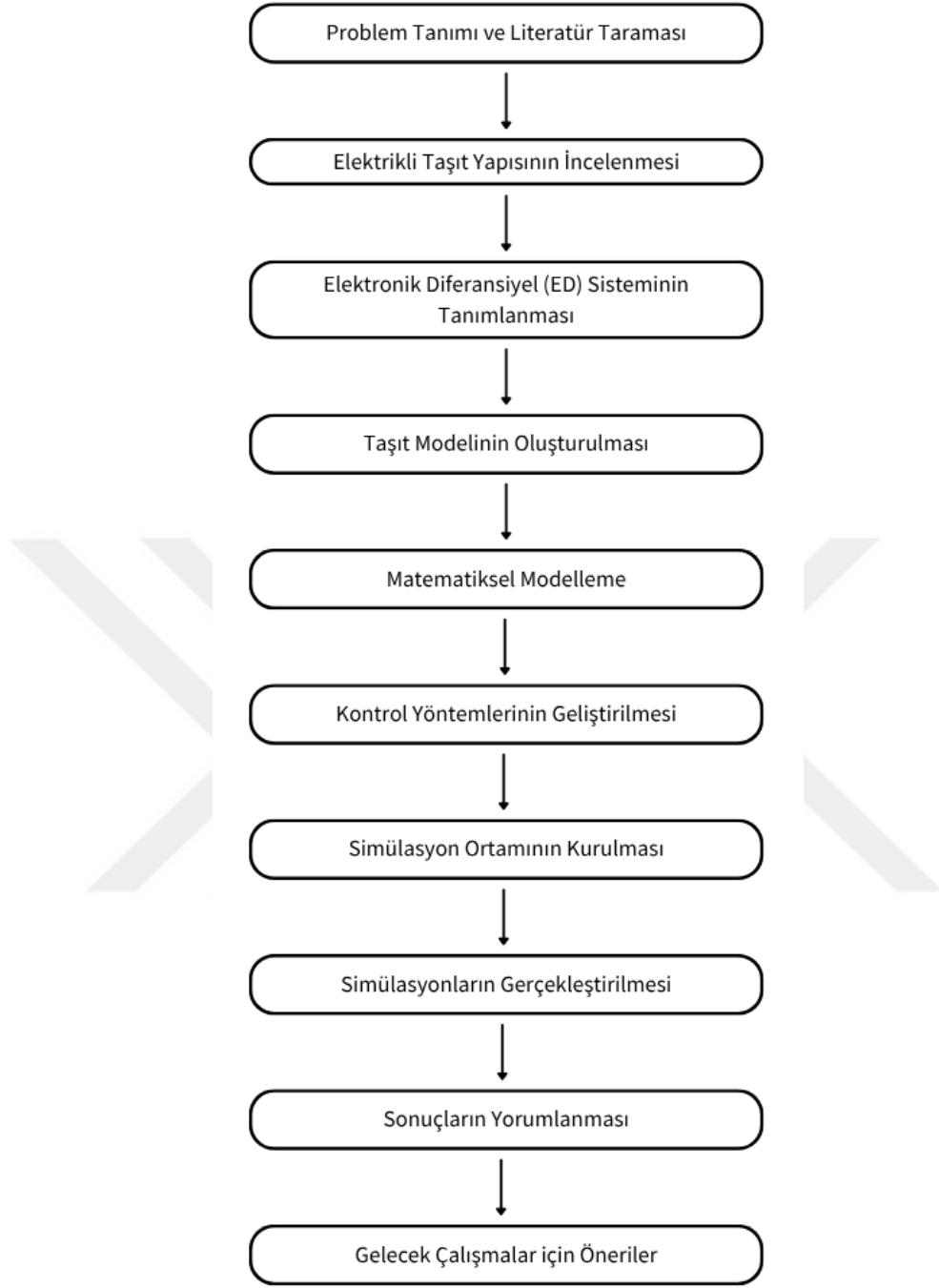
Elektrikli taşıt yapısının incelenmesi kısmında, elektrikli taşıt teknolojilerinin tarihsel gelişimi sunulmuş ve taşıtların genel yapısı detaylı şekilde analiz edilmiştir. Özellikle elektrik motorları, batarya sistemleri ve kontrol altyapısı gibi temel bileşenler incelenmiş, mevcut elektrikli taşıt mimarisi tanıtılmıştır.

EDS Tanımlanması kısmında, geleneksel mekanik diferansiyel sistemleri ile karşılaştırıldığında elektronik diferansiyelin sunduğu avantajlar vurgulanmıştır. Çalışmada özellikle tekerlek içi BLDC motorlar tercih edilmiş ve bu sistemlerin EDS ile nasıl entegre edildiği açıklanmıştır.

Taşıtların modeli oluşturulurken Ackermann geometrisi esas alınmıştır. İlk olarak iki izli, tek akstan yönlendirmeli taşıtların modellenmesi yapılmış, ardından çift akstan yönlendirmeli ve 6x6 yapıdaki negatif yönlendirme stratejileri değerlendirilmiştir.

Taşıtların hız, yön ve dönüş dinamiklerini temsil eden matematiksel denklemler geliştirilmiştir. Özellikle viraj içi ve dışı tekerleklerin farklı hızlarda dönmesi gerekliliği göz önünde bulundurularak, her bir tekerlek için ayrı ayrı tork ve hız hesaplamaları yapılmıştır. Bu sayede taşıtların dönüşlerde stabil kalması hedeflenmiştir.

Taşıtların sisteminin yönetimi için iki farklı kontrol yaklaşımı değerlendirilmiştir: PID kontrolü ve önerilen Bulanık PID kontrolü. Her iki yöntem belirli senaryolarda test edilerek performans analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde, sistem yanıt süresi, kararlılık ve sapma gibi kriterler dikkate alınmıştır.



**Şekil 3.1** Yapılan Çalışmanın Akış Diyagramı

MATLAB/Simulink platformunda, taşıtın tüm dinamiklerini içeren bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde her bir motorun bağımsız kontrol edildiği bir yapı kurulmuş ve sistemin farklı yol ve hız koşullarında nasıl tepki vereceği üzerine senaryolar oluşturulmuştur.

Simülasyonlar gerçekleştirilirken, hazırlanan senaryolar doğrultusunda, taşıtın davranışları çeşitli direksiyon açıları ve hızlarla test edilmiştir. Her tekerleğin ayrı ayrı kontrol grafiklerine yer verilmiştir. Ayrıca, PID ve Bulanık kontrol yaklaşımlarının sonuçları da sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

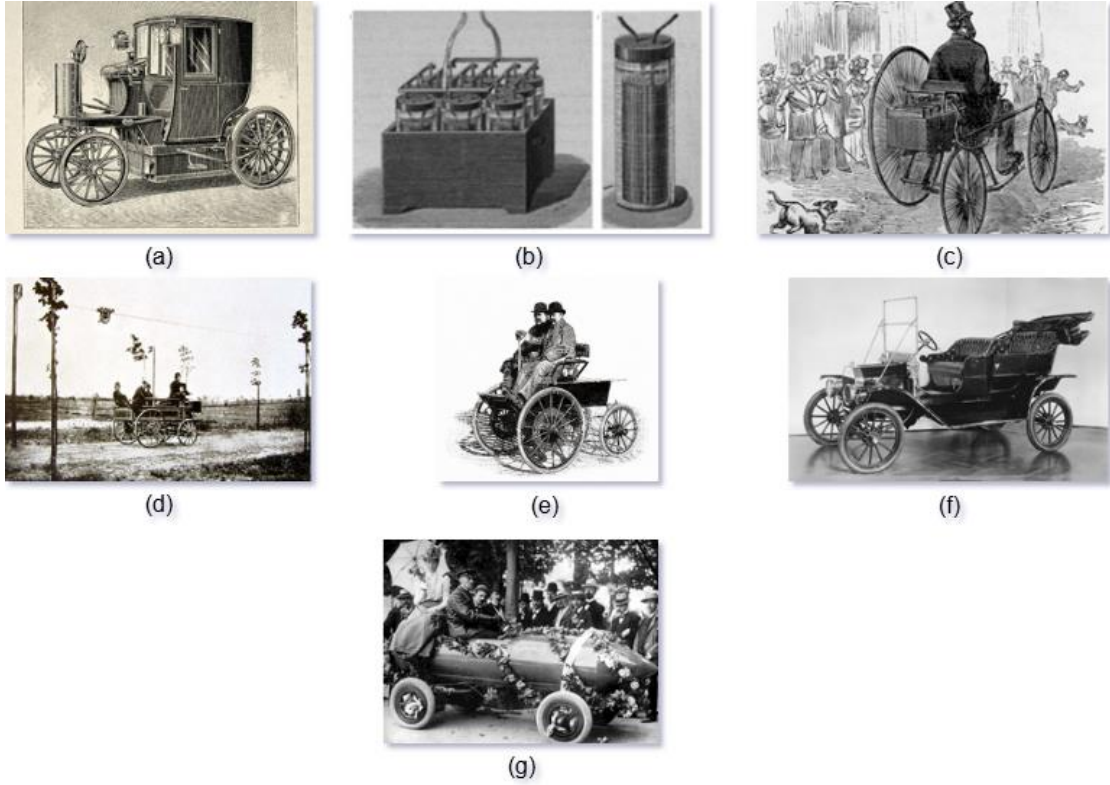
Simülasyon sonuçları analiz edilerek, önerilen sistemin taşıtın stabilitesi, çevikliği ve enerji verimliliğine olan katkısı ortaya konmuştur. Özellikle iki akstan yönlendirmenin dar alanlardaki manevra kabiliyeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bulanık mantığın klasik yöntemlere göre daha uyarlanabilir olduğu gösterilmiştir.

Son bölümde, çalışmanın gelecekteki gerçek zamanlı uygulamalara nasıl aktarılacağı üzerine öneriler sunulmuştur. Sensör füzyonu, yapay zekâ destekli kontrol, savunma sanayii uygulamaları gibi alanlara yönelik genişletilmiş modellerle sistemin daha ileri seviyelere taşınabileceği vurgulanmıştır.

### **3.1 Elektrikli Taşıtlar**

Elektrikli taşıtların tarihi gelişimi, 19. yüzyılın ortalarından itibaren önemli bilimsel ve teknolojik adımlarla şekillenmiştir. Şekil 3.2(a)'da gösterilen ilk elektrikli araç, 1835 yılında Hollandalı Profesör Strating tarafından üretilmiştir (İnt.Kyn.22). Bu gelişmeyi Şekil 3.2(b)'de gösterilen, 1860 yılında Fransız bilim insanı Gaston Planté'nin tekrar şarj edilebilen kurşun-asit akü sisteminin temellerini atması izlemiştir (Kurzweil 2010). Şekil 3.2(c)'de gösterilen 1881 yılında ise Fransız elektrik mühendisi Gustave Trouvé, ilk modern elektrikli taşıtı geliştirerek bu alandaki ilerlemeyi hızlandırmıştır (İnt.Kyn.24). Şekil 3.2(d)'de gösterilen 1882'de Berlin'de Ernst Werner von Siemens'in ürettiği "Elektromote" isimli araç, elektrikli ulaşımın şehir içi toplu taşımaya uygulanabilirliğini göstermesi açısından önemli bir adımdır (İnt.Kyn.23). Şekil 3.2(e)'de gösterilen 1895 yılında Morris ve Salom'un geliştirdiği ilk Electrobat, elektrikli taşıtların daha güçlü ve kullanışlı hale gelmesinin önünü açmıştır (İnt.Kyn.25). 1897'de Londra Elektrikli Taksi Şirketi tarafından üretilen Şekil 3.2(f)'de gösterilen elektrikli taksiler, elektrikli araçların ticari amaçlarla da kullanılabilirliğini göstermiştir (İnt.Kyn.26). 1899 yılında Belçika'da üretilen Şekil 3.2(g)'de gösterilen "La Jamais Contente" adlı taşıtın 100 km/s hıza

ulaşması, elektrikli taşıtların performans açısından da ne kadar güçlü olabileceğini kanıtlamıştır (İnt.Kyn.27). Bu gelişmeler, elektrikli taşıtların bugün ulaştığı seviyenin temelini oluşturan önemli kilometre taşlarıdır.



**Şekil 3.2** Elektrikli Taşıt Tarihsel Gelişimi

2000'li yılların sonlarına doğru, artan çevresel farkındalık ve enerji verimliliği ihtiyacı, hibrit ve tamamen elektrikli taşıtların geliştirilmesine yönelik çalışmalarını hızlandırmıştır. Bu süreçte, Kaliforniya merkezli Tesla Motors, 2004 yılında Tesla Roadster modelinin geliştirilmesine başlamış ve bu model 2008 yılında piyasaya sürülerek modern elektrikli taşıtların öncüsü olmuştur. (İnt.Kyn.1, İnt.Kyn.2)

Elektrikli taşıtlar küresel pazarda hızla yaygınlaşmaya devam ederken, 2010 yılında Mitsubishi MiEV modeli Nisan ayında satışa sunulmuş; Nissan Leaf ise aynı yılın Aralık ayında Japonya ve Amerika başta olmak üzere çeşitli ülkelerde kullanıcılarla buluşmuştur. Bu modeller, çevre dostu ve enerji verimli ulaşım çözümleri sunarak elektrikli taşıtların yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır. (Yılmaz & Gürel 2021)

2012 yılına gelindiğinde ise elektrikli taşıt pazarında büyük bir çeşitlilik ortaya çıkmıştır. REVAi, Citroën C1 EV, Transit Connect Electric, Mercedes-Benz Vito E-Cell, Tazzari Zero, Smart ED, Wheego Whip LiFe, Mia Electric, BYD e6, Ford Focus Electric, BMW ActiveE, Coda, Renault Fluence Z.E., Tesla Model S ve Honda Fit EV gibi birçok model dünya genelinde satışa sunulmuştur. Bu dönemdeki gelişmeler, elektrikli taşıtların otomotiv sektöründe kalıcı bir yer edinmesinde önemli bir dönüm noktası olmuştur. (Yılmaz & Gürel 2021, İnt.Kyn.3)

2015 sonrası dönemde Tesla, Model X (2015) ve daha sonra Model 3 (2017) ile elektrikli taşıtların hem lüks segmentte hem de geniş kitlelere ulaşabilen ekonomik sınıflarda yaygınlaşmasını sağlamıştır. Aynı dönemde Nissan Leaf'in yeni nesilleri, Chevrolet Bolt EV, Hyundai Ioniq Electric, Kia Soul EV, Jaguar I-Pace ve Audi e-tron gibi modeller pazarda yerini almıştır. Avrupa Birliği'nin 2035 yılına kadar içten yanmalı motorlu araç satışlarını sonlandırma kararı da bu dönüşüm sürecini hızlandırmıştır. (İnt.Kyn.4)

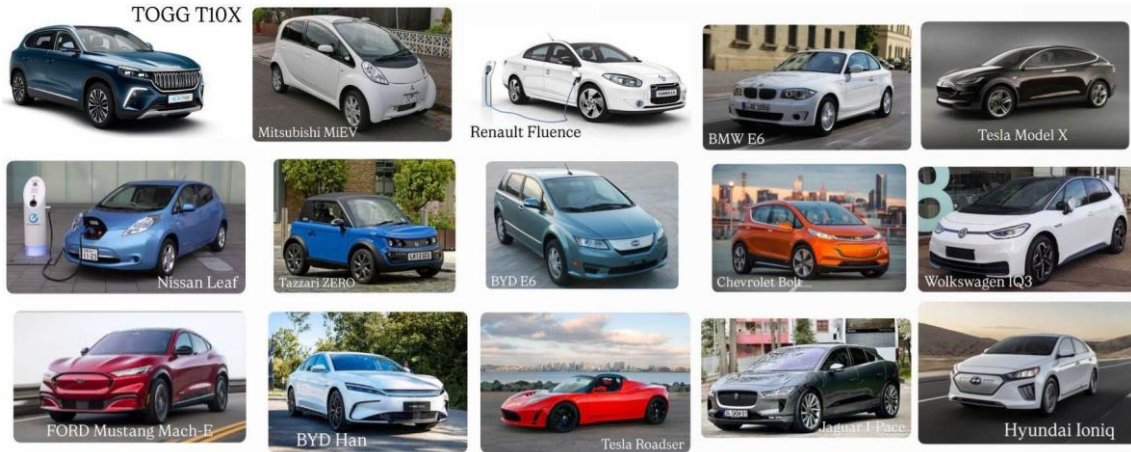
2020 sonrası dönemde elektrikli taşıt teknolojilerinde batarya kapasitesi, menzil, şarj süresi ve altyapı alanlarında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Tesla'nın Cybertruck modeli, Rivian'ın R1T ve R1S modelleri, Lucid Air, Ford Mustang Mach-E, Volkswagen ID.3 ve ID.4, Mercedes EQ serisi, BMW iX ve i4 gibi araçlar piyasaya sürülerek elektrikli taşıtların her sınıfta kullanıcıya ulaşmasını sağlamıştır. (İnt.Kyn.5)

2023 itibarıyla Çinli üreticiler (BYD, NIO, XPeng ve Li Auto gibi) dünya pazarında ciddi bir pay elde etmiş; özellikle BYD, hem iç pazarda hem de Avrupa ve Güney Amerika'da satışlarını büyük ölçüde artırmıştır. Aynı dönemde Türkiye'nin yerli ve milli elektrikli otomobili TOGG, 2022 sonunda tanıtılmış ve 2023 yılında satışa sunulmuş önemli bir yerli girişim olarak dikkat çekmiştir. (İnt.Kyn.6, İnt.Kyn.7, İnt.Kyn.8, İnt.Kyn.9, İnt.Kyn.10)

2024 ve 2025 yıllarında ise LFP (Lityum Demir Fosfat) batarya teknolojisinin yaygınlaşması, katı hal (solid-state) bataryalar üzerine Ar-Ge faaliyetlerinin hızlanması, hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaşması ve enerji yönetim sistemlerinin gelişmesi sayesinde elektrikli taşıtlar artık günlük ulaşımın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Ayrıca otonom sürüş sistemleri ve yapay zeka destekli sürücü asistanları da elektrikli araçlarda standart haline gelmeye başlamıştır. (İnt.Kyn.11, İnt.Kyn.12, İnt.Kyn.13, İnt.Kyn.14, İnt.Kyn.15, İnt.Kyn.16, İnt.Kyn.17, İnt.Kyn.18, İnt.Kyn.19, İnt.Kyn.20)

2025 yılına kadar piyasaya sürülen bazı elektrikli taşıtlar Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Son yıllarda ulaşım sektörünün hızla büyümesi, beraberinde ciddi çevresel sorunları ve fosil yakıtların hızla tükenme riskini getirmiştir. Artan taşıt kullanımı, hava ve çevre kirliliğini daha da artırarak küresel ölçekte iklim değişikliğini tetiklemiştir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek ve zararlı emisyonları azaltmak amacıyla elektrikli taşıtlar (EV’ler) giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Elektrikli taşıtların popülerliğini artıran bir diğer önemli faktör ise sürücü destek teknolojilerindeki ve batarya sistemlerindeki hızlı ilerlemelerdir. Bu teknolojik yenilikler, sadece çevre dostu bir ulaşım seçeneği sunmakla kalmayıp, aynı zamanda güvenli sürüş olanakları sağlayarak kullanıcıların elektrikli otomobillere olan ilgisini büyük ölçüde artırmıştır. Ayrıca, enerji depolama sistemlerinin gelişmesi ve şarj altyapısının yaygınlaşması, bu taşıtların hem bireysel kullanıcılar hem de toplu taşıma sistemleri için tercih edilmesini destekleyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır. (Uğur 2011, Güner 2013)



Şekil 3.3 2025 Yılına Kadar Piyasaya Sürülen Bazı Elektrikli Taşıtlar

Elektrikli taşıtlar, aslında uzun yıllardır ulaşım sektörünün bir parçası olarak gündemde yer almaktadır. Ancak geçmişte, bu taşıtların yaygınlaşmasının önünde önemli teknik ve altyapı engelleri bulunmaktaydı. Öncelikle, şarj edilebilmeleri için gerekli olan altyapının yeterince gelişmemiş olması, kullanıcıların özellikle uzun mesafeli yolculuklarda

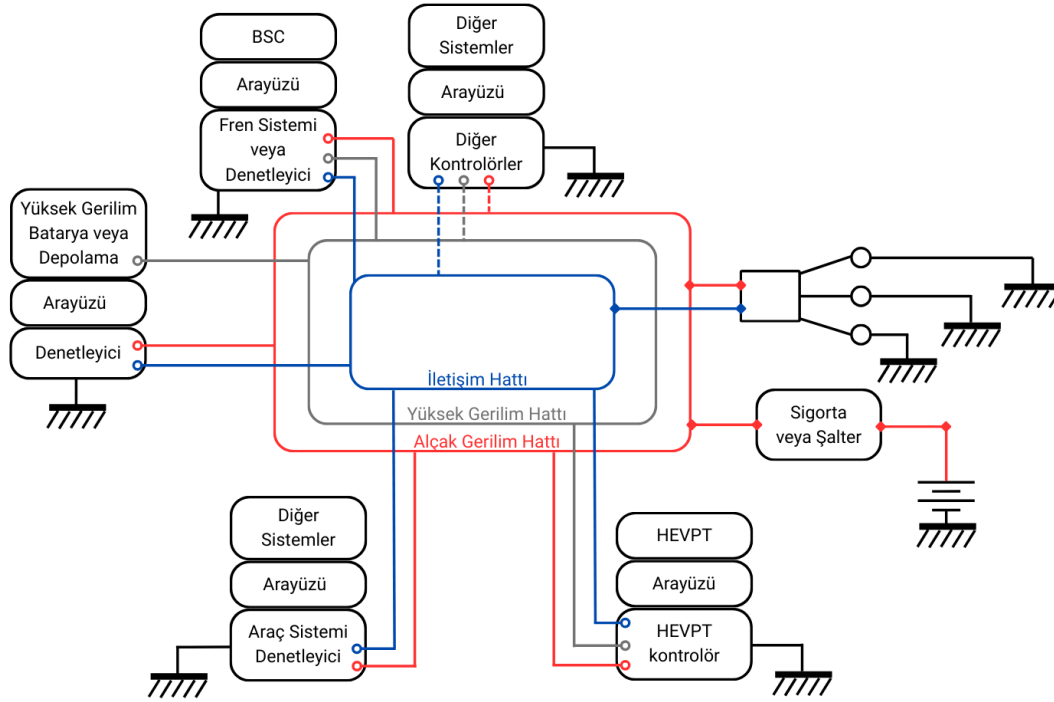
elektrikli taşıtları tercih edememesine neden olmaktadır. Ancak, son yıllarda şarj altyapısının hızla geliştirilmesi ve batarya teknolojilerindeki büyük ilerlemeler, bu sorunların önemli ölçüde aşılmasını sağlamış ve elektrikli taşıtların daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak tanımıştır. (Mökükçü 2014)

Bir elektrikli aracın güç aktarımı ve kontrol mimarisi Şekil 3.4'de detaylı biçimde gösterilmiştir. Elektrikli araçlarda enerji, temel olarak yüksek gerilimli batarya sisteminden sağlanmaktadır. Bu batarya, aracın hareketini sağlayan elektrik motorlarına ve aynı zamanda diğer yardımcı sistemlere gerekli olan enerjiyi temin etmektedir. Sistemin kalbinde yer alan yüksek gerilim bataryası veya enerji depolama ünitesi, bir sigorta veya şalter aracılığıyla sistemin geri kalanına bağlanmaktadır. Bu güvenlik elemanları, sistemin aşırı akım veya kısa devre durumlarında zarar görmesini engellemektedir. Batarya çıkışları hem yüksek gerilim hattına (HV) hem de alçak gerilim hattına (LV) bağlanarak sistemin çift seviyeli enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. (Dikmen 2022, Turğut 2018, Baygüneş 2019, Acar 2013, Elmalı vd. 2021, Kök 2020)

Yüksek gerilim hattı, özellikle elektrik motorlarının sürülmesini sağlayan HEVPT (High Efficiency Vehicle Powertrain-Yüksek Verimli Araç Güç Aktarma Sistemi) modülüne enerji sağlamaktadır. Bu modül, içerisinde bir kontrolör ve arayüz birimi barındırmakta olup, elektrik motorunun tork ve hız kontrolünü gerçekleştiren birimi olarak tanımlanmaktadır. HEVPT kontrolörü, bataryadan aldığı enerjiyi uygun dalga formlarına dönüştürerek motorun ihtiyacına uygun hale getirmekte ve elektrikli sürüşün verimli ve kararlı bir şekilde sağlanmasını mümkün kılmaktadır. HEVPT ile birlikte çalışan araç sistemi denetleyici, aracın genel çalışma parametrelerini kontrol etmektedir. Diğer denetleyicilerle sürekli haberleşerek sistemin bütünlüğünü sağlamaktadır. (Turğut 2018, Rigan 2020, Acar 2013, Yazıcı 2015, Karadağ & Dikmen 2021, Çolak & Demirbaş 2018)

Bir diğer önemli bileşen olan BSC (Brake System Controller – Fren Sistemi Denetleyici), özellikle rejeneratif frenleme sırasında önemli bir rol üstlenmektedir. Rejeneratif frenleme esnasında elektrik motoru jeneratör gibi davranarak tekerleklerin dönme enerjisini geri kazanmaktadır. Bunu elektrik enerjisine çevirerek bataryaya geri

iletmektedir. Bu süreç, hem enerji verimliliğini arttırmakta, hem de batarya ömrünü desteklemektedir. Fren sistemi denetleyicisi aynı zamanda mekanik fren sistemleriyle de koordineli çalışarak güvenli bir frenleme deneyimi sunmaktadır. (Dikmen 2022, Turğut 2018, Baygüneş 2019, Bayram 2016, Yıldırım 2014)



**Şekil 3.4** Bir Elektrikli Taşıtın Güç Aktarımı ve Kontrol Mimarisi (Yıldırım 2015)

Şekil 3.4’de yer alan iletişim hattı, tüm denetleyicilerin birbiriyle haberleşmesini sağlamaktadır. Bu hat üzerinden sensör verileri, sürücü talepleri, batarya durumu, motor sıcaklığı, frenleme komutları gibi birçok veri, merkezi kontrol sistemine iletilmektedir ve buradan gerekli işlemler yapılmaktadır. Bu iletişim genellikle CAN (Controller Area Network- Kontrolör Alan Ağı) protokolü gibi otomotiv standartlarına uygun haberleşme protokolleri ile gerçekleştirilmektedir. (Yılmaz & Gürel 2021, Demir 2021, Karakaya 2020, Çelik 2019, Arslan 2017, Kaya 2016, Aydın 2014, Şahin 2012)

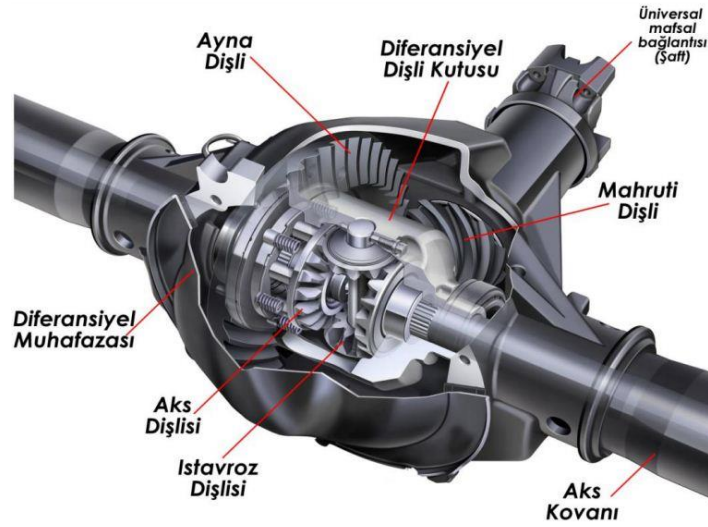
Alçak gerilim hattı (mavi hat) ise araçta yer alan yardımcı sistemleri (aydınlatma, bilgi-eğlence sistemleri, klima, cam açma sistemleri vb.) beslemektedir. Bu sistemler doğrudan

batarya ile çalışmayıp, genellikle bir dönüştürücü aracılığıyla yüksek gerilimden düşük gerilime indirilen enerji ile çalıştırılmaktadır. Bu süreçte arayüzler ve diğer kontrolörler, bu sistemlerin yönetiminde rol almaktadır. (Öztürk 2018, Yıldırım 2015, Doğan 2013)

Sistemin bu şekilde modüler ve entegre tasarlanması, elektrikli araçların daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır. Batarya yönetimi, motor kontrolü, frenleme sistemleri ve yardımcı ekipmanların birbiriyle uyumlu çalışması, elektrikli araç teknolojisinin temel faktörleri arasında yer almaktadır.

### **3.2 Elektronik Diferansiyel**

Şekil 3.5’de mekanik diferansiyel sistemi ve organları gösterilmektedir. Mekanik diferansiyel, içyapısında bulunan dişli mekanizması sayesinde, motor torkunu tahrik tekerleklerine ileterek aracın hareketini sağlayan bir mekanizmadır. Tekerleklerin farklı hızlarda dönmesine imkân tanıyan önemli bir güç aktarma organı olarak tanınmaktadır. Özellikle viraj alma esnasında, aracın iç tarafındaki tekerlek daha kısa bir mesafe kat ederken, dıştaki tekerlek daha uzun bir mesafe kat etmek zorundadır. Diferansiyel, bu hız farkını dengeleyerek aracın stabilitesini korur ve direksiyon tepkilerini iyileştirmektedir. Mekanik diferansiyel sisteminin kullanım koşullarına göre çeşitleri vardır. Açık diferansiyeller, düşük maliyetleri ve basit yapıları nedeniyle standart yol araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra sınırlı kaymalı diferansiyeller ve kilitli diferansiyeller, çekişin artırılması gereken performans veya arazi koşullarına uygun araçlarda tercih edilmektedir. Ayrıca, tork vektörlemeli diferansiyeller gibi ileri seviye sistemlerde kullanılmaktadır. Her tekerleğe iletilen torku aktif olarak yöneterek yüksek performanslı araçlarda dinamik yol tutuşu sağlamaktadır. Diferansiyelin optimum şekilde çalışması, aracın çekiş gücünü artırarak kayma veya patinajı önlemekte, sürüş güvenliğini ve araç dinamiklerini iyileştirmektedir.(Yılmaz 2014, Kaya 2013, Demir 2015, Öztürk 2016, Çelik 2017, Arslan 2018, Yıldırım & Özcan 2019, Kara & Demirtaş 2020, Şahin & Yılmaz 2021, Doğan & Aksoy 2022, Kurt & Aydın 2023, Eren & Polat 2024)



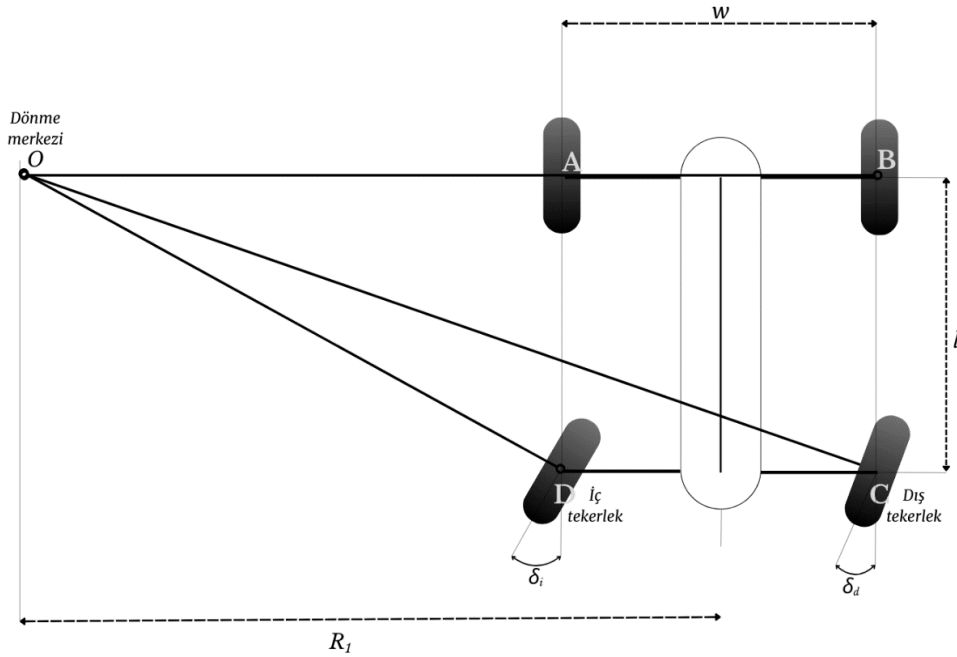
Şekil 3.5 Mekanik Diferansiyel Sistemi ve Organları

Değişen ve gelişen teknoloji ile birlikte yaşam koşulları da ele alındığında elektrikli taşıtlar için tasarlanan elektronik diferansiyele ihtiyaç duyulmaktadır. Elektronik diferansiyele duyulan ihtiyaç, geleneksel mekanik diferansiyellerin bazı performans ve verimlilik sınırlamalarından kaynaklanmaktadır. Geleneksel diferansiyeller, torku pasif bir şekilde tekerlekler arasında dağıtmaktadır. Özellikle kaygan zeminlerde veya yüksek hızlarda yeterli çekiş ve kontrol sağlayamamaktadır. İhtiyacın en fazla gözlemlendiği yüksek performanslı, elektrikli ve otonom araçlarda, her bir tekerleğe iletilen torkun hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Mekanik diferansiyeller, enerji kayıplarına ve ağırlık artışına neden olurken, elektronik diferansiyel bu kayıpları minimize ederek daha verimli bir güç aktarımı sunmaktadır. Ayrıca, diferansiyel kilitlenmesi gereken durumlarda mekanik sistemlerde sürtünme tabanlı çözümler kullanılırken, elektronik diferansiyel bu işlemi çok daha hızlı ve akıllı bir şekilde yönetebilmektedir. Bu sayede, virajlarda üstün yol tutuşu, optimize edilmiş çekiş kontrolü ve gelişmiş manevra kabiliyeti sağlamaktadır. Sürüş güvenliği ve dinamiğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Elektrikli araçlarda tahrik motorlarının her bir tekerleğe bağımsız tork uygulayabilmesi, mekanik diferansiyel ihtiyacını ortadan kaldırırken, elektronik diferansiyelin daha hassas ve etkili bir çözüm sunmasını sağlamaktadır. Bu nedenlerle, modern araç teknolojilerinde elektronik diferansiyel kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. (Yıldırım 2019, Çelik 2019, Kahveci 2013, Gökçe 2015, Kartal 2018, Boyalı 2008, Hartanı 2009, Topaç 2010, Gürkan & Korkut 2022, Özkop vd. 2008, Kumaş 2011, Akbıyık 2018)

### 3.2.1 Tek Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıt için EDS

Tek akstan ve arkadan yönlendirmeli bir taşıt Şekil 3.6’de gösterilmiştir. Tekerleklerin yönlendirme eksenleri arasında bulunan mesafe, iz genişliği olarak adlandırılmakta ve  $w$  ile ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra, ön ve arka akslar arasındaki mesafe dingil mesafesi olarak tanımlanmakta ve  $l$  harfi ile gösterilmektedir. Söz konusu iz genişliği ( $w$ ) ve dingil mesafesi ( $l$ ), aracın kinematik boyutlarının belirlenmesinde temel parametreler olarak kabul edilmektedir.

Arkadan dönüş sistemi, özellikle forklift gibi düşük hızlı araçlarda yüksek manevra kabiliyeti sağlamak amacıyla kullanılan bir yönlendirme çeşidi olarak tanınmaktadır. Bu sistem, aracın arka tekerleklerini yönlendirerek dar alanlara daha keskin dönüşlerin gerçekleştirilmesini mümkün hale getirmektedir. Ancak, arkadan yönlendirme yüksek hızlarda olumsuz etki yaparak istikrarsızlığa neden olabilmektedir. Genellikle şehir içi veya genel kullanıma yönelik binek araçlarda tercih edilmemektedir. Arkadan dönen bir aracın dönüş merkezi, yönlendirme geometrisinin bir sonucu olarak her zaman ön aks üzerinde bir konumda bulunmaktadır.



Şekil 3.6 Arkadan yönlendirmeli Bir Taşıt

Arka akstan yönlendirilen bir taşıtın kinematik direksiyon koşulu ön akstan yönlendirilen bir taşıtın direksiyon koşulu ile aynı kalmaktadır;

$$\cot \delta_d - \cot \delta_i = \frac{\omega}{l} \quad (3.1)$$

İç ve dış tekerleklerin açısal hızını kullanan bir önden direksiyonlu taşıtın kinematik durumu Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Ön akstan yönlendirilebilir tekerlekleri olan arkadan çekişli bir araçta, tahrik tekerleklerinin kaymasız dönüş yaptığı ve ön ve arka takımlarının eşit olduğu varsayıldığında, iç ( $\omega_i$ ) ve dış ( $\omega_d$ ) tahrik tekerleklerinin açısal hızlarıyla orantılı olarak, ön tekerleklerin kinematik direksiyon açıları Denklem 3.1 gibi hesaplanabilmektedir. Bu açı, aracın dönüş yaptığı virajdaki dönüş yarıçapı ile ilişkilidir. Tahrik tekerleklerinin hız farkı, aracın merkezinden uzaklık arttıkça ön tekerleklerin yönlendirme açılarını daha büyük olmaktadır. Bu kinematik ilişki, aracın yönlendirme sistemlerinin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu da dönüş hareketlerinin doğruluğunu belirlemektedir. İç ve dış açıları Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'deki gibi hesaplanmaktadır.

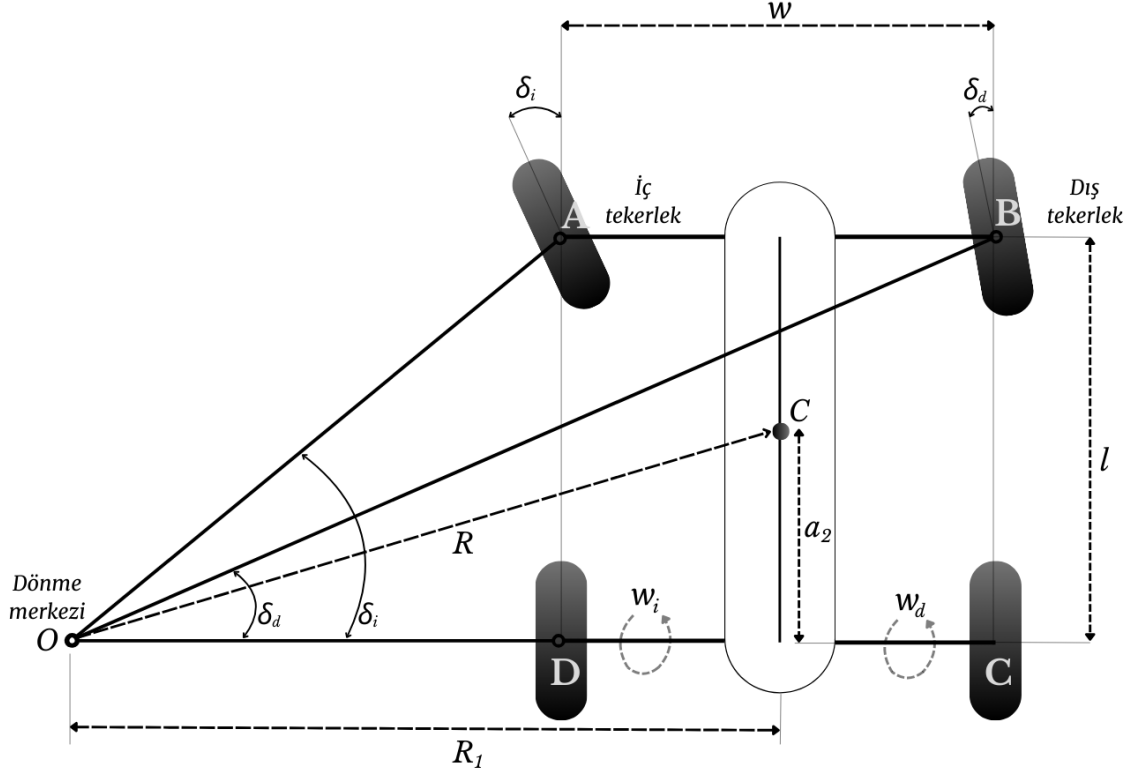
$$\delta_i = \tan^{-1} \left( \frac{l}{\omega} \left( \frac{\omega_d}{\omega_i} - 1 \right) \right) \quad (3.2)$$

$$\delta_d = \tan^{-1} \left( \frac{l}{\omega} \left( 1 - \frac{\omega_i}{\omega_d} \right) \right) \quad (3.3)$$

Ön akstan direksiyonlu bir taşıtın kinematik durumu, iç ve dış tekerleklerin açısal hızları dikkate alınarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu kinematik durum, direksiyon hareketine bağlı olarak tekerleklerin izlediği kavisli yolları ve dönüş sırasında her bir tekerleğin farklı hızlarla döndüğünü ortaya koymaktadır.

$R_\omega$  arka tekerleklerin yarıçapı olarak tanımlanmaktadır. Tahrik tekerleklerinin kaymasının ön taraftadır. Şekil 3.4'e göre Denklem 3.4 oluşturulur.

$$\frac{R_\omega \omega_d}{R_1 + \frac{\omega}{2}} = \frac{R_\omega \omega_i}{R_1 - \frac{\omega}{2}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.7 İç ve Dış Tekerleklerin Açısal Hızını Kullanan Bir Önden Direksiyonlu Taşıtın Kinematik Durumu

Denklem 3.4 düzenlendiğinde, dış ve iç açısal hız oranı Denklem 3.5'deki gibi olacaktır.

$$\frac{\omega_d}{\omega_i} = \frac{R_1 + \frac{\omega}{2}}{R_1 - \frac{\omega}{2}} \quad (3.5)$$

Aracın dönüş merkezi etrafındaki açısal hızı, aracın yalpalama oranına eşittir. Bu da Denklem 3.6'da verilmiştir.

$$r = \frac{R_\omega \omega_d}{R_1 + \frac{\omega}{2}} = \frac{R_\omega \omega_i}{R_1 - \frac{\omega}{2}} \quad (3.6)$$

Aracın dönüş yarıçapı R, aşağıdaki matematiksel formül ile ifade edilmektedir. Bu da Denklem 3.7’de verilmiştir.

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2 \delta} \quad (3.7)$$

Bu ifadede,  $\delta$  sembolü, iç ve dış yönlendirme açılarının kutupsal ortalamasını temsil etmektedir. Kutupsal ortalama Denklem 3.8’deki gibi tanımlanmaktadır:

$$\cot \delta = \frac{\cot \delta_d + \cot \delta_i}{2} \quad (3.8)$$

Bu açı, aynı dingil mesafesine ( $l$ ) ve aynı dönüş yarıçapına ( $R$ ) sahip bir eşdeğer iki tekerlekli model şartlarına denk gelen yönlendirme açısını temsil ettiği belirtilmektedir.

Tüm tekerleklerin serbestçe dönebildiği bir yolda, her bir tekerleğin düzlemine normal olarak çizilen çizgilerin ortak bir noktada kesilmesi gerekmektedir. Bu durum, Ackerman koşulu olarak adlandırılmaktadır.

Şekilde sola dönen bir aracın geometrik yapısı örnek olarak sunulmuştur. Bu senaryoda, dönüş merkezi (O), aracın sol tarafında bulunmakta ve iç tekerlekler dönüş merkezine daha yakın bir konumda yer almaktadır. Bu duruma uygun olarak, iç ve dış yönlendirme açıları ( $\delta_i$  ve  $\delta_d$ ) Denklem 3.9 ve Denklem 3.10’da hesaplanmıştır.

$$\tan \delta_i = \frac{l}{\left(R_1 - \frac{\omega}{2}\right)} \quad (3.9)$$

$$\tan \delta_d = \frac{l}{\left(R_1 + \frac{\omega}{2}\right)} \quad (3.10)$$

Bu ifadelerden yola çıkarak, Denklem 3.11 elde edilmektedir.

$$R_1 = \frac{1}{2}\omega + \frac{1}{\tan \delta_i} = -\frac{1}{2}\omega + \frac{l}{\tan \delta_d} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11,  $\delta_i$  ve  $\delta_d$  arasında doğrudan bir ilişki kurmakta ve Ackerman koşulunu

ifade eden Denklem 3.12'yi doğrulamaktadır:

$$\cot\delta_d - \cot\delta_i = \frac{\omega}{l} \quad (3.12)$$

Aracın dönüş yarıçapını (R) belirlemek amacıyla, şekil 3.4'deki gibi eşdeğer bir iki tekerlekli model kullanılmaktadır. Söz konusu modelde, dönüş yarıçapı R, aracın kütle merkezi (C) etrafında ve aracın hız vektörüne dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu modelin geometrisi temel alınarak denklem 3.13'deki matematiksel ilişki elde edilmektedir. Eşdeğer yönlendirme açısı için Denklem 3.13 ve Denklem 3.14 kullanılmaktadır.

$$R^2 = a_2^2 + R_1^2 \quad (3.13)$$

$$\cot\delta = \frac{R_1}{l} = \frac{1}{2}(\cot\delta_i + \cot\delta_d) \quad (3.14)$$

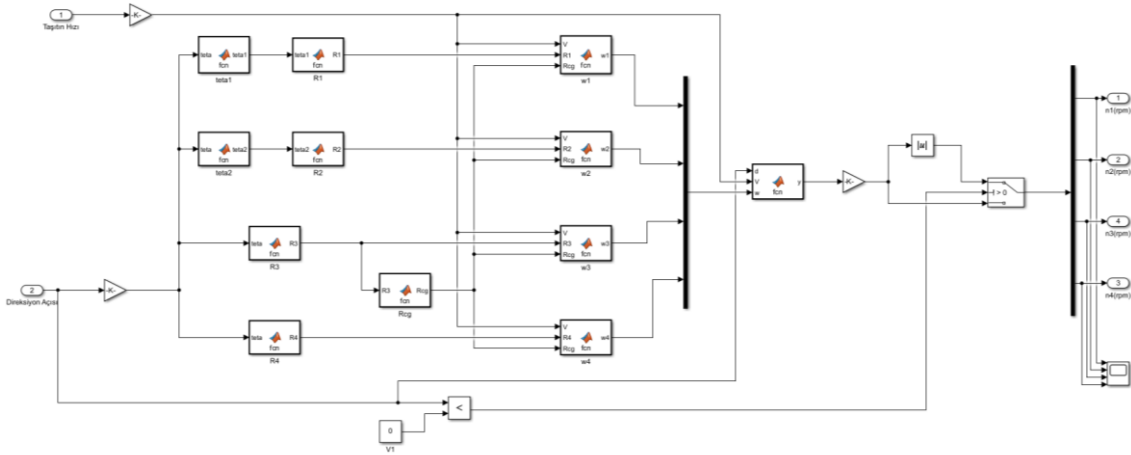
Bu durumda, dönüş yarıçapı Denklem 3.15 olarak ifade edilmektedir.

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2 \delta} \quad (3.15)$$

Ackerman koşulu, aracın hızının son derece düşük olduğu durumlarda ve kayma açılarının sıfır olduğu varsayımıyla belirtilmektedir. Bu koşulda, yanal kuvvetler ile dönüş kuvvetleri birbirini dengelemekte ve dış yanal kaymalar meydana gelmemektedir. Ackerman koşulu, kinematik bir şart olarak da adlandırılmaktadır; çünkü bu koşul, aracın sıfır hızda bulunduğu statik bir durumu da tanımlamaktadır. Ackerman koşuluna uygun bir yönlendirme sağlayan mekanizma veya geometri, Ackerman direksiyonu, Ackerman mekanizması ya da Ackerman geometrisi olarak adlandırılmaktadır.

4x4 tek akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıt için matematiksel modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yalnızca ön aks üzerindeki tekerleklerin yönlendirildiği bir yapı dikkate alınarak, taşıtın dönüş kinematiği MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Verilen doğrusal hız ve direksiyon açısı girdilerine göre her

bir tekerleğin açısal hızları, taşıtın ani dönme merkezi esas alınarak hesaplanmıştır. Tekerleklerin bu merkeze göre konumları belirlenmiş, kaymasız dönüş koşulu sağlanarak yönleri ve hızları kinematik olarak elde edilmiştir. Bu yapı sayesinde, yalnızca ön akstan yönlendirme olmasına rağmen taşıtın manevra kabiliyeti artırılmış ve yönlendirme hassasiyeti korunmuştur. Tek aks yönlendirme mimarisi, geleneksel araç sistemleriyle benzer bir yapıda çalışmakta olup, elektrikli taşıtlar için geliştirilecek kontrol stratejilerinin Simulink ortamında test edilmesine uygun bir temel sunmaktadır.

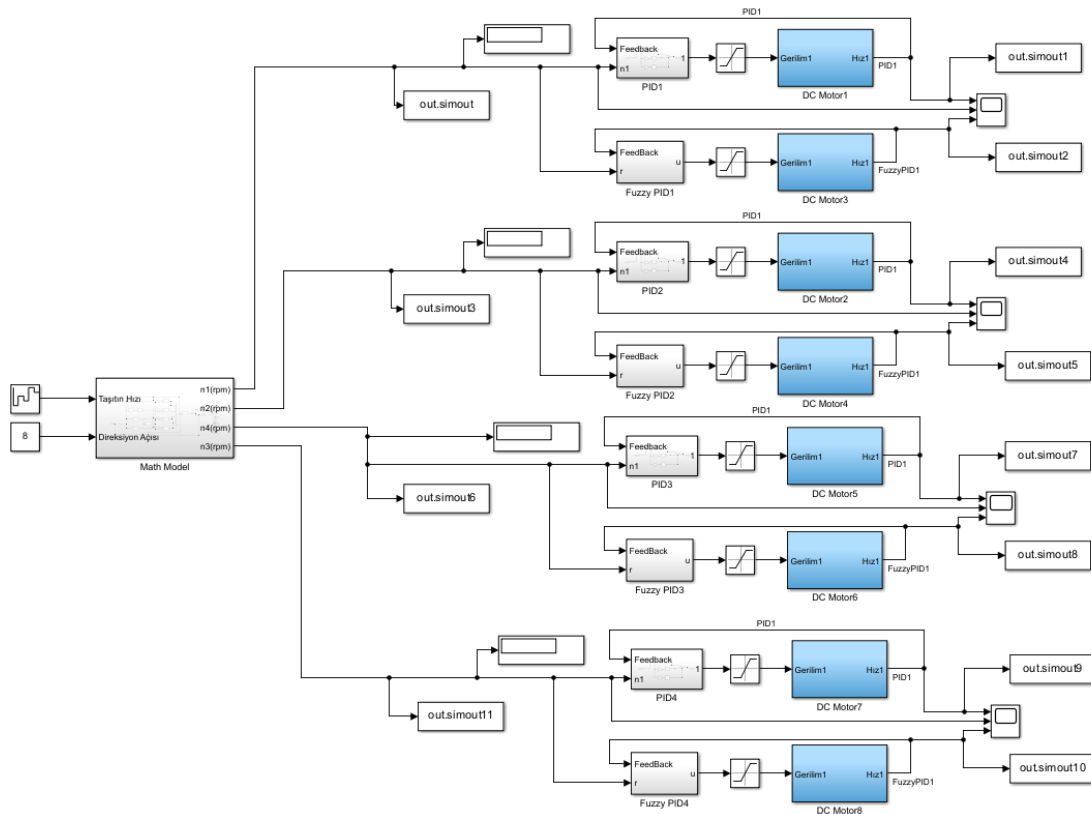


**Şekil 3.8** 4x4 Tek Akstan Yönlendirilen Bir Taşıtın Matematiksel Modelleme MATLAB/Simulink Gösterimi

Her bir tekerlek için ayrı ayrı belirlenen yarıçap değerleri ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ), Şekil 3.8’de gösterildiği gibi ilgili tekerleğin konumuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu farklılıklar, tekerleklerin izledikleri yollar ile dönme hızlarını doğrudan etkilemiştir. Ayrıca, taşıtın ağırlık merkezine göre tanımlanan ortak dönüş yarıçapı ( $R_{cg}$ ), özellikle dönüş anındaki denge analizlerinde referans parametre olarak kullanılmıştır. Bu parametre, merkezkaç kuvvetinin etkilerini simüle etmek açısından da önemli katkı sağlamaktadır.

Her bir tekerleğin bireysel açısal hızı ( $w_1, w_2, w_3, w_4$ ) Şekil 3.8’de gösterildiği gibi genel taşıt hızı ve ilgili yarıçap bilgileri doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu sayede, model dönüş manevralarında ortaya çıkan hız farklarını ayrıntılı biçimde yansıtmakta ve gerçekçi bir taşıt davranış simülasyonu sunmaktadır. Bu yapı, taşıtın iç ve dış tekerleklerinin dönüş hızlarının uyum içinde olmasını sağlayarak sürüş konforunu ve güvenliğini artırmaktadır.

4x4 tek akstan yönlendirmeli bir taşıtın her bir tekerleği için klasik PID kontrolörlerinin kullanıldığı Simulink modeli Şekil 3.9’da sunulmuştur. Modelde, dört adet ayrı kontrol döngüsü bulunmakta olup, her bir döngü bir tekerlek motorunun kontrolünü sağlamaktadır. Giriş olarak verilen referans hız sinyalleri, her bir tekerlek için ayrı ayrı tanımlanan PID kontrolörleri ile işlenmektedir. Bu kontrolörler, referans hız ile tekerlekten elde edilen geri besleme sinyali arasındaki farkı (hata) hesaplayarak, bu hatayı minimize edecek şekilde kontrol sinyali üretmektedir. Her PID bloğundan çıkan sinyal, ilgili DC motor bloğuna uygulanmakta ve motorun çıkış hızı sistemde yeniden geri beslenmektedir. Modeldeki yapı sayesinde, dört tekerlek motoru birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmekte; ancak tümü, ortak hız ve yönlendirme girişlerine göre senkronize şekilde çalışmaktadır. Bu düzenleme, sistemin bütünlüğünü korurken, taşıtın dönüş ve hızlanma manevralarına duyarlı ve kararlı bir yanıt vermesini sağlamaktadır.



Şekil 3.9 4x4 Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink gösterimi

4x4 tek akstan yönlendirmeli bir taşıtın her bir tekerleği için Fuzzy PID kontrolörlerinin kullanıldığı Simulink modeli Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Modelde, dört tekerleğin her biri

için ayrı ayrı yapılandırılmış kontrol döngüleri bulunmaktadır. Her bir döngüde, matematiksel modelden gelen referans hız sinyali, ilgili motorun geri besleme verisi ile karşılaştırılmakta ve hata sinyali oluşturulmaktadır. Bu hata sinyali, ilgili tekerleğe ait Fuzzy PID kontrol bloğuna gönderilerek uygun kontrol gerilimi üretilmektedir. Kontrol sinyali, ardından bir DC motor bloğu aracılığıyla simüle edilen tekerlek motoruna uygulanmakta ve motorun çıkış hızı yeniden sistem girişine geri beslenmektedir. Bu yapıda her bir tekerlek bağımsız olarak kontrol edilmesine rağmen, tüm sistem ortak giriş verilerine göre senkronize bir şekilde çalışmakta, bu da taşıtın yönlendirme ve hız kontrolünü hassas biçimde gerçekleştirmesini sağlamaktadır.

### **3.2.2 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıt için EDS**

İki akstan yönlendirme sistemi, hem ön hem de arka akslarda yer alan tekerleklerin aktif olarak yönlendirilmesiyle taşıtın dört tekerlekten yönlendirilmesini mümkün kılan gelişmiş bir teknolojidir. Dört tekerlekten yönlendirme (4WS - Four Wheel Steering), olarak da bilinen iki akstan yönlendirme, taşıtlarda direksiyon tepkisini iyileştirmek, manevra kabiliyetini artırmak ve genel sürüş dinamiklerini optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistem sayesinde, özellikle yüksek hızlarda taşıtın stabilitesi artarken; düşük hızlarda dönüş kabiliyeti önemli ölçüde iyileşmektedir.

İki akstan yönlendirme, iki farklı modda çalışacak şekilde tasarlanır:

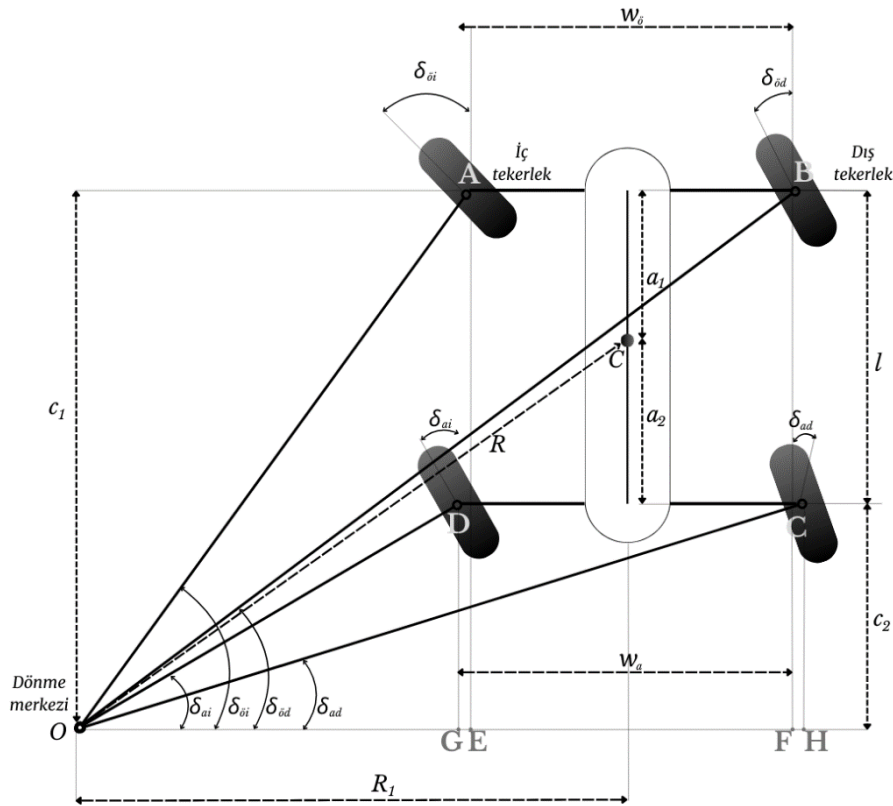
**Pozitif yönlendirme (aynı yönlü):** Ön ve arka tekerleklerin aynı yöne yönlendirildiği bu mod, genellikle yüksek hızlarda devreye girer. Bu sayede taşıt, şerit değiştirme ve ani manevra gibi durumlarda daha dengeli ve güvenli bir şekilde hareket eder. Arka tekerleklerin ön tekerleklerle aynı yönde dönmesi, taşıtın gövde salınımlarını azaltır ve daha keskin tepki vermesini sağlar.

**Negatif yönlendirme (karşı yönlü):** Bu modda, arka tekerlekler ön tekerleklerin tersi yönünde döner. Özellikle düşük hızlarda, örneğin park sırasında veya dar alan manevralarında, taşıtın dönüş yarıçapını küçültür. Böylece geleneksel yalnızca ön tekerlekten yönlendirmeli sistemlere kıyasla çok daha keskin dönüşler gerçekleştirilebilir.

Bu yönlendirme yapısının en büyük avantajlarından biri, taşıtın yönlendirme geometrisini daha esnek hale getirmesidir. Ön ve arka tekerleklerin bağımsız ve senkronize bir şekilde yönlendirilebilmesi, taşıtın viraj alma kabiliyetini artırırken aynı zamanda sürüş konforunu ve güvenliğini de iyileştirir. İki akstan yönlendirme, özellikle yüksek performanslı araçlar ve büyük gövdeli taşıtlar için tercih edilmekte olup, aktif sürüş güvenliğini artırma açısından da önemli bir rol oynamaktadır. (Aksoy 2023, Bağcı 2022, Demir vd 2021, Güneş 2022, Kara 2021, Kılıç vd 2022, Öztürk 2023, Tekin vd 2022, Vural 2023, Yılmaz vd 2021, Aydın 2023, Çelik vd 2022)

### 3.2.2.1 Negatif Yönlendirme

Şekil 3.10’da, bir iki akstan yönlendirmeli aracın sola doğru gerçekleştirilen dönüş manevrasını göstermektedir. Bu durumda, aracın dönüş merkezi O noktası olarak belirlenmiştir. Bu nokta aracın sol tarafında yer almaktadır.



Şekil 3.10 İki Akstan Negatif Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıt

Aracın dönüş geometrisinde, dönüş merkezi (O) ile aracın ön ve arka aksları arasındaki uzunlamasına mesafeler, gövde koordinat sisteminde Şekil 3.10'daki gibi sırasıyla  $c_1$  ve  $c_2$  olarak tanımlanmıştır. Bu mesafeler, aracın dönüş sırasındaki kinematik geometrisinin temel parametreleri olarak ele alınmaktadır.

Dönüş sırasında aracın ön aksında meydana gelen iç ve dış direksiyon açıları ( $\delta_{\ddot{o}i}$  ve  $\delta_{\ddot{o}d}$ ), Şekil 3.10'da tanımlı  $\Delta OAE$  ve  $\Delta OBF$  üçgenlerinden elde edilen trigonometriye dayalı olarak hesaplanmaktadır. Benzer bir yaklaşımla, aracın arka aksına ait iç ve dış direksiyon açıları ( $\delta_{ai}$  ve  $\delta_{ad}$ ),  $\Delta ODG$  ve  $\Delta OCH$  üçgenlerinden türetilmektedir. Bu açılar Denklem 3.16, Denklem 3.17, Denklem 3.18 ve Denklem 3.19'da bulunmaktadır.

$$\tan \delta_{\ddot{o}i} = \frac{c_1}{R_1 - \frac{\omega_{\ddot{o}}}{2}} \quad (3.16)$$

$$\tan \delta_{\ddot{o}d} = \frac{c_1}{R_1 + \frac{\omega_{\ddot{o}}}{2}} \quad (3.17)$$

$$\tan \delta_{ai} = \frac{c_2}{R_1 - \frac{\omega_a}{2}} \quad (3.18)$$

$$\tan \delta_{ad} = \frac{c_2}{R_1 + \frac{\omega_a}{2}} \quad (3.19)$$

Dönüş yarıçapı ( $R_1$ ) bu ifadelerden hareketle bulunduğunda, Denklem 3.20'deki matematiksel sonuçlara ulaşılmaktadır.

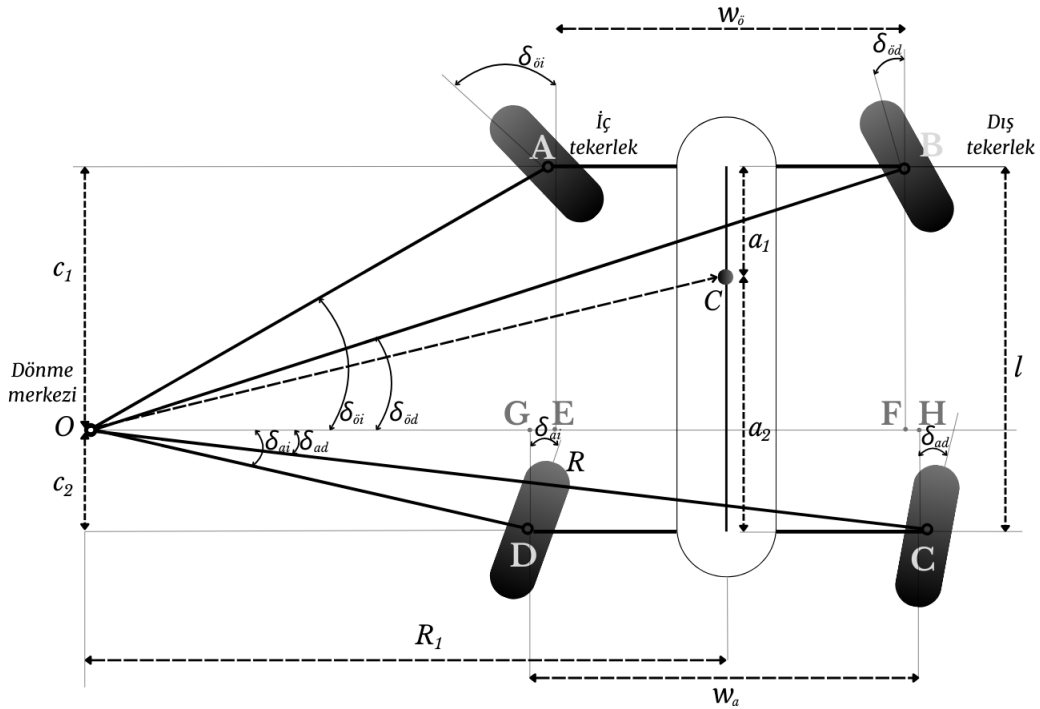
$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2} \omega_{\ddot{o}} + \frac{c_1}{\tan \delta_{\ddot{o}i}} \\ &= -\frac{1}{2} \omega_{\ddot{o}} + \frac{c_1}{\tan \delta_{\ddot{o}d}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Tüm bu denklemler, aracın iç ve dış direksiyon açıları ile dönüş yarıçapı arasındaki matematiksel ilişkileri doğrudan tanımlamaktadır. Özellikle ön ve arka aksların uzunlamasına mesafeleri ile akslar arasındaki iz genişliğinin ( $\omega_{\ddot{o}}$  ve  $\omega_a$ ) dönüş davranışını üzerindeki etkisi bu ifadelerde görülmektedir.

### 3.2.2.2 Pozitif Yönlendirme

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, ticari araç uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen pozitif iki akstan yönlendirme modeli incelenmiştir. Pozitif yönlendirme hem ön hem de arka tekerleklerin aynı yöne dönmesi prensibine dayanır ve özellikle yüksek hızlarda şerit değiştirme gibi manevralarda taşıtın kararlılığını artırma avantajı sunar. Bu özelliklerinden dolayı, ağır vasıtalar ve uzun dingil mesafesine sahip ticari araçlar için oldukça uygun bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada 4x4 iki aks için yalnızca bu yönlendirme tipi ele alınmış olup, negatif yönlendirme modeli 6x6 iki aks modelinde incelenmiştir.

Şekil 3.11’de, sola dönüş yapan pozitif iki akstan yönlendirmeli bir taşıtın kinematik yapısı gösterilmiştir. Bu sistemde hem ön hem arka tekerlekler aynı yöne döndüğü için dönüş yarıçapı büyümekte ve taşıt daha stabil bir şekilde şerit değiştirmektedir. Pozitif iki akstan yönlendirme, yüksek hızlarda manevra kabiliyetini ve yol tutuşunu artırmak amacıyla tercih edilmektedir.



Şekil 3.11 İki Akstan Pozitif Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıt

Sola dönüş yapan pozitif iki akstan yönlendirmeli bir taşıt için Denklem 3.21 oluşturulmaktadır.

$$\frac{\omega_{\ddot{o}}}{\cot\delta_{\ddot{o}d} - \cot\delta_{\ddot{o}i}} - \frac{\omega_a}{\cot\delta_{ad} - \cot\delta_{ai}} = l \quad (3.21)$$

Ön ve arka tekerlek direksiyon açıları arasındaki kinematik koşulu sağlanmaktadır. Dönme merkezi (O) solda ve iç tekerlekler dönüş merkezine daha yakın olan sol tekerleklerdir. Ön iç ve dış direksiyon açıları  $\delta_{\ddot{o}i}$  ve  $\delta_{\ddot{o}d}$  üçgenler  $\Delta OAE$  ve  $\Delta OBF$ 'den Denklem 3.22 ve Denklem 3.23 ile hesaplanabilirken, arka iç ve dış direksiyon açıları  $\delta_{ai}$  ve  $\delta_{ad}$  üçgenler  $\Delta ODG$  ve  $\Delta OCH$ 'den Denklem 3.24 ve Denklem 3.25 gibi hesaplanmaktadır.

$$\tan\delta_{\ddot{o}i} = \frac{c_1}{R_1 - \frac{\omega_{\ddot{o}}}{2}} \quad (3.22)$$

$$\tan\delta_{\ddot{o}d} = \frac{c_1}{R_1 - \frac{\omega_{\ddot{o}}}{2}} \quad (3.23)$$

$$-\tan\delta_{ai} = \frac{-c_2}{R_1 - \frac{\omega_a}{2}} \quad (3.24)$$

$$-\tan\delta_{ad} = \frac{-c_2}{R_1 - \frac{\omega_a}{2}} \quad (3.25)$$

Tüm denklemlerde olan  $R_1$ 'i tanımlandığında Denklem 3.26 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2}\omega_{\ddot{o}} + \frac{c_1}{\tan\delta_{\ddot{o}i}} \\ &= -\frac{1}{2}\omega_{\ddot{o}} + \frac{c_1}{\tan\delta_{\ddot{o}d}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Denklem 3.22 ve Denklem 3.23, ön dönüş açıları  $\delta_{\ddot{o}i}$  ve  $\delta_{\ddot{o}d}$  arasındaki kinematik durumu Denklem 3.27'de sağlamaktadır.

$$\cot\delta_{\ddot{o}d} - \cot\delta_{\ddot{o}i} = \frac{\omega_{\ddot{o}}}{c_1} \quad (3.27)$$

Benzer şekilde,  $R_1$ 'i ortadan kaldırıldığında Denklem 3.28 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{2}\omega_a + \frac{c_2}{\tan\delta_{ai}} \\ &= -\frac{1}{2}\omega_a + \frac{c_2}{\tan\delta_{ad}} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Denklem 3.24 ve Denklem 3.25, arka yönlendirme açıları  $\delta_{ai}$  ve  $\delta_{ad}$  arasındaki kinematik durumu Denklem 3.29'da sağlamaktadır.

$$\cot\delta_{ad} - \cot\delta_{ai} = \frac{\omega_a}{c_2} \quad (3.29)$$

Denklem 3.30'daki kısıtlamayı kullanılmaktadır.

$$c_1 - c_2 = l \quad (3.30)$$

Denklem 3.27 ve Denklem 3.29, Denklem 3.30'daki kısıtlamaya göre birleştirilmiştir.

$$\frac{\omega_{\ddot{o}}}{\cot\delta_{\ddot{o}d} - \cot\delta_{\ddot{o}i}} - \frac{\omega_a}{\cot\delta_{ad} - \cot\delta_{ai}} = l \quad (3.31)$$

Denklem 3.31, negatif iki akstan yönlendirmeli taşıtın ön ve arka tekerleklerinin yönlendirme açıları arasındaki kinematik koşulu sağlamaktadır.

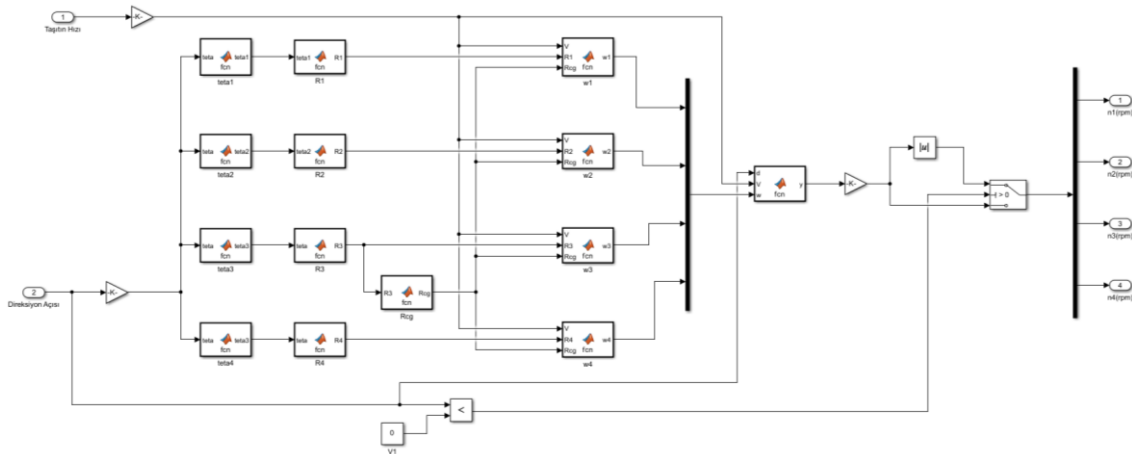
İki akstan negatif yönlendirme ve iki akstan pozitif yönlendirme için her iki durum da analiz edilebilmektedir. Negatif yönlendirmeli sistemde ön tekerleklerin direksiyon açısı pozitif olduğunda, arka tekerleklerin direksiyon açısı negatiftir. Ancak bu durum pozitif sistem için farklıdır. Arka tekerleklerin direksiyon açısı pozitifdir.

$$\cot\delta_{\ddot{o}a} - \cot\delta_{\ddot{o}l} = \frac{\omega_{\ddot{o}}}{l} - \frac{\omega_a \cot\delta_{\ddot{o}a} - \cot\delta_{\ddot{o}l}}{l \cot\delta_{aa} - \cot\delta_{al}} \quad (3.32)$$

Denklem 3.32’de hem pozitif hem de negatif dört tekerden yönlendirmeli taşıt sistemleri için kinematik koşul ifade edebilmektedir. Benzer şekilde, Denklem 3.33 ve Denklem 3.34 pozitif veya negatif iki akstan yönlendirmeli sisteme bakılmaksızın  $c_1$  ve  $c_2$ ’yi matematiksel olarak belirleyebilmektedir.

$$c_1 = \frac{\omega_{\ddot{o}}}{\cot\delta_{\ddot{o}a} - \cot\delta_{\ddot{o}l}} \quad (3.33)$$

$$c_2 = \frac{\omega_r}{\cot\delta_{aa} - \cot\delta_{al}} \quad (3.34)$$



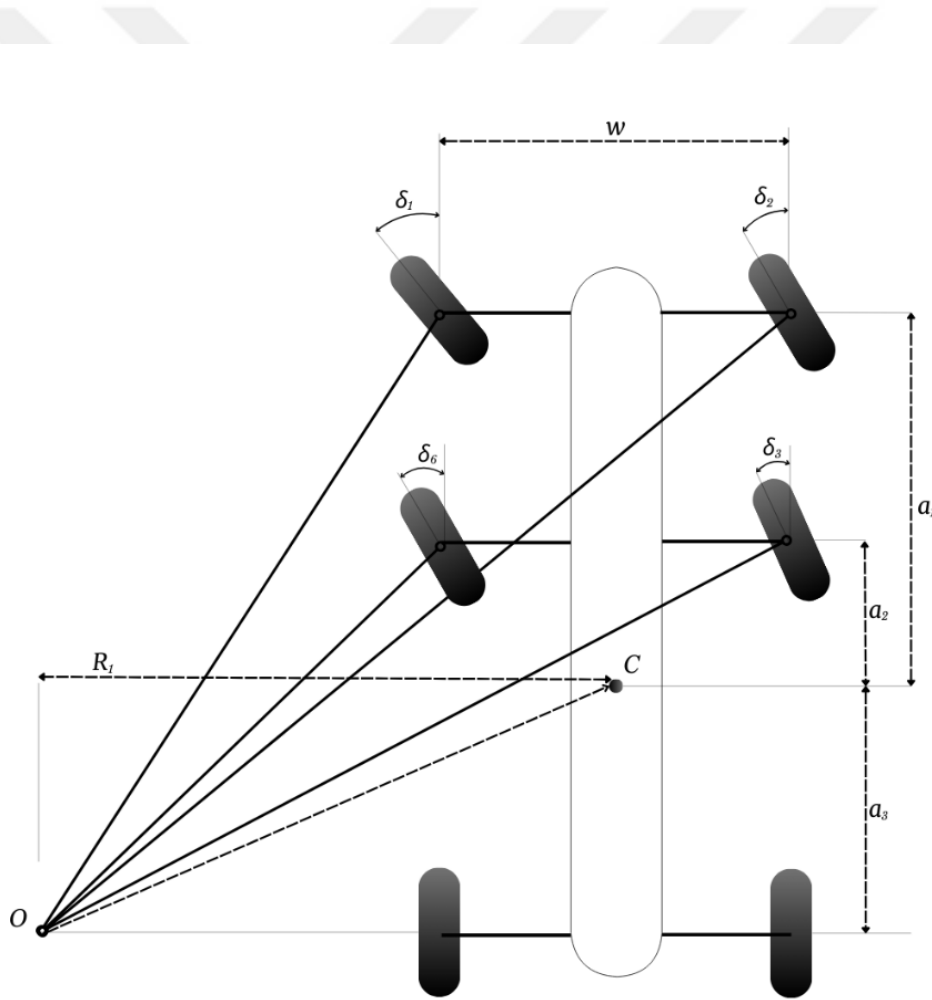
**Şekil 3.12** İki Akstan Yönlendirmeli Bir Elektrikli Taşıtın Matematiksel Modelleme Simulink Gösterimi

Şekil 3.12’de, iki akstan pozitif yönlendirme yapılan bir taşıt için oluşturulan EDS’nin Simulink modeli sunulmuştur. Bu model, Denklem (3.21)–(3.34) aralığında verilen matematiksel modele dayanılarak geliştirilmiştir. Söz konusu matematiksel model, referans olarak kullanılmıştır.

İki akstan yönlendirmeli 4x4 bir elektrikli taşıtın EDS kontrol yapısının genel blok diyagramı şeklinde modellenmiştir. Bu blok diyagramı, Ekler bölümünde Şekil 7.1’de detaylı olarak verilmiştir.

### 3.2.3 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Taşıt için EDS

Direksiyon sistemlerinin temel tasarımı, direksiyon mekanizmasının icadından bu yana çok fazla değişikliğe uğramamıştır. Sürücünün direksiyon girdisi, bir şaft üzerinden bir dişli mekanizmasıyla iletilerek ön tekerleklere gerekli direksiyon hareketini sağlar. Eğer bir aracın iki aksından fazlası varsa, sıfır hızda kaymasız bir dönüş sağlamak için tek bir aks hariç tüm aksların yönlendirilebilir olması gereklidir. Bu durumda,  $n$ -eksenli bir aracın yalnızca bir yönlendirilemeyen aksı bulunduğu anda,  $n - 1$  geometrik yönlendirme koşulu oluşur. Şekil 3.13’de, iki yönlendirilebilir aksı olan üç aksı bulunan bir araç gösterilmektedir.



Şekil 3.13 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Bir Taşıt

Altı tekerlekli iki akstan yönlendirmeli bir taşıt Şekil 3.13’de göstermektedir. İki akstan

yönlendirmeli bir aracın geometrik özelliklerini tanımlamak adına, öncelikle ön aks üzerinden başlayarak aks ile kütle merkezi C arasındaki uzunlamasına mesafe  $a_1$  olarak tanımlanmıştır. Buna göre,  $a_1$  ön aks ile kütle merkezi C arasındaki mesafeyi,  $a_2$  ise ikinci aks ile kütle merkezi C arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Ayrıca, tekerlekler sürücü tekerleğinden başlayarak saat yönünde numaralandırılmakta ve bu yöntem belirli bir düzen sağlamaktadır.

İki akstan yönlendirmeli Şekil 3.13’de gösterilen 6x6 taşıt, iki bağımsız Ackerman koşulu Denklem 3.35 ve Denklem 3.36 ile tanımlanmaktadır.

$$\cot \delta_2 - \cot \delta_1 = \frac{\omega}{a_1 + a_3} \quad (3.35)$$

$$\cot \delta_3 - \cot \delta_6 = \frac{\omega}{a_2 + a_3} \quad (3.36)$$

Bu bağıntılar, aracın ön ve arka aksları ile tekerlek açıları arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Özellikle, her bir aksın kütle merkeziyle olan mesafesi ve iz genişliği ( $\omega$ ), dönüş sırasında aracın yönlendirme performansını etkileyen temel parametredir. Bu ifade, iki akstan yönlendirmeli taşıtların kinematik analizinde temel bir çerçeve sunmaktadır. Aracın manevra kabiliyetinin optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır.

Ackerman koşulları, özellikle düşük hızda veya durağan durumda kaymasız bir dönüş gerçekleştirilmesi gereken durumlarda uygulanmaktadır. Şekil 3.13’de gösterilen model, çeşitli geometrik yapılandırmalar ve direksiyon mekanizmaları için daha karmaşık senaryolara olanak tanımaktadır.

6x6 tahrikli bir elektrikli taşıtta, her bir tekerleğin yönlendirme ve hız değerleri Ackerman direksiyon geometrisine uygun şekilde hesaplanmaktadır. Bu sayede, taşıt dönüş sırasında tüm tekerleklerin zemine kaymadan dönmesi sağlanır. Taşıt geometrisine ait temel parametreler ve bu parametrelerle tekerlek açıları ile açısız hızlarını bulunmuştur.

Taşıt geometrisine ilişkin aşağıdaki ilişkiler Şekil 3.13’e göre uygun geometri

uygulandığında Denklem 3.37, Denklem 3.38 ve Denklem 3.39 oluşmaktadır

$$a_1 = 3a_2 \quad (3.37)$$

$$a_3 = 2a_2 \quad (3.38)$$

$$a_3 + a_1 = 2285 \quad (3.39)$$

Ackerman geometrisinde, tüm tekerleklerin hız vektörleri, taşıtın ani dönme merkezi olan O noktasına diktir. Bu merkez etrafında dönüş sağlanır. Sol ön tekerlek (1. aks) için dönme yarıçapı Denklem 3.40'da bulunmuştur.

$$\tan\delta_1 = \frac{L}{R_a - \frac{w}{2}} \quad (3.40)$$

İfade düzenlendiğinde Denklem 3.41 meydana gelmektedir.

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{L}{R_a - \frac{w}{2}} \quad (3.41)$$

Sağ Ön Tekerlek (1. aks) için dönme yarıçapı Denklem 3.42 olarak bulunmuştur.

$$\tan\delta_2 = \frac{L}{R_a + \frac{w}{2}} \quad (3.42)$$

İfade düzenlendiğinde Denklem 3.43 meydana gelmektedir.

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{L}{R_a + \frac{w}{2}} \right) \quad (3.43)$$

Burada  $L$  :Ön aks mesafesi,  $R_a$  :Dönüş yarıçapı (ani dönme merkezine olan yatay uzaklık),  $w$  :Tekerlekler arası iz genişliği (iz açıklığı) ifade etmektedir. İkinci aksta tekerlekler için benzer işlemler yapılmıştır. Sol orta tekerlek (2. aks) için dönme yarıçapı Denklem 3.44'de verilmiştir.

$$\tan\delta_3 = \frac{a_2 + a_3}{R_a - \frac{w}{2}} \quad (3.44)$$

Dolayısıyla Denklem 3.45 oluşturulmuştur.

$$\delta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{a_2 + a_3}{R_a - \frac{w}{2}}\right) \quad (3.45)$$

Sağ orta tekerlek (2. aks) için dönme yarıçapı Denklem 3.46'da verilmiştir.

$$\tan\delta_3 = \frac{a_2 + a_3}{R_a + \frac{w}{2}} \quad (3.46)$$

Dolayısıyla Denklem 3.47 oluşturulmuştur.

$$\delta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{a_2 + a_3}{R_a + \frac{w}{2}}\right) \quad (3.47)$$

Üçüncü aks tekerlekleri için dönme yarıçapı ve açıları hesaplanmaktadır. Sol arka tekerlek 3. Aks Tekerleği için önce  $R_5$  (tekerleğin dönüş yarıçapı) Denklem 3.48 hesaplanmıştır.

$$R_5 = \frac{L}{\tan\delta} - \frac{w}{2} \quad (3.48)$$

Buradan tekrar  $\delta$  açısı Denklem 3.49 oluşturulmuştur.

$$\tan\delta = \frac{L}{R_5 + \frac{w}{2}}$$

$$\delta = \tan^{-1}\frac{L}{R_5 + \frac{w}{2}} \quad (3.49)$$

Sol arka 3. Aks Tekerleği için Denklem 3.50 oluşturulmuştur.

$$R_6 = \frac{L}{\tan\delta} + \frac{w}{2} \quad (3.50)$$

Veya Denklem 3.51'den de bulunmaktadır.

$$R_6 = R_3 + w \quad (3.51)$$

Üçüncü aksın sol tekerleğinden araç ağırlık merkezine olan uzaklık Denklem 3.52'de verilmiştir.

$$R_{cg} = \sqrt{\left(R_5 + \frac{w}{2}\right)^2 + (a_3)^2} \quad (3.52)$$

Her bir tekerleğin açısal hızı, taşıtın doğrusal hızının ( $V$ ) tekerleğin dönüş yarıçapına göre dağılımıyla Denklem 3.53'de hesaplanmıştır.

$$w_n = \frac{R_n}{R_{cg}} * \frac{V}{\sqrt{t}} \quad (3.53)$$

İlgili Denklemlerde  $w_n$  n numaralı tekerleğin açısal hızı,  $R_n$  ilgili tekerleğin dönüş yarıçapı,  $R_{cg}$  araç ağırlık merkezine olan uzaklığı,  $V$  araç doğrusal hızı,  $t$  dönüş zamanı ya da sabit zaman katsayısını (model tanımına göre) ifade etmektedir.

Tüm Tekerleklerin Açısal Hızları için  $w_1$  sol ön tekerlek,  $w_2$  sağ ön tekerlek,  $w_3$  sol 2. aks tekerlek,  $w_4$  sağ 2. aks tekerlek,  $w_5$  sol 3. aks tekerlek,  $w_6$  sağ 3. aks tekerlek olarak ifade edilmektedir.

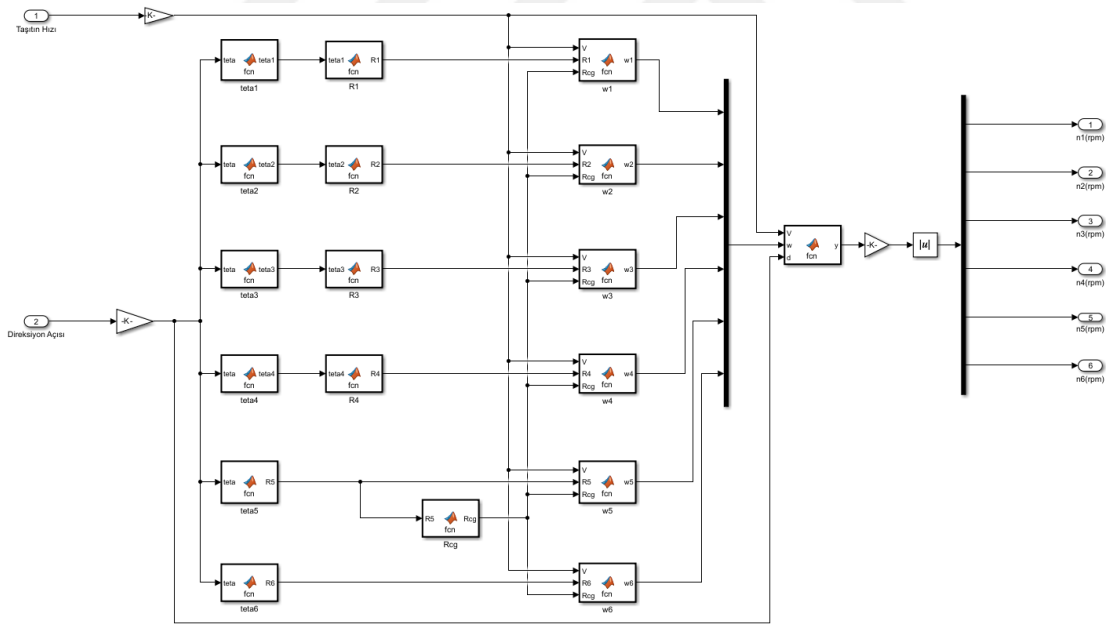
Denklem 3.54 genelleştirilmiş haliyle tümü için geçerlidir.

$$w_n = \frac{R_n}{R_{cg}} * \frac{V}{\sqrt{t}} \quad (n = 1,2, \dots, 6) \quad (3.54)$$

6x6 tahrikli bir elektrikli taşıtın dönüş manevralarını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek amacıyla Şekil 3.13'de gösterilen, Ackermann direksiyon geometrisine

dayalı bir Simulink modeli geliştirilmiştir. Modelde, taşıtın doğrusal hızı ve direksiyon açısı giriş olarak alınarak, her bir tekerleğin dönme açıları ve açısal hızları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Araç geometrisine uygun olarak her aksın konumu ve tekerleklerin yerleşimi dikkate alınmış, özellikle ani dönme merkezi etrafındaki hareketlerin uyumlu olması hedeflenmiştir. Bu sayede her bir tekerleğin yönü, dönüş yarıçapı ve aracın ağırlık merkezine olan uzaklığına göre belirlenmiş ve buna bağlı olarak kaymasız bir dönüş davranışı sağlanmıştır. Modeldeki tüm hesaplamalar, tekerleklerin taşıt gövdesiyle uyumlu şekilde dönmesini ve özellikle virajlarda lastiklerin ideal çizgisel hız dağılımına ulaşmasını amaçlamaktadır. Oluşturulan bu yapı, taşıt dinamiği açısından önemli bir adım olup, ileri seviye kontrol sistemleri ve manevra kabiliyeti geliştirme çalışmaları için temel teşkil etmektedir.

Şekil 3.14'te sunulan matematiksel modelin referans giriş değeri olarak kullanıldığı EDS kontrol blok diyagramı, Ekler bölümünde Şekil 8.2'de detaylı biçimde verilmiştir.



Şekil 3.14 6x6 İki Akstan Yönlendirmeli ED için Matematiksel Modelleme

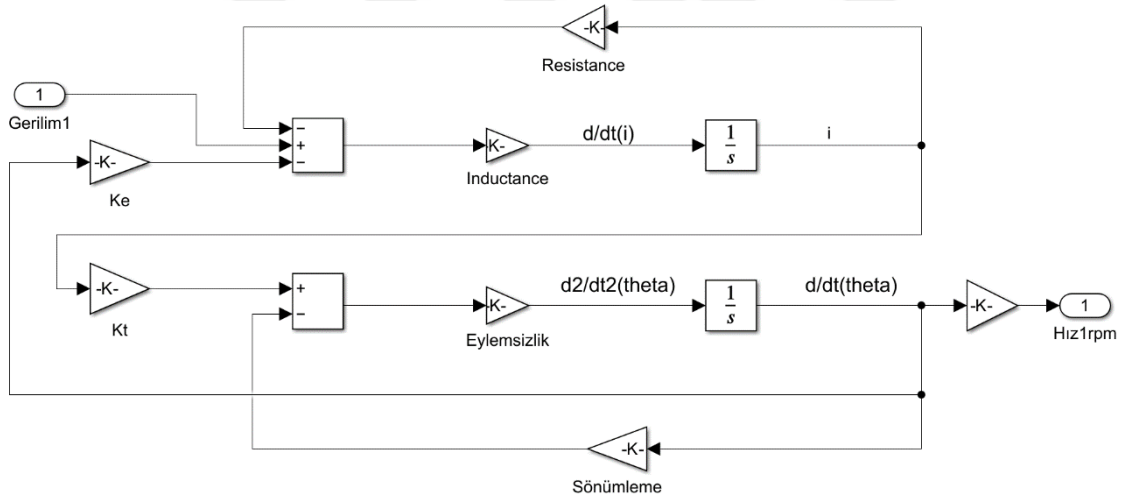
### 3.3 EDS Modellerinde Kullanılan DC Motor Modeli

Çalışmada kullanılan bir DC motorun MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi Şekil 3.15'de, gösterilmektedir. Bu model, taşıtın hızı ve direksiyon açısı gibi giriş

parametrelerine dayanan matematiksel ifadeler ile başlamakta ve her bir tekerleğe ait hedef hız değerlerini hesaplamaktadır.

Hedef hız değerleri, her bir motor için ayrı ayrı tanımlanmış dört bağımsız PID kontrolörü aracılığıyla işlenerek, motorlara uygulanacak olan uygun gerilim sinyalleri oluşturulmaktadır. Bu sinyaller, doğrudan motorlara uygulanarak her bir motorun belirlenen hedef hızda çalışması sağlanmaktadır.

Kullanılan DC Motor modelinde Şekil 3.15'deki gibi; elektriksel sistem parametreleri olarak direnç (Resistance), endüktans (Inductance) ve gerilim sabiti ( $K_e$ ); mekanik sistem parametreleri olarak ise moment of atalet (Eylemsizlik), sönüm katsayısı (Sönümlenme) ve tork sabiti ( $K_t$ ) yer almaktadır. Bu parametreler, sistemin hem elektriksel hem de mekanik dinamiklerini kapsamlı bir şekilde yansıtmakta ve motorun hız tepkisinin doğru biçimde modellenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.15 DC Motor Modellemesi

### 3.4 Kullanılan Kontrol Yöntemleri

Kontrol yöntemi, bir sistemin istenilen bir davranışı sergilemesi için uygulanan teknikler ve stratejilerdir. Amaç, sistemin girişine verilen sinyaller yardımıyla çıkışın belirlenen hedeflere uygun olmasını sağlamaktır. (Kızır & Yaren 2020, Özkop vd. 2008, Kumaş 2011, Gökçe 2015, Boyalı 2008, Gürkan & Korkut 2022)

### 3.4.1 PID Kontrol

PID kontrol, Oransal, İntegral ve Türev terimlerini temel alan bir kontrol yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem, bir sistemin istenilen davranışı sergilemesi için hata sinyalinin analiz ederek kontrol sinyali oluşturmaktadır. PID kontrolör, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılarak, etkili ve dayanıklı bir algoritma sunmaktadır. (Karabacak vd. 2023, Can & Ercan 2022, Gün & Karamancıoğlu 2021, Durmaz vd. 2013, Ulus & İkbâl 2019, Volosencu 2025, Ang vd. 2005, Elbeji 2022, Ates vd. 2015, Kharola vd. 2016)

PID kontrol, basit bir matematiksel modele dayanan, ancak doğru şekilde ayarlandığında oldukça güçlü ve etkili bir kontrol yöntemi olarak kullanılmaktadır. Oransal, integral ve türev bileşenlerinin dengeli bir şekilde kullanılması, sistemin istenilen performansı sergilemesini sağlamaktadır. Endüstriyel süreçlerin büyük bir kısmında hala en popüler kontrol yöntemi olarak tercih edilmektedir. (Karabacak vd. 2023, Can & Ercan 2022, Gün & Karamancıoğlu 2021, Ang vd. 2005, Elbeji 2022)

Referans alınan Şekil 3.16'da gösterilen PID kontrol amacı sistemin referans girişine uygun bir çıkış üretmesini sağlamaktadır. Hataları minimize ederek kararlı bir kontrol sağlamaktadır. Bunun yanı sıra hızlı yanıt verirken salınım ve aşım gibi istenmeyen etkileri azaltmak bu amaçların arasında sayılabilmektedir. Yerleşme süresini optimize ederek kararlı bir çalışma sağlamaktadır. (Karabacak vd. 2023, Can & Ercan 2022, Gün & Karamancıoğlu 2021, Durmaz vd. 2013, Ulus & İkbâl 2019, Volosencu 2025, Ang vd. 2005, Elbeji 2022)

PID Kontrol, 3 Temel bileşenden oluşmaktadır.

#### Oransal (P) Kontrol:

Hata sinyalinin mevcut değerine tepki vermektedir. Sistem tepkisini hızlandırmaktadır. Hata sıfır olduğunda kontrolör çıkışı sıfır olmaktadır. Kalıcı durum hatası (steady-state error) oluşabilmektedir. Matematiksel olarak Denklem 3.55 olarak ifade edilmektedir.

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (3.55)$$

Denklem 3.55'deki  $K_p$  oransal kazanç katsayısıdır.

#### İntegral (I) Kontrol:

Hata sinyalinin geçmişteki toplamını dikkate almaktadır. Kalıcı durum hatasını gidermektedir. Ancak aşma ve salınımlara neden olabilmektedir. Matematiksel olarak Denklem 3.56 olarak ifade edilmektedir.

$$u(t) = K_i * \int e(t)dt \quad (3.56)$$

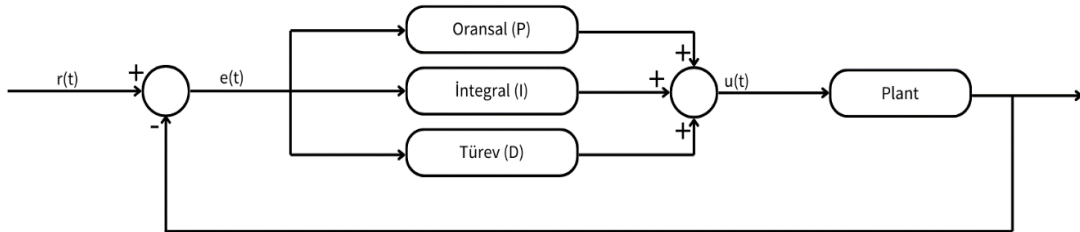
Denklem 3.56'daki  $K_i$  integral kazanç katsayısıdır.

#### Türev (D) Kontrol:

Hata sinyalinin değişim hızını (türevini) dikkate almaktadır. Sistem davranışını tahmin ederek aşma ve salınımları azaltmaktadır. Ancak gürültüye karşı hassastır. Matematiksel olarak Denklem 3.57 olarak ifade edilmektedir.

$$u(t) = K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (3.57)$$

Denklem 3.57'deki  $K_d$  türev kazanç katsayısıdır.



**Şekil 3.16** Referans Alınan PID Kontrolör Sistem

PID kontrolör, Denklem 3.55, Denklem 3.56 ve Denklem 3.57'yi birleştirerek kontrol sinyalini oluşturmaktadır.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (3.58)$$

Denklem 3.58’de verilen  $u(t)$ : Kontrolör çıkışı,  $e(t)$ : Hata sinyali,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ : Oransal, integral ve türev kazanç katsayılarıdır. (Karabacak vd. 2023, Can & Ercan 2022, Gün & Karamancioğlu 2021, Durmaz vd. 2013, Ulus & İkbâl 2019, Volosencu 2025, Ang vd. 2005, Elbeji 2022, Ates vd. 2015, Kharola vd. 2016, Aki & Dirik 2020, Verma & Mishra 2015)

Bu çalışmada kullanılan kontrol yapısı, oransal-integral-türevsel (PID) kontrol algoritması temel alınarak oluşturulmuştur. İlgili sistem, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş olup, hata sinyalinin değerlendirilmesi yoluyla bir kontrol sinyali üretilmesini amaçlamaktadır. Sistemin genel amacı, referans olarak verilen değere ulaşılmasını sağlamak ve bu değerde kararlı bir şekilde kalınmasını temin etmektir. Simülasyonun amacı, taşıtın hızına ve direksiyon açısına bağlı olarak her bir tekerlek motorunun dönme hızının belirlenmesini sağlamaktır. Belirlenen hızlara ulaşılabilmesi için motorlar, uygulanan gerilimi PID kontrolörler aracılığıyla düzenlemektedir. İlk olarak, sistemin girişinde yer alan iki farklı kaynak üzerinden referans değer ( $n_1$ ) ve geri besleme (Feedback) bilgisi sağlanmaktadır. Bu iki sinyal, blok diyagramda bir fark bloğuna yönlendirilmekte ve burada hata sinyali elde edilmektedir. Hata sinyali, referans değer ile sistemden alınan mevcut durum bilgisi arasındaki fark olarak tanımlanmakta ve kontrol algoritmasının temel girdisini oluşturmaktadır.

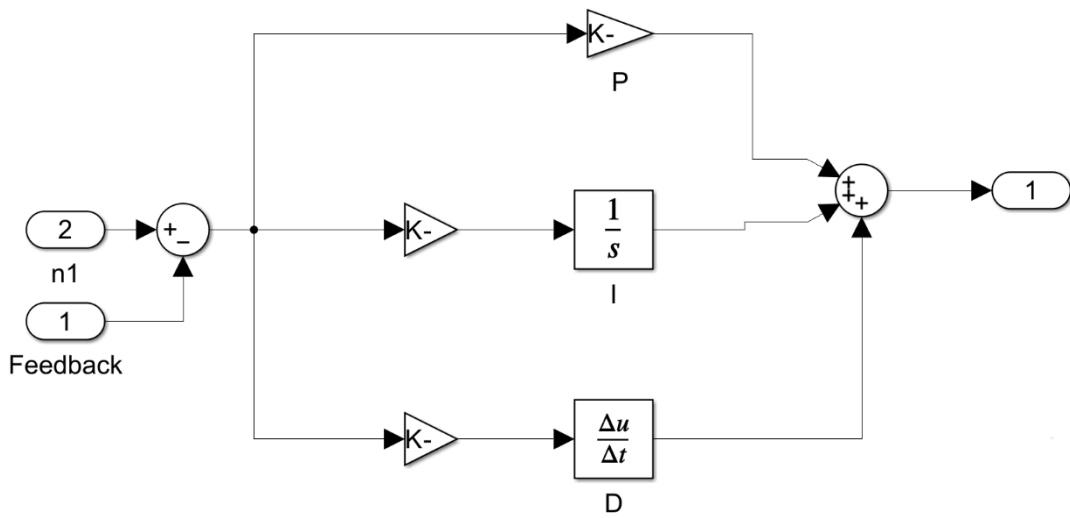
Elde edilen hata sinyali, PID kontrolörünün üç temel bileşeni olan oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) yapılar aracılığıyla işlenmektedir. Bu bileşenlerin kazanç değerleri, sistemin adım cevabı dikkate alınarak Ziegler–Nichols yöntemi ile belirlenmiştir.

Oransal bileşen için hata sinyali, 70.56 ile çarpılmaktadır. Bu bileşen, sistemin anlık hatasına doğrudan tepki verilmesini sağlamakta ve sistemin referans değere daha hızlı yaklaşmasına katkı sunmaktadır.

İntegral bileşende ise hata sinyali önce 41 katsayısı ile çarpılmakta, ardından bir integratör bloğuna gönderilmektedir. Bu yapı sayesinde hata sinyalinin zamana bağlı

birikimi hesaplanmakta ve sistemin geçmişteki hata davranışları da kontrol sinyaline dâhil edilmektedir. Böylece kalıcı hata oranı azaltılmakta ve uzun vadede daha kararlı bir sistem davranışı elde edilmektedir.

Türevsel bileşen ise hata sinyalinin değişim hızını dikkate almaktadır. Bu amaçla hata sinyali, 4.68 katsayısı ile çarpıldıktan sonra bir türev alma bloğuna yönlendirilmekte ve zamanla değişim oranı ( $\Delta u/\Delta t$ ) hesaplanmaktadır. Bu bileşen sayesinde sistemin hızlı değişimlere karşı daha kararlı ve dengeli tepkiler vermesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.17 Simulink Üzerinde Modellenen PID Modellemesi

Oransal, integral ve türevsel bileşenlerden elde edilen sinyaller, bir toplama bloğunda birleştirilerek toplam kontrol sinyali oluşturulmaktadır. Bu kontrol sinyali, sistemin çıkışına uygulanmakta ve sistemin istenilen referans değere ulaşması hedeflenmektedir. Bu yapı sayesinde kapalı çevrim bir kontrol sistemi oluşturulmuş olup, sistemin dinamik özelliklerine uygun bir şekilde yönlendirilmesi mümkün kılınmıştır. (İnt.Kyn.21, Yıldız 2019, Uçak 2015, Ortataş vd. 2022, Yeşil vd. 2021, Demir 2021, Karakaya 2020, Çelik 2019, Öztürk 2018, Arslan 2017, Kaya 2016, Yıldırım 2015)

### 3.4.2 Fuzzy PID (Bulanık PID) Kontrol

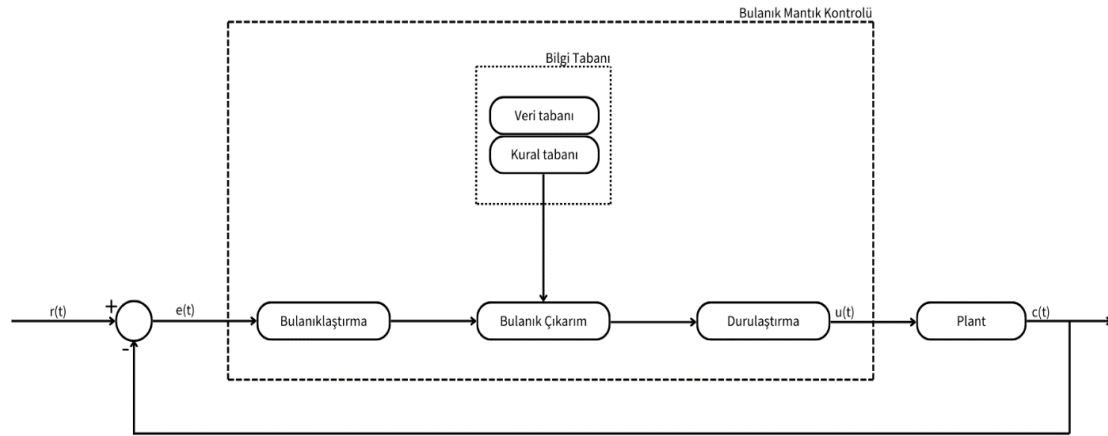
Fuzzy PID kontrol, klasik PID kontrolün doğrusal yapısından farklı olarak bulanık mantık prensipleriyle güçlendirilmiş, doğrusal olmayan sistemlere daha uyumlu bir şekilde

uygulanabilen hibrit bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol türünde, sistemin giriş büyüklüklerine ait hata (error) ve hata değişim hızı (error rate of change) gibi bilgiler, bulanık mantık kuralları ile işlenerek çıkış sinyali ya da kontrol kazançları belirlenmektedir. Böylece klasik PID kontrolün belirli sabit katsayılarla dayalı, doğrusal modele bağımlı yaklaşımı, yerini dinamik olarak ayarlanabilen, daha esnek bir yapı sunan Fuzzy PID kontrol yapısına bırakılmaktadır.

Fuzzy PID kontrol sistemlerinde öncelikle sistemin kontrol edilmek istenen büyüklüğü ile referans sinyal arasındaki fark hesaplanmakta ve bu fark hata ( $e$ ) olarak tanımlanmaktadır. Eş zamanlı olarak, bu hatanın zamana göre türevi alınmakta ve hata değişim hızı ( $de/dt$ ) hesaplanmaktadır. Söz konusu iki büyüklük, bulanık mantık sistemine giriş olarak verilmekte ve burada önceden belirlenmiş üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanıklaştırılmaktadır. Her bir giriş, örneğin negatif büyük (NB), negatif küçük (NS), sıfır (Z), pozitif küçük (PS), pozitif büyük (PB) gibi dilsel terimlerle ifade edilen üyelik fonksiyonları aracılığıyla sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma sayesinde, sistemin mevcut durumu dilsel olarak değerlendirilmekte ve kontrol kararları bu değerlendirmeye göre oluşturulmaktadır.

Şekil 3.18’de bir bulanık mantık kontrollü temel algoritma görülmektedir. İşlem Kuralları oluştururken bulanık mantık kontrolünde, uzman bilgisi ve deneyime dayalı kurallar oluşturulmaktadır. Girdi durumlarına bağlı olarak çıktı dağılımlarını belirleyen kurallardır. Üyelik Fonksiyonları tanımlanırken girdi ve çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonları belirlenir. Bu fonksiyonlar, belirli bir değişken değerinin bir kümenin içine ne kadar uyduğunu belirlemektedir. Üyelik fonksiyonları genellikle üçgen, trapezoidal veya Gauss şeklinde olabilir. Veri Tabanı oluşturulurken işlem kurallarının temelini oluşturan veri tabanı, girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarıyla kesişimlerini içermektedir. Bu kesişimler, her bir kuralın uygulanabilirlik derecesini ifade etmektedir. Kural Tabanı oluşturulurken işlem kuralları ve veri tabanının birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Her bir kural, girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının uyumluluğuna dayanarak bir uygulanabilirlik derecesi ile ilişkilendirilmektedir. Aynı zamanda çıktı değişkenlerinin hangi üyelik fonksiyonlarına sahip olması gerektiğini belirlemektedir. Bulanıklaştırma aşamasında gerçek dünya verileri bulanık verilere

dönüştürülmektedir. Girdi verileri, üyelik fonksiyonlarına göre değerlendirilir ve her bir üyelik fonksiyonuna ne kadar uyduğu belirlenmektedir. Bu adım, girdi değişkenlerini bulanık hale getirmektedir. Çıkarım Sistemi Oluşturulurken kural tabanındaki kurallar, bulanıklaştırılmış girdi verileriyle birleştirilmektedir. İşlem kuralları ve bulanıklaştırılmış veriler kullanılarak, her bir kuralın çıktı üyelik derecesi hesaplanmaktadır. Bu üyelik dereceleri, çıktı değişkenlerinin belirli üyelik fonksiyonlarına uyumluluğunu ifade etmektedir. Durulaştırma (Aggregation) aşamasında çıkarım sonuçları birleştirilerek genel bir çıkarım sonucu elde edilmektedir. Her çıktı değişkeni için uygun üyelik fonksiyonlarına dönüştürülerek her çıktı değişkeninin üyelik dereceleri birleştirilir. Bu, tüm kural sonuçlarının göz önünde bulundurularak elde edilen toplam sonucu ifade etmektedir. Sonuçların çözümlenmesi (Defuzzification) noktasında elde edilen bulanık çıkarım sonucu, kesirli kesitlere dönüştürülür. Bu adım, net ve somut bir çıktıyı temsil etmektedir (Peçe 2020, Emikönel 2022, Ateşova 2022,)



**Şekil 3.18** Bulanık Mantık Kontrolü Temel Algoritması (Kaplan K, Kuncan M, Polat H, Tepe B, Ertunç H M. 2019)

Fuzzy PID kontrol sistemleri, yapısal olarak farklı şekillerde uygulanabilmektedir. En yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri olan kazanç planlamalı fuzzy PID kontrol, klasik PID yapısında yer alan oransal ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) ve türev ( $K_d$ ) katsayılarının, bulanık mantık ile hesaplanarak dinamik biçimde belirlenmesini sağlamaktadır. Diğer yaklaşımda ise, doğrudan kontrol sinyali bulanık mantık kuralları ile oluşturulmakta ve klasik PID denklemi tamamen yerini bulanık denetleyiciye bırakmaktadır. Bu tür yapılarda, sistemin genel kontrol davranışı, yalnızca bulanık mantık kuralları ile şekillendirilmektedir.

Ayrıca hibrit modellerde, klasik PID denetleyici ile bulanık mantık birlikte çalıştırılarak, her iki yöntemin avantajlarından eşzamanlı yararlanılması amaçlanmaktadır.

Klasik PID kontrol denkleminde yer alan sabit kazanç katsayıları Denklem 3.58 olarak tanımlanmaktadır. Fuzzy PID kontrolör yapısında ise bu katsayılar sistemin mevcut hata ve hata değişimi bilgilerine bağlı olarak değişken hale getirilmektedir. Dolayısıyla, Denklem 3.59 olarak yeniden tanımlanmaktadır:

$$u(t) = K_p(e, e') * e(t) + K_i(e, e') * \int e(t)dt + K_d(e, e') * \frac{de(t)}{dt} \quad (3.59)$$

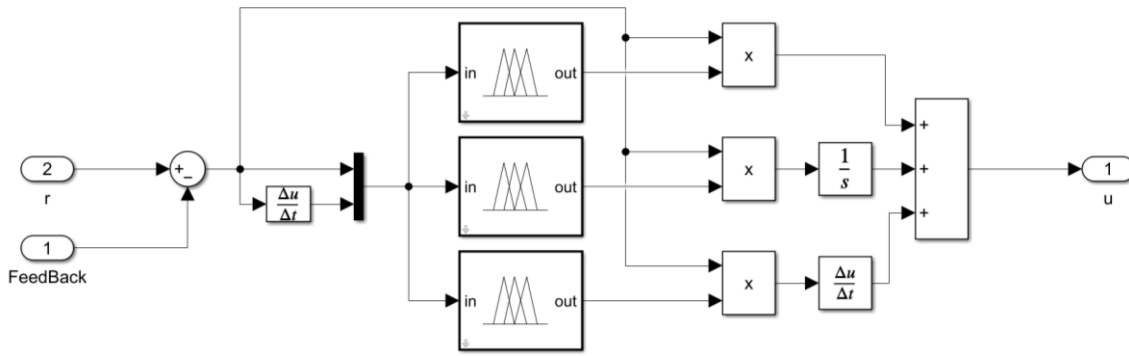
Burada  $K_p(e, e')$ ,  $K_i(e, e')$  ve  $K_d(e, e')$  ifadeleri, bulanık mantık sisteminden türetilen kazançları temsil etmektedir. Bu yapının temel avantajı, sistemin dinamik koşullarına anlık olarak tepki verebilen bir kontrol yapısı sunmasıdır. Böylelikle sistem performansı iyileştirilmekte, aşım (overshoot), salınım (oscillation) ve kararsızlık gibi klasik PID kontrolde sıkça karşılaşılan problemler minimize edilmektedir.

Fuzzy PID kontrol sistemleri özellikle doğrusal olmayan, zamanla değişen ya da modellenmesi güç olan sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Elektrikli araçlarda hız ve yön kontrolü, robotik kol hareketlerinin hassas biçimde kontrolü, sıcaklık ve nem gibi çevresel parametrelerin regülasyonu gibi uygulama alanlarında yüksek performanslı sonuçlar elde edildiği literatürde sıklıkla rapor edilmiştir. Ayrıca endüstriyel otomasyon sistemlerinde, inverter sürücülerde, güneş panelleri ve hibrit enerji sistemlerinde de başarılı uygulama örneklerine rastlanmaktadır.

Özetle, Fuzzy PID kontrol sistemleri, klasik PID kontrol sistemlerinin sınırlamalarını ortadan kaldıran, daha esnek, öğrenilebilir ve insan uzmanlığını içeren bir kontrol yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle kontrol edilen sistemin dinamiklerinin sürekli değiştiği, doğrusal olmadığı ya da dışsal bozuculara karşı dayanıklılık gerektirdiği durumlarda, Fuzzy PID kontrol kullanımı önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Şekil 3.19'da Fuzzy PID Sistemin MATLAB/Simulink üzerinde çalışması gösterilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen Simulink modeli, bulanık mantık tabanlı bir

PID kontrol sistemini temsil etmektedir. Klasik PID kontrolcülerin sabit katsayılar ile çalışması, özellikle doğrusal olmayan ve dinamikleri değişken sistemlerde yetersiz performansa yol açabilmektedir. Bu nedenle söz konusu modelde, PID katsayıları sabit bir şekilde belirlenmemiş; bunun yerine her bir katsayı, sistemin anlık durumuna göre bulanık mantık kontrolcülerini tarafından dinamik olarak hesaplanmaktadır. Böylece kontrol sistemi, çalışma koşullarına gerçek zamanlı olarak adapte olabilmeye özelliği kazanmıştır.



Şekil 3.19 MATLAB/Simulink üzerinde Fuzzy PID Modellenmesi

Modelin girişinde iki temel sinyal bulunmaktadır. Bunlardan biri sistemin istenen hedef değerini temsil eden referans girişi, diğeri ise sistemin anlık çıkış değerini temsil eden geri besleme sinyalidir. Bu iki sinyal arasındaki fark, yani hata sinyali, sistemin ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder. Bu hata sinyali hem doğrudan hem de türev bileşeni hesaplanarak kontrol algoritmasında kullanılmak üzere ayrılmaktadır. Hata türevi, sistemin ne kadar hızlı değiştiğini temsil eder ve kontrolcünün ani değişimlere ne kadar tepki vermesi gerektiğini belirlemede kritik bir rol oynar.

Modelin merkezinde üç adet bulanık mantık kontrolcü bloğu yer almaktadır. Bu blokların her biri, PID kontrol yasasının bir bileşenine karşılık gelen katsayıyı üretir. İlk blok oransal katsayıyı ( $K_p$ ), ikinci blok integral katsayıyı ( $K_i$ ), üçüncü blok ise türevsel katsayıyı ( $K_d$ ) hesaplamaktadır. Bu katsayıların her biri, hata ve hata türevi bilgilerine dayalı olarak belirlenmektedir. Kullanılan bulanık mantık yapıları, genellikle üçgen ya da trapez üyelik fonksiyonları ve kural tabanları aracılığıyla karar mekanizmasını

oluşturmaktadır. Böylece klasik sabit katsayılardan farklı olarak sistem koşullarına göre değişken kontrol katsayıları üretilmektedir.

Bulanık mantık kontrolcülerinden elde edilen  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  değerleri, sırasıyla hata, hatanın integrali ve hata türevi ile çarpılarak PID kontrol sinyalinin üç ana bileşeni oluşturulur. Bu bileşenler toplanarak toplam kontrol sinyali elde edilir. Bu sinyal, sistemin girişine uygulanarak çıkışın referans değere doğru yönlendirilmesi sağlanır. Özellikle integral bileşeni, uzun vadeli sapmaları düzeltirken; türevsel bileşen ani değişimlere karşı sistemin tepkisini düzenler. Oransal bileşen ise genel yanıtın büyüklüğünü belirlemede kullanılır.

Oransal kazanç olan  $K_p$ , kontrol sisteminin kararlılığına doğrudan etki eden temel parametrelerden biridir. Sistemde meydana gelen hata ( $e$ ) ve hata değişim hızı ( $de$ ) parametrelerine göre belirlenen bu kazanç, ani sapmalara karşı hızlı bir tepki üretme amacı taşımaktadır. Tablo 3.1’de verilen  $K_p$  bulanık kural tabanı, her iki giriş değişkeni için yedi üyelik fonksiyonu tanımlanarak oluşturulmuş, böylece toplam 49 kuraldan oluşan bir yapı elde edilmiştir. Tablo 3.1 analizinde dikkat çeken önemli bir özellik, hem büyük pozitif (PB) hem de büyük negatif (NB) hatalarda, kontrol sisteminin tepkisinin oldukça agresif bir şekilde yüksek  $K_p$  değerleri ile düzenlenmiş olmasıdır. Bu durum, sistemin ani hata artışlarına karşı güçlü ve hızlı bir şekilde yanıt vermesini sağlar. Hata sifıra yaklaştıkça, özellikle ortada kalan Z bölgesinde,  $K_p$  değerinin düşürüldüğü gözlenmektedir. Böylece aşırı kontrol eylemleri engellenmiş ve sistemin osilasyon riski azaltılmıştır.

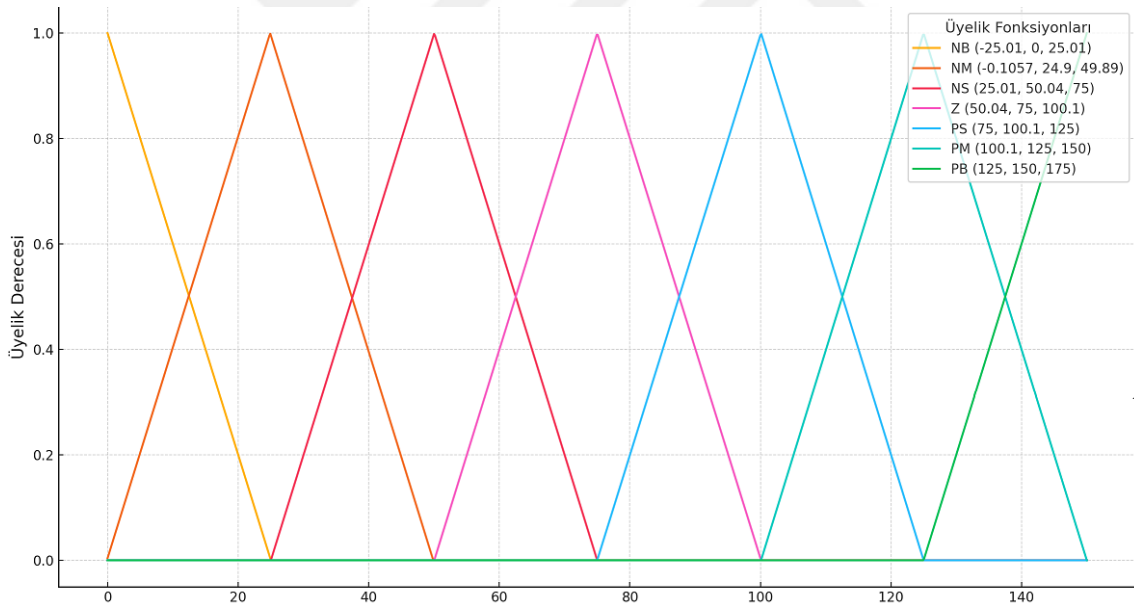
Bu kurallar sayesinde, kontrol edilen sistemin çıkışına uygun bir tepki verilmekte, kararlılık ve hızlı yanıt dengeli bir şekilde sağlanmaktadır. Uygulanan bulanık mantık yaklaşımı, klasik PID kontrolcülerde karşılaşılan ani geçiş ve kararsızlık sorunlarını yumuşatarak daha güvenli bir kontrol karakteristiği sunmaktadır.

**Tablo 3.1**  $K_p$  Fuzzy Kural Tablosu

$e \setminus de$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

e \ de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NM	NM	NM	NS	NS	NS	NM	NM
NS	NS	NS	NS	Z	NS	NS	NS
Z	NM	NM	Z	Z	Z	PM	PM
PS	PM	PS	PS	Z	PS	PS	PM
PM	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

Şekil 3.20’de, Mamdani tipi bulanık kontrol sistemi içerisinde yer alan çıkış değişkeni  $k_p$ ’ye ait üçgensel üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Bu değişkenin tanım aralığı  $[0,150][0, 150][0,150]$  olarak belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonları, sistemin kontrol hassasiyetini belirleyen yedi dilsel terimden oluşmaktadır.



Şekil 3.20  $k_p$ ’nin Üyelik Fonksiyonları

Her bir üyelik fonksiyonu, ilgili  $k_p$  değerinin bulanık mantık kuralları içerisindeki katkısını belirlemektedir. Şekil 3.20 üzerinden, üyelik fonksiyonlarının örtüşen geçiş bölgeleri sayesinde sistemin yumuşak geçişli ve esnek bir kontrol yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

İntegral kazanç olan  $K_i$ , sistemdeki hata birikimini zamanla ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kazanç parametresi, kontrol sisteminin statik hata düzeltme performansını doğrudan etkiler. Tablo 3.2’de  $K_i$  fuzzy kural tabanı, hata ( $e$ ) ve hata değişim hızı ( $de$ ) olmak üzere iki temel girişe göre çıkışı belirler ve her biri için yedi üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu da sistemin 49 kuraldan oluşan zengin bir karar yapısına sahip olmasını sağlamaktadır. Tablo 3.2 analizinde, hatanın yüksek olduğu (özellikle PB ve NB bölgeleri) durumlarda  $K_i$  değerinin düşük seviyelerde tutulduğu görülmektedir. Bu yaklaşım, sistemin integral bileşeni nedeniyle aşırı tepki üretmesini ve sistemin dengesizliğe sürüklenmesini önlemektedir. Bunun yerine, sistemin daha dengeli bir şekilde hata birikimini gidermesi amaçlanmıştır. Orta hata değerlerinde, özellikle Z (sıfıra yakın) bölgede ise daha yüksek  $K_i$  değerleri tercih edilerek, sistemin kararlı bir şekilde hatayı sıfıra yakınsaması sağlanmaktadır.

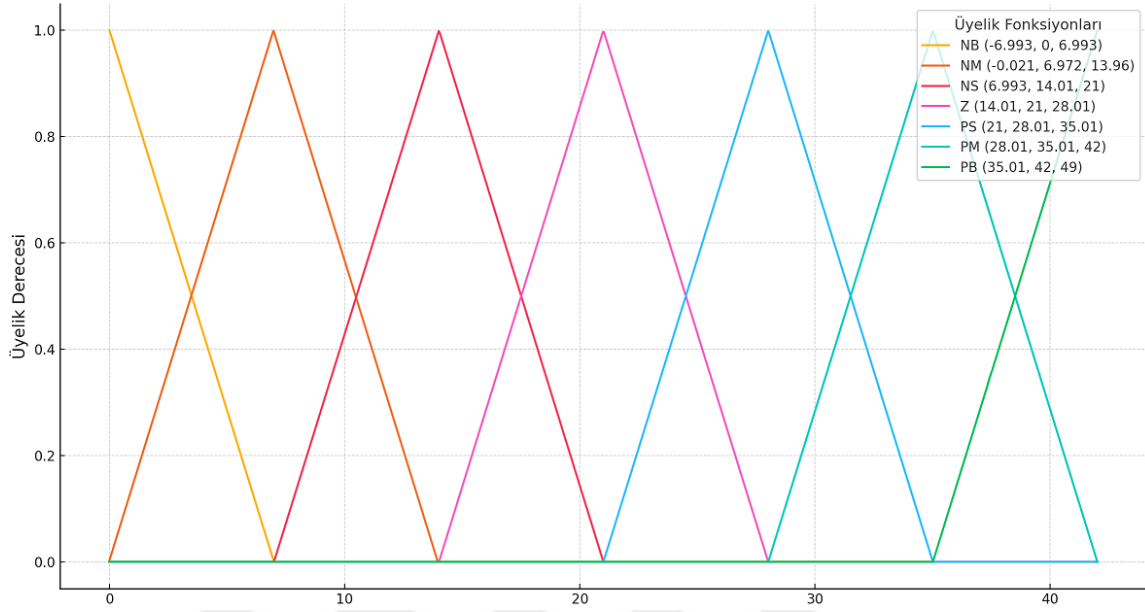
Bu yapı sayesinde sistemin yavaş ama istikrarlı bir şekilde hedef değere yaklaşması temin edilirken, ani sapmalarda daha temkinli bir kontrol uygulanmaktadır.  $K_i$  tabanının bu hassas ayarı, sistemin uzun vadeli kararlılığını ve doğruluğunu artırarak sürekli sapmaların önüne geçer.

**Tablo 3.2**  $K_i$  Fuzzy Kural Tablosu

$e \setminus de$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NM	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
NS	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
Z	PB	PB	PM	Z	PM	PB	PB
PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM
PM	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

Şekil 3.21’de, Mamdani tipi bulanık kontrol sisteminde yer alan  $K_i$  çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları görselleştirilmiştir.  $K_i$  değişkeni, sistemin integral kazanç değerini temsil eder ve değer aralığı  $[0,42][0, 42][0,42]$  olarak tanımlanmıştır. Üyelik

fonksiyonları yedi dilsel terimden oluşmaktadır.



Şekil 3.21 Ki'nin Üyelik Fonksiyonları

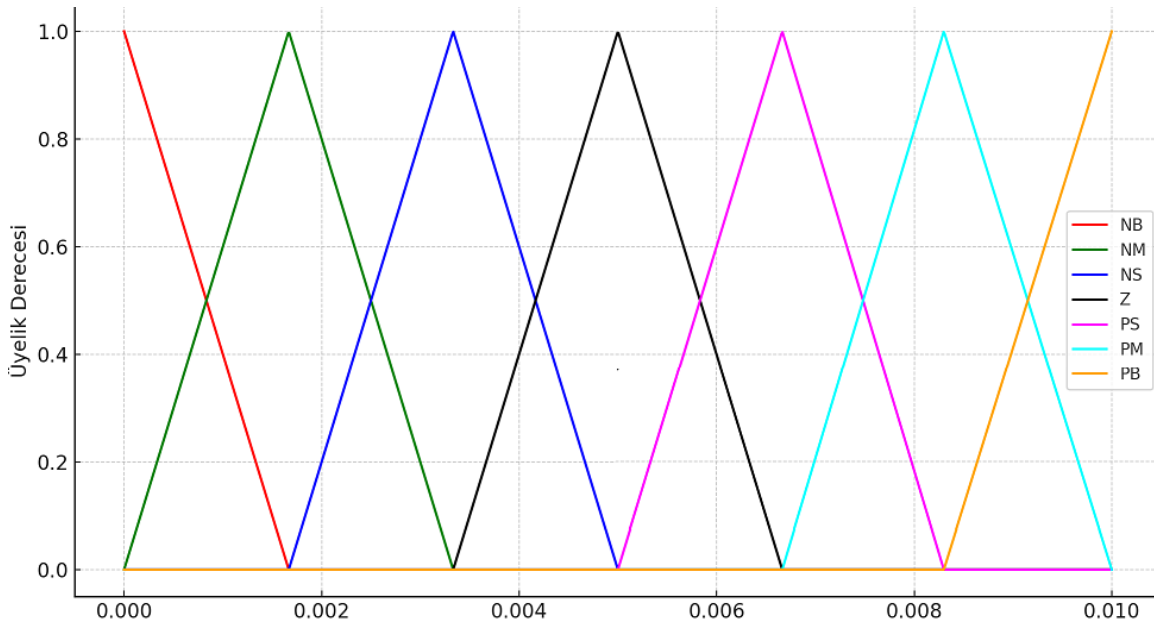
Türevsel kazanç olan  $K_d$ , sistemin ani değişimlerine karşı önleyici bir kontrol tepkisi sunar. Bu kazanç, özellikle hata değişim hızına duyarlı olup sistemin aşırı salınım yapmasını engellemek amacıyla önemli bir parametre olarak görev yapar. Tablo 3.3'de  $K_d$  fuzzy kural tabanı, hata ( $e$ ) ve hata türevi ( $de$ ) olmak üzere iki girişe göre şekillendirilmiş ve toplamda yedi üyelik fonksiyonu üzerinden 49 kural tanımlanmıştır. Tablo 3.3 analizinde, sistemin hızlı değişim yaşadığı ve hatanın büyük olduğu (NB veya PB) bölgelerde  $K_d$  değerinin yüksek tutulmasıdır. Böylece sistemin gelecekteki davranışını öngörerek aşırı kontrol eylemlerinin önüne geçilmesi sağlanır. Özellikle merkezdeki Z bölgesinde  $K_d$  değeri nispeten orta seviyelerde tanımlanmış olup, bu durum sistemin sabit hatalara karşı dengeli bir tepki vermesini destekler.

Ayrıca, negatif yönlü değişimlerde sistemin geçmişe dönük hataya tepkisi daha hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede hem hızlı iyileşme hem de aşırı tepki riski minimize edilmiştir. Sonuç olarak,  $K_d$  kuralları sistemin sönümlenme karakteristiğini artırarak, özellikle hızlı geçiş süreçlerinde titreşimsiz bir performans sunar. Bu yaklaşım, klasik PID kontrolcülere kıyasla daha esnek ve uyarlanabilir bir kontrol stratejisi sağlar.

**Tablo 3.3** Kd Fuzzy Kural Tablosu

e \ de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NB	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

Şekil 3.22’de, Mamdani tipi bulanık kontrol sisteminde yer alan ki çıkış değişkeninin üyelik fonksiyonları görselleştirilmiştir. ki değişkeni, sistemin integral kazanç değerini temsil eder ve değer aralığı  $[0, 42]$  olarak tanımlanmıştır. Bu üyelik fonksiyonları, sistemin farklı kontrol stratejilerini temsil eden dilsel etiketlerin tanımlanmasında kullanılmıştır. Grafikselleştirildiğinde, bu üyelik fonksiyonları sistemin integral kazanç kararlarını nasıl etkilediğini ve birbirleriyle nasıl örtüştüğünü gözler önüne sermektedir.

**Şekil 3.22** Kd'nin Üyelik Fonksiyonları

## 4. BULGULAR

Simülasyonlar sonucunda, geliştirilen bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi ile taşıtın her bir tekerleği için uygun değerdeki hız ile uygun tork değerleri başarıyla elde edilmiştir. Farklı direksiyon açıları ve hız senaryolarında yapılan testlerde, sistemin taşıt stabilitesini koruduğu ve dar alanlarda manevra kabiliyetini belirgin şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, enerji verimliliği açısından da geleneksel PID yöntemine kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

### 4.1 Tek Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıt için Sonuçlar

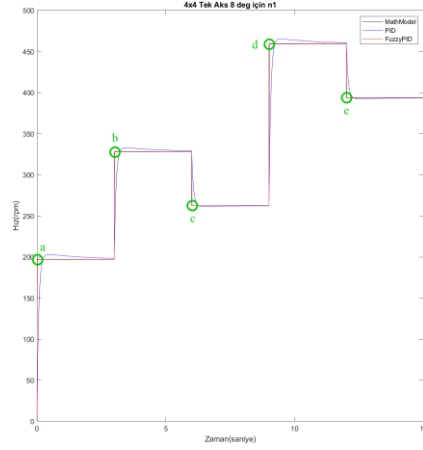
Tek akstan yönlendirmeli 4x4 taşıt için her bir tekerlek davranışı incelenmiştir. Sol ön ( $n_1$ ) için, Şekil 4.1'te, farklı hızlarda seyreden bir elektrikli taşıtın sol ön ( $n_1$ ) tekerleği için PID ve bulanık (fuzzy) PID kontrolcülerinin karşılaştırmalı performansları sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Başlangıçta, taşıt 30 km/s hızla hareket ederken sistem referans konuma ulaşmak üzere harekete geçmiştir. Şekil 4.1(a)'da, fuzzy PID kontrolcü klasik PID'e kıyasla daha düşük bir aşım ile daha hızlı bir kararlı duruma ulaşmaktadır. Ayrıca, PID kontrolcünün ilk tepki anında kısa süreli salınımlar gözlemlenirken, fuzzy PID bu salınımları daha iyi bastırmıştır. Bu durum, fuzzy kontrolcünün geçici rejim performansında daha üstün olduğunu göstermektedir.

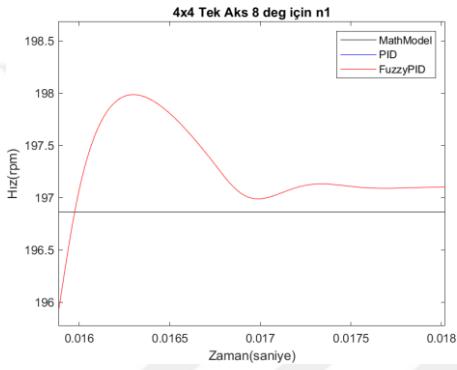
İkinci Hız Değişimi (b noktası – 50 km/s)

Ara hız artışıyla birlikte sistem yeni bir referans değere ulaşmaya çalışmaktadır. Şekil 4.1(b)'de fuzzy PID kontrolcünün referans değere daha hızlı ve dengeli bir şekilde ulaşabildiği, PID kontrolcünün ise daha fazla salınım ürettiği gözlemlenmektedir. Burada fuzzy PID, artan hızla birlikte sistemin daha kararlı bir şekilde davranmasını sağlamıştır. Bu da fuzzy kontrol yapısının hız değişimlerine daha adaptif olduğunu ortaya koymaktadır.

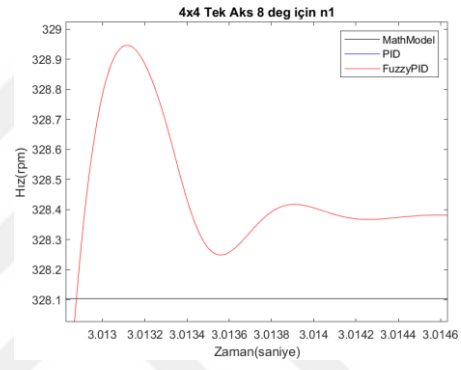


(a)

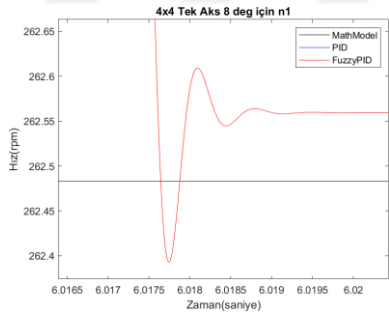
(b)



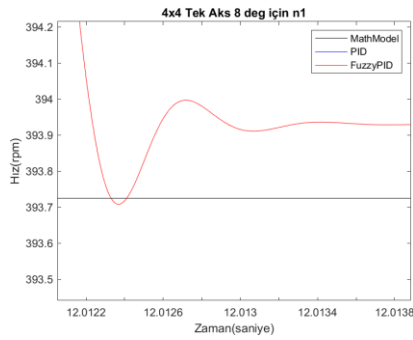
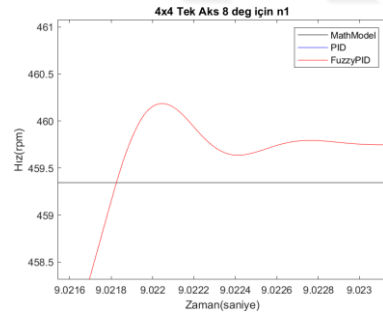
(c)



(d)



(e)



Şekil 4.1 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için  $8^\circ$  Direksiyon Açısında  $n_1$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafığı

Üçüncü Hız Değişimi (c noktası – 40 km/s)

Hızın düşmesiyle birlikte sistemin aşağı yönlü bir adım tepkisi gözlemlenmektedir. Şekil 4.1(c)'de PID kontrolcü negatif aşım gösterirken, fuzzy PID daha kısa sürede dengeye oturmuştur. Grafiklerde fuzzy PID'in daha küçük genlikli salınımlar gösterdiği ve kısa sürede kararlı duruma ulaştığı açıkça görülmektedir.

Dördüncü Hız Değişimi (d noktası – 70 km/s)

En yüksek hız geçişi olan bu durumda, sistemin tepki süresi ve kararlılığı daha belirgin hale gelmektedir. Klasik PID kontrolcünde yüksek frekanslı salınımlar ve aşım görülürken, fuzzy PID bu tür kararsızlıkları oldukça azaltmıştır. Şekil 4.1(d)'de, fuzzy PID'in ani ve büyük referans değişimlerinde daha başarılı bir geçici rejim kontrolü sunduğunu ortaya koymaktadır.

Beşinci Hız Değişimi (e noktası – 60 km/s)

Son hız geçişinde Şekil 4.1(e)'de her iki kontrolcü de sistemin hedef konuma ulaşmasını sağlamıştır. Ancak fuzzy PID daha kısa sürede ve daha az aşım ile bu başarıyı elde etmiştir. PID kontrolcünde ise salınım süreleri uzamış ve kararlı hale geçiş daha yavaş olmuştur.

Şekil 8.3'de, farklı hızlarda ilerleyen elektrikli taşıtın sağ ön ( $n_2$ ) tekerleğine uygulanan klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarının sistem yanıtları karşılaştırılmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Şekil 8.3(a)'da taşıt 30 km/s hızla ilerlerken hem PID hem de fuzzy PID kontrolcü referans değere başarılı bir şekilde ulaşmıştır. Ancak klasik PID kontrolcünde hafif bir aşım ve ardından salınımlar görülmektedir. Buna karşın fuzzy PID kontrolcü, daha az aşım ve daha hızlı sönümlenme ile sistemin kararlı hale geçmesini sağlamaktadır. Bu, fuzzy kontrolün sistemin dinamiklerine daha iyi uyum sağladığını göstermektedir.

İkinci Hız Değişimi (b noktası – 50 km/s)

Şekil 8.3(b)'de sistem, yeni bir referans değere ani bir geçiş yapmaktadır. PID kontrolcünün cevabında belirgin bir aşım ve ardından hafif salınımlar gözlenmektedir.

Fuzzy PID kontrolcü ise daha az aşım ve daha hızlı yerleşme süresi ile öne çıkmaktadır. Bu durum, fuzzy PID kontrolcünün daha dengeli ve kontrollü bir geçici rejim sağladığını ve yüksek hızlardaki referans değişimlerine daha iyi yanıt verdiğini göstermektedir.

#### Üçüncü Hız Değişimi (c noktası – 40 km/s)

Hız düşürülerek sistem aşağı yönlü bir adım tepkisine maruz bırakılmıştır. Bu geçişte Şekil 8.3(c)'de PID kontrolcünde negatif aşım (undershoot) görülürken, fuzzy PID bu durumu daha iyi yönetmiş ve daha hızlı dengeye ulaşmıştır. Her iki kontrolcü de hedef değeri başarıyla takip etse de fuzzy PID, salınım miktarını azaltarak daha kararlı bir davranış sergilemiştir. Bu fark, özellikle hız azalışı gibi ters yönlü geçişlerde fuzzy yapının avantajını öne çıkarır.

#### Dördüncü Hız Değişimi (d noktası – 70 km/s)

En büyük pozitif adım geçişi bu noktada gerçekleşmiştir. Şekil 8.3(d)'de PID kontrolcü referans değere ulaşmakta başarılı olsa da sistemin kararlı hale geçmesi fuzzy PID'e kıyasla daha uzun sürmektedir. Özellikle geçici rejim sırasında klasik PID, sistemde daha belirgin bir aşım ve dalgalanma yaratmıştır. Fuzzy PID ise daha kontrollü ve kısa sürede kararlı hale gelen bir yanıt üreterek üstünlüğünü bir kez daha göstermiştir.

#### Beşinci Hız Değişimi (e noktası – 60 km/s)

Son adım geçişi, sistemin daha düşük bir referans konumuna ulaşmasını gerektirmektedir. Şekil 8.3(e)'de Her iki kontrolcü de hedef değere yakın bir performans sergilemiş olsa da PID kontrolcünün salınım süreleri daha uzun, fuzzy PID'in ise geçici rejimi daha kısa sürmüştür. Bu geçişte de fuzzy PID'in genel anlamda daha üstün olduğu, salınım genliklerini minimumda tuttuğu ve yerleşme süresini kısalttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 8.4'da, farklı hızlarda ilerleyen elektrikli taşıtın sol arka ( $n_3$ ) tekerleğine uygulanan klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarının sistem yanıtları karşılaştırılmaktadır.

#### Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Şekil 8.4(a)'da Taşıt 30 km/s hızla ilerlerken hem PID hem de fuzzy PID kontrolcü referans değere başarılı bir şekilde ulaşmaktadır. Ancak PID kontrolcünün yanıtında,

fuzzy PID'e kıyasla daha fazla aşım ve kısa süreli salınım gözlemlenmektedir. Fuzzy PID kontrolcü ise daha kısa sürede kararlı hale gelerek, sistemin başlangıçta daha stabil çalışmasını sağlamaktadır.

İkinci Hız Değişimi (b noktası – 50 km/s)

Şekil 8.4(b)'de sistem, yaklaşık 350 birimlik yeni bir referans konuma yönelmektedir. PID kontrolcünde aşım ve ardından gelen salınımlar bariz şekilde görülmektedir. Fuzzy PID ise daha düşük aşım ve hızlı sönümlenme ile daha düzgün bir geçiş gerçekleştirmiştir.

Üçüncü Hız Değişimi (c noktası – 40 km/s)

Sistem bu adımda Şekil 8.4(c)'de gösterildiği gibi daha düşük bir referans konuma geçerek negatif bir adım tepkisine maruz kalmaktadır. PID kontrolcünde belirgin bir negatif aşım (undershoot) ve ardından toparlama süreci gözlenirken, fuzzy PID daha hızlı dengeye ulaşmakta ve salınımları minimize etmektedir.

Dördüncü Hız Değişimi (d noktası – 70 km/s)

Şekil 8.4(d)'de en büyük pozitif adım geçişi yaşanmakta ve referans konum yaklaşık 480 birime yükselmektedir. PID kontrolcü referans konuma ulaşmakta başarılı olsa da sistemin kararlı hale gelmesi fuzzy PID'e göre daha uzun sürmüştür. Fuzzy PID kontrolcü, daha düşük aşım ve daha kısa yerleşme süresi ile daha hızlı stabilite sağlamıştır. Bu da fuzzy yapının büyük adım değişimlerinde sistem kontrolünü daha verimli sağladığını gösterir.

Beşinci Hız Değişimi (e noktası – 60 km/s)

Sistemin son adımı Şekil 8.4(e)'de yaklaşık 420 birimlik daha düşük bir referans değere inişi içermektedir. PID kontrolcünde geçici rejimde gözle görülür salınımlar varken, fuzzy PID daha kısa sürede ve daha az dalgalanma ile hedef konuma ulaşmıştır. Bu da fuzzy PID'in sistemdeki ani düşümlere daha uyumlu bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir. Şekil 8.5'de, farklı hızlarda ilerleyen elektrikli taşıtın arka sağ ( $n_4$ ) tekerleğine uygulanan klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarının sistem yanıtları karşılaştırılmaktadır. Çizelge 4.1, sistem yanıt grafiklerinden elde edilen verilere dayanmaktadır. Grafiklerde, PID kontrolörün daha uzun süreli salınımlar sergilediği ve geç kararlı duruma ulaştığı

gözlemlenmiştir. Buna karşılık, Fuzzy PID kontrolörün daha kısa sürede sönümlendiği ve sistemin hızlıca kararlı hale geldiği açıkça görülmektedir.

Bu veriler, Fuzzy PID kontrol yapısının geçici rejim performansında klasik PID kontrolöre kıyasla çok daha etkin olduğunu ve sistemin referans değere daha hızlı ulaşmasını sağladığını ortaya koymaktadır (Ziegler ve Nichols, 1942, Astrom vd., 2004; Aksoy, 2021). Çizelge 4.1, bu durumu sayısal olarak desteklemekte ve tez kapsamında yapılan karşılaştırmalı değerlendirmelere temel oluşturmaktadır (Hang vd., 1991, Yıldız, 2018).

**Çizelge 4.1** 4x4 Tek Akstan Yönlendirmeli Taşıt için 30 km/h- 8° Direksiyon Açısında Yerleşme Süreleri (s)

Tekerlek No	PID Yerleşme Süresi (s)	Fuzzy PID Yerleşme Süresi(s)
$n_1$	0.900	0.017
$n_2$	0.910	0.016
$n_3$	0.880	0.018
$n_4$	0.895	0.017
<b>Ortalama</b>	0.896	0.017

Bu sonuçlara dayanarak, tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde genel değerlendirmelerin yapılabilmesi adına, Fuzzy PID için yerleşme süresi 0.017 saniye, klasik PID için ise 1 saniye olarak yuvarlatılmış ve bu değerler referans alınarak karşılaştırmalı analizler yürütülmüştür (Karaca, 2019; Kurnaz, 2017; Gürbüz, 2020).

**Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)**

Şekil 8.5(a)'da PID kontrolcüde hafif bir aşım ve kısa süreli salınım gözlenirken, fuzzy PID kontrolcü daha hızlı sönümleme ile sistemin kararlı hale gelmesini sağlamaktadır. Bu, fuzzy PID'in başlangıç koşullarında daha hassas ve dengeli bir kontrol sunduğunu göstermektedir.

**İkinci Hız Değişimi (b noktası – 50 km/s)**

Sistem Şekil 8.5(b)'de yaklaşık 330 birim konuma adım şeklinde geçiş yapmaktadır. PID kontrolcü bu geçişte belirgin bir aşım sergilemiş, ardından salınımlarla dengeye

ulaşmıştır. Fuzzy PID kontrolcü ise daha az aşım ve daha kısa sürede kararlı hale gelerek, sistemin geçici rejimini daha dengeli yönetmiştir.

Üçüncü Hız Değişimi (c noktası – 40 km/s)

Yaklaşık 260 birim seviyesine yapılan Şekil 8.5(c)'de aşağı yönlü adım geçişte, PID kontrolcüde hafif bir negatif aşım (undershoot) ve ardından salınımlar gözlenmektedir. Fuzzy PID ise daha kısa sürede ve daha az salınımla hedef değere ulaşmış, sistem daha çabuk dengelenmiştir. Bu durum, özellikle hız düşüşlerinde fuzzy PID'in sistem tepkisini daha iyi yönettiğini göstermektedir.

Dördüncü Hız Değişimi (d noktası – 70 km/s)

Şekil 8.5(d), yaklaşık 450 birim seviyesine yapılan en büyük yukarı yönlü hız geçişidir. PID kontrolcü bu geçişte yüksek aşım ve daha uzun süren salınımlarla hedefe ulaşırken, fuzzy PID daha kontrollü bir yanıt üretmiştir. Özellikle geçici rejimde fuzzy PID'in daha kısa sürede kararlı hale gelmesi, sistem stabilitesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Beşinci Hız Değişimi (e noktası – 60 km/s)

Son adımda Şekil 8.5(e) sistem yaklaşık 400 birim seviyesine iniş yapmaktadır. PID kontrolcü geçici rejimde belirgin salınımlar sergilerken, fuzzy PID kontrolcü bu geçiş daha kısa sürede ve daha düşük dalgalanma ile tamamlamıştır.

Bu çalışmada, taşıt 0.017. saniyede 30 km/s hızla ilerlerken, farklı direksiyon açılarına karşılık dört tekerlek ( $n_1, n_2, n_3, n_4$ ) için hem matematiksel model hem de PID kontrolör ile elde edilen yönlendirme değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çizelge 4.2'de verilen veriler, her iki yöntemin de tekerlek davranışını göstermektedir.

**Çizelge 4.2** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	46.671	46.671	46.671	46.671
1	200.480	202.557	202.496	200.419	45.884	46.346	46.338	45.876

**Çizelge 4.3(Devamı)** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
2	199.614	203.767	203.523	199.367	45.636	46.605	46.549	45.585
3	198.863	205.091	204.543	198.306	45.434	46.871	46.758	45.306
4	198.228	206.528	205.556	197.236	45.296	47.173	46.983	45.062
5	197.710	208.079	206.563	196.155	45.084	47.384	47.099	44.728
6	197.309	209.742	207.564	195.063	44.934	47.677	47.195	44.419
7	197.026	211.519	208.559	193.959	44.871	48.075	47.413	44.169
8	196.862	213.408	209.549	192.843	44.795	48.480	47.611	43.877
9	196.817	215.411	210.535	191.715	44.720	48.895	47.799	43.561
10	196.892	217.526	211.517	190.573	44.709	49.356	48.001	43.275
11	197.087	219.755	212.494	189.416	44.737	49.854	48.213	42.998
12	197.404	222.098	213.468	188.245	44.810	50.382	48.432	42.732
13	197.843	224.555	214.439	187.057	44.904	50.937	48.652	42.462
14	198.405	227.127	215.407	185.853	45.024	51.513	48.864	42.181
15	199.091	229.814	216.373	184.632	45.180	52.120	49.084	41.901

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Direksiyon açısının sıfır olduğu durumda, hem matematiksel model hem de PID kontrolör tüm tekerleklerle eşit yönlendirme sinyalleri uygulamaktadır. Bu noktada, matematiksel model oldukça yüksek (yaklaşık 201.46) değerler üretirken, PID kontrolör daha düşük seviyede ve sistemin kontrol ihtiyaçlarına uygun (yaklaşık 46.67) bir yönlendirme sinyali sağlamaktadır. Bu durum, PID kontrolörün daha yumuşak bir geçiş sağlamaya yönelik yapısını ve ani yönlendirme değişimlerine karşı daha kontrollü bir yanıt verdiğini göstermektedir.

Direksiyon açısının artmasıyla birlikte, her iki modelde de tekerlek yönlendirme açıları arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Matematiksel modelde özellikle ön sağ ( $n_2$ ) ve arka sol ( $n_3$ ) tekerleklerin yönlendirme açıları hızlı bir artış göstermiştir. Örneğin,  $n_2$  tekerleği 201.462'den 229.8145 değerine kadar yükselirken, arka sağ ( $n_4$ ) tekerlek yönlendirmesi 201.462'den 184.6326'ya düşmüştür.

PID kontrolör sonuçları incelendiğinde ise benzer bir artış eğilimi görülmekle birlikte, tüm tekerlekler arasındaki yönlendirme farklarının çok daha sınırlı ve dengeli olduğu

anlaşılmaktadır. Örneğin, direksiyon açısının maksimum olduğu durumda  $n_2$  ve  $n_4$  tekerlekleri arasındaki fark yalnızca yaklaşık 10 derece seviyesindedir. Bu, PID kontrol sisteminin taşıtın yönlendirme davranışını dengede tutarak ani değişimlerden kaçındığını, sistemin hem kararlılığını hem de sürüş güvenliğini artırmayı hedeflediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, matematiksel model daha teorik ve ideal koşullar altında tekerlek açılarını belirlerken, PID kontrolör gerçek sistem gereksinimlerine uygun, daha yumuşak ve kararlı bir yönlendirme davranışı sergilemektedir. Bu durum, PID kontrolörlerin pratik uygulamalarda tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Özellikle iki akstan yönlendirmeli sistemlerde, tüm tekerleklerin uyum içinde yönlendirilmesi gerektiğinden, PID tabanlı kontrol sistemleri daha güvenilir ve uygulanabilir çözümler sunmaktadır.

**Çizelge 4.4** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	202.238	202.238	202.238	202.238
1	200.480	202.557	202.496	200.419	201.059	203.484	203.415	200.986
2	199.614	203.767	203.523	199.367	200.029	204.833	204.567	199.734
3	198.863	205.091	204.543	198.306	199.131	206.200	205.650	198.498
4	198.228	206.528	205.556	197.236	198.418	207.448	206.636	197.364
5	197.710	208.079	206.563	196.155	197.856	208.283	207.472	196.302
6	197.309	209.742	207.564	195.063	197.439	208.406	208.093	195.267
7	197.026	211.519	208.559	193.959	197.152	208.415	208.394	194.207
8	196.862	213.408	209.549	192.843	196.988	208.413	208.413	193.102
9	196.817	215.411	210.535	191.715	196.943	208.402	208.402	191.960
10	196.892	217.526	211.517	190.573	197.018	208.390	208.390	190.797
11	197.087	219.755	212.494	189.416	197.213	208.399	208.399	189.627
12	197.404	222.098	213.468	188.245	197.536	208.408	208.408	188.451
13	197.843	224.555	214.439	187.057	197.997	208.400	208.400	187.266
14	198.405	227.127	215.407	185.853	198.618	208.390	208.383	186.064
15	199.091	229.814	216.373	184.632	199.410	208.404	208.396	184.842

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.3’de, taşıt 0.017. saniyede 30 km/s hızla hareket ederken, farklı direksiyon açılarına karşılık dört tekerlekte ( $n_1, n_2, n_3, n_4$ ) hem matematiksel modelle hem de fuzzy PID kontrolör ile elde edilen yönlendirme değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, klasik model ile bulanık mantık temelli kontrol yönteminin sistem tepkisine etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Direksiyon açısı sıfırken, her iki yöntemde de tüm tekerleklere eşit yönlendirme açıları uygulanmıştır. Ancak dikkat çeken ilk fark, fuzzy PID kontrolörün başlangıçta matematiksel modelden daha yüksek yönlendirme değerleri üretmesidir (örneğin, fuzzy PID’de tüm tekerleklerde 202.2380 iken, matematiksel modelde 201.4620). Bu durum, fuzzy PID kontrolörün başlangıç koşullarında sistemin dinamiklerine daha hızlı ve aktif şekilde müdahale ettiğini göstermektedir.

Direksiyon açısının artmasıyla birlikte matematiksel modelde, özellikle ön sağ ( $n_2$ ) ve arka sol ( $n_3$ ) tekerleklerde yönlendirme açılarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin,  $n_2$  değeri 201.462’den 229.8145’e yükselmiştir. Bu artış, dönüş geometrisi gereği dış tekerleklerin daha geniş bir açıyla yönlendirilmesi ihtiyacını karşılamaktadır. Arka sağ ( $n_4$ ) tekerlek ise 201.462’den 184.6326’ya kadar düşmüştür, bu da iç tekerleğin daha dar açıyla hareket etmesini sağlayan klasik yönlendirme prensibini doğrulamaktadır.

Fuzzy PID kontrol sonuçlarına bakıldığında ise sistemin daha dengeli ve sınırlı bir yönlendirme değişimi gösterdiği görülmektedir.  $n_2$  tekerleği için başlangıç değeri 202.2380 iken, en yüksek değeri 208.4048 olarak kalmıştır. Benzer şekilde,  $n_4$  tekerleği 202.2380’den 184.8421’e düşmüştür.

Bulanık mantık temelli kontrolörün en dikkat çekici yönü, belirli bir direksiyon açısından sonra (örneğin 7. adımdan itibaren), bazı tekerleklerde yönlendirme açılarının sabitlenmesidir. Bu durum, fuzzy PID algoritmasının karar mekanizmasının, yönlendirme sistemini belirli eşiklerde sabit tutarak aşırı sapmaları engellediğini göstermektedir. Bu özellik, sistemin aşırı kontrol hatalarından korunması ve stabilite açısından olumlu bir katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, fuzzy PID kontrolör klasik matematiksel modele kıyasla daha adaptif ve dengeli bir yönlendirme stratejisi sunmaktadır. Bu kontrol yaklaşımı, direksiyon açısı arttıkça meydana gelen ani değişimleri yumuşatarak, taşıtın kararlılığını ve yol tutuşunu artırmaktadır. Fuzzy PID sistem, özellikle iki akstan yönlendirmeli taşıtlarda, tüm tekerleklerin uyumlu ve hassas bir şekilde yönlendirilmesini sağlamıştır.

**Çizelge 4.5** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	207.586	207.586	207.586	207.586
1	200.480	202.557	202.496	200.419	205.314	207.445	207.379	205.249
2	199.614	203.767	203.523	199.367	204.416	208.669	208.414	204.164
3	198.863	205.091	204.543	198.306	203.630	210.011	209.446	203.063
4	198.228	206.528	205.556	197.236	202.990	211.487	210.486	201.968
5	197.710	208.079	206.563	196.155	202.433	213.054	211.499	200.844
6	197.309	209.742	207.564	195.063	202.043	214.782	212.546	199.746
7	197.026	211.519	208.559	193.959	201.741	216.579	213.544	198.599
8	196.862	213.408	209.549	192.843	201.568	218.510	214.559	197.453
9	196.817	215.411	210.535	191.715	201.524	220.568	215.572	196.307
10	196.892	217.526	211.517	190.573	201.594	222.726	216.575	195.132
11	197.087	219.755	212.494	189.416	201.800	225.010	217.572	193.946
12	197.404	222.098	213.468	188.245	202.114	227.402	218.561	192.734
13	197.843	224.555	214.439	187.057	202.565	229.917	219.563	191.526
14	198.405	227.127	215.407	185.853	203.154	232.560	220.559	190.297
15	199.091	229.814	216.373	184.632	203.847	235.314	221.556	189.048

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 4.6** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	201.675	201.675	201.675	201.675
1	200.480	202.557	202.496	200.419	200.691	202.773	202.711	200.630
2	199.614	203.767	203.523	199.367	199.823	203.985	203.740	199.576
3	198.863	205.091	204.543	198.306	199.071	205.311	204.762	198.513

**Çizelge 4.7 (Devamı)** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
4	198.228	206.528	205.556	197.236	198.435	206.751	205.777	197.440
5	197.710	208.079	206.563	196.155	197.916	208.305	206.786	196.357
6	197.309	209.742	207.564	195.063	197.514	209.972	207.789	195.263
7	197.026	211.519	208.559	193.959	197.231	211.751	208.786	194.157
8	196.862	213.408	209.549	192.843	197.066	213.644	209.778	193.039
9	196.817	215.411	210.535	191.715	197.021	215.650	210.766	191.908
10	196.892	217.526	211.517	190.573	197.095	217.770	211.749	190.764
11	197.087	219.755	212.494	189.416	197.291	220.003	212.729	189.605
12	197.404	222.098	213.468	188.245	197.609	222.350	213.705	188.431
13	197.843	224.555	214.439	187.057	198.049	224.811	214.677	187.241
14	198.405	227.127	215.407	185.853	198.612	227.387	215.647	186.035
15	199.091	229.814	216.373	184.632	199.299	230.079	216.615	184.811

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Bu bölümde, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de 1. saniyede taşıtın sabit 30 km/h hızla hareket ettiği durumlar gözlemlenmektedir. Direksiyon açısına bağlı olarak dört tekerlekte ( $n_1$ : sol ön,  $n_2$ : sağ ön,  $n_3$ : sağ arka,  $n_4$ : sol arka) oluşan yönlendirme değerleri üç farklı yöntem ile analiz edilmiştir: matematiksel model, klasik PID kontrol ve fuzzy PID kontrol. Bu karşılaştırma, kontrolcülerin dinamik sistem davranışına etkilerini ve yönlendirme tepkilerini değerlendirmek açısından önemlidir.

Matematiksel model değerleri, yönlendirme geometrisinin teorik çözümlerine karşılık gelirken, PID ve fuzzy PID kontrolör sonuçları sistemin gerçek zamanlı yanıt kabiliyetini göstermektedir. Direksiyon açısı sıfırken, tüm yöntemlerde dört tekerleğe eşit yönlendirme açısı uygulanmış ve başlangıç koşullarında sistem dengeli bir tepki vermiştir. Ancak yönlendirme açısı arttıkça yöntemler arasındaki farklar daha net ortaya çıkmaktadır.

Klasik PID kontrolör ile elde edilen yönlendirme değerleri, özellikle dış tekerleklerde ( $n_2$  ve  $n_3$ ) hızlı bir artış göstermektedir. Örneğin,  $n_2$  değeri 207.5865’ten başlayarak 235.3143’e kadar yükselmiştir. Bu durum, PID kontrolörün hata düzeyine duyarlı bir şekilde yönlendirme açısını artırarak referansa ulaşmaya çalıştığını göstermektedir.

Ancak, bu agresif tepki zaman zaman aşırı sapmalara ve tekerlekler arası uyumun bozulmasına neden olabilir.

Diğer yandan, fuzzy PID kontrolör sonuçları daha yumuşak ve dengeleyici bir artış profili sergilemektedir. Aynı tekerlek için  $n_2$  değeri, fuzzy PID ile yalnızca 201.6750'den 230.0791'e yükselmiştir. Fuzzy PID kontrolörün özellikle geçici rejimde daha stabil davranarak aşırı tepkileri önlediği gözlemlenmektedir. Bu durum, fuzzy PID yapısının bulanık mantık kural tabanı sayesinde daha adaptif ve esnek bir yanıt üretme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca fuzzy PID kontrolör, dört tekerlek arasında yönlendirme farklarını daha dengeli bir şekilde korumaktadır. Örneğin,  $n_1$  ile  $n_4$  arasında fark, PID kontrolöre göre daha düşük kalmakta ve bu da araç dengesine olumlu katkı sağlamaktadır. Örneğin, 15. direksiyon açısında PID kontrolörde  $n_1-n_4$  farkı yaklaşık 14.8 derece iken, fuzzy PID'de bu fark 14.48 derece olarak sınırlı kalmıştır. Bu küçük farklar, özellikle yüksek hızlarda taşıtın yönlendirme kararlılığı açısından önem arz etmektedir.

Genel olarak, fuzzy PID kontrolörün sistem dinamiklerine daha kontrollü tepkiler verdiği ve özellikle tekerlekler arası uyumu daha iyi koruduğu görülmektedir. Bu özellik, iki akstan yönlendirmeli taşıt sistemlerinde hem güvenli sürüş hem de lastik aşınmalarının azaltılması açısından avantaj sağlamaktadır.

4x4 bir taşıtın tek akstan kontrolü için direksiyon açısının  $0^\circ$ 'den  $15^\circ$ 'ye kadar olan bilgileri ekler kısmında Çizelge 8.1'den Çizelge 8.8e kadar verilmiştir.

## 4.2 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Taşıt için Sonuçlar

Şekil 8.6'de,  $8^\circ$  direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın ön sol tekerleği ( $n_1$ ) için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına karşılık gelen sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Taşıtın hızları sırasıyla 30, 50, 40, 70 ve 60 km/s olacak şekilde adım fonksiyonları ile değiştirilmiş ve bu hız değişimlerine karşılık gelen konum tepkileri analiz edilmiştir. Siyah çizgi taşıtın matematiksel modelini, mavi çizgi klasik PID kontrolcünün çıktısını, kırmızı çizgi ise fuzzy PID kontrolcünün

çıkışını temsil etmektedir.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Şekil 8.6(a)'da PID kontrolcüde hafif bir aşım ve sönümlenme ile denge sağlanırken, fuzzy PID kontrolcü daha hızlı bir yerleşme süresi ve daha düşük aşım ile sistemi kararlı hale getirmiştir. Bu durum, fuzzy PID'in başlangıç koşullarında daha yumuşak bir geçici rejim tepkisi verdiğini göstermektedir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Sistem, Şekil 8.6(b)'de yaklaşık 330 birimlik bir konuma geçiş yapmaktadır. PID kontrolcü, belirgin bir aşım ve ardından gelen salınımlarla referansa ulaşmıştır. Fuzzy PID ise daha kontrollü bir çıkış ile daha kısa sürede kararlılığa ulaşmıştır. Farklı hız rejimlerinde fuzzy PID kontrolcününün aşım oranını azaltarak geçici rejimi daha stabil yönettiği gözlenmektedir.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Şekil 8.6(c)'de yaklaşık 260 birimlik bu aşağı yönlü hız değişiminde, PID kontrolcüde kısa süreli bir negatif aşım (undershoot) ve takip eden salınımlar izlenmektedir. Fuzzy PID, daha kısa sürede dengeye ulaşarak bu geçişi daha yumuşak bir şekilde gerçekleştirmiştir. Hız düşüşleri gibi sistemin yönünü tersine çevirdiği durumlarda fuzzy PID'in avantajı daha belirgin hale gelmektedir.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Şekil 8.6(d)'de sistem yaklaşık 450 birimlik konuma adım atmaktadır ve bu en büyük yukarı yönlü hız artışı anlamına gelmektedir. PID kontrolcü bu geçişte yüksek bir aşım ve uzun süren salınımlar sergilerken, fuzzy PID daha kısa sürede ve daha az dalgalanma ile referans değere ulaşmıştır. Bu durum, fuzzy PID'in büyük adımlı girişlere karşı daha dirençli ve etkin bir kontrol mekanizması sunduğunu göstermektedir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son adımda Şekil 8.6(e)'de sistem, yaklaşık 400 birim seviyesine iniş gerçekleştirmiştir. PID kontrolcü bu geçişte belirgin salınımlar sergilerken, fuzzy PID daha sönümlü ve hızlı

bir şekilde dengeye ulaşmıştır. Fuzzy PID'in iniş-çıkış geçişlerinde sağladığı düşük aşım ve kısa yerleşme süresi, sistem performansını istikrarlı kılmıştır.

Şekil 8.7'te, 8° direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_2$  tekerleği için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Şekil 8.7(a)'da PID kontrolcünün tepkisi, küçük bir aşım ve sönümlenme ile dengelenirken; fuzzy PID kontrolcü daha kısa sürede ve daha yumuşak bir geçişle kararlılığa ulaşmaktadır.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Yaklaşık 400 birimlik konuma çıkılan bu noktada, Şekil 8.7(b)'de PID kontrolcü belirgin bir aşım ve salınım ile hedef konuma ulaşırken, fuzzy PID daha az aşım ve daha kararlı bir geçici rejim performansı sergilemiştir. Bu, fuzzy PID'in yüksek hızlara geçişlerde sistemin kararlılığını daha iyi koruduğunu ortaya koymaktadır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem konumu yaklaşık 320 birime gerilemektedir. Şekil 8.7(c)'de PID kontrolcü bu ani inişe kısa süreli negatif aşım ve ardından gelen salınımlarla tepki verirken, fuzzy PID kontrolcü daha düşük dalgalanma ve hızlı yerleşme ile tepki vermiştir. Bu, fuzzy PID'in hız düşüşlerine karşı daha etkin ve stabil yanıtlar verdiğini göstermektedir.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Sistem Şekil 8.7(d)'de yaklaşık 560 birimlik konuma sıçramaktadır. Bu büyük yukarı yönlü hız artışı sırasında PID kontrolcü belirgin bir aşım ve uzun süreli salınımlar ile hedefe ulaşırken, fuzzy PID kontrolcü daha az dalgalanma ve daha kısa sürede kararlılık sağlamıştır. Bu, fuzzy PID'in büyük adımlı referans değişimlerinde dahi sistem dinamiklerine daha iyi uyum sağladığını göstermektedir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son adımda Şekil 8.7(e)'de sistem yaklaşık 480 birim konuma düşmektedir. PID

kontrolcü bu inişi belirgin salınımlar eşliğinde karşılarken, fuzzy PID kontrolcü daha sönümlü ve hızlı bir geçiş ile referans değere ulaşmıştır. Fuzzy PID'in iniş-çıkış geçişlerinde sağladığı düşük aşım, kısa yerleşme süresi ve stabil tepki, kontrolcü performansını ön plana çıkarmaktadır.

Şekil 8.8'te, 8° direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_3$  için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Şekil 8.8(a)'da PID kontrolcünde hafif bir aşım ve salınım gözlenirken, fuzzy PID kontrolcü daha kısa sürede ve daha düşük aşım ile kararlılığa ulaşmaktadır. Fuzzy PID'in bu noktadaki daha hızlı yerleşim süresi, sistemin ilk tepkisinde dahi daha dengelidir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Şekil 8.8(b)'deki hız artışında sistemin konumu 320 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü belirgin bir aşım ve kısa süreli salınımlar ile hedefe ulaşırken, fuzzy PID daha dengeli bir çıkış göstererek daha kısa sürede kararlılığı sağlamıştır. Bu durum, fuzzy PID'in geçici rejimi daha etkin yönettiğini ve sistemdeki titreşimleri daha iyi bastırdığını göstermektedir.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem, yaklaşık 260 birim seviyesine iniş yapmaktadır. PID kontrolcü bu aşağı yönlü geçişte kısa süreli bir negatif aşım (undershoot) ve ardından salınımlar sergilemiştir. Şekil 8.8(c)'de Fuzzy PID kontrolcü ise iniş sırasında daha kısa sürede dengeye ulaşmış ve bu geçişi daha yumuşak bir şekilde gerçekleştirmiştir. Bu, fuzzy PID'in hız azalışlarında sistemin dengesini daha hızlı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Bu geçişle birlikte sistem, yaklaşık 450 birimlik konuma ulaşmaktadır. PID kontrolcü yüksek aşım ve ardından gelen dalgalanmalarla referans değere ulaşırken, Şekil 8.8(d)'de fuzzy PID daha hızlı ve daha az dalgalanma ile dengeye varmıştır. Bu, büyük yukarı yönlü

geçişlerde fuzzy PID'in daha etkili bir geçici rejim kontrolü sunduğunu göstermektedir. Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son geçişte sistem konumu yaklaşık 390 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcü bu noktada belirgin salınımlar gösterirken, Şekil 8.8(e)'de fuzzy PID daha yumuşak ve hızlı bir şekilde dengeye ulaşmıştır. Bu da iniş yönündeki referans değişimlerine fuzzy PID'in daha uyumlu olduğunu göstermektedir.

Şekil 8.9'te, 8° direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_4$  tekerleği için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcü ilk tepkide hafif bir aşım ve salınım gösterirken, Şekil 8.9(a)'da fuzzy PID kontrolcü daha az aşım ile daha kısa sürede kararlılığa ulaşmıştır. Bu durum, fuzzy PID'in sistemin ilk tepkisinde daha dengeli bir kontrol sağladığını ortaya koymaktadır.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu hız artışı ile sistemin konumu yaklaşık 410 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü bu geçişte belirgin bir aşım ve ardından kısa süreli dalgalanmalar sergilemiştir. Şekil 8.9(b)'de Fuzzy PID ise daha dengeli bir çıkışla hedef değere daha kısa sürede ulaşmış ve dalgalanmaları daha iyi bastırmıştır. Bu, fuzzy PID'in geçici rejimi daha etkin yönettiğini göstermektedir.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Konum yaklaşık 320 birim seviyesine inmektedir. PID kontrolcü bu geçişte aşağı yönlü bir negatif aşım ve ardından kısa süreli salınımlar üretmiştir. Şekil 8.9(c)'de Fuzzy PID ise bu düşüşe daha kontrollü tepki vererek sistemi daha kısa sürede dengeye taşımıştır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Bu geçişle birlikte sistemin konumu yaklaşık 560 birime çıkmaktadır. PID kontrolcü yüksek aşım ve ardından gelen salınımlar ile dengeye ulaşırken, Şekil 8.9(d)'de fuzzy PID daha az aşım ve daha az salınım ile daha hızlı şekilde kararlılığı sağlamıştır. Bu da

fuzzy PID'in yüksek hızlı geçişlerde sistem tepkisini daha iyi yönettiğini göstermektedir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Sistem bu geçişte yaklaşık 490 birim seviyesine inmektedir. PID kontrolcü burada da belirgin dalgalanmalarla hedefe ulaşırken, Şekil 8.9(e)'de fuzzy PID kontrolcü bu değişime daha yumuşak ve kısa sürede yanıt vermiştir. Bu durum, fuzzy PID'in iniş yönündeki referans değişimlerine karşı daha uyumlu olduğunu ve daha istikrarlı bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Çizelge 4.6'da, taşıt 0.017. saniyede 30 km/s hızla hareket ederken, dört tekerlek ( $n_1, n_2, n_3, n_4$ ) üzerinde matematiksel model ve PID kontrol sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu analiz, klasik model ile PID kontrol yapısının yönlendirme sistemine etkilerini açıkça göstermektedir.

**Çizelge 4.8** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	46.671	46.671	46.671	46.671
1	201.489	205.686	200.408	206.705	46.066	47.022	45.807	47.218
2	201.572	210.055	199.323	212.054	46.089	47.824	45.563	48.275
3	201.717	214.571	198.204	217.512	46.096	48.834	45.277	49.490
4	201.925	219.240	197.051	223.087	46.069	49.846	44.942	50.708
5	202.202	224.068	195.860	228.784	45.971	50.858	44.526	51.923
6	202.553	229.061	194.629	234.611	45.968	51.953	44.174	53.206
7	202.982	234.224	193.357	240.574	46.054	53.117	43.874	54.551
8	203.495	239.567	192.039	246.682	46.187	54.331	43.598	55.941
9	204.098	245.094	190.674	252.941	46.300	55.569	43.262	57.341
10	204.798	250.816	189.259	259.362	46.460	56.863	42.942	58.796
11	205.601	256.740	187.789	265.951	46.636	58.201	42.608	60.286
12	206.515	262.876	186.262	272.720	46.841	59.588	42.259	61.814
13	207.548	269.234	184.673	279.679	47.073	61.023	41.899	63.386
14	208.709	275.825	183.018	286.837	47.337	62.521	41.526	65.010
15	210.007	282.659	181.293	294.206	47.632	64.063	41.135	66.674

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Direksiyon açısı sıfırken, her iki yöntemde de tüm tekerleklere başlangıçta eşit yönlendirme açıları uygulanmıştır. Ancak Çizelge 4.6'da dikkat çeken ilk fark, matematiksel modelin tüm tekerleklerde yaklaşık 201.4620 yönlendirme değeri üretmesine karşın, PID kontrolörün bu değeri 46.6719 gibi çok daha düşük bir seviyede üretmesidir.

Direksiyon açısı arttıkça, matematiksel modelde özellikle ön sağ tekerlek ( $n_2$ ) ve arka sol tekerlek ( $n_3$ ) yönlendirme açıları dikkat çekici biçimde değişmektedir. Örneğin,  $n_2$  değeri 201.462'den 282.6597'ye,  $n_3$  değeri ise 201.4620'den 181.2937'ye kadar düşmektedir. Bu değişim, dönüş geometrisine uygun olarak, dışta kalan tekerleklerin daha geniş bir açıyla yönlendirilmesi ve içte kalanların daha dar açılarla dönmesi gerektiğini göstermektedir.

PID kontrolörün sonuçlarına ise sistemin yönlendirme açılarındaki değişimin daha sınırlı ve kontrollü olduğu görülmektedir. Örneğin,  $n_2$  tekerleği için başlangıç değeri 46.6719 iken, en yüksek değer 64.0635 olmuştur. Benzer şekilde,  $n_4$  tekerleği 46.6719'dan 66.6747 seviyesine ulaşmıştır. Özellikle  $n_3$  tekerleğinde, matematiksel modelde 183.0186 gibi oldukça düşük değerlere düşülmesine rağmen, PID kontrolör bu değeri 41.1357 seviyesinde tutarak sistemin stabilitesine katkı sağlamıştır.

Sonuç olarak, Çizelge 4.6'de PID kontrolör, matematiksel modele kıyasla daha dengeleyici ve kararlı bir yönlendirme stratejisi sunmaktadır. Direksiyon açısının artmasıyla oluşabilecek ani yönlendirme değişikliklerini sınırlayarak, taşıtın stabilite ve yol tutuş performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bu yönüyle PID kontrol yapısının, iki akstan yönlendirmeli sistemlerde daha güvenli ve uyumlu bir kontrol davranışı sergilediği gözlemlenmiştir.

**Çizelge 4.9** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	202.238	202.238	202.238	202.238
1	201.489	205.686	200.408	206.705	202.250	206.755	200.975	207.581

**Çizelge 4.10(Devamı)** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
2	201.572	210.055	199.323	212.054	202.346	208.431	199.678	208.431
3	201.717	214.571	198.204	217.512	202.512	208.436	198.388	208.436
4	201.925	219.240	197.051	223.087	202.756	208.415	197.177	208.415
5	202.202	224.068	195.860	228.784	203.084	208.389	196.021	208.396
6	202.553	229.061	194.629	234.611	203.487	208.389	194.853	208.389
7	202.982	234.224	193.357	240.574	203.970	208.401	193.614	208.401
8	203.495	239.567	192.039	246.682	204.536	208.471	192.290	208.471
9	204.098	245.094	190.674	252.941	205.188	208.455	190.899	208.465
10	204.798	250.816	189.259	259.362	205.911	208.466	189.468	208.466
11	205.601	256.740	187.789	265.951	206.678	208.456	187.996	208.456
12	206.515	262.876	186.262	272.720	207.451	208.455	186.472	208.455
13	207.548	269.234	184.673	279.679	208.099	208.455	184.882	208.455
14	208.709	275.825	183.018	286.837	208.436	208.473	183.222	208.473
15	210.007	282.659	181.293	294.206	208.450	208.463	181.491	208.463

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.7’da, taşıt 0.017 saniyede 30 km/s hızla hareket ederken farklı direksiyon açılara karşılık dört tekerlekte ( $n_1, n_2, n_3, n_4$ ) elde edilen yönlendirme değerleri, hem matematiksel model hem de Fuzzy PID kontrolör açısından karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.7, klasik modelle bulanık mantık tabanlı PID kontrol yönteminin sistem davranışları üzerindeki farklarını detaylı biçimde ortaya koymaktadır.

Her iki yöntemde de başlangıçta tüm tekerleklere eşit yönlendirme açıları uygulanmıştır. Ancak, matematiksel modelde tüm tekerleklerde yönlendirme açısı 201.4620 iken, Fuzzy PID kontrolör aynı koşulda 202.2380 değerini üretmiştir.

Direksiyon açısı arttıkça, matematiksel modelde özellikle ön sağ ( $n_2$  ve arka sağ ( $n_4$ ) tekerleklerde yönlendirme açılarında belirgin artış gözlemlenmektedir.  $n_2$  değeri, 201.4620’den başlayarak 282.6597’ye kadar yükselmiştir.  $n_4$  değeri, 201.4620’den 294.2061’ye kadar artmıştır. Bu artış, klasik yönlendirme prensipleri doğrultusunda dış

tekerleklerin dönüş sırasında daha büyük açıyla yönlendirilme ihtiyacını yansıtmaktadır. Öte yandan, içte kalan arka sol ( $n_3$ ) tekerlek 201.4620'den 181.2937'ye kadar azalmıştır. Bu, klasik modelin dönüş geometrisine göre tekerlek açılarını kademeli olarak değiştirdiğini göstermektedir.

Fuzzy PID kontrolör verilerine bakıldığında ise daha sınırlı ve dengeli bir yönlendirme değişimi gözlemlenmektedir:  $n_2$ , başlangıçta 202.2380 iken yalnızca 208.4730'e kadar çıkmıştır.  $n_4$  ise 202.2380'den 208.4632'ye kadar artmıştır.  $n_3$ , 202.2380'den 181.4917 seviyesine inmiştir; bu, klasik modele benzer ama daha yumuşak bir düşüş eğilimidir. Bu farklılıklar, Fuzzy PID kontrolörün ani değişimleri yumuşattığını ve daha kontrollü bir yönlendirme sunduğunu göstermektedir. Özellikle geçici rejimlerde (örneğin direksiyon açısı 3–7 arasında), klasik modeldeki büyük sapmalara karşılık fuzzy PID daha tutarlı ve lineer bir geçiş sağlamaktadır. Tablonun 7. adımından itibaren Fuzzy PID kontrolörde  $n_2$  ve  $n_4$  tekerleklerinin yönlendirme açıları neredeyse sabitlemiştir:  $n_2$ , 208.4017 civarında stabilize olmuştur.  $n_4$ , benzer şekilde 208.4017 – 208.4730 aralığında kalmıştır. Bu durum, fuzzy PID algoritmasının belli eşiklerde karar vererek yönlendirme sistemini dengede tuttuğunu ve gereksiz sapmalardan kaçınarak sistemi aşırı kontrol hatalarına karşı koruduğunu göstermektedir. Aynı stabilizasyon eğilimi  $n_3$  ve  $n_1$  tekerlekleri için de gözlemlenmektedir.

Fuzzy PID kontrolör, klasik matematiksel modele kıyasla daha adaptif, dengeli ve kararlı bir yönlendirme stratejisi sunmaktadır. Başlangıçta daha hızlı tepki vermesi, geçici rejimde ani değişimleri yumuşatması ve yüksek direksiyon açılarında yönlendirme açılarını sınırlaması sayesinde taşıtın yönlendirme kararlılığı ve yol tutuş özellikleri iyileştirilmiştir. Özellikle iki akstan yönlendirmeli sistemlerde bu tarz bir kontrol yaklaşımı, tüm tekerleklerin senkronize ve hassas biçimde yönlendirilmesini sağlama konusunda üstünlük sunmaktadır.

**Çizelge 4.11** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	207.586	207.586	207.586	207.586

**Çizelge 4.12(Devamı)** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
1	201.489	205.686	200.408	206.705	206.341	210.640	205.240	211.683
2	201.572	210.055	199.323	212.054	206.411	215.094	204.111	217.149
3	201.717	214.571	198.204	217.512	206.525	219.699	202.934	222.712
4	201.925	219.240	197.051	223.087	206.764	224.496	201.768	228.434
5	202.202	224.068	195.860	228.784	207.043	229.434	200.550	234.266
6	202.553	229.061	194.629	234.611	207.403	234.546	199.286	240.215
7	202.982	234.224	193.357	240.574	207.843	239.829	197.985	246.320
8	203.495	239.567	192.039	246.682	208.385	245.303	196.657	252.579
9	204.098	245.094	190.674	252.941	208.991	250.939	195.243	258.968
10	204.798	250.816	189.259	259.362	209.686	256.783	193.769	265.520
11	205.601	256.740	187.789	265.951	210.505	262.847	192.264	272.259
12	206.515	262.876	186.262	272.720	211.431	269.120	190.698	279.185
13	207.548	269.234	184.673	279.679	212.491	275.621	189.079	286.305
14	208.709	275.825	183.018	286.837	213.682	282.361	187.374	293.635
15	210.007	282.659	181.293	294.206	215.008	289.355	185.607	301.177

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 4.13** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	201.675	201.675	201.675	201.675
1	201.489	205.686	200.408	206.705	201.702	205.908	200.619	206.929
2	201.572	210.055	199.323	212.054	201.786	210.284	199.531	212.287
3	201.717	214.571	198.204	217.512	201.930	214.809	198.411	217.756
4	201.925	219.240	197.051	223.087	202.139	219.487	197.255	223.340
5	202.202	224.068	195.860	228.784	202.417	224.323	196.062	229.047
6	202.553	229.061	194.629	234.611	202.768	229.324	194.829	234.882
7	202.982	234.224	193.357	240.574	203.198	234.495	193.553	240.852
8	203.495	239.567	192.039	246.682	203.712	239.844	192.233	246.964
9	204.098	245.094	190.674	252.941	204.316	245.376	190.865	253.223

**Çizelge 4.14(Devamı)** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel ve Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
10	204.798	250.816	189.259	259.362	205.017	251.098	189.447	259.644
11	205.601	256.740	187.789	265.951	205.822	257.022	187.974	266.235
12	206.515	262.876	186.262	272.720	206.738	263.159	186.444	273.005
13	207.548	269.234	184.673	279.679	207.773	269.518	184.851	279.964
14	208.709	275.825	183.018	286.837	208.936	276.110	183.193	287.124
15	210.007	282.659	181.293	294.206	210.237	282.946	181.465	294.494

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

1. saniyede taşıtın sabit 30 km/h hızla hareket ettiği durumda Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da gösterilen, direksiyon açısına bağlı olarak dört tekerlekte ( $n_1$ : sol ön,  $n_2$ : sağ ön,  $n_3$ : sağ arka,  $n_4$ : sol arka) oluşan yönlendirme değerleri analiz edilmiştir. Üç farklı yöntem ile analiz edilmiştir: matematiksel model, klasik PID kontrol ve fuzzy PID kontrol. Bu karşılaştırma, kontrolcülerin dinamik sistem davranışına etkilerini ve yönlendirme tepkilerini değerlendirmek açısından önemlidir.

Matematiksel model değerleri, yönlendirme geometrisinin teorik çözümlerine karşılık gelirken, PID ve fuzzy PID kontrolör sonuçları sistemin gerçek zamanlı yanıt kabiliyetini ortaya koymaktadır. Direksiyon açısı sıfır olduğunda tüm yöntemlerde tekerlek yönlendirme açıları eşit olup başlangıç koşullarında sistem dengeli bir tepki göstermiştir. Ancak direksiyon açısı arttıkça kontrolcülerin verdiği yanıtlar arasındaki farklar daha belirgin hale gelmektedir.

Klasik PID kontrolör ile elde edilen yönlendirme açıları, özellikle dış tekerleklerde ( $n_2$  ve  $n_4$ ) oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Örneğin,  $n_2$  tekerleği için 0. direksiyon açısında 207.5865 derece olan açı, 15. direksiyon açısında 289.3556 dereceye kadar çıkmaktadır. Aynı şekilde,  $n_4$  tekerleği 207.5865'ten başlayarak 301.1779 dereceye ulaşmıştır. Bu durum, klasik PID kontrolcünün referans değerle gerçek değer arasındaki hatayı hızlı kapatma eğilimiyle, yönlendirme açısını agresif şekilde artırdığını göstermektedir. Ancak bu durum, tekerlekler arası senkronizasyonun bozulmasına ve sistemde istenmeyen dengesizliklerin oluşmasına yol açabilir. Buna karşılık, fuzzy PID

kontrolör daha dengeli ve uyumlu bir artış profili sunmaktadır. Örneğin,  $n_2$  değeri fuzzy PID ile başlangıçta 201.6750 iken, 15. direksiyon açısında 282.9461'e ulaşmıştır. Aynı tekerlek için klasik PID ile ulaşılan değer 289.3556 olduğundan, fuzzy PID daha ölçülü ve stabil bir artış sergilemiştir. Aynı durum  $n_4$  tekerleğinde de gözlemlenmektedir; fuzzy PID kontrolörle 15. adımda  $n_4$  yönlendirme açısı 294.4948 derece ile sınırlı kalırken, klasik PID'de bu değer 301.1779'dur.

Fuzzy PID kontrolör, ayrıca tekerlekler arasındaki yönlendirme farklılıklarını daha simetrik ve uyumlu tutma başarısı göstermektedir. Örneğin, 15. direksiyon açısında klasik PID ile  $n_1-n_4$  farkı yaklaşık 29.40 derece iken (215.0087 - 185.6070), fuzzy PID'de bu fark yalnızca 28.77 derece olarak gerçekleşmiştir (210.2375 - 181.4654). Bu küçük farklar, özellikle yüksek hızlarda ve dar dönüşlerde taşıtın yönlendirme kararlılığı ve sürüş güvenliği açısından önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, fuzzy PID kontrolör hem yönlendirme tepkilerinde daha yumuşak geçişler sağlamak hem de dört tekerlek arasında daha iyi bir senkronizasyon sunmaktadır. Bu özellikler, iki akstan yönlendirmeli elektrikli taşıtlarda sistem kararlılığı, sürüş konforu ve lastik ömrünün uzatılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

4x4 bir taşıtın iki akstan kontrolü için direksiyon açısının  $0^\circ$ 'den  $15^\circ$ 'ye kadar olan bilgileri ekler kısmında Çizelge 8.9'den Çizelge 8.1'e kadar verilmiştir.

### 4.3 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Taşıt için Sonuçlar

Çalışmada, 6x6 bir taşıtın tekerlekleri  $n_1$  sol ön,  $n_2$  sağ ön,  $n_3$  sol orta,  $n_4$  sağ orta,  $n_5$  sol arka ve  $n_6$  sağ arka olarak tanımlanmıştır. Şekil 8.10'da,  $8^\circ$  direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli 6x6 bir elektrikli taşıtın  $n_1$  tekerleği için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Taşıtın hızları sırasıyla 30, 50, 40, 70 ve 60 km/s olacak şekilde adım fonksiyonları ile değiştirilmiş ve bu geçişlere ait konum tepkileri analiz edilmiştir. Siyah çizgi taşıtın matematiksel modelini, mavi çizgi klasik PID kontrolcünün çıktısını, kırmızı çizgi ise fuzzy PID kontrolcünün çıktısını temsil etmektedir.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcüde hafif bir aşım ve kısa süreli salınımlar gözlemlenirken, Şekil 8.10(a)'da fuzzy PID kontrolcü bu noktada daha kısa sürede ve daha düşük aşım ile kararlılığa ulaşmaktadır. Bu, fuzzy PID kontrolcünün sistemin ilk tepkisinde daha stabil bir performans sunduğunu göstermektedir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Sistem bu hız artışıyla yaklaşık 330 birimlik konuma ulaşmaktadır. PID kontrolcü, bu artışta küçük bir aşım ile hedefe yaklaşırken, Şekil 8.10(b)'de fuzzy PID daha kararlı bir çıkış göstererek daha az salınım ile hedef değeri yakalamıştır. Bu, fuzzy PID'in geçici rejimi daha dengeli yönettiğini ve aşımı daha iyi kontrol ettiğini ortaya koymaktadır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Bu geçişte sistem yaklaşık 260 birimlik konuma inmektedir. PID kontrolcü aşağı yönlü geçişte hafif bir negatif aşım (undershoot) ve ardından kısa dalgalanmalar sergilerken, fuzzy PID daha yumuşak ve kısa sürede dengeye ulaşan bir tepki üretmiştir.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Konum yaklaşık 460 birim seviyesine ulaşmaktadır. PID kontrolcü bu yükselişte daha fazla aşım ve dalgalanma gösterirken, Şekil 8.10(c)'de fuzzy PID daha kontrollü bir çıkış sergilemiştir. Bu geçişte fuzzy PID kontrolcünün sistemin geçici rejimini daha hızlı ve daha az salınımla yönettiği görülmektedir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Sistem bu noktada yaklaşık 390 birim konumuna inmektedir. PID kontrolcü burada da kısa süreli salınımlar göstermiş, Şekil 8.10(e)'de fuzzy PID ise daha yumuşak ve istikrarlı bir tepki ile kararlılığa ulaşmıştır. Bu, fuzzy PID'in iniş yönündeki referans değişimlerine karşı daha uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 8.11'da,  $8^\circ$  direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli 6x6 bir elektrikli taşıtın  $n_2$  tekerleği için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcüde ilk adımda küçük bir aşım ve kısa süreli salınımlar görülmektedir. Buna karşılık Şekil 8.11(a)'da fuzzy PID kontrolcü, daha az aşım ve daha kısa sürede kararlılık sağlayarak daha dengeli bir tepki sunmuştur. Bu durum, fuzzy PID'in sistemin ilk hareketinde daha güvenilir bir kontrol sağladığını göstermektedir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu geçişte sistemin konumu yaklaşık 350 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü belirgin bir aşım ve hafif salınımlarla hedefe ulaşırken, Şekil 8.11(b)'de fuzzy PID daha kontrollü bir çıkış ile kısa sürede kararlılığa ulaşmıştır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem yaklaşık 280 birim konumuna düşmektedir. PID kontrolcü aşağı yönlü geçişte kısa süreli bir negatif aşım (undershoot) ve ardından salınımlar üretmiştir. Şekil 8.11(c)'de Fuzzy PID kontrolcü ise daha hızlı ve daha az dalgalanma ile dengeye ulaşarak geçişi yumuşak bir şekilde tamamlamıştır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Bu noktada konum yaklaşık 490 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü bu ani yükselişte belirgin bir aşım ve ardından gelen salınımlar göstermektedir. Şekil 8.11(d)'de Fuzzy PID kontrolcü ise daha kısa sürede daha küçük aşım ile kararlılığa ulaşarak sistemin geçici rejimini daha iyi yönetmiştir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Sistem bu geçişte yaklaşık 420 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcü bu iniş sırasında dalgalanmalar sergilerken, Şekil 8.11(e)'de fuzzy PID daha yumuşak ve dengeli bir geçiş sağlamıştır.

Şekil 8.12'de,  $8^\circ$  direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_3$  için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

Sistem yaklaşık 190 birimlik bir başlangıç konumundan çalışmaya başlamaktadır. PID kontrolcüde belirgin bir aşım ve kısa süreli salınım gözlenirken, Şekil 8.12(a)'da fuzzy PID kontrolcü daha az aşım ile ve daha hızlı şekilde kararlılığa ulaşmaktadır. Fuzzy PID'in bu noktadaki daha kısa yerleşim süresi, sistemin ilk tepkisinde dahi daha istikrarlı bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu hız artışında sistemin konumu 320 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü belirgin bir aşım ve kısa süreli salınımlarla hedefe ulaşırken, Şekil 8.12(b)'de fuzzy PID daha dengeli bir çıkış göstermektedir. Bu durum, fuzzy PID'in geçici rejimi daha etkin yönettiğini ve sistemdeki titreşimleri daha iyi bastırdığını göstermektedir.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem, yaklaşık 260 birim seviyesine iniş yapmaktadır. PID kontrolcü bu aşağı yönlü geçişte negatif aşım (undershoot) ve ardından kısa süreli salınımlar sergilemiştir. Şekil 8.12(c)'de Fuzzy PID kontrolcü ise iniş sırasında daha hızlı bir şekilde dengeye ulaşmış ve bu geçişi daha yumuşak şekilde tamamlamıştır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Bu geçişle birlikte sistem, yaklaşık 450 birimlik konuma ulaşmaktadır. PID kontrolcü yüksek aşım ve salınımlar eşliğinde referans değere ulaşırken, Şekil 8.12(d)'de fuzzy PID kontrolcü daha az taşma ve daha az dalgalanma ile kararlılığa varmıştır. Bu, büyük yukarı yönlü geçişlerde fuzzy PID'in daha başarılı bir geçici rejim kontrolü sunduğunu göstermektedir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son geçişte sistem konumu yaklaşık 390 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcü bu noktada yine belirgin salınımlar sergilerken, Şekil 8.12(e)'de fuzzy PID daha kısa sürede ve daha yumuşak bir geçişle dengeye ulaşmıştır. Bu da iniş yönündeki referans değişimlerine fuzzy PID'in daha iyi uyum sağladığını göstermektedir.

Şekil 8.13’de, 8° direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_4$  için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcüde kısa süreli bir aşım ve zayıf bir salınım gözlenirken, Şekil 8.13(a)’da fuzzy PID kontrolcü daha az taşma ile daha hızlı bir şekilde kararlılığa ulaşmıştır. Fuzzy PID’in bu daha kısa yerleşim süresi, sistemin başlangıçta daha dengeli tepki verdiğini göstermektedir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu hız artışıyla sistemin konumu 350 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü bu noktada belirgin bir aşım ve kısa süreli salınımlar üretmektedir. Şekil 8.13(b)’de Fuzzy PID kontrolcü ise daha düşük aşım ile daha kısa sürede hedef konumda dengeye ulaşmaktadır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Bu aşamada sistem yaklaşık 280 birim konumuna iniş yapmaktadır. PID kontrolcü iniş sırasında kısa süreli negatif aşım (undershoot) ve ardından kısa salınımlar üretmiştir. Şekil 8.13(c)’de Fuzzy PID ise daha yumuşak ve hızlı bir geçiş sergileyerek kısa sürede kararlılığa ulaşmıştır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Sistem bu geçişle birlikte 480 birimlik konuma ulaşmaktadır. PID kontrolcü bu noktada yüksek aşım ve salınım göstermektedir. Şekil 8.13(d)’de Fuzzy PID ise bu büyük adım geçişinde daha kontrollü bir yükselişle, daha düşük taşma ve daha az dalgalanmayla dengeye gelmiştir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son hız geçişinde sistem yaklaşık 410 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcüde bu noktada yine belirgin dalgalanmalar gözlenmekte, Şekil 8.13(e)’de fuzzy PID ise daha kısa sürede ve daha az salınımla dengeye ulaşmaktadır. Bu durum fuzzy PID’in iniş

yönündeki referans değişimlerine PID kontrolcüye kıyasla daha iyi uyum sağladığını göstermektedir.

Şekil 8.14’de, 8° direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_5$  için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcüde hafif bir aşım ve küçük salınımlar görülmektedir. Şekil 8.14(a)’da Fuzzy PID kontrolcü ise daha düşük aşım ve daha hızlı bir yerleşim süresi ile daha dengeli bir başlangıç tepkisi sergilemiştir. Bu durum fuzzy PID’in sistemin ilk hareketinde daha hızlı ve kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu geçişte sistem konumu yaklaşık 320 birime yükselmektedir. PID kontrolcü bu artışta dikkat çeken bir aşım ve geçici rejim salınımları üretmektedir. Şekil 8.14(b)’de Fuzzy PID kontrolcü ise daha düşük aşım ve daha kısa sürede yerleşim göstererek daha dengeli bir kontrol sağlamıştır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem yaklaşık 260 birim seviyesine iniş yapmaktadır. PID kontrolcü negatif aşım ve kısa süreli salınımlar göstermektedir. Şekil 8.14(c)’de Fuzzy PID ise daha yumuşak bir iniş ve daha hızlı yerleşim ile bu geçişi daha istikrarlı bir şekilde tamamlamıştır. Bu, fuzzy PID’in hız azalışlarındaki performans üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Sistem yaklaşık 450 birim seviyesine ulaşmaktadır. PID kontrolcü bu adımda belirgin bir aşım ve dalgalanma üretmektedir. Şekil 8.14(d)’de Fuzzy PID ise daha kısa sürede ve daha az taşma ile dengeye gelmiştir.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son geçişte sistem yaklaşık 390 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcü bu inişte

küçük çaplı salınımlar üretmektedir. Şekil 8.14(e)'de Fuzzy PID ise daha düşük salınım ve daha kısa sürede kararlılık göstererek sistemin bu geçişte daha hızlı stabilize olmasını sağlamıştır.

Şekil 8.15'de,  $8^\circ$  direksiyon açısı altında iki akstan yönlendirmeli bir elektrikli taşıtın  $n_6$  için klasik PID ve fuzzy PID kontrol algoritmalarına ait sistem yanıtları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Başlangıç Durumu (a noktası – 30 km/s)

PID kontrolcüde hafif bir aşım ve kısa süreli salınımlar gözlenirken, Şekil 8.15(a)'da fuzzy PID kontrolcü daha kısa sürede ve daha az aşım ile dengeye ulaşmaktadır. Fuzzy PID'in bu noktadaki daha hızlı yerleşim süresi, sistemin ilk tepkisinde dahi daha dengeli bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

İkinci Hız Geçişi (b noktası – 50 km/s)

Bu hız artışında sistemin konumu 360 birim seviyesine yükselmektedir. PID kontrolcü belirgin bir aşım ve kısa süreli salınımlar ile hedefe ulaşırken, Şekil 8.15(b)'de fuzzy PID daha kontrollü ve yumuşak bir çıkış sergileyerek daha kısa sürede kararlılığı sağlamıştır.

Üçüncü Hız Geçişi (c noktası – 40 km/s)

Sistem, yaklaşık 270 birim seviyesine iniş yapmaktadır. PID kontrolcü bu düşüşte kısa süreli bir negatif aşım ve ardından gelen salınımlar sergilemiştir.

Dördüncü Hız Geçişi (d noktası – 70 km/s)

Bu geçişle birlikte sistem, yaklaşık 480 birimlik konuma ulaşmaktadır. PID kontrolcü yüksek aşım ve dalgalanma ile referans değere ulaşırken, Şekil 8.15(d)'de fuzzy PID daha hızlı ve daha az dalgalanma ile kararlılığa ulaşmıştır.

Beşinci Hız Geçişi (e noktası – 60 km/s)

Son geçişte sistem konumu yaklaşık 410 birim seviyesine düşmektedir. PID kontrolcü bu noktada gözle görülür salınımlar gösterirken, Şekil 8.15(e)'de fuzzy PID daha kısa sürede ve yumuşak bir şekilde dengeye ulaşmıştır.

**Çizelge 4.15** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel Sonuçları

Direksiyon		Matematik Modelin Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	201.462	201.462
1	200.449	202.526	200.429	202.506	200.418	202.495
2	199.488	203.641	199.408	203.564	199.364	203.520
3	198.580	204.808	198.400	204.634	198.299	204.536
4	197.725	206.024	197.404	205.716	197.223	205.543
5	196.924	207.292	196.419	206.812	196.135	206.542
6	196.178	208.609	195.447	207.921	195.034	207.533
7	195.488	209.976	194.486	209.044	193.921	208.517
8	194.855	211.393	193.538	210.180	192.793	209.495
9	194.279	212.861	192.601	211.331	191.651	210.465
10	193.762	214.379	191.677	212.496	190.495	211.430
11	193.306	215.947	190.766	213.677	189.322	212.389
12	192.911	217.567	189.867	214.872	188.133	213.342
13	192.579	219.237	188.981	216.084	186.927	214.289
14	192.311	220.959	188.108	217.311	185.702	215.232
15	192.109	222.734	187.249	218.556	184.459	216.170

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 4.16** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan PID Kontrol Sonuçları

Direksiyon		PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	46.671	46.671	46.671	46.671	46.671	46.671
1	45.843	46.320	45.832	46.314	45.836	46.313
2	45.571	46.520	45.547	46.504	45.544	46.494
3	45.325	46.771	45.286	46.732	45.254	46.710
4	45.166	47.060	45.091	46.999	45.044	46.965
5	44.889	47.265	44.775	47.160	44.710	47.086
6	44.729	47.441	44.561	47.333	44.466	47.263
7	44.525	47.729	44.295	47.521	44.167	47.403
8	44.285	47.993	43.985	47.721	43.816	47.568
9	44.098	48.296	43.717	47.952	43.504	47.752
10	43.973	48.632	43.498	48.208	43.231	47.964

**Çizelge 4.17(Devamı) 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan PID Kontrol Sonuçları**

Direksiyon	PID Kontrolün Sonuçları						
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
11		43.879	48.989	43.302	48.479	42.976	48.188
12		43.767	49.346	43.084	48.738	42.689	48.393
13		43.695	49.719	42.881	49.008	42.412	48.602
14		43.632	50.112	42.680	49.284	42.136	48.811
15		43.572	50.503	42.465	49.558	41.839	49.014

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de, taşıtın 0.017. saniyede 30 km/s sabit hızla hareket ettiği durumda, altı tekerleğe ( $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ ) ait yönlendirme açıları, sırasıyla matematiksel model ve PID kontrolör ile elde edilen sonuçlara göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu analiz, klasik hesaplama yöntemleriyle geliştirilen yönlendirme stratejileri ile PID temelli kontrol sistemlerinin dinamik yanıtlarının kıyaslanması açısından önem arz etmektedir.

Direksiyon açısı sıfır olduğunda, her iki yöntemde de tüm tekerlekler için başlangıçta eşit yönlendirme açıları gözlemlenmiştir. Matematiksel modelde bu değer 201.4620 olarak hesaplanırken, PID kontrolör için bu değer 46.6719 olarak daha düşük seviyede kalmıştır. Bu fark, PID kontrol yapısının çıkış sinyalinin sınırlayıcı kazançlar, ölçekleme faktörleri ya da belirli bir doygunluk eğrisi ile şekillendirdiğini ve başlangıç koşullarında daha yumuşak bir tepki sunduğunu göstermektedir.

Direksiyon açısının artırılmasıyla birlikte, matematiksel modeldeki yönlendirme açılarında belirgin ve kademeli bir farklılaşma gözlemlenmiştir. Dışta kalan sağ ön tekerlek ( $n_2$ ), 202.5263 değerinden başlayarak 217.5670 seviyesine kadar ulaşırken, içte kalan sol orta tekerlek ( $n_3$ ) 200.4294’ten 189.8672’ye kadar azalmıştır. Aynı şekilde  $n_6$  tekerleği de 203.5203’ten 213.3421’e yükselmiştir. Bu değerler, matematiksel modelin dönüş geometrisine uygun olarak dış tekerleklerin daha büyük açıyla, iç tekerleklerin ise daha dar açıyla yönlendirildiğini göstermektedir. Yönlendirme farkının direksiyon açısına bağlı olarak lineer biçimde artması, modelin simetrik dönüş prensiplerini izlediğini ortaya koymaktadır.

PID kontrolör verileri ise daha yumuşak geçişli ve sönümlü bir kontrol karakteristiği sergilemektedir. Direksiyon açısı 1 olduğunda  $n_2$  tekerleği sadece 46.3208,  $n_3$  ise 45.8321 değerine ulaşmıştır. Direksiyon açısı 8 olduğunda bu fark artmakla birlikte hâlen sınırlı düzeydedir:  $n_2$  değeri 47.9933,  $n_3$  değeri ise 43.9851 olarak kaydedilmiştir. Bu durum, PID kontrol sisteminin dış tekerleklerdeki açı artışını daha kontrollü gerçekleştirdiğini, iç tekerleklerdeki düşüşleri ise ani şekilde değil, kademeli olarak uyguladığını göstermektedir. Benzer şekilde  $n_6$  tekerleği 47.5687 değerine ulaşırken,  $n_5$  yalnızca 43.8163 seviyesinde kalmıştır. Bu, PID kontrolörün özellikle simetrik sapmaları sönümlediğini ve yönlendirme sistemini ani değişimlerden koruduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, PID kontrolör yapısı, matematiksel modele kıyasla daha dengeleyici, uyumlu ve güvenli bir yönlendirme karakteristiği sunmaktadır. Direksiyon açısının artmasıyla birlikte, matematiksel modeldeki gibi büyük farklar oluşmak yerine, PID kontrolör daha sönümlü bir geçiş sağlayarak taşıtın yönlendirme stabilitesini korumaktadır.

**Çizelge 4.18** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrol Sonuçları

Direksiyon Açısı	Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları					
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	202.238	202.238	202.238	202.238	202.238	202.238
1	201.027	203.452	201.003	203.430	200.991	203.417
2	199.874	204.694	199.779	204.610	199.726	204.561
3	198.814	205.922	198.612	205.746	198.495	205.645
4	197.870	207.052	197.535	206.784	197.350	206.626
5	197.050	207.944	196.556	207.647	196.283	207.455
6	196.324	208.384	195.630	208.238	195.239	208.076
7	195.669	208.400	194.717	208.400	194.169	208.376
8	195.069	208.398	193.794	208.398	193.052	208.398
9	194.517	208.404	192.859	208.404	191.895	208.404
10	194.014	208.401	191.922	208.401	190.718	208.401
11	193.564	208.397	190.994	208.397	189.532	208.397
12	193.170	208.404	190.082	208.404	188.340	208.404
13	192.836	208.396	189.189	208.396	187.135	208.396

**Çizelge 4.19(Devamı)** 0.017. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrol Sonuçları

Direksiyon	Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları						
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<b>14</b>		192.565	208.389	188.315	208.389	185.913	208.389
<b>15</b>		192.361	208.389	187.457	208.389	184.668	208.389

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

Başlangıçta, Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere, tüm tekerlekler eşit yönlendirme açıları uygulanmış ve bu durumda Fuzzy PID kontrolör tüm tekerlekler için 202.2380 değeri üretmiştir. Bu eşitlik, sistemin başlangıç koşullarındaki denge durumunu yansıtırken, Fuzzy PID kontrolörün sisteme hızlı ve simetrik bir tepki verdiğini göstermektedir. Bu durum, kontrolörün başlangıçta tüm tekerlekler eş zamanlı bir yönlendirme tepkisi sunduğunu ortaya koymaktadır.

Direksiyon açısı arttıkça, özellikle dış kısımda kalan ön sağ ( $n_2$ ), orta sağ ( $n_4$ ) ve arka sağ ( $n_6$ ) tekerleklerde yönlendirme açıları belirgin şekilde artmaktadır. Örneğin  $n_2$  tekerleği, 202.2380’den başlayarak 208.4045 değerine kadar yükselmiştir. Benzer şekilde,  $n_4$  ve  $n_6$  tekerleklerinde de sırasıyla 208.4045 ve 208.4045 değerlerine ulaşılmıştır. Bu artış, yönlendirme sisteminin klasik dönüş geometrisine uygun olarak dış tekerlekler daha fazla yön verme eğilimini sergilemektedir.

Buna karşılık, iç kısımda yer alan ön sol ( $n_1$ ), orta sol ( $n_3$ ) ve arka sol ( $n_5$ ) tekerleklerde yönlendirme açıları kademeli olarak azalmıştır.  $n_1$  değeri 202.2380’den 193.1702 seviyesine,  $n_3$  değeri 190.0820’ye ve  $n_5$  değeri 188.3400’e kadar düşmüştür. Bu farklılık, Fuzzy PID kontrolörün klasik Ackermann tipi yönlendirme geometrisine uyum sağladığını ve sistemin iç-dış tekerlek ayrımını dikkate alarak yönlendirme açılarını optimize ettiğini göstermektedir.

Ayrıca, 8. adımdan itibaren özellikle sağ taraftaki tekerleklerde ( $n_2$ ,  $n_4$ ,  $n_6$ ) yönlendirme açıları 208.3986–208.4047 aralığında sabitlemiş görünmektedir. Bu sabitleme, Fuzzy PID kontrolörün belli eşik değerlerinden sonra yönlendirme açılarında kararlı bir denge sağladığını ve sistemi gereksiz kontrol değişimlerinden koruduğunu göstermektedir. Benzer şekilde,  $n_1$ ,  $n_3$  ve  $n_5$  tekerleklerinde de yönlendirme değerlerinin giderek azalan

bir hızla düştüğü ve 193.1702, 190.0820 ve 188.3400 değerlerine sabitlendiği görülmektedir.

Fuzzy PID kontrolör, klasik modele kıyasla daha dengeli, yumuşak geçişli ve adaptif bir yönlendirme karakteristiği sergilemektedir. Özellikle geçici rejimlerde (örneğin direksiyon açısı 3–7 arasında), kontrolör ani değişimleri sönümleyerek daha lineer ve kararlı bir geçiş sağlamaktadır. Bu özellik, iki akstan yönlendirmeli sistemlerde tüm tekerleklerin senkronize şekilde kontrol edilmesi açısından büyük bir avantaj sunmaktadır.

**Çizelge 4.20** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Matematiksel Sonuçları

Direksiyon		Matematik Modelin Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	201.462	201.462	201.462	201.462	201.462	201.462
1	200.449	202.526	200.429	202.506	200.418	202.495
2	199.488	203.6419	199.408	203.564	199.364	203.520
3	198.580	204.808	198.400	204.634	198.299	204.536
4	197.725	206.024	197.404	205.716	197.223	205.543
5	196.924	207.292	196.419	206.812	196.135	206.542
6	196.178	208.609	195.447	207.921	195.034	207.533
7	195.488	209.976	194.486	209.044	193.921	208.517
8	194.855	211.393	193.538	210.180	192.793	209.495
9	194.279	212.861	192.601	211.331	191.651	210.465
10	193.762	214.379	191.677	212.496	190.495	211.430
11	193.306	215.947	190.766	213.677	189.322	212.389
12	192.911	217.567	189.867	214.872	188.133	213.342
13	192.579	219.237	188.981	216.084	186.927	214.289
14	192.311	220.959	188.108	217.311	185.702	215.232
15	192.109	222.734	187.249	218.556	184.459	216.170

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 4.21** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon		PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	207.586	207.586	207.586	207.586	207.586	207.586
1	205.254	207.374	205.236	207.363	205.224	207.350
2	204.243	208.483	204.158	208.422	204.121	208.370
3	203.295	209.664	203.118	209.490	203.009	209.390
4	202.420	210.908	202.092	210.605	201.911	210.416
5	201.600	212.214	201.082	211.716	200.784	211.440
6	200.821	213.553	200.089	212.857	199.668	212.458
7	200.121	214.952	199.096	214.009	198.516	213.468
8	199.463	216.399	198.123	215.162	197.354	214.460
9	198.880	217.916	197.160	216.352	196.190	215.448
10	198.357	219.467	196.221	217.535	195.012	216.440
11	197.886	221.074	195.295	218.745	193.818	217.427
12	197.480	222.726	194.365	219.960	192.589	218.385
13	197.139	224.430	193.451	221.212	191.352	219.367
14	196.869	226.190	192.574	222.472	190.090	220.331
15	196.673	228.028	191.695	223.743	188.830	221.304

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 4.22** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon		Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	201.675	201.675	201.675	201.675	201.675	201.675
1	200.660	202.741	200.640	202.721	200.629	202.710
2	199.697	203.859	199.617	203.781	199.573	203.737
3	198.787	205.027	198.607	204.853	198.506	204.755
4	197.930	206.247	197.609	205.938	197.427	205.764
5	197.128	207.516	196.622	207.036	196.337	206.765
6	196.381	208.836	195.648	208.147	195.234	207.758
7	195.689	210.206	194.685	209.272	194.118	208.744
8	195.054	211.626	193.735	210.410	192.989	209.724
9	194.478	213.096	192.797	211.563	191.845	210.696
10	193.960	214.617	191.871	212.731	190.685	211.662

**Çizelge 4.23** 1. Saniyede Taşıtın Hızı 30 km/h iken Tekerleklerin Hesaplanan Fuzzy PID Kontrolör Sonuçları

Direksiyon Açısı	Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları					
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
11	193.502	216.188	190.957	213.913	189.510	212.623
12	193.107	217.810	190.056	215.111	188.319	213.578
13	192.774	219.484	189.169	216.325	187.110	214.527
14	192.505	221.209	188.294	217.555	185.883	215.472
15	192.303	222.987	187.433	218.801	184.637	216.411

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.

1. saniyede taşıtın sabit 30 km/h hızla hareket ettiği durum için elde edilen yönlendirme açıları, Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14'te sırasıyla matematiksel model, klasik PID kontrolör ve fuzzy PID kontrolör yöntemleriyle sunulmuştur. Bu üç farklı yöntem, direksiyon açısına bağlı olarak altı tekerlekte ( $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ ) oluşan yönlendirme açılarını karşılaştırmalı olarak analiz etmek amacıyla değerlendirilmiştir.

Matematiksel model sonuçları Çizelge 4.13'de verilmiştir. Ackerman prensiplerine göre oluşturulmuştur. Direksiyon açısı sıfır olduğunda, tüm tekerleklerde yönlendirme açısı eşit olup  $201.4620^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Direksiyon açısı arttıkça, dışta kalan tekerleklerde yönlendirme açılarında artış, içte kalanlarda ise azalış meydana gelmektedir. Örneğin,  $8^\circ$  direksiyon açısında sol ön tekerlek  $n_1$ 'in açısı  $194.8551^\circ$ , sağ ön tekerlek  $n_2$ 'nin açısı ise  $211.3939^\circ$ 'dir. Bu değerler, dönüş geometrisine uygun olarak yönlendirme açılarının tekerlek konumuna göre kademeli biçimde ayarlandığını göstermektedir.

PID kontrolör sonuçları Çizelge 4.14'de incelendiğinde, başlangıçta tüm tekerlekler için  $207.5865^\circ$  gibi yüksek bir yönlendirme açısı üretildiği görülmektedir. PID yapısının, hata sinyalini hızlı şekilde azaltma eğilimi nedeniyle daha agresif bir tepki verdiği gözlemlenmiştir.  $8^\circ$  direksiyon açısında  $n_1$  tekerleği  $199.4639^\circ$ ,  $n_2$  ise  $216.3996^\circ$  değerine ulaşmaktadır. Bu değerler matematiksel modele göre daha yüksektir. Ayrıca PID kontrolörün dış ve iç tekerlekler arasında oluşturduğu yönlendirme farkı daha asimetriktir. Bu durum, yüksek hızlarda ya da ani dönüşlerde taşıtın yönlendirme dengesini olumsuz etkileyebilecek sapmalara yol açabilir.

Fuzzy PID kontrolör sonuçları Çizelge 4.15’de daha dengeli bir yönlendirme karakteristiği sunmaktadır. Başlangıçta tüm tekerlekler için hesaplanan yönlendirme açısı  $201.6750^\circ$  olup, bu değer matematiksel modele oldukça yakındır. Direksiyon açısı arttıkça fuzzy PID kontrollü sistemde de tekerlekler arasında beklenen yönlendirme farkları oluşmaktadır.  $8^\circ$  direksiyon açısında  $n_1$  tekerleği  $195.0548^\circ$ ,  $n_2$  ise  $211.6263^\circ$  değerini almaktadır. Bu değerler, hem yönlendirme farkının korunmasını hem de ani sapmaların önlenmesini sağlamaktadır.

Üç yöntemin karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği  $8^\circ$  direksiyon açısında,  $n_1$  ve  $n_2$  tekerlekleri arasındaki yönlendirme farkları göz önünde bulundurulduğunda; matematiksel model:  $16.5388^\circ$ , PID kontrolör:  $16.9357^\circ$ , fuzzy PID kontrolör:  $16.5715^\circ$  olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma, fuzzy PID kontrolörün klasik PID yapısına göre matematiksel modele daha yakın bir yönlendirme senkronizasyonu sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Fuzzy PID kontrolör, dış ve iç tekerlekler arasındaki yön farklarını daha uyumlu biçimde düzenleyerek tekerlekler arası koordinasyonu korumakta, sistemin kararlılığını ve yol tutuşunu iyileştirmektedir.

Sonuç olarak, klasik PID kontrolör hata sinyaline hızlı yanıt verme eğilimi nedeniyle daha büyük yönlendirme farkları oluştururken, fuzzy PID kontrol yapısı, daha yumuşak geçişler ve kontrollü tepkiler üreterek tekerlekler arası yön farklarını minimize etmekte ve matematiksel modele daha yakın değerler üretmektedir. Bu da özellikle çok akstan yönlendirmeli sistemlerde yönlendirme doğruluğunu artırarak taşıt dinamiğini olumlu yönde etkilemektedir.

6x6 bir taşıtın iki akstan kontrolü için direksiyon açısının  $0^\circ$ ’den  $15^\circ$ ’ye kadar olan bilgileri ekler kısmında Çizelge 8.17’den Çizelge 8.24’e kadar verilmiştir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, çok akstan yönlendirmeli elektrikli taşıtlarda kullanılan Elektronik Diferansiyel Sisteminin (EDS), klasik PID kontrolü ile Bulanık Mantık tabanlı PID (Fuzzy PID) kontrol yaklaşımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Geliştirilen modeller, MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiş ve farklı hızlarda, farklı direksiyon açıları için analizler yapılmıştır. Elde edilen bulgular, sistemin dinamik ve kararlı davranışlarını derinlemesine değerlendirme olanağı sunmuştur.

Yapılan analizlerde, klasik PID kontrolcü, daha yüksek oranda yönlendirme tepkisi vermekte; ancak bu agresif yapı, bazı senaryolarda sistemde aşırı sapmalara ve tekerlekler arası koordinasyon kaybına neden olabilmektedir. Buna karşın fuzzy PID kontrolcü,  $8^\circ$  direksiyon açısında sol ön tekerlek ( $n_1$ ) ile sol arka tekerlek ( $n_4$ ) arasındaki yön farkını  $14.48^\circ$  seviyesinde tutarak, PID kontrolcüye göre daha dengeli bir yönlendirme sağlamıştır. Her ne kadar yön farkı küçük olsa da, özellikle yüksek hızlarda bu tür sapmalar taşıtın stabilitesi üzerinde doğrudan etkili olabilmekte; dolayısıyla fuzzy PID kontrolcü daha yumuşak ve kontrollü bir sürüş karakteristiği sunmaktadır.

Taşıt hız geçişlerinde de kontrolcülerin performansı karşılaştırılmıştır. 30 km/h, 50 km/h, 40 km/h, 70 km/h ve 60 km/h gibi artan ve azalan hız senaryolarında, fuzzy PID kontrolcü klasik PID kontrolcüye kıyasla daha kısa yerleşme süresi ve daha düşük aşım değeri ile sistemin daha hızlı kararlı hale gelmesini sağlamıştır. Örneğin, 70 km/h'ye geçişte PID kontrolcünde belirgin bir aşım ve dalgalanma gözlemlenirken, fuzzy PID kontrolcü daha yumuşak bir geçişle hedef değere ulaşmıştır.

İki akstan yönlendirmeli 4x4 taşıt modelinde de benzer eğilimler tespit edilmiştir. Direksiyon açısı  $8^\circ$  olduğunda, fuzzy PID ile kontrol edilen sistemde tüm tekerleklerin yönlendirme değerleri arasında daha düşük farklar oluşmuştur. Bu durum, aracın dönüş sırasında daha stabil ve uyumlu bir hareket gerçekleştirmesine olanak tanımıştır.

İki akstan yönlendirmeli 6x6 taşıt konfigürasyonu için yapılan simülasyonlarda ise, fuzzy PID kontrolcünün özellikle geçici rejim sürecinde daha başarılı sonuçlar verdiği

belirlenmiştir.  $15^\circ$  direksiyon açısı ve 60 km/h hız durumunda, fuzzy PID ile tekerlek hızlarında maksimum sapma  $3.5^\circ$  seviyesinde sınırlı kalırken, PID kontrolör ile bu sapma yaklaşık  $5.2^\circ$  seviyesine çıkmıştır. Bu da fuzzy PID kontrolcünün taşıt dinamiğinde daha yüksek hassasiyet ve kararlılık sunduğunu göstermektedir.

Fuzzy PID kontrol sistemi ile birlikte; aşım miktarını ortalama %20 azaltarak, kontrol sisteminin daha az enerji harcamasını sağlamıştır. Yerleşme süresini ortalama %30 kısaltarak hızlı geçici rejim performansı sunmuştur. Tekerlekler arası yön farklarını dengeleyerek, viraj performansını ve lastik ömrünü artırmıştır. Sistem salınımlarını baskılayarak hem sürüş konforunu hem de güvenliği artırmıştır.

Sonuç olarak, klasik PID kontrol yapısı genel anlamda kabul edilebilir bir yön kontrol başarısı sunmakla birlikte, ani geçişlerde ve yüksek hızlarda sistemin kararlılığını koruma noktasında yetersiz kalmıştır. Bulanık mantık temelli PID kontrol yaklaşımı ise sistemin doğrusal olmayan doğasına daha uygun bir çözüm sunarak, tekerlek hızlarını daha hassas ve uyumlu biçimde kontrol edebilmiştir.

Simülasyon ortamında yapılan analizlerde, Fuzzy PID kontrolörünün ortalama tepki süresi yaklaşık 0.07 saniye, klasik PID kontrolörün ise yaklaşık 0.9 saniye olarak ölçülmüştür. Ancak, gerçek zamanlı uygulamalarda DC motorların bu denli kısa sürelerde tepki verebilmesi pratikte mümkün olmayabilir. Bu nedenle, sistemin fiziksel sınırlamaları göz önünde bulundurularak, kontrol parametrelerinin gerçek uygulamalarda yeniden ayarlanması gerekebilir. Alternatif olarak, mevcut parametrelerle elde edilen tepki süreleri, uygulamanın dinamik ihtiyaçlarını karşılıyorsa, bu süreler de kabul edilebilir düzeyde değerlendirilebilir. Bu doğrultuda, gelecekteki çalışmalarda, gerçek zamanlı donanım üzerinde kontrolcü performansının test edilmesi ve parametre optimizasyonunun fiziksel koşullara göre yeniden yapılandırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, taşıt hızı ve direksiyon açısı ayrı ayrı sabitlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak gerçek sürüş koşullarında, taşıt hızı ve direksiyon açısı genellikle aynı anda ve sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda, hem taşıt hızının hem de direksiyon açısının aynı anda değiştirildiği daha

karmaşık ve gerçekçi senaryoların dikkate alınması önerilmektedir. Bu tür bir analiz, kontrolcünün dinamik koşullar altındaki performansını değerlendirmek açısından daha kapsamlı sonuçlar sağlayacak ve sistemin gerçek zamanlı kararlılığı ile tepkiselliği hakkında daha doğru çıkarımlar yapılmasına imkân tanıyacaktır.

Bu bağlamda, geliştirilen fuzzy PID tabanlı elektronik diferansiyel sistemin özellikle taktiksel insansız kara araçları ve otonom elektrikli taşıtlar gibi yüksek manevra kabiliyeti ve enerji verimliliği gerektiren platformlarda uygulanabilirliği oldukça yüksektir. Gelecek çalışmalarda bu yapı, gerçek zamanlı sistemler üzerinde test edilerek, sensör füzyonu ve yapay zekâ destekli adaptif kontrol algoritmaları ile zenginleştirilebilir. Ayrıca, yol tutuş sensörleri, kayma tespiti ve tork vektörleme gibi gelişmiş kontrol stratejileriyle entegre edilerek, sistemin otomotiv uygulamalarındaki başarımı daha da artırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abas N, Kalair A, Khan N, 2015, Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies, *Futures*, 69, 31–49, doi:10.1016/j.futures.2015.03.003.
- Acar C, 2013, Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi ve Batarya Modelleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.
- Ahmed SA, Zhou S, Tsegay AS, Zhu Y, Malik A, Ahmad N, Legese Z, 2020, Effects of CO<sub>2</sub> Ratio in Biogas on Performance, Combustion and Emissions of a Dual-Fuel Diesel Engine, *International Energy Journal*, 20, 15–38.
- Akbıyık E, 2018, Şehir İçi Günlük Kullanım İçin Bir Taşıtın Enerji İhtiyacının Tespiti ve Elektrik Motorlu Tahrikli Haline Dönüştürülmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 147s, İzmir.
- Aki K, Dirik AE, 2020, Derin Öğrenme Tabanlı ve PID Kontrol Tabanlı Sürücüsüz Araç Sistemleri, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(5), 306–316, doi:10.21923/jesd.829598.
- Aksoy, B., 2021, Bulanık PID ve Ziegler–Nichols Yöntemi ile Ayarlanmış PID Kontrolörlerinin Performans Karşılaştırması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s, Afyonkarahisar.
- Alaca E, 2023, Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Motorların Dinamik Modellenmesi, Karşılaştırılması ve Hata Durumunda Analizi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 139s, İstanbul.
- Al-Fiky HT, Asfoor MS, Yacoub MI, Sharaf AM, 2019, *Electronic differential optimization for electric vehicle full model for in-wheel permanent magnet brushless DC motors*, 2019 IEEE 7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), IEEE, 15–20. doi:10.1109/ICCMA46720.2019.8988695.
- Altan N, 2012, Güneş Pili ve Hidrojen Yakıt Pilinden Beslenen Küçük Bir Elektrikli Araç İçin Batarya Şarj Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Ankara.

- Ang KH, Chong G, Li Y, 2005, PID Control System Analysis, Design, and Technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559–576.
- Arslan E, 2018, Sınırlı Kaymalı Diferansiyel Sistemlerinin Simülasyon ve Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, İzmir.
- Arslan M, 2017, Elektrikli Araçlarda Haberleşme Protokollerinin Karşılaştırmalı Analizi, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, 85s, İstanbul.
- Astrom, K. J., Hagglund, T., 2004, Revisiting the Ziegler–Nichols Step Response Method for PID Control, *Journal of Process Control*, 14(6), 635–650.
- Ates A, Alagöz BB, Yeroğlu C, Alisoy H, 2015, Sigmoid Based PID Controller Implementation for Rotor Control, *2015 European Control Conference (ECC)*, 458–463.
- Ateşova M, 2014, Zaman Gecikmeli Sistemler İçin Kural Kaydırma Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, İstanbul.
- Awaili KAS, 2020, Improving Energy Efficiency of Electric and Hybrid Electric Vehicles Using Computer Aided Design, Karabük University, Graduate School of Education, Doctoral Thesis, 154p, Karabük.
- Aydın E, 2014, Elektrikli Araçlarda CAN-BUS ve LIN Protokollerinin Entegrasyonu, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, 90s, Konya.
- Aykaç CB, 2019, Elektrikli Taşıtlardaki Enerji Depolama ve Dağıtım Sistemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İstanbul.
- Aykaç CB, Yiğit K, Acarkan B, 2021, Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Elektrik Motoru Türleri: Avantajları ve Dezavantajları, *International Congress of Engineering and Natural Sciences (ICENSS 2021)*, ISBN: 978-605-06728-8-6.
- Bahri A, Gupta A, Ji F, 2014, Performance Enhancement of Electronic Differential in Electric Vehicles Using a Novel Wavelet Controller, 2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 152–157, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), doi:10.1109/ICVES.2014.7063740.

- Barın A, Bingöl M, Karaaslan MH, 2021, Türkiye’deki Elektrikli Otomobil Markalarının Pazarlama İletişimi Kanalı Olarak Youtube Gönderilerinin İncelenmesi, *Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 78–107.
- Başer E, 2016, Elektrikli Taşıtlarda Yol Koşullarına Uygun Motor Seçimi Algoritması Geliştirme, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Düzce.
- Baygüneş B, 2019, Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Konya.
- Bayram H, 2020, Elektrikli Taşıtlar İçin İklimlendirme Sistemlerinde Performans ve Enerji Kullanımı Açısından İyileştirme Yöntemlerinin Araştırılması, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 138s, Bursa.
- Bayram M, 2016, Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Teknolojileri ve Enerji Yönetimi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Kayseri.
- Berber A, Alkhraisha A, Gastli A, Meskin N, 2022, A Matlab/Simulink Model for Electric Vehicle with Four Independent In-Wheel Drive and Steering, *3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, doi:10.1109/SGRE53517.2022.9774268.
- Boyalı A, 2008, Hibrit Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi ve Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 160s, İstanbul.
- Burha M, 2021, İki Akstan Dümenlenen Üç Akslı Özel Maksatlı Bir Taşıtlın Direksiyon Mekanizmasının Kinematik Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İstanbul.
- Can MS, Ercan H, 2022, Real-Time Tuning of PID Controller Based on Optimization Algorithms for a Quadrotor, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(3), 418–430.
- Cebeci H, 2020, Elektrikli Bir Taşıtlın Matlab/Simulink’te Modellenmesi ve Simülasyonu, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Lisans Tezi, 111s, Ankara.

- Clavero-Ordóñez L, Fernández-Ramos J, Gago-Calderón A, 2018, Electronic Differential System for Light Electric Vehicles with Two Inwheel Motors, *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 16, 325–329.
- Çelik H, 2017, Aktif Diferansiyel Sistemlerinin Kontrol Algoritmaları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Trabzon.
- Çelik H, 2019, Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetim Sistemlerinin Tasarımı ve Optimizasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Doktora Tezi, 180s, İstanbul.
- Çelik İ, 2019, Elektrikli Bir Araç İçin Elektronik Diferansiyel Simülasyonunun Modellenmesi ve Gerçek Zamanlı Uygulanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Afyonkarahisar.
- Çelik M, 2018, Dizel Motorlarda Performans ve Egzoz Emisyonlarının n-Hexadecane Katkı Maddesi ile İyileştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 21(3), 701–706, doi:10.2339/politeknik.400182.
- Çetin MS, Güler H, Gençoğlu MT, 2021, Fuzzy Logic Based Battery Control System Design for Electric Vehicles, *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 6–8 Ekim 2021, Elazığ, Türkiye, 1–4, IEEE.
- Çetinkaya S, 2015, *Taşıt Mekaniği*, Nobel Yayın Dağıtım, 310s, Ankara.
- Çolak İ, Demirbaş Ş, 2018, Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye.
- Daya FJL, Sanjeevikumar P, Blaabjerg F, Wheeler PW, Olorunfemi Ojo J, Ertaş AH, 2016, Analysis of Wavelet Controller for Robustness in Electronic Differential of Electric Vehicles: An Investigation and Numerical Developments, *Electrical Power Components and Systems*, 44, 763–773, doi:10.1080/15325008.2015.1131771.
- De Castro RP, Oliveira HS, Soares JR, Cerqueira NM, Araujo RE, 2007, A New FPGA Based Control System for Electrical Propulsion with Electronic Differential, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, IEEE, 1–10.

- Demir M, 2021, Elektrikli Araçlarda Güç Dağıtım Sistemlerinin Analizi, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(2), 45–52.
- Demir S, 2015, Elektrikli Araçlarda Diferansiyel Sistemlerinin Performans Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, İstanbul.
- Demir U, Aküner MC, 2018, Elektrikli Bir Araç İçin Tekerlek İçi Asenkron Motorun Tasarım ve Optimizasyonu, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1517–1530.
- Demir Y, 2021, Özgün Bir Sargı Yapısı Yaklaşımı ile Dokuz Fazlı Dengesiz ve Asimetrik Sargılı Yüzey ve Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorların Elektrikli Taşıt Uygulaması İçin Tasarımı, Modellenmesi ve Deneysel Doğrulanması, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 197s, Kocaeli.
- Dikmen İC, 2022, Elektrikli Araçlar İçin Akıllı Batarya Yönetim Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 130s, Malatya.
- Doğan R, 2013, Elektrikli Araçlarda Alçak Gerilim Sistemlerinin Tasarımı ve Uygulaması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, İzmir.
- Doğan R, Aksoy E, 2022, Elektrikli Araçlarda Tork Vektörlendirme Sistemlerinin Uygulama Alanları, *Uluslararası Otomotiv Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye.
- Draou A, 2013, Electronic Differential Speed Control for Two In-Wheels Motors Drive Vehicle, *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 764–769, IEEE, İstanbul.
- Durmaz M, Cici K, Sarıkaya M, Bilici M, Bilgiç HH, 2013, Metaheuristic Algorithm-Based Cascade PID Controller Design for Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle, *European Mechanical Science*, 7(4), 230–237.
- Elmalı N, Çetin E, Yaz M, 2021, Elektrikli Araçlar İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Uygulama Örneği, *İLK Bildiriler Konferansı*, Ankara, Türkiye.

- Emhemed AA, Mamat RB, 2012, Modelling and Simulation for Industrial DC Motor Using Intelligent Control, *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, Procedia Engineering*, 41, 420–425.
- Emikönel S, 2019, Güneş Enerji Tesisleri İçin Bulanık Mantık Kontrollü Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmasının Geliştirilmesi ve İncelenmesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 103s, Nevşehir.
- Erbaş S, 2017, Yeni Teknolojilerin Sürdürülebilir Toplu Taşımacılıkta Kullanımının Önemi: Hibrid Elektrikli Taşıt Kullanımının Fayda-Maliyet Analizi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, İstanbul.
- Eren S, 2018, Elektrikli Araç Elektronik Diferansiyel Denetleyici Tasarımı ve Performans Analizi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Zonguldak.
- Eren T, Polat D, 2024, Tork Vektörleme Sistemlerinin Sürüş Dinamiklerine Etkisi, *Ulusal Mekatronik Mühendisliği Konferansı*, Ankara, Türkiye.
- Gair S, Cruden A, McDonald J, Hredzak B, 2004, *Electronic differential with sliding mode controller for a direct wheel drive electric vehicle*, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, IEEE, 98–103.
- Gao, Y., & Ehsani, M. ,2018, *Modern Electric Vehicle Technology CRC Press* – Bölüm 9: Multi-wheel drive and differential control.
- Gökçe C, 2015, *Elektrikli yol taşıtlarında bulanık mantık tabanlı tam elektrikli frenlemenin geliştirilmesi ve uygulanması*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Gökçe C, Karakaya U, Yılmaz M, Şengür A, Çiftçioğlu M, Üstün Ö, Tuncay RN, 2010, *Ağır şehir içi trafik koşulları için motor miline entegre dur-çalıştır özellikli hafif hibrit elektrikli aracın elektrikli güç aktarma sisteminin geliştirilmesi*, OTEKON Konferansı, Bursa.
- Gökkozan H, 2020, *Traction motors and motor drivers used in electric vehicles*, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 19, 105–111.

- Gün A, Karamancıoğlu A, 2021, *PID control of an inverted pendulum with experimental friction model estimation*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 1078–1085.
- Güner C, 2013, *Dışarıdan şarj edilebilen hibrit elektrikli araç ile menzil artırıcı elektrikli araç konseptlerinin karşılaştırmalı analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürbüz Y, Kulaksız A, 2016, *Elektrikli araçlar ile klasik içten yanmalı motorlu araçların çeşitli yönlerden karşılaştırılması*, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(2), 117–125.
- Gürbüz, İ., 2020, PID Kontrol Parametrelerinin Ziegler–Nichols ve Genetik Algoritmalar ile Optimizasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, İstanbul.
- Gürkan D, Korkut İ, 2022, *Yeni nesil elektrikli araçlar için elektronik diferansiyel tasarımı ve kinematik analizi*, 7. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi, Samsun, Türkiye.
- Gürmeriç M, 2015, *Elektrikli taşıtlar için elektronik diferansiyel tasarımı ve kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 104s, İstanbul.
- Haddoun A, Benbouzid ME, Diallo D, Abdessemed R, Ghouili J, Srairi K, 2010, *Design and implementation of an electric differential for traction application*, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE, 1–6.
- Hang, C. C., Astrom, K. J., Ho, W. K., 1991, Refinements of the Ziegler–Nichols Tuning Formula, IEE Proceedings D-Control Theory and Applications, 138(2), 111–118.
- Hartani K, Bourahla M, Miloud Y, Sekour M, 2009, *Electronic differential with direct torque fuzzy control for vehicle propulsion system*, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 17, 21–38.
- Hartani K, Bourahla M, Miloud Y, Sekour M, 2009, *Electronic differential with direct torque fuzzy control for vehicle propulsion system*, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 17, 21–38. <https://doi.org/10.3906/elk-0801-1v>

- He X, 2022, *Rear-wheel steering: State of the art control creation*, Master of Science Tezi, Politecnico di Torino, Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione, 97s.
- Hu JS, Lin XC, Hu FR, 2014, *Direct yaw-moment control for in-wheel motor electric vehicles*, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2014), IEEE, 475–479. <https://doi.org/10.1109/SII.2014.7028085>.
- Hubka L, 2019, *Electric cars in the Czech Republic—the analysis of CO<sub>2</sub> emissions reduction*, 20th International Carpathian Control Conference, 1–6.
- İnce M, 2024, *Motorin ve biyodizel karışımların motor gürültüsü ve emisyonlara etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s.
- Jain M, Williamson SS, 2009, *Suitability analysis of in-wheel motor direct drives for electric and hybrid electric vehicles*, Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, Montreal, Canada.
- Ju-Sang L, Young-Jae R, Young-Cheol L, Freere P, Tae-Gon K, Seok-Jun S, Eui-Sun K, 2000, *A neural network model of electric differential system for electric vehicle*, 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 83–88.
- Kahveci H, 2013, *Doğrudan sürürlü elektrikli araçlar için bulanık mantık tabanlı elektronik diferansiyel sisteminin gerçekleştirilmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 169s, Trabzon.
- Kaplan K, Kuncan M, Polat H, Tepe B, Ertunç HM, 2019, *PID ve bulanık mantık tabanlı DC motorun gerçek zamanlı konum kontrolü*, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(2), 900–916.
- Kara T, Demirtaş A, 2020, *Tork vektörleme teknolojisinin performans araçlarındaki uygulamaları*, Otomotiv Teknolojileri Dergisi, 12(2), 60–68.
- Karabacak Y, Yaşar A, Sarıtaş İ, 2023, *Doğrusal olmayan manyetik levitasyon sisteminin kontrolü için PID ve LQR kontrolcülerinin performans karşılaştırılması*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25(74), 339–350.

- Karabasoglu O, 2021, *Hibrit ve elektrikli araçlar için güç aktarım sistemi bağlantılı yeşil rotalama*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(68), 421–433.
- Karaca, M., 2019, *Ziegler–Nichols Yöntemi ile PID Parametre Ayarı ve MATLAB/Simulink Ortamında Gerçeklenmesi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Ankara.
- Karadağ T, Dikmen İC, 2021, *Yeni nesil, modüler ve akıllı batarya yönetim sistemi*, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 32, 1103–1112.
- Karakaya E, 2020, *Elektrikli araçlarda CAN-BUS haberleşme protokolünün incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karavaşin AT, 2022, *Elektrik tahrikli bir karavan sisteminin dinamik kararlılığının modellenmesi ve kontrolü*, Doktora Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kartal MR, 2018, *Elektrikli araçlarda kullanılan farklı batarya ve elektrik motorların sürüş çevrimlerine göre performans analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaya M, 2013, *Merkezi diferansiyelin çoklu model geçişiyle aktif kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya S, 2016, *Elektrikli araçlarda güç elektroniği sistemlerinin kontrolü*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Kaymaz H, 2018, *Hibrit ve elektrikli metrobüs araçları için sürüş çevrimi oluşturulması*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kerem A, 2014, *Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri*, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 1–13.
- Kharola A, Patin P, Raiwani S, Rajput D, 2016, *A comparison study for control and stabilisation of inverted pendulum on inclined surface (IPIS) using PID and fuzzy controllers*, Recent Trends in Engineering and Material Sciences, 8, 187–190.

- Kıyak İ, Kaya KY, 2020, *Elektrikli taşıtlarda kullanılan indüksiyon/sabit mıknatıslı motor sürücülerinin simülasyonu ve motor dinamiklerinin analizi*, International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(2), 152–157.
- Kıyaklı AO, 2018, *Matlab/SIMULINK'te elektrikli bir taşıtın modellenmesi*, Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi.
- Kızır S, Yaren T, 2020, *LQR kontrolcü parametrelerinin sistem davranışına etki analizi: çift çubuklu ters sarkaç sistemi*, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 175–191.
- Koç CT, 2023, *Arka tekerlekten bağımsız-tahrikli elektrikli taşıtlar için savrulma dinamiği kontrol sistemi tasarımı ve analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 103s, İstanbul.
- Kök B, 2020, *Elektrikli araçlar için enerji depolama sistemleri ve uygun batarya seçimi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Körpe UU, 2020, *Elektrikli taşıt uygulamaları için dahili mıknatıslı senkron motorlarda model öngörülü tork kontrol stratejileri*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 115s, Karabük.
- Kumaş H, 2011, *Ağır araçlar için yol eğimi ve viraj yarıçapı dikkate alınarak en hızlı güzergahın belirlenmesi*, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(3), 385–395.
- Kurnaz, C., 2017, *PID ve Bulanık PID Denetleyici Uygulamalarında Ziegler–Nichols Yönteminin Etkinliği*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, Konya.
- Kurt L, Aydın S, 2023, *Mekanik diferansiyel sistemlerinin gelişimi ve geleceği*, Otomotiv Teknolojileri Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.
- Magallán GA, De Angelo CH, Bisheimer G, Garcia G, 2008, *A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control*, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), IEEE, 2757–2763.

- Maozen M, Sharifian MBB, Sabahi M, 2016, *Electric differential for an electric vehicle with 4WD/2WS ability*, 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, IEEE.
- Marzbani H, Khayyam H, To CN, Quóć DV, Jazar RN, 2019, *Autonomous vehicles: Autodriver algorithm and vehicle dynamics*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(4), 0018–9545.
- Miao, Y., et al. ,2017, *Dynamic control of six-wheel electric drive vehicle using fuzzy logic and slip control*. SAE International Journal of Commercial Vehicles. SAE Technical Paper 2017-01-0001.
- Milli Eğitim Bakanlığı, 2012, *Motorlu Araçlar Teknolojisi: Araç Yönetim Sistemleri*, MEB Yayınları, Ankara.
- Moazen M, Sabahi M, 2014, *Electric differential for an electric vehicle with four independent driven motors and four wheels steering ability using improved fictitious master synchronization strategy*, Journal of Operation and Automation in Power Engineering, 2, 141–150.
- Mollahasanoğlu M, Okumuş H, 2021, *A review of three phase AC-DC power factor correction converters for electric vehicle fast charging*, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 32, 663–669.
- Mökükçü MS, 2014, *Elektrikli araç sürüş sistemi tasarımı ve imalatı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Muratoğlu Y, Alkaya A, 2016, *Elektrikli araç teknolojisi ve pil yönetim sistemi - İnceleme*, Elektrik Mühendisliği, 458, 10–14.
- Mutlu Y, 2011, *Elektrikli araç motorunun soğutma sistem tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- MÜSİAD, 2021, *Elektrikli araçlarda geçmişten geleceğe bakış*, MÜSİAD Yayınları, İstanbul.

- Ozkop E, Altas İH, Okumus HI, Sharaf AM, 2015, A Fuzzy Logic Sliding Mode Controlled Electronic Differential for a Direct Wheel Drive EV, *International Journal of Electronics*, 102(11), 1919–1942, doi:10.1080/00207217.2015.1010183.
- Rajamani, R, 2011, *Vehicle Dynamics and Control Springer* – Özellikle “Multi-axle Vehicle Control” ve “Fuzzy Control” bölümleri.
- Schaltz E, 2011, *Electrical Vehicle Design and Modeling*, Aalborg University, 176p, Danimarka.
- Tian H, Zhu W, Wang S, 2020, *Adaptive electronic differential control of vehicle by torque balance*, *Mobile Networks and Applications*, 25, 1604–1610. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01365-w>.
- Wang, H., & Zhao, Y, 2016, *Steering and torque distribution control of 6x6 electric vehicle on rough terrain. Journal of Terramechanics*, Vol. 64, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jterra.2015.12.002
- Xu, X., & Liu, J., 2018, *Electronic differential control for 6x6 electric all-wheel drive vehicles based on fuzzy PID strategy. International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. DOI: 10.1109/ICMA.2018.8484399
- Yıldırım M, Öksüztepe E, Tanyeri B, Kürüm H, 2021, Electronic Differential System for an Electric Vehicle with In-Wheel Motor, *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Türkiye, Elektrik Mühendisleri Odası Yayını, Erişim adresi: [https://www.emo.org.tr/ekler/7433f59020ec6bf\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/7433f59020ec6bf_ek.pdf), erişim tarihi: 23.06.2025.
- Yıldız, S., 2018, *Ziegler–Nichols ve Fuzzy Logic Tabanlı PID Kontrol Uygulamalarının Birbirine Karşılaştırılması*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, Denizli.
- Yin D, Shan D, Hu JS, 2017, A Study on the Control Performance of Electronic Differential System for Four-Wheel Drive Electric Vehicles, *Applied Sciences*, 7(1), 74, doi:10.3390/app7010074.

Zhou, Y., Wang, Z., & Li, S. ,2019, *Fuzzy Logic Control of Torque Distribution in 6x6 Electric Vehicles with Independent Wheel Drive. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68(2), pp. 1490–1501. DOI: 10.1109/TVT.2018.2883541

Ziegler, J. G., Nichols, N. B., 1942, Optimum Settings for Automatic Controllers, Transactions of the ASME, 64(11), 759–768.

### **İnternet Kaynakları**

1- Wikipedia, 2025, *History of the electric vehicle*,

[https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_electric\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle) [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

2- Tesla Motors, 2008, Tesla Motors begins regular production of 2008 Tesla Roadster, San Carlos, Calif., <https://ir.tesla.com/press-release/tesla-motors-begins-regular-production-2008-tesla-roadster> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

3- U.S. Department of Energy, 2012, Clean Cities Plug-in Electric Vehicle Handbook for Consumers, Washington, DC, [https://afdc.energy.gov/pdfs/pev\\_handbook.pdf](https://afdc.energy.gov/pdfs/pev_handbook.pdf) [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

4- Anadolu Ajansı, 2025, Avrupa'nın 2035 itibarıyla yeni benzin ve dizel araç satışını sonlandırma hedefi riske girebilir, <https://www.aa.com.tr/...> [Erişim Tarihi: 05.05.2025]

5- Business Insider, 2024, 5 promises Elon Musk made about the Cybertruck that never happened, <https://www.businessinsider.com/...> [Erişim Tarihi: 05.05.2025]

6- BYD, 2024, 2023'te 3 milyonluk rekor satışla küresel NEV pazarında liderlik, <https://www.byd.com/us/news-list/...> [Erişim Tarihi: 05.05.2025]

7- Tridens Technology, 2025, BYD satış istatistikleri: Model ve ülke bazında, <https://tridens technology.com/byd-sales-statistics/> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

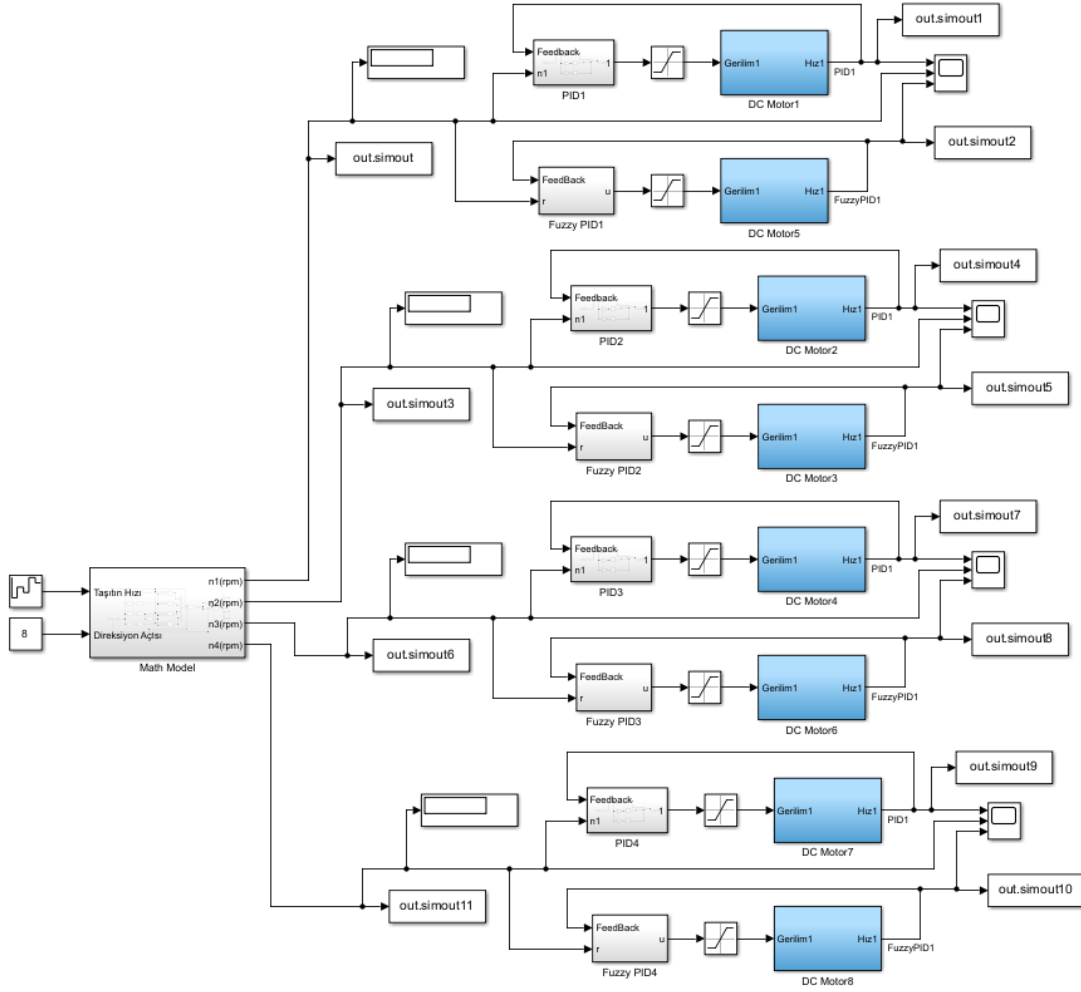
8- Anadolu Ajansı, 2024, “Devrim”den Togg’a uzanan 61 yıllık hayal, <https://www.aa.com.tr/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

- 9- Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD), 2023, Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG), <https://www.odmd.org.tr/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 10-ODMD, 2023, Yerli elektrikli otomobil TOGG satışa sunuldu, <https://omd.org.tr/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 11-Hove A, 2025, EVs and battery supply chains: Issues and impacts, Oxford Energy Forum, (144), 1–12, <https://www.oxfordenergy.org/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 12-McKinsey & Company, 2024, The battery chemistries powering the future of electric vehicles, <https://www.mckinsey.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 13-Hatzell K, 2025, Anode-free solid-state batteries, TechXplore, [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 14-Zhang Y, vd., 2025, Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technology, *Energy Storage Materials*, 55, 123–145, <https://www.sciencedirect.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 15-International Energy Agency (IEA), 2024, Global EV Outlook 2024: Trends in electric vehicle charging, <https://www.iea.org/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 16-Zhang X, vd., 2024, Optimal planning for electric vehicle fast charging stations, *Sustainable Cities and Society*, 85, 104–115, <https://www.sciencedirect.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 17-Zhang Y, vd., 2025, Data-driven energy management for electric vehicles, *Nature Communications*, 16(1), 192, <https://www.nature.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 18-Li J, vd., 2024, Energy management strategy for hybrid energy storage systems, *Science China Technological Sciences*, 67(3), 456–470, <https://link.springer.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 19-Zhang H, vd., 2023, Overview analysis of recent development on self-driving electric vehicles, arXiv:2307.00016, <https://arxiv.org/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]

- 20-Kumar A, vd., 2024, Autonomous vehicles: Evolution of AI and autonomous driving, Journal of Artificial Intelligence and Data Mining, 8(4), 42, <https://www.mdpi.com/...> [Erişim Tarihi: 17.04.2025]
- 21-The MathWorks Inc., 2023, PID Controller Block - Simulink Documentation, <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html> [Erişim Tarihi: 15.04.2025]
- 22-Arabam.com, 2025, Elektrikli otomobil üretiminin tarihi, [https://www.arabam.com/blog/elektrikli\\_dunyasi/elektrikli-otomobil-uretiminin-tarihi/](https://www.arabam.com/blog/elektrikli_dunyasi/elektrikli-otomobil-uretiminin-tarihi/) [Erişim Tarihi: 15.05.2025]
- 23-Wikipedi, 2025, Elektromote, <https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Elektromote> [Erişim Tarihi: 15.05.2025]
- 24-Wikipedia (İbranice), 2025, Elektrisches Tricycle görseli, [https://he.m.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Elektrisches\\_Tricycle\\_2.jpg](https://he.m.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Elektrisches_Tricycle_2.jpg) [Erişim Tarihi: 15.05.2025]
- 25-Alamy, 2025, Morris and Salom electric truck (stok fotoğraf açıklaması), <https://www.alamy.com/stock-photo/morris-and-salom-electric-truck.html> [Erişim Tarihi: 15.05.2025] Markut.net, 2025, İkonik Arabalar: Ford Model T, <https://markut.net/sayi-13/i%CC%87konik-arabalar-ford-model-t/> [Erişim Tarihi: 15.05.2025]
- 26-TopGear.nl, 2025, La Jamais Contente: De eerste snelste auto, <https://topgear.nl/autonieuws/la-jamais-contente-de-eerste-snelste-auto/> [Erişim Tarihi: 15.05.2025]
- 27-Kılıç B, 2020, Geçmişten geleceğe otomobil tasarımı, <https://erdeger.com.tr/assets/img/katalog/gecmisten-gelecege-otomobil-tasarimi.pdf> [Erişim Tarihi: 21.06.2025]
- 28- Kılıç B, 2020, Geçmişten geleceğe otomobil tasarımı, <https://erdeger.com.tr/...> [Erişim Tarihi: 21.06.2025]

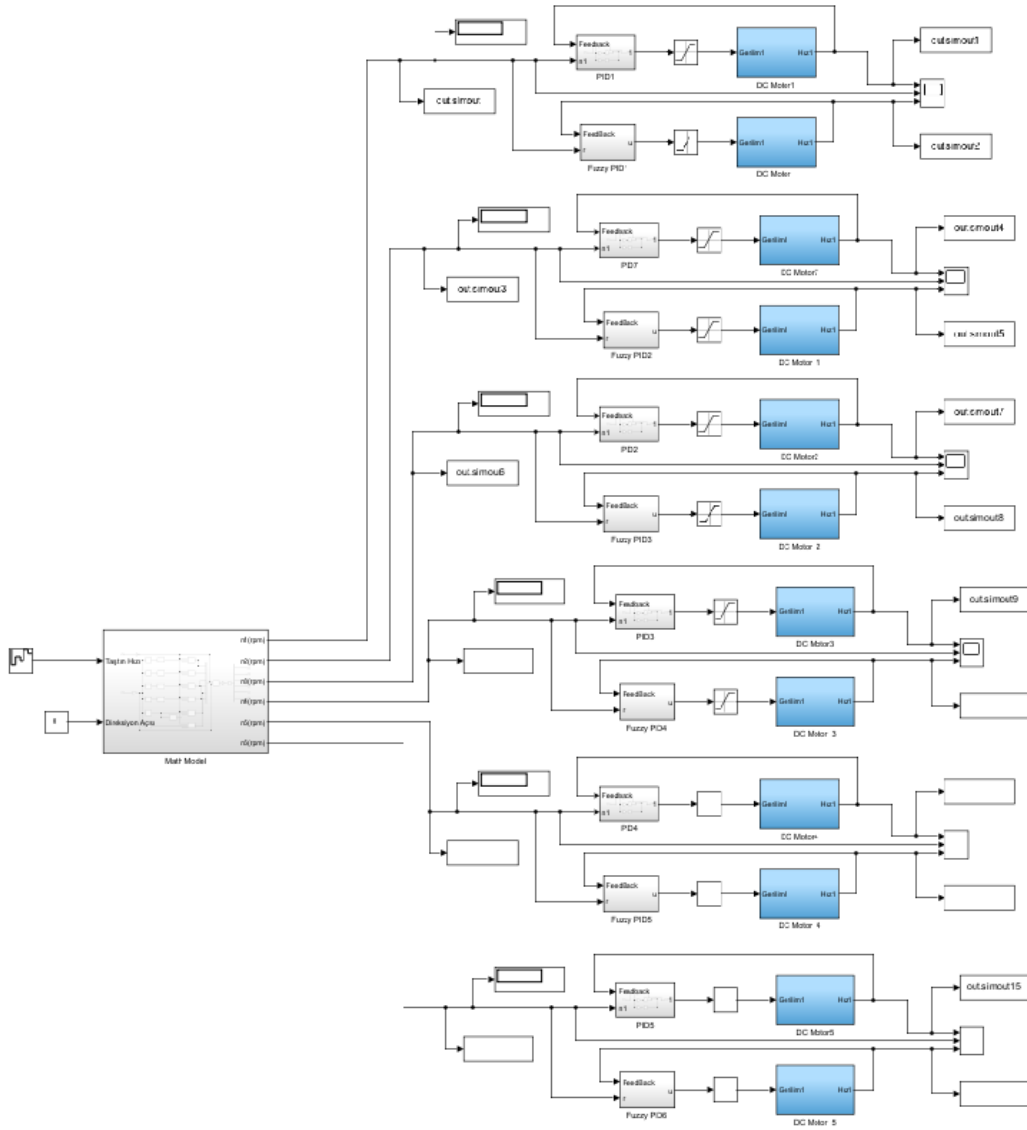
## 8. EKLER

### EK 1. Çalışmada oluşturulan FuzzyPID ve PID Kontrol Simulink Gösterimleri



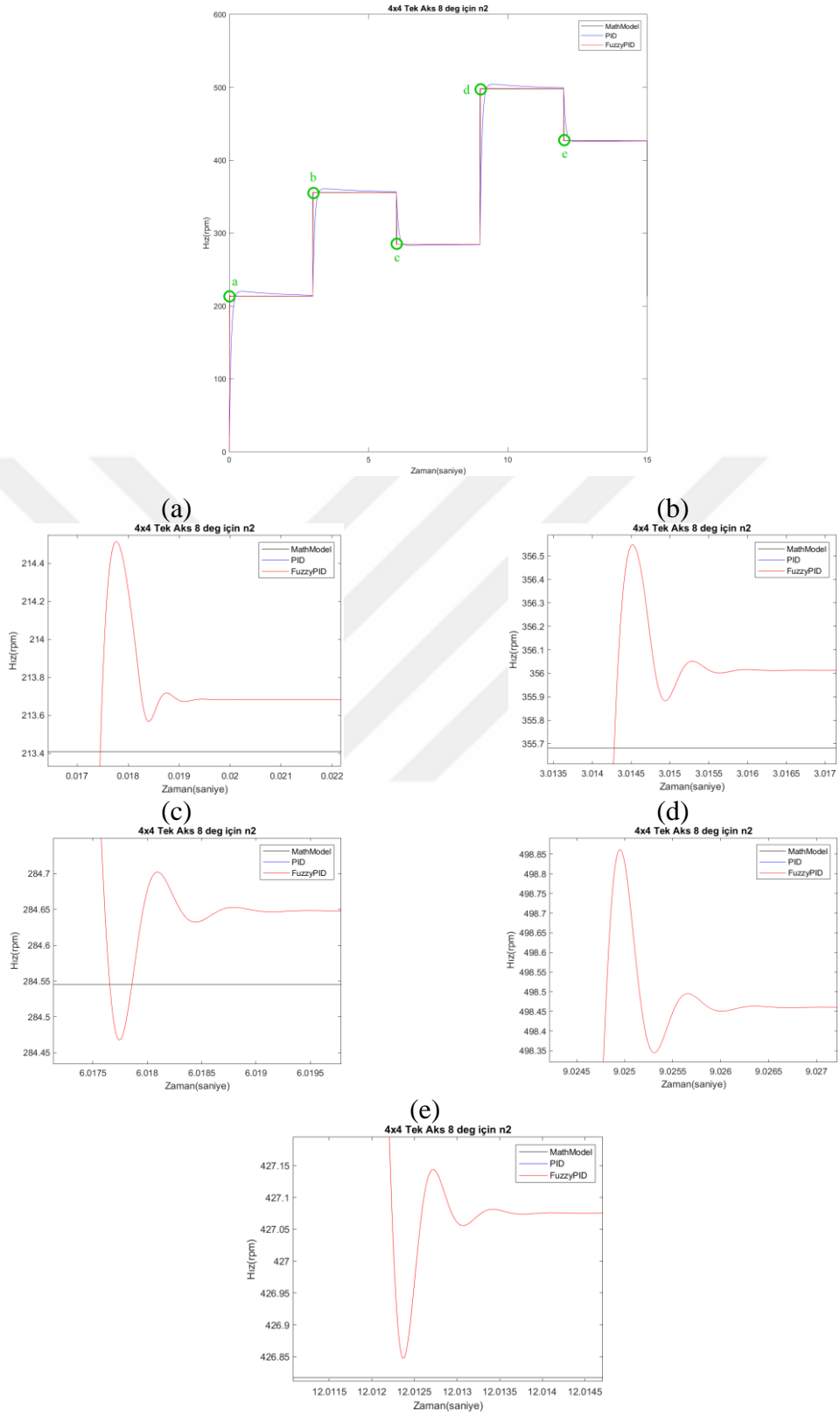
Şekil 8.1 İki Akstan Yönlendirmeli 4x4 Bir Elektrikli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink Gösterimi

## EK 1. (Devam) Çalışmada oluşturulan FuzzyPID ve PID Kontrol Simulink Gösterimleri



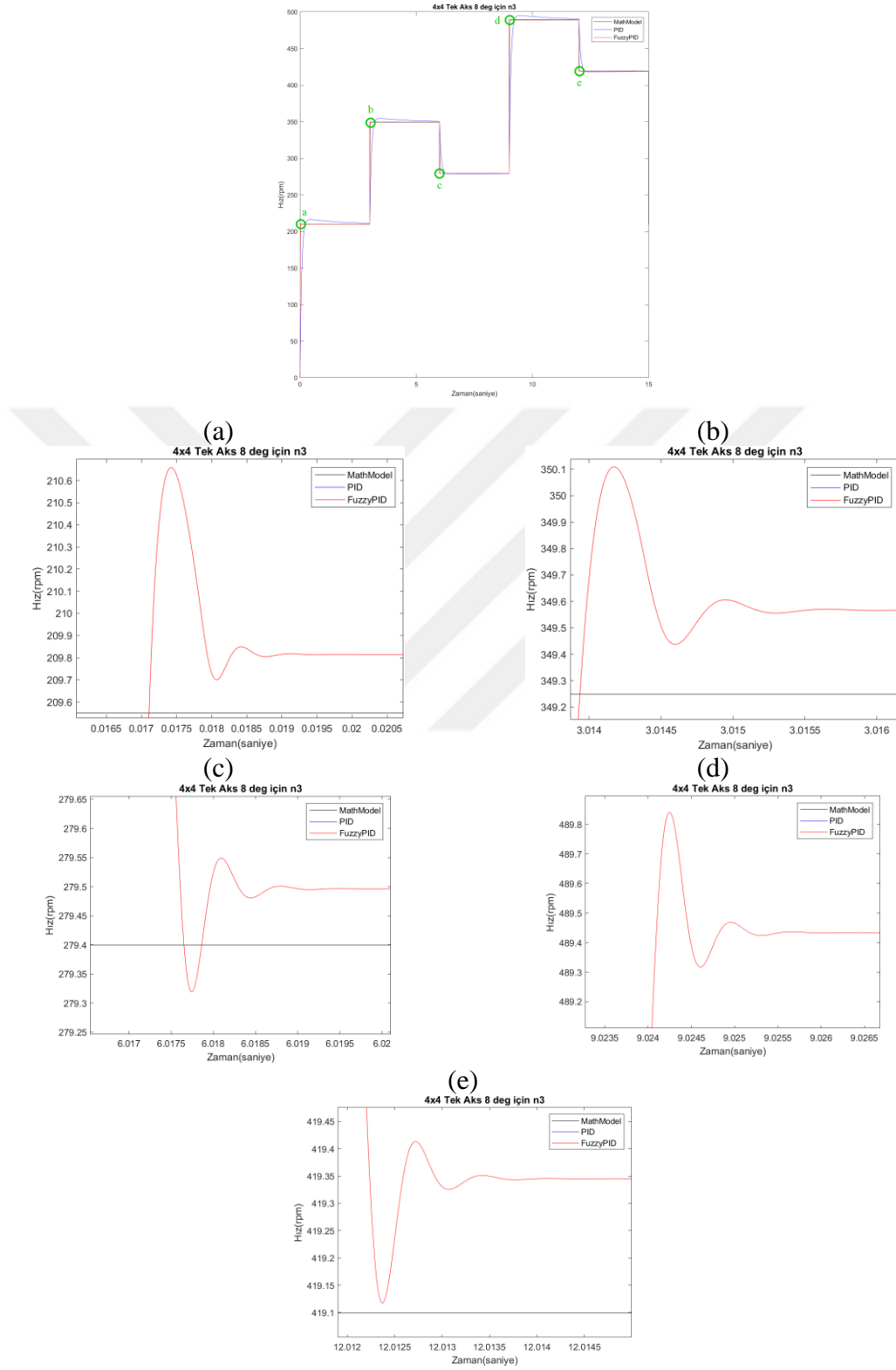
Şekil 8.2 İki Akstan Yönlendirmeli 6x6 Bir Elektrikli Taşıtın PID ve Fuzzy PID Kontrol Simulink Gösterimi

## EK 2. Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



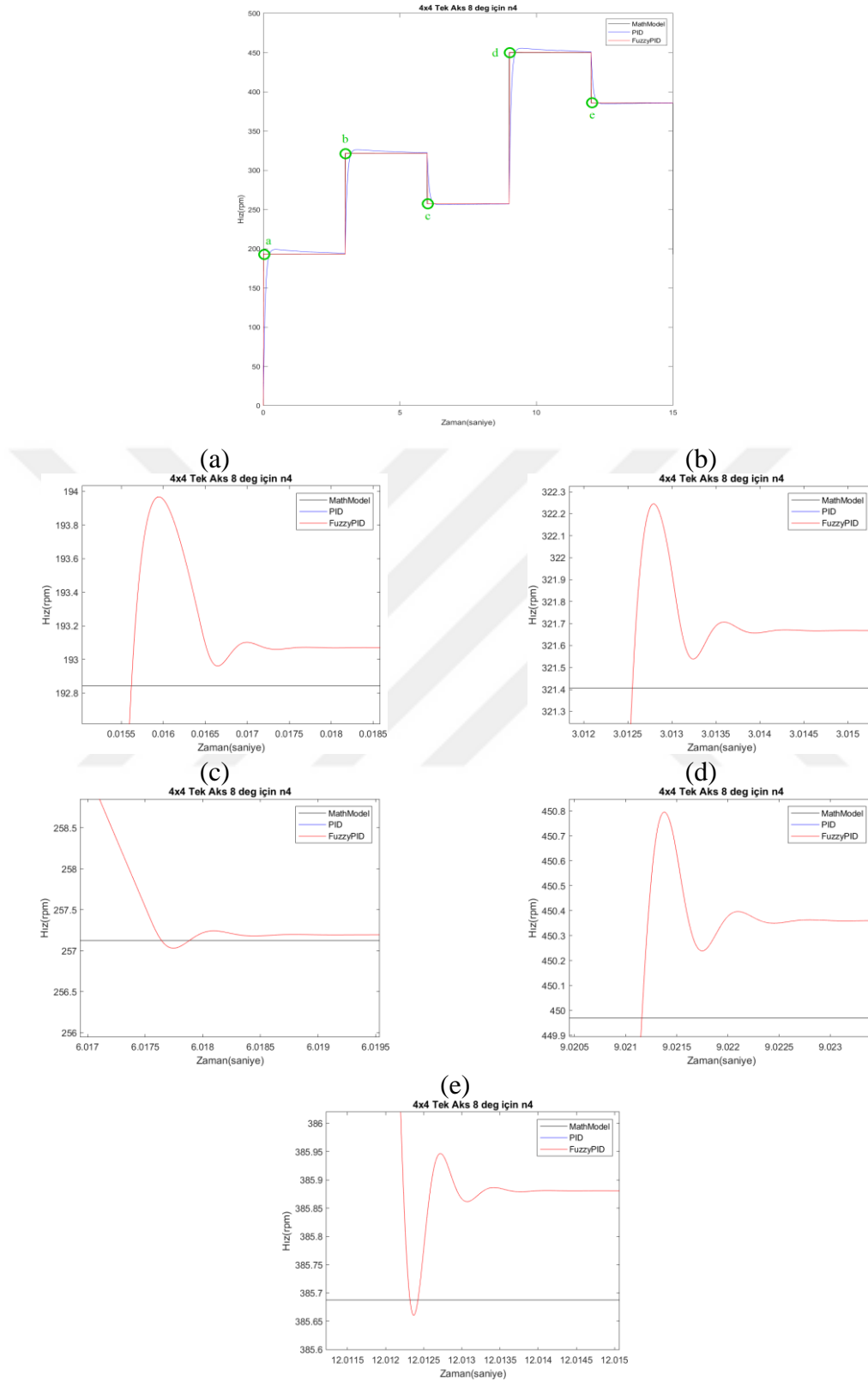
Şekil 8.3 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için  $8^\circ$  Direksiyon Açısında  $n_2$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



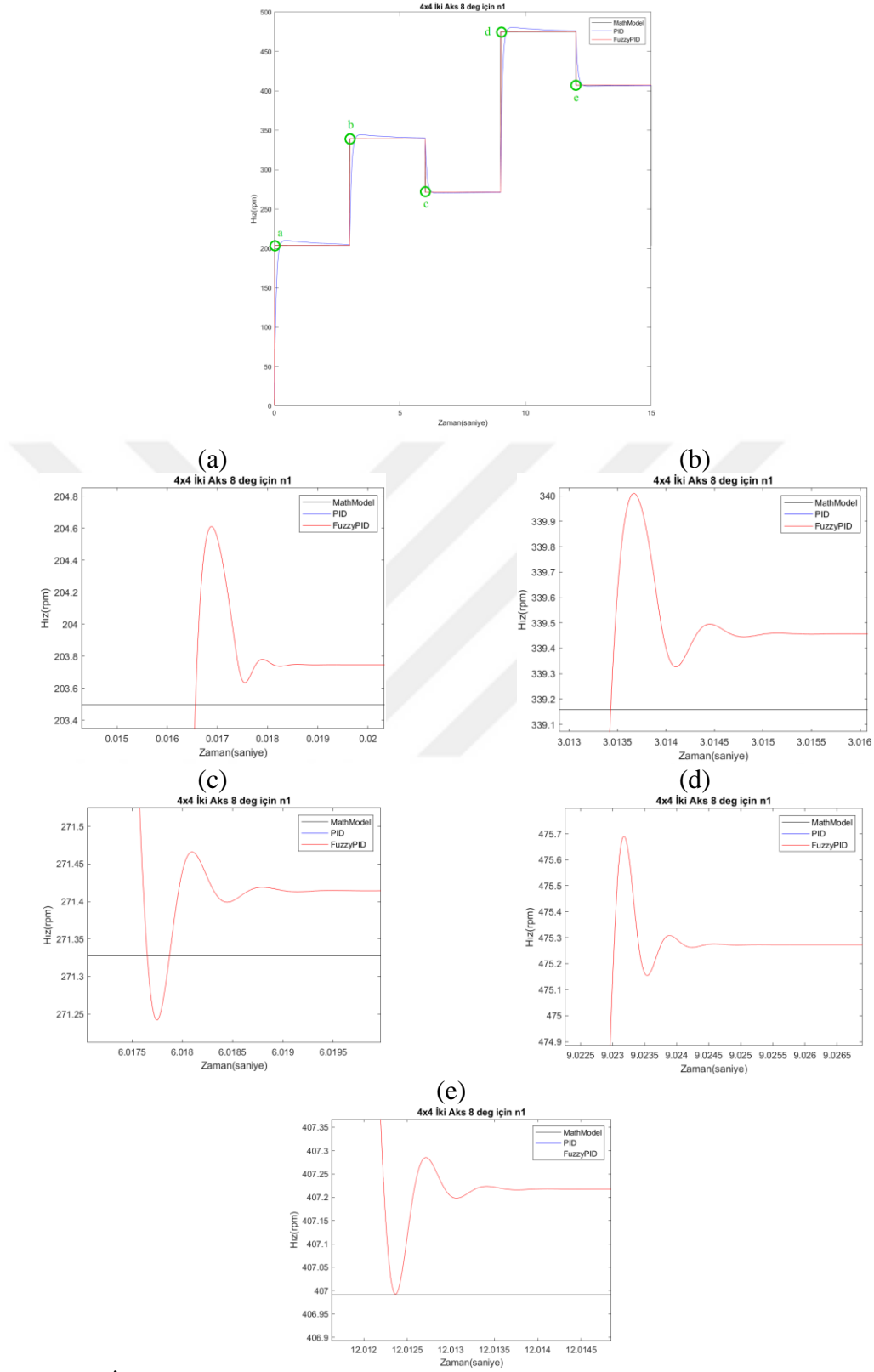
Şekil 8.4 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_3$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



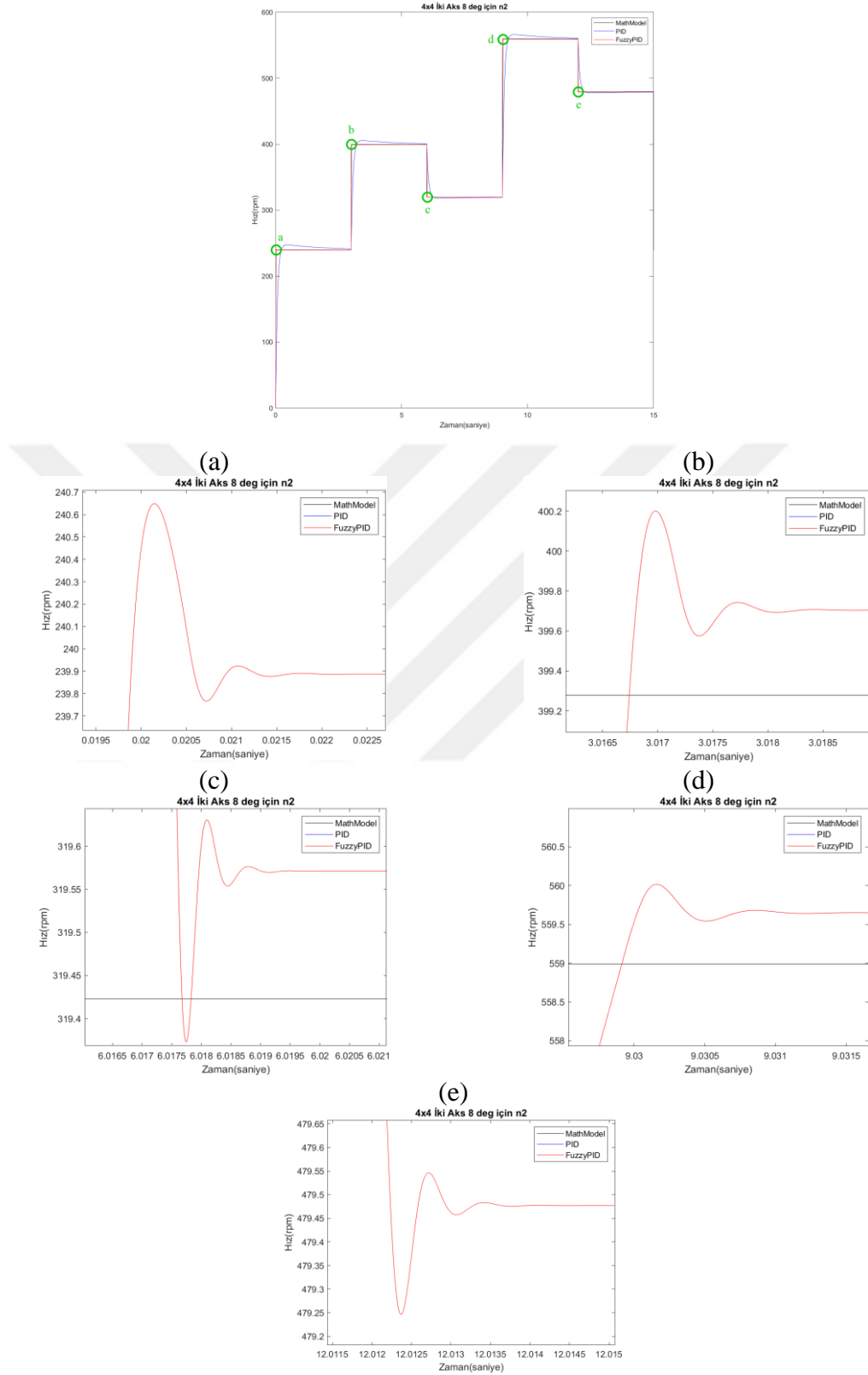
Şekil 8.5 4x4 Tek Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_4$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



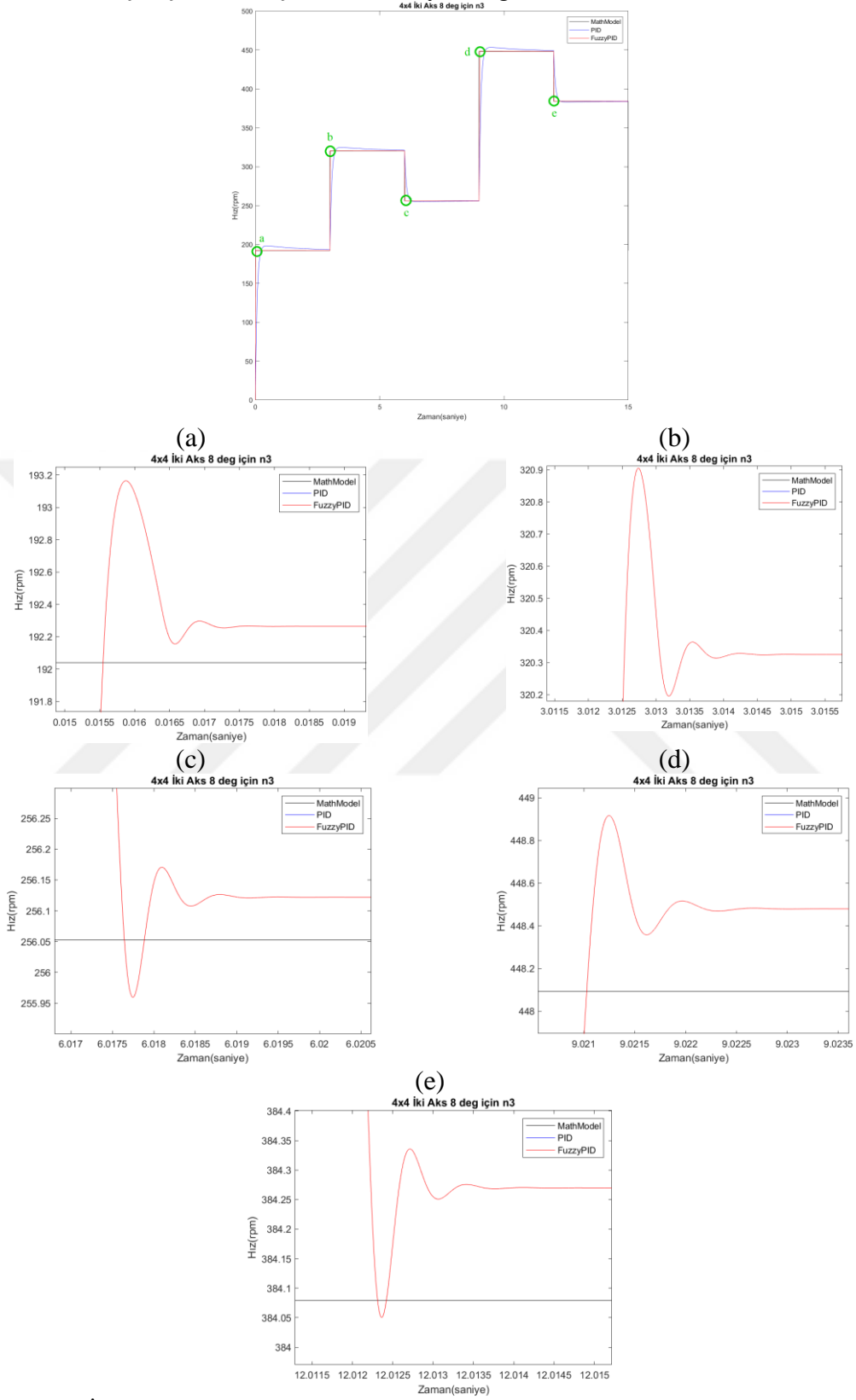
Şekil 8.6 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_1$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



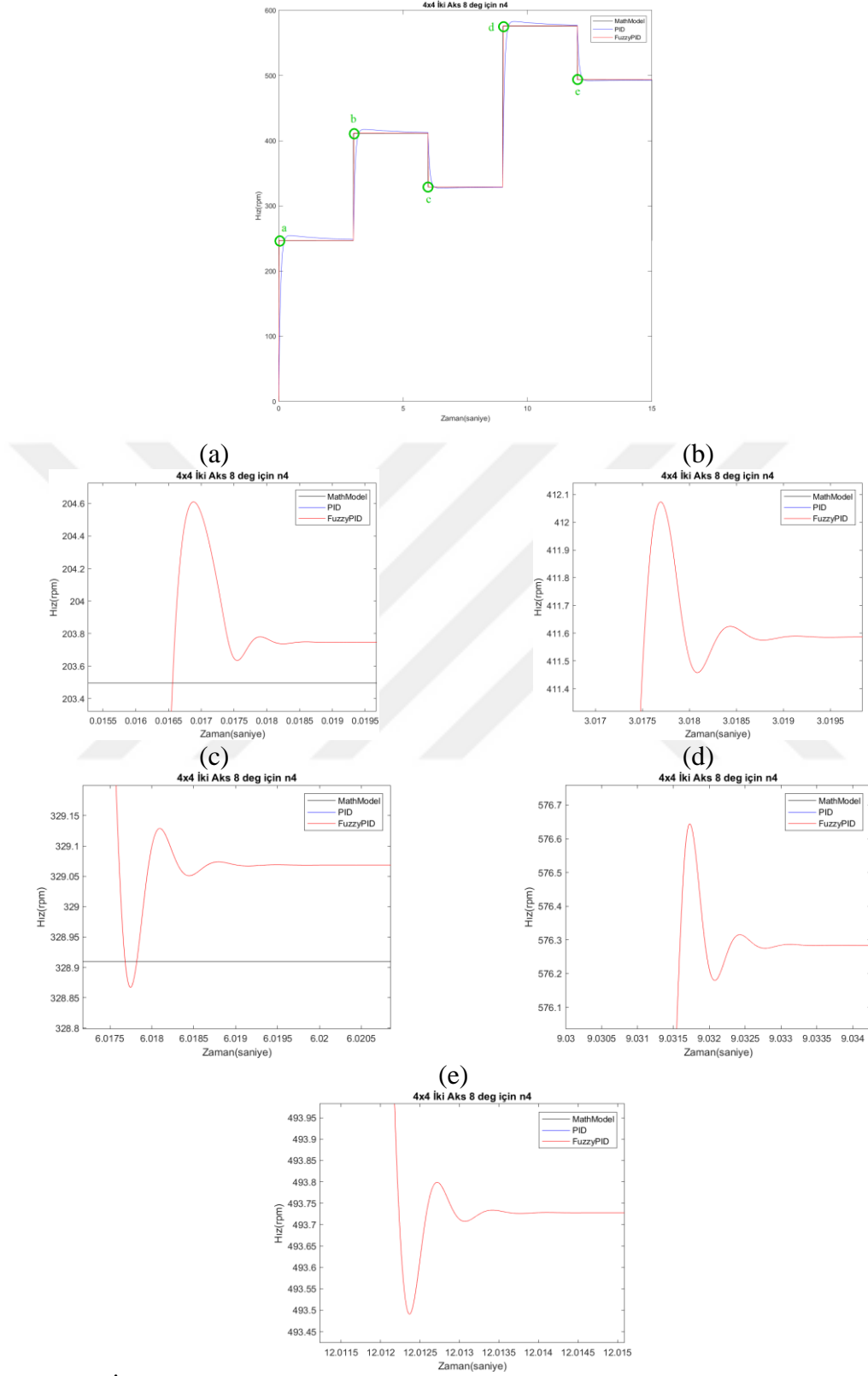
Şekil 8.7 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_2$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



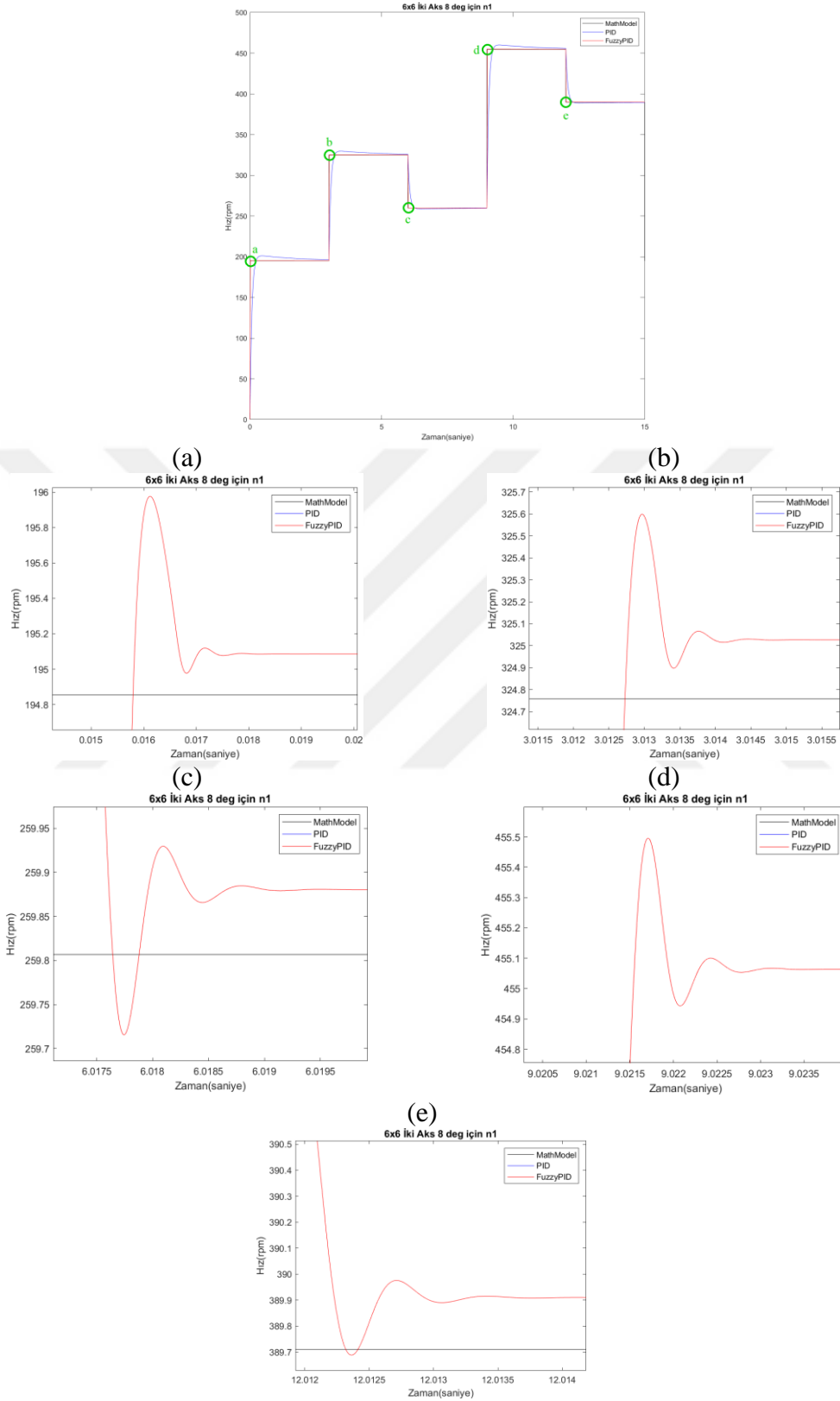
Şekil 8.8 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_3$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



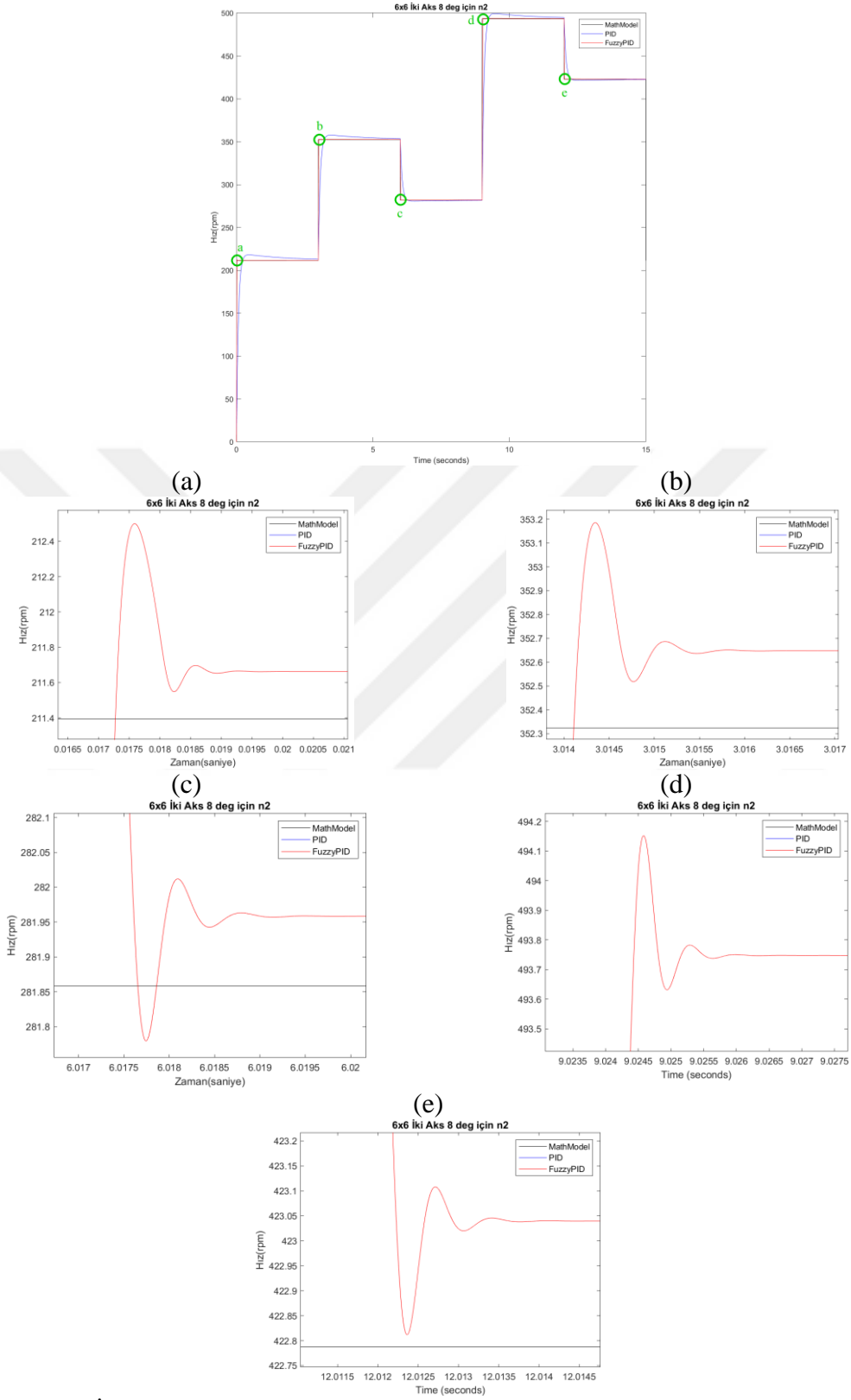
Şekil 8.9 4x4 İki Akstan Kontrollü Taşıt için  $8^\circ$  Direksiyon Açısında  $n_4$  Tekerleğinin Fuzzy PID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



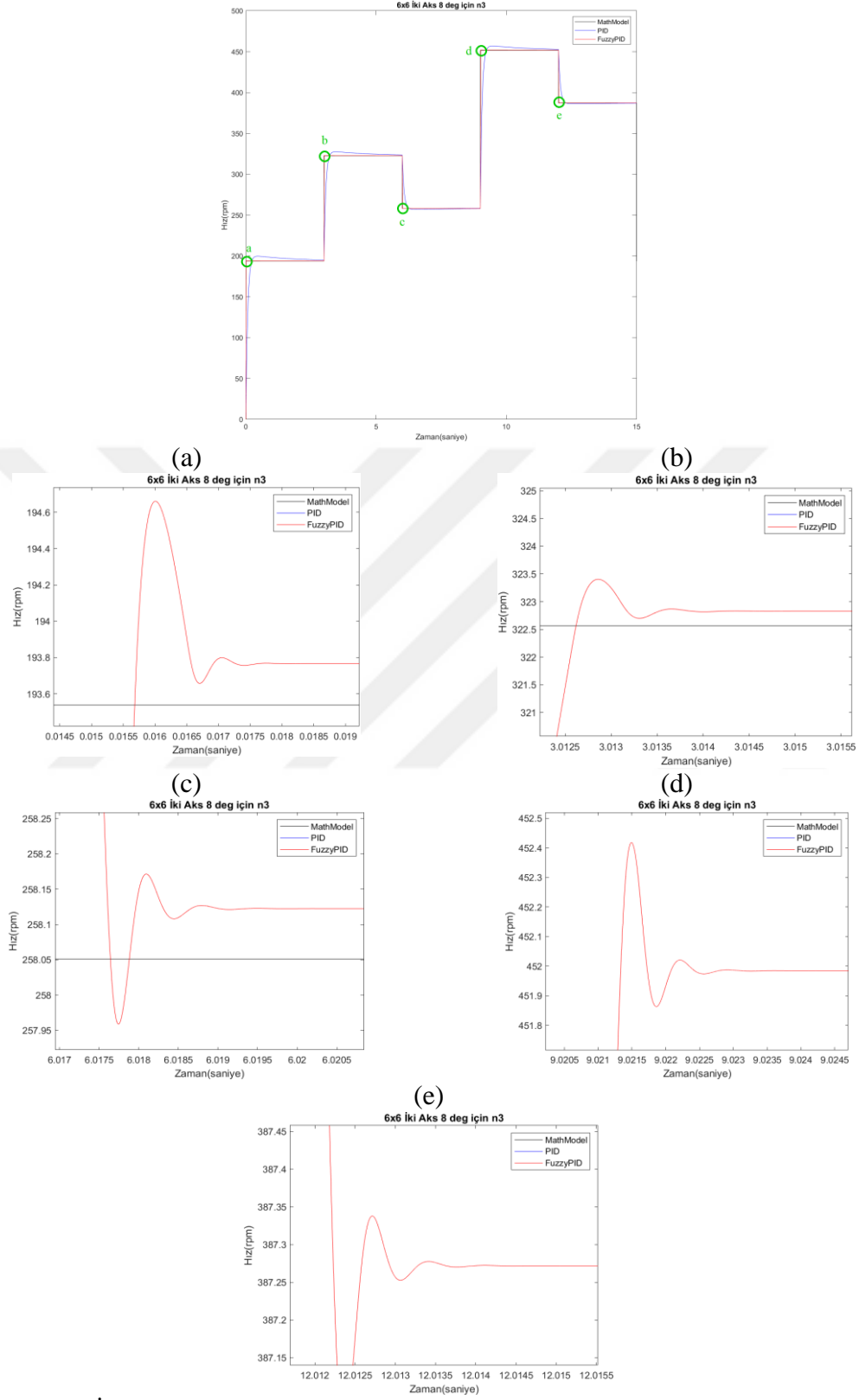
Şekil 8.10 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_1$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



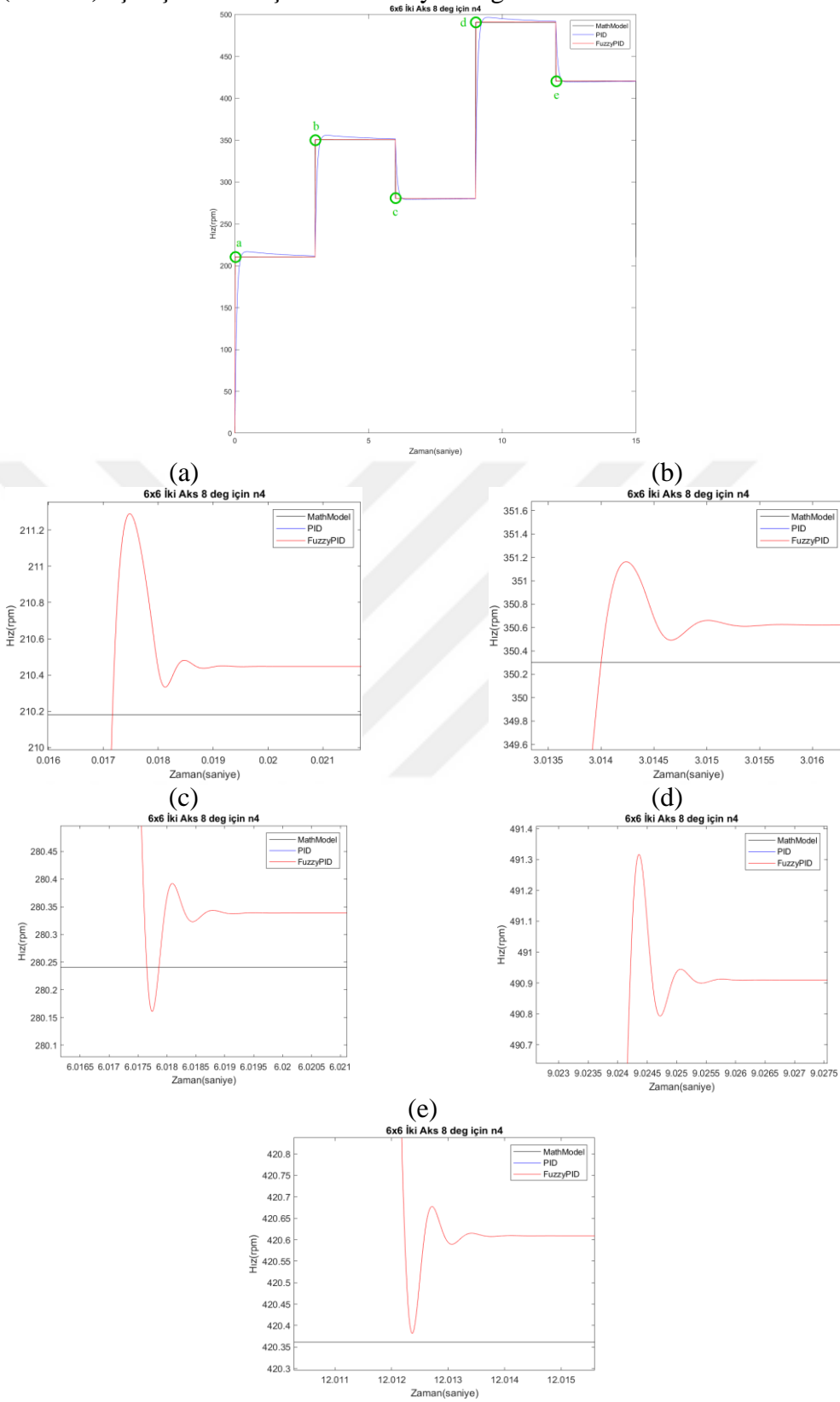
Şekil 8.11 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için  $8^\circ$  Direksiyon Açısında  $n_2$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafığı

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



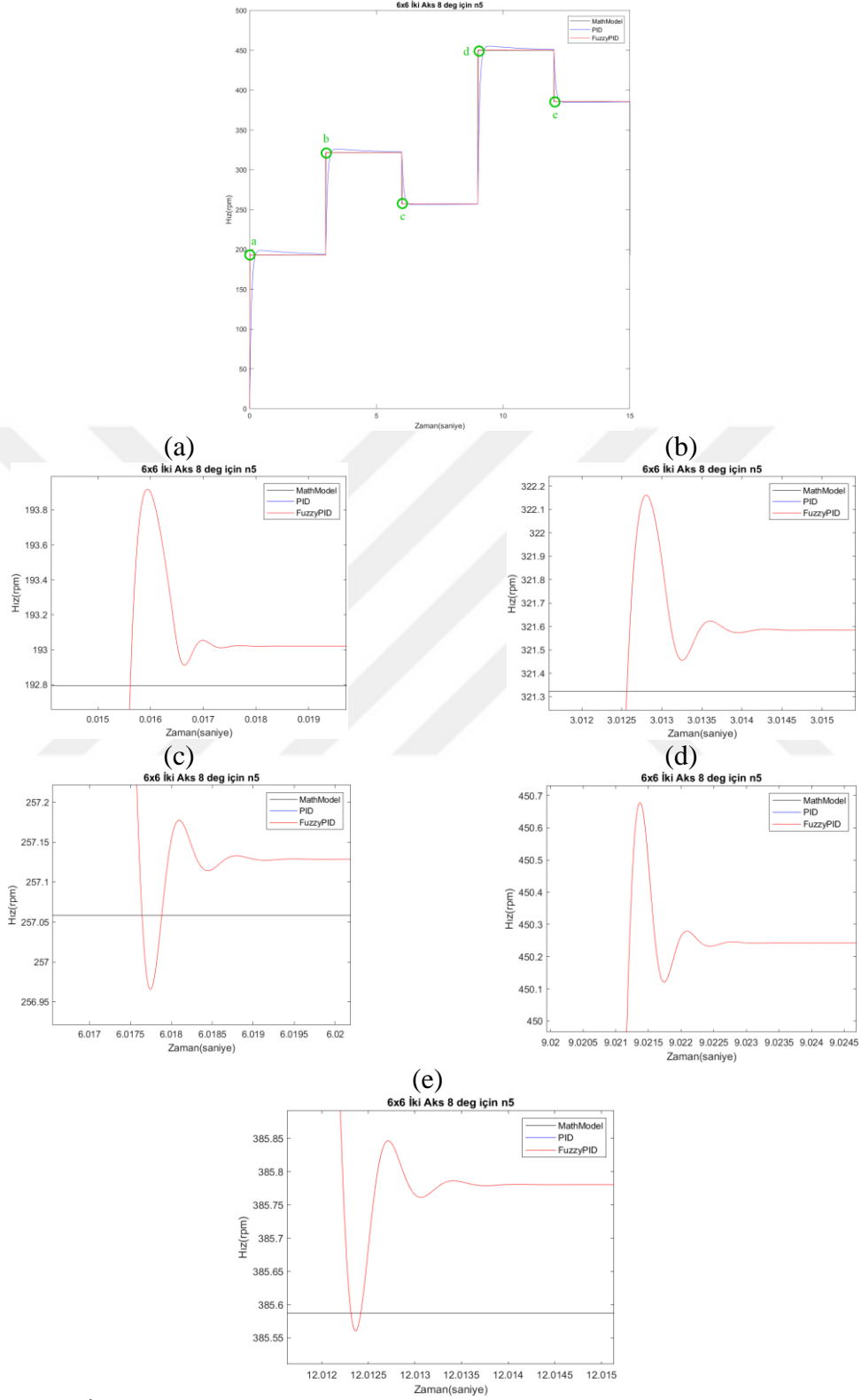
Şekil 8.12 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_3$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafığı

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



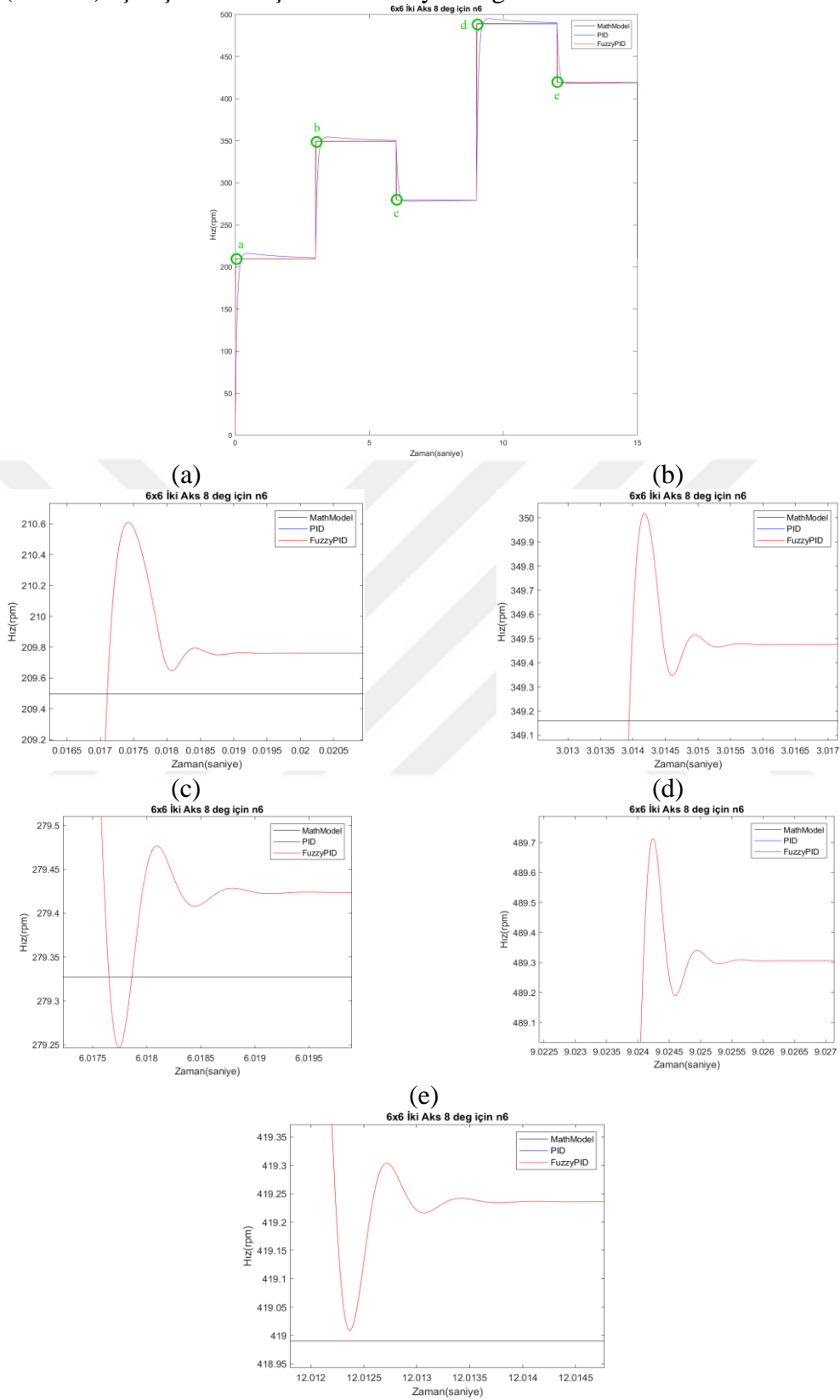
Şekil 8.13 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında n<sub>4</sub> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



Şekil 8.14 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında  $n_5$  Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafığı

## EK 2(Devam). Çalışmada oluşturulan Fuzzy PID grafikleri



Şekil 8.15 6x6 İki Akstan Kontrollü Taşıt için 8° Direksiyon Açısında n<sub>6</sub> Tekerleğinin FuzzyPID Kontrol Grafiği

### EK 3. Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.1** 4x4 Tek Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	233.201	233.201	328.747	328.747
1	334.134	337.596	337.494	334.031	232.122	234.528	331.694	328.294
2	332.690	339.613	339.206	332.279	231.111	235.912	333.365	326.536
3	331.439	341.819	340.905	330.511	230.254	237.454	335.061	324.824
4	330.381	344.214	342.594	328.726	229.514	239.120	336.730	323.064
5	329.517	346.798	344.271	326.925	228.893	240.890	338.336	321.268
6	328.849	349.571	345.939	325.105	228.446	242.836	340.001	319.512
7	328.378	352.532	347.599	323.265	228.092	244.870	341.590	317.661
8	328.104	355.681	349.249	321.406	227.894	247.047	343.190	315.828
9	328.028	359.018	350.892	319.525	227.875	249.386	344.860	314.004
10	328.153	362.544	352.528	317.621	227.945	251.820	346.442	312.130
11	328.479	366.259	354.157	315.694	228.167	254.402	348.075	310.252
12	329.007	370.163	355.781	313.741	228.530	257.115	349.636	308.326
13	329.739	374.258	357.399	311.763	229.035	259.953	351.256	306.370
14	330.675	378.545	359.013	309.756	229.690	262.932	352.845	304.422
15	331.818	383.024	360.622	307.720	230.484	266.042	354.407	302.398

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	336.058	336.058	336.052	336.052
1	334.134	337.596	337.494	334.031	334.420	337.889	337.780	334.311
2	332.690	339.613	339.206	332.279	332.973	339.910	339.495	332.555
3	331.439	341.819	340.905	330.511	331.719	342.120	341.198	330.783
4	330.381	344.214	342.594	328.726	330.660	344.521	342.890	328.996
5	329.517	346.798	344.271	326.925	329.796	347.112	344.573	327.192
6	328.849	349.571	345.939	325.105	329.126	349.889	346.243	325.368
7	328.378	352.532	347.599	323.265	328.653	352.856	347.906	323.525
8	328.104	355.681	349.249	321.406	328.378	356.012	349.559	321.662
9	328.028	359.018	350.892	319.525	328.302	359.356	351.206	319.777
10	328.153	362.544	352.528	317.621	328.428	362.890	352.845	317.870
11	328.479	366.259	354.157	315.694	328.754	366.612	354.478	315.939
12	329.007	370.163	355.781	313.741	329.284	370.526	356.105	313.983
13	329.739	374.258	357.399	311.763	330.017	374.633	357.727	312.000
14	330.675	378.545	359.013	309.756	330.956	378.919	359.344	309.990
15	331.818	383.024	360.622	307.720	332.101	383.417	360.957	307.950

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.2 4x4 Tek Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	338.674	338.674	338.674	338.674
1	334.134	337.596	337.494	334.031	337.852	341.399	341.281	337.747
2	332.690	339.613	339.206	332.279	336.367	343.411	342.985	335.971
3	331.439	341.819	340.905	330.511	335.136	345.660	344.696	334.199
4	330.381	344.214	342.594	328.726	334.042	348.044	346.462	332.387
5	329.517	346.798	344.271	326.925	333.211	350.688	348.105	330.582
6	328.849	349.571	349.796	325.105	332.527	353.491	346.208	328.727
7	328.378	352.532	347.599	323.265	332.041	356.477	351.473	326.895
8	328.104	355.681	349.249	321.406	331.768	359.661	353.164	324.982
9	328.028	359.018	350.892	319.525	331.704	363.035	354.837	323.050
10	328.153	362.544	352.528	317.621	331.816	366.623	356.465	321.161
11	328.479	366.259	354.157	315.694	332.126	370.376	358.170	319.175
12	329.007	370.163	355.781	313.741	332.677	374.340	359.779	317.206
13	329.739	374.258	357.399	311.763	333.414	378.489	361.416	315.208
14	330.675	378.545	359.013	309.756	334.385	382.810	363.060	313.165
15	331.818	383.024	360.622	307.720	335.552	387.341	364.664	311.119

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	336.019	336.019	336.019	336.019
1	334.134	337.596	337.494	334.031	334.381	337.849	337.747	334.279
2	332.690	339.613	339.206	332.279	332.935	339.870	339.462	332.523
3	331.439	341.819	340.905	330.511	331.681	342.080	341.164	330.751
4	330.381	344.214	342.594	328.726	330.622	344.480	342.856	328.965
5	329.517	346.798	344.271	326.925	329.758	347.069	344.538	327.161
6	328.849	349.571	349.796	325.105	329.088	349.846	346.208	325.337
7	328.378	352.532	347.599	323.265	328.616	352.812	347.870	323.495
8	328.104	355.681	349.249	321.406	328.341	355.967	349.523	321.632
9	328.028	359.018	350.892	319.525	328.265	359.310	351.169	319.747
10	328.153	362.544	352.528	317.621	328.390	362.843	352.808	317.841
11	328.479	366.259	354.157	315.694	328.717	366.565	354.441	315.911
12	329.007	370.163	355.781	313.741	329.246	370.477	356.067	313.955
13	329.739	374.258	357.399	311.763	329.979	374.580	357.689	311.973
14	330.675	378.545	359.013	309.756	330.918	378.874	359.305	309.963
15	331.818	383.024	360.622	307.720	332.062	383.362	360.918	307.924

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.3 4x4 Tek Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	321.887	321.887	321.887	321.887
1	267.307	270.077	269.995	267.225	320.316	323.636	323.540	320.220
2	266.152	271.690	271.364	265.823	318.933	325.529	325.122	318.540
3	265.151	273.455	272.724	264.408	317.731	327.684	326.768	316.859
4	264.304	275.371	274.075	262.981	316.720	329.912	328.366	315.094
5	263.614	277.439	275.417	261.540	315.801	332.342	329.930	313.303
6	263.079	279.657	276.752	260.084	315.127	334.951	331.483	311.520
7	262.702	282.025	278.079	258.612	314.638	337.778	333.060	309.763
8	262.483	284.544	279.399	257.125	314.379	340.789	334.627	307.969
9	262.423	287.214	280.714	255.620	314.321	343.983	336.213	306.174
10	262.522	290.035	282.022	254.097	314.445	347.378	337.752	304.317
11	262.783	293.007	283.326	252.555	314.729	350.916	339.325	302.505
12	263.205	296.130	284.625	250.993	315.215	354.647	340.878	300.599
13	263.791	299.406	285.919	249.410	315.946	358.595	342.426	298.727
14	264.540	302.836	287.210	247.805	316.808	362.696	343.981	296.792
15	265.455	306.419	288.498	246.176	317.916	366.977	345.532	294.833

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	270.781	270.781	270.781	270.781
1	267.307	270.077	269.995	267.225	269.479	272.273	272.190	269.396
2	266.152	271.690	271.364	265.823	268.319	273.906	273.577	267.987
3	265.151	273.455	272.724	264.408	267.293	275.670	274.933	266.544
4	264.304	275.371	274.075	262.981	266.446	277.611	276.302	265.111
5	263.614	277.439	275.417	261.540	265.754	279.701	277.662	263.662
6	263.079	279.657	276.752	260.084	265.221	281.944	279.013	262.199
7	262.702	282.025	278.079	258.612	264.838	284.331	280.350	260.712
8	262.483	284.544	279.399	257.125	264.605	286.862	281.671	259.200
9	262.423	287.214	280.714	255.620	264.558	289.569	283.010	257.696
10	262.522	290.035	282.022	254.097	264.646	292.402	284.318	256.146
11	262.783	293.007	283.326	252.555	264.921	295.413	285.646	254.604
12	263.205	296.130	284.625	250.993	265.329	298.545	286.937	253.010
13	263.791	299.406	285.919	249.410	265.929	301.861	288.253	251.422
14	264.540	302.836	287.210	247.805	266.689	305.324	289.559	249.807
15	265.455	306.419	288.498	246.176	267.602	308.929	290.848	248.154

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.4 4x4 Tek Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları				
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0		268.615	268.615	268.615	268.615	268.5412	268.541	268.541	268.541
1		267.307	270.077	269.995	267.225	266.4714	269.229	269.146	266.392
2		266.152	271.690	271.364	265.823	265.3087	270.844	270.501	265.002
3		265.151	273.455	272.724	264.408	264.3288	272.600	271.880	263.611
4		264.304	275.371	274.075	262.981	263.4977	274.501	273.221	262.187
5		263.614	277.439	275.417	261.540	262.7984	276.533	274.539	260.745
6		263.079	279.657	276.752	260.084	262.2617	278.751	275.876	259.285
7		262.702	282.0257	278.079	258.612	261.8789	281.139	277.207	257.827
8		262.483	284.544	279.399	257.125	261.6490	283.641	278.502	256.335
9		262.423	287.214	280.714	255.620	261.5992	286.296	279.813	254.833
10		262.522	290.035	282.022	254.097	261.6963	289.107	281.106	253.326
11		262.783	293.007	283.326	252.555	261.9353	292.054	282.415	251.768
12		263.205	296.130	284.625	250.993	262.3713	295.180	283.694	250.224
13		263.791	299.406	285.919	249.410	262.9411	298.429	284.975	248.640
14		264.540	302.836	287.210	247.805	263.6917	301.857	286.262	247.037
15		265.455	306.419	288.498	246.176	264.6084	305.419	287.541	245.411

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları				
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0		268.615	268.615	268.615	268.615	268.687	268.687	268.687	268.687
1		267.307	270.077	269.995	267.225	267.378	270.150	270.068	267.296
2		266.152	271.690	271.364	265.823	266.221	271.765	271.439	265.892
3		265.151	273.455	272.724	264.408	265.219	273.532	272.800	264.473
4		264.304	275.371	274.075	262.981	264.372	275.451	274.152	263.079
5		263.614	277.439	275.417	261.540	263.681	277.521	275.497	261.605
6		263.079	279.657	276.752	260.084	263.146	279.741	276.832	260.147
7		262.702	282.025	278.079	258.612	262.768	282.112	278.161	258.675
8		262.483	284.544	279.399	257.125	262.549	284.634	279.483	257.185
9		262.423	287.214	280.714	255.620	262.488	287.306	280.798	255.679
10		262.522	290.035	282.022	254.097	262.588	290.130	282.109	254.155
11		262.783	293.007	283.326	252.555	262.849	293.106	283.414	252.612
12		263.205	296.130	284.625	250.993	263.272	296.233	284.714	251.048
13		263.791	299.406	285.919	249.410	263.858	299.513	286.010	249.463
14		264.540	302.836	287.210	247.805	264.609	302.946	287.302	247.857
15		265.455	306.419	288.498	246.176	265.524	306.533	288.591	246.226

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.5 4x4 Tek Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik modelin sonuçları				PID kontrolün sonuçları			
açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	313.828	313.828	313.828	313.828
1	467.788	472.635	472.492	467.644	312.336	315.553	315.465	312.229
2	465.766	475.458	474.888	465.190	311.092	317.545	317.156	310.710
3	464.014	478.547	477.267	462.715	309.801	319.494	318.641	308.934
4	462.533	481.900	479.631	460.217	308.836	321.754	320.242	307.289
5	461.324	485.518	481.980	457.695	308.081	324.163	321.796	305.653
6	460.389	489.400	484.315	455.147	307.414	326.776	323.379	303.926
7	459.729	493.545	486.638	452.572	306.972	329.549	325.020	302.205
8	459.345	497.953	488.949	449.968	306.737	332.614	326.607	300.499
9	459.240	502.625	491.249	447.335	306.630	335.701	327.988	298.689
10	459.414	507.561	493.539	444.670	306.742	338.872	329.518	296.903
11	459.870	512.762	495.820	441.972	307.042	342.348	331.165	295.114
12	460.610	518.229	498.093	439.238	307.555	346.135	332.626	293.285
13	461.634	523.962	500.359	436.468	308.220	349.956	334.204	291.435
14	462.946	529.963	502.618	433.659	309.101	353.962	335.574	289.561
15	464.546	536.233	504.871	430.809	310.167	358.163	337.196	287.670

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	424.898	424.898	424.898	424.898
1	467.788	472.635	472.492	467.644	423.900	426.139	426.073	423.829
2	465.766	475.458	474.888	465.190	422.979	427.447	427.184	422.714
3	464.014	478.547	477.267	462.715	422.191	428.889	428.300	421.596
4	462.533	481.900	479.631	460.217	421.372	430.298	429.252	420.345
5	461.324	485.518	481.980	457.695	420.856	432.008	430.377	419.139
6	460.389	489.400	484.315	455.147	420.490	433.859	431.516	418.074
7	459.729	493.545	486.638	452.572	420.139	435.786	432.602	416.841
8	459.345	497.953	488.949	449.968	420.010	437.802	433.656	415.689
9	459.240	502.625	491.249	447.335	419.962	439.960	434.717	414.475
10	459.414	507.561	493.539	444.670	420.021	442.213	435.750	413.225
11	459.870	512.762	495.820	441.972	420.262	444.642	436.832	412.010
12	460.610	518.229	498.093	439.238	420.605	447.166	437.885	410.762
13	461.634	523.962	500.359	436.468	421.003	449.719	438.845	409.415
14	462.946	529.963	502.618	433.659	421.686	452.580	439.975	408.187
15	464.546	536.233	504.871	430.809	422.434	455.480	441.023	406.888

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.6** 4x4 Tek Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	464.014	478.547	477.267	462.715	468.123	482.790	481.499	466.813
1	467.788	472.635	472.492	467.644	471.972	476.865	476.720	471.826
2	465.766	475.458	474.888	465.190	470.125	479.988	479.406	469.578
3	464.014	478.547	477.267	462.715	468.123	482.790	481.499	466.813
4	462.533	481.900	479.631	460.217	466.726	486.273	483.987	464.388
5	461.324	485.518	481.980	457.695	465.594	489.877	486.308	461.930
6	460.389	489.400	484.315	455.147	464.539	493.820	488.691	459.243
7	459.729	493.545	486.638	452.572	463.930	498.060	491.157	456.706
8	459.345	497.953	488.949	449.968	463.986	502.824	493.808	454.111
9	459.240	502.625	491.249	447.335	463.360	507.468	495.663	451.343
10	459.414	507.561	493.539	444.670	463.539	512.112	497.976	448.659
11	459.870	512.762	495.820	441.972	464.000	517.364	500.434	445.941
12	460.610	518.229	498.093	439.238	464.747	523.230	502.734	443.185
13	461.634	523.962	500.359	436.468	465.782	529.008	505.016	440.391
14	462.946	529.963	502.618	433.659	467.112	535.070	507.135	437.561
15	464.546	536.233	504.871	430.809	468.725	541.398	509.736	434.688

Direksiyon	Matematik Modelin sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	464.014	478.547	477.267	462.715	464.381	478.943	477.661	463.079
1	467.788	472.635	472.492	467.644	468.162	473.019	472.876	468.018
2	465.766	475.458	474.888	465.190	466.136	475.848	475.277	465.559
3	464.014	478.547	477.267	462.715	464.381	478.943	477.661	463.079
4	462.533	481.900	479.631	460.217	462.897	482.305	480.031	460.576
5	461.324	485.518	481.980	457.695	461.686	485.930	482.385	458.049
6	460.389	489.400	484.315	455.147	460.748	489.820	484.725	455.495
7	459.729	493.545	486.638	452.572	460.087	493.974	487.052	452.916
8	459.345	497.953	488.949	449.968	459.702	498.392	489.368	450.307
9	459.240	502.625	491.249	447.335	459.596	503.074	491.673	447.668
10	459.414	507.561	493.539	444.670	459.772	508.021	493.968	444.998
11	459.870	512.762	495.820	441.972	460.229	513.233	496.255	442.294
12	460.610	518.229	498.093	439.238	460.970	518.712	498.532	439.555
13	461.634	523.962	500.359	436.468	461.996	524.458	500.803	436.780
14	462.946	529.963	502.618	433.659	463.310	530.472	503.067	433.965
15	464.546	536.233	504.871	430.809	464.914	536.756	505.325	431.109

### EK 3. (Devam) Tek Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.7 4x4 Tek Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları				
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0		402.923	402.923	402.923	402.923	456.047	456.047	456.047	456.047
1		400.961	405.115	404.993	400.838	453.985	458.697	458.551	453.855
2		399.228	407.535	407.047	398.735	452.043	461.309	460.890	451.494
3		397.726	410.183	409.086	396.613	450.312	464.424	463.175	449.056
4		396.457	413.057	411.112	394.472	448.902	467.705	465.497	446.655
5		395.421	416.158	413.126	392.310	447.698	471.190	467.731	444.175
6		394.619	419.485	415.127	390.126	446.812	474.973	470.021	441.724
7		394.053	423.038	417.118	387.919	446.187	479.011	472.298	439.242
8		393.724	426.817	419.099	385.687	445.953	483.337	474.620	436.649
9		393.634	430.822	421.071	383.430	445.718	487.623	476.784	434.146
10		393.784	435.053	423.034	381.146	445.842	492.568	478.976	431.553
11		394.175	439.510	424.989	378.833	446.299	497.627	481.172	428.911
12		394.808	444.196	426.937	376.490	447.009	502.889	483.369	426.269
13		395.686	449.110	428.879	374.115	447.993	508.456	485.554	423.575
14		396.811	454.254	430.815	371.707	449.282	514.284	487.769	420.852
15		398.182	459.629	432.747	369.265	450.828	520.351	489.930	418.094

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları				
	Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0		402.923	402.923	402.923	402.923	403.143	403.143	403.143	403.143
1		400.961	405.115	404.993	400.838	401.177	405.338	405.216	401.054
2		399.228	407.535	407.047	398.735	399.442	407.762	407.273	398.947
3		397.726	410.183	409.086	396.613	397.938	410.414	409.316	396.829
4		396.457	413.057	411.112	394.472	396.667	413.294	411.345	394.689
5		395.421	416.158	413.126	392.310	395.629	416.400	413.362	392.537
6		394.619	419.485	415.127	390.126	394.826	419.732	415.367	390.326
7		394.053	423.038	417.118	387.919	394.259	423.290	417.361	388.115
8		393.724	426.817	419.099	385.687	393.930	427.075	419.345	385.880
9		393.634	430.822	421.071	383.430	393.839	431.086	421.319	383.619
10		393.784	435.053	423.034	381.146	393.989	435.324	423.286	381.332
11		394.175	439.510	424.989	378.833	394.381	439.789	425.244	379.015
12		394.808	444.196	426.937	376.490	395.016	444.482	427.196	376.669
13		395.686	449.110	428.879	374.115	395.895	449.404	429.141	374.291
14		396.811	454.254	430.815	371.707	397.021	454.556	431.080	371.879
15		398.182	459.629	432.747	369.265	398.395	459.940	433.015	369.433

### EK 3. (Devam) Tek Aksın Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

Çizelge 8.8 4x4 Tek Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	402.260	402.260	402.260	402.260
1	400.961	405.115	404.993	400.838	400.382	404.550	404.430	400.241
2	399.228	407.535	407.047	398.735	398.509	406.768	406.303	398.032
3	397.726	410.183	409.086	396.613	397.104	409.544	408.424	395.958
4	396.457	413.057	411.112	394.472	395.873	412.432	410.498	393.894
5	395.421	416.158	413.126	392.310	394.558	415.536	412.355	391.627
6	394.619	419.485	415.127	390.126	394.031	418.864	414.454	389.552
7	394.053	423.038	417.118	387.919	393.429	422.394	416.430	387.365
8	393.724	426.817	419.099	385.687	392.851	425.969	418.240	385.033
9	393.634	430.822	421.071	383.430	393.137	429.987	420.510	382.701
10	393.784	435.053	423.034	381.146	393.084	434.244	422.250	380.470
11	394.175	439.510	424.989	378.833	393.536	438.820	424.132	378.203
12	394.808	444.196	426.937	376.490	394.151	443.118	426.084	375.920
13	395.686	449.110	428.879	374.115	395.039	448.040	427.994	373.514
14	396.811	454.254	430.815	371.707	396.182	453.223	430.057	371.053
15	398.182	459.629	432.747	369.265	397.505	458.586	431.701	368.659

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	403.113	403.113	403.113	403.113
1	400.961	405.115	404.993	400.838	401.148	405.308	405.186	401.025
2	399.228	407.535	407.047	398.735	399.413	407.732	407.242	398.919
3	397.726	410.183	409.086	396.613	397.909	410.383	409.285	396.795
4	396.457	413.057	411.112	394.472	396.639	413.262	411.314	394.650
5	395.421	416.158	413.126	392.310	395.601	416.367	413.330	392.486
6	394.619	419.485	415.127	390.126	394.798	419.698	415.334	390.299
7	394.053	423.038	417.118	387.919	394.231	423.256	417.328	388.089
8	393.724	426.817	419.099	385.687	393.902	427.040	419.311	385.854
9	393.634	430.822	421.071	383.430	393.811	431.050	421.286	383.594
10	393.784	435.053	423.034	381.146	393.961	435.287	423.252	381.307
11	394.175	439.510	424.989	378.833	394.353	439.751	425.210	378.991
12	394.808	444.196	426.937	376.490	394.987	444.443	427.161	376.645
13	395.686	449.110	428.879	374.115	395.867	449.364	429.105	374.267
14	396.811	454.254	430.815	371.707	396.992	454.515	431.044	371.856
15	398.182	459.629	432.747	369.265	398.366	459.898	432.978	369.410

#### EK 4. İki Aksın Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.9** 4x4 İki Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	233.201	233.201	233.201	233.201
1	335.815	342.811	334.013	344.509	233.332	238.185	232.083	239.359
2	335.954	350.091	332.205	353.423	233.370	243.189	230.770	245.502
3	336.195	357.618	330.341	362.520	233.514	248.392	229.442	251.796
4	336.542	365.400	328.418	371.811	233.776	253.813	228.144	258.266
5	337.004	373.447	326.433	381.307	234.089	259.402	226.753	264.859
6	337.588	381.768	324.382	391.018	234.491	265.171	225.317	271.591
7	338.303	390.374	322.261	400.957	234.990	271.159	223.848	278.504
8	339.159	399.278	320.066	411.136	235.586	277.342	222.325	285.574
9	340.164	408.491	317.791	421.569	236.279	283.733	220.747	292.811
10	341.330	418.027	315.431	432.270	237.091	290.357	219.107	300.245
11	342.669	427.900	312.982	443.253	238.025	297.214	217.412	307.877
12	344.192	438.127	310.436	454.534	239.078	304.314	215.634	315.709
13	345.914	448.724	307.788	466.131	240.279	311.675	213.797	323.761
14	347.849	459.708	305.031	478.061	241.616	319.295	211.881	332.039
15	350.013	471.099	302.156	490.343	243.125	327.207	209.892	340.600

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	336.058	336.058	336.058	336.058
1	335.815	342.811	334.013	344.509	336.103	343.114	334.298	344.816
2	335.954	350.091	332.205	353.423	336.245	350.411	332.488	353.749
3	336.195	357.618	330.341	362.520	336.485	357.954	330.620	362.867
4	336.542	365.400	328.418	371.811	336.833	365.752	328.693	372.179
5	337.004	373.447	326.433	381.307	337.296	373.820	326.705	381.684
6	337.588	381.768	324.382	391.018	337.882	382.149	324.650	391.341
7	338.303	390.374	322.261	400.957	338.599	390.726	322.525	401.800
8	339.159	399.278	320.066	411.136	339.456	400.195	320.325	407.266
9	340.164	408.491	317.791	421.569	340.462	406.006	318.045	412.362
10	341.330	418.027	315.431	432.270	341.631	410.674	315.682	417.592
11	342.669	427.900	312.982	443.253	342.972	415.510	313.227	422.960
12	344.192	438.127	310.436	454.534	344.499	420.416	310.677	428.335
13	345.914	448.724	307.788	466.131	346.224	425.562	308.023	433.982
14	347.849	459.708	305.031	478.061	348.163	430.846	305.260	439.705
15	350.013	471.099	302.156	490.343	350.331	436.359	302.380	445.652

## EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.10** 4x4 İki Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	338.674	338.674	338.674	338.674
1	335.815	342.811	334.013	344.509	339.549	346.614	337.711	348.373
2	335.954	350.091	332.205	353.423	339.685	354.039	335.853	357.374
3	336.195	357.618	330.341	362.520	339.961	361.622	334.013	366.565
4	336.542	365.400	328.418	371.811	340.351	369.464	332.015	375.996
5	337.004	373.447	326.433	381.307	340.771	377.669	330.101	385.558
6	337.588	381.768	324.382	391.018	341.385	386.085	327.960	395.395
7	338.303	390.374	322.261	400.957	342.027	394.851	325.845	405.528
8	339.159	399.278	320.066	411.136	342.871	403.905	323.560	415.907
9	340.164	408.491	317.791	421.569	343.911	413.164	321.331	426.420
10	341.330	418.027	315.431	432.270	345.131	422.707	318.967	437.192
11	342.669	427.900	312.982	443.253	346.454	432.855	316.442	448.374
12	344.192	438.127	310.436	454.534	348.030	443.118	313.888	459.671
13	345.914	448.724	307.788	466.131	349.792	453.797	311.228	471.431
14	347.849	459.708	305.031	478.061	351.690	465.394	308.410	483.955
15	350.013	471.099	302.156	490.343	354.004	476.449	305.533	495.967

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	336.019	336.019	336.019	336.019
1	335.815	342.811	334.013	344.509	336.064	343.073	334.259	344.774
2	335.954	350.091	332.205	353.423	336.205	350.367	332.449	353.705
3	336.195	357.618	330.341	362.520	336.446	357.908	330.582	362.820
4	336.542	365.400	328.418	371.811	336.794	365.705	328.656	372.128
5	337.004	373.447	326.433	381.307	337.257	373.767	326.668	381.642
6	337.588	381.768	324.382	391.018	337.842	382.104	324.614	391.371
7	338.303	390.374	322.261	400.957	338.559	390.726	322.489	401.328
8	339.159	399.278	320.066	411.136	339.415	399.646	320.290	411.525
9	340.164	408.491	317.791	421.569	340.422	408.875	318.011	421.973
10	341.330	418.027	315.431	432.270	341.590	418.425	315.648	432.690
11	342.669	427.900	312.982	443.253	342.931	428.314	313.194	443.690
12	344.192	438.127	310.436	454.534	344.457	438.557	310.644	454.991
13	345.914	448.724	307.788	466.131	346.182	449.170	307.991	466.607
14	347.849	459.708	305.031	478.061	348.121	460.173	305.229	478.558
15	350.013	471.099	302.156	490.343	350.288	471.583	302.349	490.862

## EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.11** 4x4 İki Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	321.887	321.887	321.887	321.887
1	268.652	274.249	267.210	275.607	321.930	328.594	320.194	330.201
2	268.763	280.073	265.764	282.738	321.919	335.472	318.368	338.656
3	268.956	286.094	264.272	290.016	322.120	342.619	316.502	347.357
4	269.233	292.320	262.734	297.449	322.439	350.079	314.741	356.245
5	269.603	298.757	261.146	305.045	322.925	357.802	312.745	365.343
6	270.071	305.414	259.506	312.815	323.452	365.756	310.788	374.644
7	270.643	312.299	257.809	320.766	324.147	374.010	308.748	384.144
8	271.327	319.422	256.052	328.909	324.956	382.608	306.643	393.957
9	272.131	326.793	254.232	337.255	325.906	391.434	304.462	403.975
10	273.064	334.421	252.345	345.816	327.003	400.587	302.202	414.239
11	274.135	342.320	250.385	354.602	328.333	409.963	299.889	424.652
12	275.354	350.502	248.349	363.627	329.777	419.798	297.415	435.533
13	276.731	358.979	246.230	372.905	331.387	429.966	294.884	446.618
14	278.279	367.766	244.024	382.449	333.305	440.305	292.268	457.945
15	280.010	376.879	241.724	392.274	335.356	451.400	289.485	469.814

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	270.781	270.781	270.781	270.781
1	268.652	274.249	267.210	275.607	274.249	276.487	269.386	277.858
2	268.763	280.073	265.764	282.738	270.947	282.356	267.921	285.045
3	268.956	286.094	264.272	290.016	271.133	288.424	266.409	292.381
4	269.233	292.320	262.734	297.449	271.409	294.700	264.853	299.875
5	269.603	298.757	261.146	305.045	271.803	301.216	263.272	307.561
6	270.071	305.414	259.506	312.815	272.286	307.944	261.629	315.410
7	270.643	312.299	257.809	320.766	272.843	314.870	259.897	323.412
8	271.327	319.422	256.052	328.909	273.532	322.056	258.124	331.626
9	272.131	326.793	254.232	337.255	274.335	329.481	256.279	340.034
10	273.064	334.421	252.345	345.816	275.278	337.178	254.377	348.671
11	274.135	342.320	250.385	354.602	276.358	345.146	252.400	357.534
12	275.354	350.502	248.349	363.627	277.599	353.410	250.357	366.651
13	276.731	358.979	246.230	372.905	278.982	361.954	248.214	376.002
14	278.279	367.766	244.024	382.449	280.540	370.816	245.984	385.628
15	280.010	376.879	241.724	392.274	282.290	380.011	243.668	395.543

#### EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.12** 4x4 İki Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	321.887	321.887	321.887	321.887
1	268.615	268.615	268.615	268.615	268.541	268.541	268.541	268.541
2	268.763	280.073	265.764	282.738	267.924	279.181	264.943	281.853
3	268.956	286.094	264.272	290.016	268.092	285.166	263.456	289.081
4	269.233	292.320	262.734	297.449	268.374	291.385	261.950	296.479
5	269.603	298.757	261.146	305.045	268.715	297.795	260.318	304.050
6	270.071	305.414	259.506	312.815	269.144	304.391	258.697	311.792
7	270.643	312.299	257.809	320.766	269.787	311.268	256.940	319.723
8	271.327	319.422	256.052	328.909	270.517	318.359	255.254	327.809
9	272.131	326.793	254.232	337.255	271.265	325.689	253.394	336.129
10	273.064	334.421	252.345	345.816	272.175	333.312	251.548	344.657
11	274.135	342.320	250.385	354.602	273.215	341.199	249.591	353.449
12	275.354	350.502	248.349	363.627	274.408	349.389	247.562	362.499
13	276.731	358.979	246.230	372.905	275.819	357.835	245.462	371.715
14	278.279	367.766	244.024	382.449	277.336	366.505	243.267	381.144
15	280.010	376.879	241.724	392.274	279.019	375.645	240.984	391.011

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	270.781	270.781	270.781	270.781
1	268.615	268.615	268.615	268.615	268.687	268.687	268.687	268.687
2	268.763	280.073	265.764	282.738	268.836	280.157	265.833	282.826
3	268.956	286.094	264.272	290.016	269.028	286.186	264.340	290.112
4	269.233	292.320	262.734	297.449	269.306	292.418	262.800	297.553
5	269.603	298.757	261.146	305.045	269.676	298.863	261.211	305.158
6	270.071	305.414	259.506	312.815	270.144	305.527	259.569	312.936
7	270.643	312.299	257.809	320.766	270.717	312.420	257.870	320.896
8	271.327	319.422	256.052	328.909	271.402	319.551	256.112	329.047
9	272.131	326.793	254.232	337.255	272.207	326.928	254.291	337.399
10	273.064	334.421	252.345	345.816	273.141	334.563	252.401	345.966
11	274.135	342.320	250.385	354.602	274.213	342.468	250.440	354.760
12	275.354	350.502	248.349	363.627	275.433	350.656	248.401	363.794
13	276.731	358.979	246.230	372.905	276.812	359.141	246.280	373.080
14	278.279	367.766	244.024	382.449	278.361	367.936	244.072	382.633
15	280.010	376.879	241.724	392.274	280.094	377.058	241.770	392.469

## EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.13** 4x4 İki Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	313.828	313.828	313.828	313.828
1	470.141	479.936	467.619	482.313	313.897	320.566	312.205	322.076
2	470.336	490.128	465.087	494.792	314.039	327.233	310.530	330.349
3	470.672	500.666	462.477	507.529	314.325	334.413	308.787	338.997
4	471.159	511.561	459.785	520.536	314.568	341.689	307.008	347.660
5	471.806	522.826	457.007	533.830	315.065	349.192	305.147	356.553
6	472.624	534.475	454.135	547.426	315.561	356.989	303.234	365.607
7	473.625	546.524	451.166	561.340	316.234	365.011	301.273	374.890
8	474.822	558.989	448.092	575.591	317.027	373.346	299.182	384.400
9	476.230	571.887	444.907	590.197	317.974	381.930	297.063	394.149
10	477.862	585.238	441.604	605.178	319.085	390.742	294.870	404.148
11	479.736	599.061	438.175	620.554	320.324	400.073	292.610	414.409
12	481.869	613.378	434.611	636.348	321.782	409.615	290.195	424.931
13	484.280	628.213	430.904	652.584	323.332	419.517	287.763	435.766
14	486.989	643.591	427.043	669.286	325.199	429.739	285.168	446.868
15	490.018	659.539	423.018	686.480	327.242	440.415	282.455	458.376

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	424.898	424.898	424.898	424.898
1	470.141	479.936	467.619	482.313	424.990	429.505	423.701	430.601
2	470.336	490.128	465.087	494.792	425.110	434.233	422.690	436.383
3	470.672	500.666	462.477	507.529	425.240	439.066	421.463	442.229
4	471.159	511.561	459.785	520.536	425.337	443.960	420.109	448.098
5	471.806	522.826	457.007	533.830	425.773	449.285	418.950	454.358
6	472.624	534.475	454.135	547.426	426.057	454.618	417.547	460.592
7	473.625	546.524	451.166	561.340	426.567	460.229	416.210	467.059
8	474.822	558.989	448.092	575.591	427.158	465.964	414.836	473.624
9	476.230	571.887	444.907	590.197	427.722	471.902	413.285	480.340
10	477.862	585.238	441.604	605.178	428.552	478.072	411.840	487.262
11	479.736	599.061	438.175	620.554	429.371	484.459	410.214	494.365
12	481.869	613.378	434.611	636.348	430.397	491.040	408.615	501.626
13	484.280	628.213	430.904	652.584	431.507	497.876	406.899	509.108
14	486.989	643.591	427.043	669.286	432.713	504.983	405.083	516.826
15	490.018	659.539	423.018	686.480	434.168	512.315	403.287	524.733

## EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.14** 4x4 İki Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	473.927	473.927	473.927	473.927
1	470.141	479.936	467.619	482.313	474.368	484.350	471.822	486.753
2	470.336	490.128	465.087	494.792	474.540	494.511	469.242	499.218
3	470.672	500.666	462.477	507.529	475.052	505.319	466.630	512.425
4	471.159	511.561	459.785	520.536	475.379	516.489	463.902	525.544
5	471.806	522.826	457.007	533.830	476.201	527.876	461.117	538.972
6	472.624	534.475	454.135	547.426	476.890	539.637	458.232	552.685
7	473.625	546.524	451.166	561.340	477.932	551.769	455.255	566.704
8	474.822	558.989	448.092	575.591	479.100	564.344	452.104	581.084
9	476.230	571.887	444.907	590.197	480.553	577.362	448.935	595.833
10	477.862	585.238	441.604	605.178	482.205	590.685	445.611	610.943
11	479.736	599.061	438.175	620.554	484.139	604.745	442.189	626.420
12	481.869	613.378	434.611	636.348	486.260	619.208	438.581	642.376
13	484.280	628.213	430.904	652.584	488.690	634.175	434.837	658.764
14	486.989	643.591	427.043	669.286	491.461	649.651	430.964	675.574
15	490.018	659.539	423.018	686.480	494.607	665.798	426.844	692.980

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	470.457	470.457	470.457	470.457
1	470.141	479.936	467.619	482.313	470.520	480.335	467.992	482.718
2	470.336	490.128	465.087	494.792	470.716	490.550	465.456	495.224
3	470.672	500.666	462.477	507.529	471.053	501.110	462.841	507.988
4	471.159	511.561	459.785	520.536	471.541	512.030	460.144	521.025
5	471.806	522.826	457.007	533.830	472.188	523.319	457.359	534.347
6	472.624	534.475	454.135	547.426	473.009	534.994	454.482	547.973
7	473.625	546.524	451.166	561.340	474.012	547.069	451.507	561.915
8	474.822	558.989	448.092	575.591	475.212	559.559	448.427	576.191
9	476.230	571.887	444.907	590.197	476.622	572.481	445.236	590.816
10	477.862	585.238	441.604	605.178	478.258	585.850	441.926	605.818
11	479.736	599.061	438.175	620.554	480.136	599.692	438.490	621.218
12	481.869	613.378	434.611	636.348	482.273	614.030	434.919	637.039
13	484.280	628.213	430.904	652.584	484.689	628.890	431.204	653.303
14	486.989	643.591	427.043	669.286	487.404	644.295	427.336	670.033
15	490.018	659.539	423.018	686.480	490.439	660.270	423.304	687.257

#### EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeleri

**Çizelge 8.15** 4x4 İki Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	456.047	456.0479	456.047	456.047
1	402.978	411.373	400.816	413.411	456.275	465.7588	453.826	468.080
2	403.145	420.110	398.646	424.108	456.470	475.6681	451.376	480.173
3	403.434	429.142	396.409	435.024	456.772	485.8624	448.855	492.355
4	403.850	438.480	394.102	446.174	457.234	496.4249	446.220	505.141
5	404.405	448.136	391.720	457.568	457.871	507.3657	443.523	518.039
6	405.106	458.122	389.259	469.222	458.661	518.6540	440.719	531.223
7	405.964	468.449	386.714	481.149	459.642	530.3728	437.829	544.728
8	406.991	479.134	384.079	493.364	460.807	542.4491	434.856	558.547
9	408.197	490.189	381.349	505.883	462.184	554.9812	431.781	572.694
10	409.596	501.632	378.517	518.724	463.747	568.0046	428.548	587.301
11	411.202	513.481	375.578	531.903	465.507	581.2573	425.176	602.228
12	413.031	525.753	372.524	545.441	467.596	595.1758	421.740	617.518
13	415.097	538.469	369.346	559.358	469.925	609.6458	418.134	633.198
14	417.419	551.650	366.037	573.673	472.552	624.5568	414.412	649.375
15	420.015	565.319	362.587	588.412	475.563	639.9593	410.553	666.061

Direksiyon Açısı	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	403.143	403.1436	403.143	403.143
1	402.978	411.373	400.816	413.411	403.197	411.6067	401.032	413.647
2	403.145	420.110	398.646	424.108	403.365	420.3574	398.859	424.361
3	403.434	429.142	396.409	435.024	403.654	429.4044	396.619	435.296
4	403.850	438.480	394.102	446.174	404.072	438.7583	394.308	446.464
5	404.405	448.136	391.720	457.568	404.627	448.4293	391.922	457.876
6	405.106	458.122	389.259	469.222	405.329	458.4308	389.458	469.549
7	405.964	468.449	386.714	481.149	406.189	468.7755	386.908	481.495
8	406.991	479.134	384.079	493.364	407.217	479.4770	384.269	493.727
9	408.197	490.189	381.349	505.883	408.425	490.5489	381.536	506.260
10	409.596	501.632	378.517	518.724	409.827	502.0050	378.700	519.116
11	411.202	513.481	375.578	531.903	411.435	513.8667	375.756	532.312
12	413.031	525.753	372.524	545.441	413.266	526.1539	372.697	545.870
13	415.097	538.469	369.346	559.358	415.336	538.8869	369.514	559.806
14	417.419	551.650	366.037	573.673	417.662	552.0872	366.200	574.141
15	420.015	565.319	362.587	588.412	420.262	565.7757	362.745	588.899

#### EK 4.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 4x4 Çizelgeler

**Çizelge 8.16** 4x4 iki Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.9239	402.9239	402.923	402.260	402.2609	402.2609	402.260
1	402.978	411.373	400.816	413.411	402.371	410.625	400.188	412.698
2	403.145	420.110	398.646	424.108	402.532	419.555	398.009	423.478
3	403.434	429.142	396.409	435.024	402.678	428.219	395.674	434.113
4	403.850	438.480	394.102	446.174	403.216	437.393	393.520	445.221
5	404.405	448.136	391.720	457.568	403.553	447.036	391.077	456.532
6	405.106	458.122	389.259	469.222	404.428	457.015	388.648	468.165
7	405.964	468.449	386.714	481.149	405.292	467.400	386.059	480.134
8	406.991	479.134	384.079	493.364	406.291	478.050	383.423	492.229
9	408.197	490.189	381.349	505.883	407.481	489.425	380.653	504.946
10	409.596	501.632	378.517	518.724	408.869	500.761	377.845	517.637
11	411.202	513.481	375.578	531.903	410.371	512.257	374.818	530.819
12	413.031	525.753	372.524	545.441	412.308	524.609	371.873	544.211
13	415.097	538.469	369.346	559.358	414.249	537.385	368.593	557.918
14	417.419	551.650	366.037	573.673	416.749	550.375	365.352	572.422
15	420.015	565.319	362.587	588.412	419.137	563.874	361.937	586.744

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları				Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları			
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	403.113	403.113	403.113	403.113
1	402.978	411.373	400.816	413.411	403.168	411.575	401.003	413.615
2	403.145	420.110	398.646	424.108	403.336	420.323	398.830	424.327
3	403.434	429.142	396.409	435.024	403.624	429.368	396.590	435.259
4	403.850	438.480	394.102	446.174	404.042	438.720	394.280	446.424
5	404.405	448.136	391.720	457.568	404.597	448.389	391.895	457.834
6	405.106	458.122	389.259	469.222	405.299	458.389	389.431	469.505
7	405.964	468.449	386.714	481.149	406.159	468.731	386.882	481.448
8	406.991	479.134	384.079	493.364	407.186	479.430	384.244	493.678
9	408.197	490.189	381.349	505.883	408.394	490.500	381.510	506.209
10	409.596	501.632	378.517	518.724	409.796	500.761	378.675	519.062
11	411.202	513.481	375.578	531.903	411.404	513.814	375.732	532.257
12	413.031	525.753	372.524	545.441	413.235	526.099	372.673	545.811
13	415.097	538.469	369.346	559.358	415.304	538.830	369.492	559.745
14	417.419	551.650	366.037	573.673	417.629	552.027	366.178	574.078
15	420.015	565.319	362.587	588.412	420.229	565.713	362.724	588.833

## EK 5. İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeler

**Çizelge 8.17** 6x6 İki Aks 3.017. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon		Matematik Modelin Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	335.769	335.769
1	334.081	337.543	334.049	337.511	334.030	337.493
2	332.480	339.403	332.348	339.273	332.273	339.200
3	330.967	341.346	330.667	341.056	330.499	340.893
4	329.542	343.374	329.007	342.861	328.705	342.571
5	328.207	345.486	327.366	344.687	326.892	344.237
6	326.964	347.682	325.745	346.535	325.057	345.889
7	325.814	349.960	324.144	348.406	323.201	347.529
8	324.758	352.323	322.563	350.301	321.322	349.158
9	323.799	354.769	321.003	352.219	319.419	350.776
10	322.937	357.298	319.463	354.161	317.491	352.384
11	322.177	359.912	317.943	356.128	315.537	353.981
12	321.518	362.611	316.445	358.121	313.555	355.570
13	320.965	365.395	314.968	360.140	311.544	357.149
14	320.518	368.263	313.514	362.186	309.504	358.720
15	320.182	371.223	312.082	364.260	307.431	360.283

Direksiyon		PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	233.201	233.201	233.201	233.201	233.201	233.201
1	232.089	234.489	232.054	234.465	232.048	234.448
2	231.018	235.819	230.925	235.738	230.874	235.692
3	229.913	237.119	229.714	236.920	229.589	236.808
4	228.912	238.514	228.534	238.154	228.327	237.955
5	227.996	239.997	227.411	239.440	227.076	239.130
6	227.116	241.505	226.268	240.706	225.820	240.259
7	226.312	243.079	225.159	242.010	224.502	241.400
8	225.569	244.716	224.054	243.314	223.201	242.528
9	224.917	246.424	222.975	244.649	221.873	243.652
10	224.326	248.178	221.921	246.011	220.549	244.776
11	325.801	363.982	321.484	360.122	319.056	358.024
12	223.347	251.870	219.818	248.754	217.819	246.989
13	222.942	253.802	218.781	250.152	216.404	248.073

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

14	222.644	255.797	217.774	251.570	214.989	249.173
15	222.397	257.844	216.770	253.019	213.562	250.254

<b>Direksiyon</b>		<b>Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	336.058	336.058	336.058	336.058	336.058	336.058
1	334.367	337.836	334.334	337.804	334.316	337.785
2	332.762	339.699	332.629	339.569	332.555	339.496
3	331.247	341.648	330.947	341.357	330.778	341.193
4	329.820	343.680	329.283	343.165	328.981	342.875
5	328.482	345.796	327.639	344.995	327.164	344.544
6	327.237	347.996	326.015	346.847	325.326	346.200
7	326.084	350.279	324.411	348.722	323.466	347.843
8	325.027	352.647	322.827	350.621	321.584	349.476
9	324.065	355.098	321.264	352.542	319.677	351.097
10	323.202	357.633	319.721	354.489	317.745	352.708
11	322.404	360.207	318.164	356.415	315.754	354.265
12	321.780	362.958	316.697	358.457	313.802	355.901
13	321.226	365.747	315.218	360.481	311.787	357.484
14	320.779	368.624	313.761	362.532	309.742	359.058
15	320.442	371.589	312.326	364.609	307.666	360.625

**Çizelge 8.18** 6x6 İki Aks 4. Saniyede Taşıtın Hızı 50 km/h iken Tekerlekler

<b>Direksiyon</b>		<b>Matematik Modelin Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	335.769	335.769	335.769	335.769	335.769	335.769
1	334.081	337.543	334.049	337.511	334.030	337.490
2	332.480	339.403	332.348	339.273	332.273	339.200
3	330.967	341.346	330.667	341.056	330.499	340.893
4	329.542	343.374	329.007	342.861	328.705	342.571
5	328.207	345.486	327.366	344.687	326.892	344.237
6	326.964	347.682	325.745	346.535	325.057	345.889
7	325.814	349.960	324.144	348.406	323.201	347.529
8	323.799	354.769	321.003	352.219	319.419	350.776
9	323.799	354.769	321.003	352.219	319.419	350.776
10	322.937	357.298	319.463	354.161	317.491	352.384
11	322.177	359.912	317.943	356.128	315.537	353.981

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizgeleri**

12	321.518	362.611	316.445	358.121	313.555	355.570
13	320.965	365.395	314.968	360.140	311.544	357.149
14	320.518	368.266	313.514	362.186	309.504	358.720
15	320.182	371.223	312.082	364.260	307.431	360.283

<b>Direksiyon</b>		<b>PID Kontrolün Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	338.674	338.674	338.674	338.679	338.674	338.674
1	337.834	341.340	337.786	341.318	337.765	341.296
2	336.239	343.261	336.108	343.107	336.027	342.993
3	334.680	345.208	334.363	344.898	334.179	344.730
4	333.270	347.219	332.705	346.719	332.377	346.442
5	331.871	349.369	331.051	348.590	330.530	348.125
6	330.622	351.587	329.396	350.422	328.741	349.804
7	329.483	353.923	327.786	352.326	326.833	351.423
8	328.383	356.316	326.174	354.262	324.917	353.100
9	327.447	358.771	324.608	356.193	322.995	354.759
10	326.558	361.359	323.053	358.179	321.063	356.356
11	325.801	363.982	321.484	360.122	319.056	358.024
12	325.117	366.733	320.000	362.197	317.072	359.610
13	324.576	369.537	318.477	364.196	315.036	361.218
14	324.117	372.447	317.003	366.288	312.951	362.801
15	323.771	375.430	315.574	368.396	310.869	364.347

<b>Direksiyon</b>		<b>Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	336.019	336.019	336.019	336.019	336.019	336.019
1	334.328	337.796	334.295	337.764	334.277	337.746
2	332.724	339.659	332.591	339.529	332.516	339.456
3	331.209	341.607	330.909	341.316	330.740	341.152
4	329.782	343.638	329.246	343.124	328.944	342.834
5	328.445	345.754	327.602	344.953	327.127	344.502
6	327.200	347.953	325.979	346.805	325.290	346.158
7	326.047	350.236	324.375	348.679	323.430	347.801
8	324.990	352.603	322.792	350.577	321.549	349.433
9	324.029	355.053	321.228	352.498	319.642	351.053
10	323.166	357.588	319.686	354.444	317.711	352.664

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

11	322.404	360.207	318.164	356.415	315.754	354.265
12	321.745	362.911	316.663	358.412	313.768	355.856
13	321.190	365.700	315.184	360.434	311.754	357.438
14	320.743	368.576	313.727	362.484	309.710	359.012
15	320.407	371.539	312.293	364.562	307.634	360.579

**Çizelge 8.19** 6x6 iki Aks 6.017. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	268.615	268.615
1	267.265	270.035	267.239	270.009	267.224	269.994
2	265.984	271.522	265.878	271.418	265.819	271.360
3	264.773	273.077	264.534	272.845	264.399	272.714
4	263.633	274.699	263.205	274.288	262.964	274.057
5	262.566	276.389	261.893	275.749	261.513	275.389
6	261.571	278.145	260.596	277.228	260.046	276.711
7	260.651	279.968	259.315	278.725	258.561	278.023
8	259.806	281.858	258.051	280.240	257.058	279.326
9	259.039	283.815	256.802	281.775	255.535	280.621
10	258.350	285.839	255.570	283.329	253.993	281.907
11	257.741	287.930	254.354	284.902	252.429	283.185
12	257.214	290.089	253.156	286.496	250.844	284.456
13	256.772	292.316	251.974	288.112	249.236	285.719
14	256.415	294.613	250.811	289.748	247.603	286.976
15	256.146	296.978	249.665	291.408	245.945	288.227

Direksiyon	PID Kontrolün Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	321.887	321.887	321.887	321.887	321.887	321.887
1	320.380	323.629	320.322	323.613	320.304	323.593
2	318.749	325.391	318.655	325.282	318.595	325.176
3	317.306	327.228	317.010	326.968	316.862	326.803
4	315.849	329.068	315.307	328.599	315.037	328.327
5	314.534	331.079	313.735	330.302	313.267	329.860
6	313.323	333.147	312.166	332.054	311.515	331.434
7	312.197	335.320	310.586	333.810	309.685	332.963
8	311.175	337.561	309.065	335.629	307.894	334.561

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

9	310.255	339.942	307.588	337.466	306.053	336.092
10	309.412	342.329	306.091	339.341	304.218	337.665
11	308.705	344.841	304.632	341.227	302.350	339.158
12	308.064	347.414	303.204	343.132	300.428	340.686
13	307.536	350.105	301.772	345.067	298.504	342.186
14	307.105	352.834	300.385	347.004	296.556	343.716
15	306.785	355.666	299.014	349.004	294.556	345.207

Direksiyon		Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	270.781	270.781	270.781	270.781	270.781	270.781
1	269.429	272.223	269.402	272.196	269.387	272.182
2	268.139	273.726	268.032	273.621	267.972	273.562
3	266.922	275.299	266.681	275.065	266.545	274.933
4	265.766	276.929	265.334	276.515	265.091	276.281
5	264.709	278.654	264.030	278.009	263.647	277.645
6	263.682	280.402	262.699	279.477	262.144	278.956
7	262.756	282.243	261.408	280.989	260.647	280.281
8	261.902	284.149	260.131	282.517	259.130	281.594
9	261.134	286.129	258.878	284.070	257.600	282.906
10	260.438	288.169	257.634	285.637	256.043	284.202
11	259.830	290.285	256.413	287.230	254.471	285.498
12	259.289	292.454	255.195	288.829	252.862	286.770
13	258.846	294.705	254.007	290.463	251.244	288.049
14	258.484	297.020	252.831	292.112	249.595	289.315
15	258.218	299.412	251.681	293.791	247.927	290.582

**Çizelge 8.20 6x6 İki Aks 7. Saniyede Taşıtın Hızı 40 km/h iken Tekerlekler**

Direksiyon		Matematik Modelin Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	268.615	268.615	268.615	268.615	268.615	268.615
1	267.265	270.035	267.239	270.009	267.224	269.994
2	265.984	271.522	265.878	271.418	265.819	271.360
3	264.773	273.077	264.534	272.845	264.399	272.714
4	263.633	274.699	263.205	274.288	262.964	274.057
5	262.566	276.389	261.893	275.749	261.513	275.389

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

6	261.571	278.145	260.596	277.228	260.046	276.711
7	260.651	279.968	259.315	278.725	258.561	278.023
8	259.806	281.858	258.051	280.240	257.058	279.326
9	259.039	283.815	256.802	281.775	255.535	280.621
10	258.350	285.839	255.570	283.329	253.993	281.907
11	257.741	287.930	254.354	284.902	252.429	283.185
12	257.214	290.089	253.156	286.496	250.844	284.456
13	256.772	292.316	251.974	288.112	249.236	285.719
14	256.415	294.613	250.811	289.748	247.603	286.976
15	256.146	296.978	249.665	291.408	245.945	288.227

Direksiyon		PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	268.541	268.541	268.541	268.541	268.541	268.541
1	266.414	269.158	266.392	269.128	266.364	269.119
2	265.147	270.669	265.049	270.561	264.999	270.511
3	263.960	272.210	263.716	271.983	263.600	271.849
4	262.788	273.801	262.386	273.414	262.154	273.184
5	261.746	275.486	261.068	274.851	260.688	274.514
6	260.745	277.249	259.773	276.319	259.231	275.806
7	259.827	279.068	258.487	277.811	257.743	277.117
8	258.994	280.931	257.238	279.339	256.238	278.422
9	258.203	282.895	255.990	280.857	254.743	279.712
10	257.531	284.909	254.784	282.402	253.222	280.996
11	256.927	286.992	253.585	283.992	251.656	282.264
12	256.392	289.137	252.329	285.557	250.047	283.538
13	255.961	291.351	251.187	287.156	248.464	284.766
14	255.602	293.637	250.032	288.776	246.835	286.028
15	255.353	295.995	248.864	290.462	245.184	287.274

Direksiyon		Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları				
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	268.687	268.687	268.687	268.687	268.687	268.687
1	267.335	270.108	267.309	270.082	267.294	270.067
2	266.053	271.597	265.947	271.493	265.887	271.434
3	264.842	273.154	264.602	272.921	264.467	272.791
4	263.701	274.778	263.272	274.367	263.031	274.135

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

5	262.632	276.469	261.958	275.829	261.578	275.469
6	261.637	278.227	260.660	277.310	260.110	276.792
7	260.715	280.052	259.378	278.808	258.623	278.106
8	259.870	281.944	258.112	280.325	257.119	279.410
9	259.102	283.903	256.863	281.861	255.595	280.706
10	258.412	285.929	255.629	283.416	254.051	281.993
11	257.803	288.023	254.413	284.992	252.486	283.273
12	257.275	290.184	253.213	286.588	250.899	284.545
13	256.832	292.414	252.031	288.205	249.289	285.810
14	256.475	294.713	250.866	289.844	247.655	287.068
15	256.206	297.082	249.719	291.505	245.995	288.320

**Çizelge 8.21** 6x6 İki Aks 9.017. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	470.077	470.077	470.077	470.077	470.077	470.077
1	467.714	472.561	467.668	472.515	467.642	472.490
2	465.472	475.164	465.287	474.982	465.183	474.880
3	463.353	477.885	462.934	477.479	462.698	477.250
4	461.359	480.724	460.609	480.005	460.187	479.600
5	459.490	483.681	458.312	482.562	457.648	481.931
6	457.750	486.754	456.043	485.150	455.080	484.245
7	456.139	489.945	453.802	487.769	452.482	486.541
8	454.661	493.252	451.589	490.421	449.851	488.822
9	453.318	496.676	449.404	493.106	447.187	491.087
10	452.113	500.218	447.248	495.825	444.488	493.337
11	451.047	503.878	445.121	498.579	441.752	495.574
12	450.126	507.656	443.023	501.369	438.977	497.798
13	449.351	511.554	440.956	504.196	436.162	500.009
14	448.726	515.572	438.919	507.060	433.305	502.209
15	448.255	519.713	436.914	509.964	430.404	504.397

Direksiyon	PID Kontrolün Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	313.828	313.828	313.828	313.828	313.828	313.828
1	312.276	315.572	312.262	315.496	312.237	315.466
2	310.769	317.245	310.654	317.109	310.577	317.052

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

3	309.364	319.051	309.088	318.787	308.932	318.635
4	308.029	320.945	307.529	320.475	307.254	320.200
5	306.800	322.934	306.011	322.337	305.580	321.872
6	305.802	325.131	304.676	324.046	304.040	323.419
7	304.597	327.273	303.052	325.690	302.158	324.890
8	303.589	329.396	301.524	327.514	300.360	326.441
9	302.676	331.697	300.061	329.230	298.587	327.962
10	301.869	333.986	298.615	331.124	296.766	329.467
11	301.194	336.555	297.238	332.896	295.007	330.892
12	300.553	339.064	295.814	334.821	293.114	332.440
13	300.029	341.673	294.431	336.779	291.232	333.988
14	299.624	344.374	293.080	338.562	289.342	335.389
15	299.303	347.117	291.756	340.631	287.406	336.758

Direksiyon	Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	424.898	424.898	424.898	424.898	424.898	424.898
1	423.820	426.054	423.798	426.033	423.786	426.021
2	422.845	427.312	422.760	427.228	422.711	427.181
3	421.887	428.585	421.694	428.398	421.585	428.293
4	420.965	429.891	420.620	429.560	420.425	429.373
5	420.082	431.232	419.539	430.716	419.233	430.426
6	419.285	432.653	418.498	431.914	418.054	431.497
7	418.541	434.123	417.464	433.120	416.855	432.554
8	417.865	435.654	416.449	434.349	415.648	433.612
9	417.244	437.229	415.440	435.583	414.425	434.652
10	416.666	438.840	414.424	436.815	413.152	435.668
11	416.138	440.549	413.406	438.107	411.853	436.721
12	415.775	442.293	412.501	439.395	410.637	437.748
13	415.436	444.105	411.566	440.713	409.357	438.783
14	415.128	445.945	410.608	442.021	408.033	439.785
15	414.905	447.850	409.685	443.356	406.685	440.790

**Çizelge 8.22** 6x6 İki Aks 10. Saniyede Taşıtın Hızı 70 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

<b>0</b>	470.077	470.077	470.077	470.077	470.077	470.077
<b>1</b>	467.714	472.561	467.668	472.515	467.642	472.490
<b>2</b>	465.472	475.164	465.287	474.982	465.183	474.880
<b>3</b>	463.353	477.885	462.934	477.479	462.698	477.250
<b>4</b>	461.359	480.724	460.609	480.005	460.187	479.600
<b>5</b>	459.490	483.681	458.312	482.562	457.648	481.931
<b>6</b>	457.750	486.754	456.043	485.150	455.080	484.245
<b>7</b>	456.139	489.945	453.802	487.769	452.482	486.541
<b>8</b>	454.661	493.252	451.589	490.421	449.851	488.822
<b>9</b>	453.318	496.676	449.404	493.106	447.187	491.087
<b>10</b>	452.113	500.218	447.248	495.825	444.488	493.337
<b>11</b>	451.047	503.878	445.121	498.579	441.752	495.574
<b>12</b>	450.126	507.656	443.023	501.369	438.977	497.798
<b>13</b>	449.351	511.554	440.956	504.196	436.162	500.009
<b>14</b>	448.726	515.572	438.919	507.060	433.305	502.209
<b>15</b>	448.255	519.713	436.914	509.964	430.404	504.397

<b>Direksiyon</b>	<b>PID Kontrolün Sonuçları</b>						
	<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<b>0</b>		473.927	473.927	473.927	473.927	473.927	473.927
<b>1</b>		471.942	476.926	471.897	476.785	471.870	476.760
<b>2</b>		469.634	479.416	469.446	479.234	469.341	479.133
<b>3</b>		467.493	482.156	467.069	481.746	466.833	481.514
<b>4</b>		465.486	485.030	464.728	484.302	464.303	483.893
<b>5</b>		463.622	488.036	462.432	487.037	461.764	486.406
<b>6</b>		462.235	491.490	460.438	489.889	459.345	488.984
<b>7</b>		460.828	494.838	458.439	492.669	457.128	491.439
<b>8</b>		458.759	497.859	455.656	495.005	453.904	493.389
<b>9</b>		457.406	501.318	453.454	497.558	451.218	495.676
<b>10</b>		456.187	504.725	451.278	500.460	448.490	497.952
<b>11</b>		455.171	508.562	449.189	503.146	445.786	500.115
<b>12</b>		454.183	512.559	447.020	506.061	442.937	502.455
<b>13</b>		453.405	516.507	444.939	508.904	440.102	504.684
<b>14</b>		452.779	520.566	442.887	511.639	437.227	506.911
<b>15</b>		452.303	524.753	440.865	514.910	434.290	508.953

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

<b>Direksiyon</b>		<b>Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<b>0</b>	470.457	470.457	470.457	470.457	470.457	470.457
<b>1</b>	468.088	472.945	468.042	472.900	468.016	472.874
<b>2</b>	465.841	475.553	465.656	475.372	465.551	475.269
<b>3</b>	463.719	478.281	463.299	477.874	463.062	477.644
<b>4</b>	461.720	481.126	460.969	480.405	460.546	479.999
<b>5</b>	459.848	484.089	458.667	482.968	458.002	482.336
<b>6</b>	458.104	487.169	456.394	485.561	455.429	484.654
<b>7</b>	456.490	490.366	454.148	488.186	452.825	486.955
<b>8</b>	455.009	493.680	451.930	490.844	450.189	489.241
<b>9</b>	453.663	497.112	449.741	493.534	447.520	491.510
<b>10</b>	452.455	500.662	447.581	496.259	444.815	493.766
<b>11</b>	451.388	504.329	445.450	499.019	442.074	496.008
<b>12</b>	450.464	508.116	443.348	501.815	439.294	498.236
<b>13</b>	449.688	512.022	441.276	504.648	436.473	500.452
<b>14</b>	449.062	516.050	439.236	507.519	433.611	502.657
<b>15</b>	448.590	520.199	437.227	510.429	430.704	504.850

**Çizelge 8.23** 6x6 İki Aks 12.017. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

<b>Direksiyon</b>		<b>Matematik Modelin Sonuçları</b>				
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<b>0</b>	402.923	402.923	402.923	402.923	402.923	402.923
<b>1</b>	400.898	405.052	400.858	405.013	400.836	404.991
<b>2</b>	398.976	407.283	398.817	407.128	398.728	407.040
<b>3</b>	397.160	409.616	396.801	409.268	396.598	409.071
<b>4</b>	395.450	412.049	394.808	411.433	394.446	411.086
<b>5</b>	393.849	414.584	392.839	413.624	392.270	413.084
<b>6</b>	392.357	417.218	390.894	415.843	390.069	415.067
<b>7</b>	390.977	419.953	388.973	418.088	387.841	417.035
<b>8</b>	389.710	422.787	387.076	420.361	385.587	418.990
<b>9</b>	388.558	425.722	385.203	422.662	383.303	420.931
<b>10</b>	387.525	428.758	383.355	424.993	380.990	422.860
<b>11</b>	386.612	431.895	381.532	427.354	378.644	424.778
<b>12</b>	385.822	435.134	379.734	429.745	376.266	426.684
<b>13</b>	385.158	438.475	377.962	432.168	373.853	428.579

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

<b>14</b>	384.622	441.919	376.216	434.623	371.405	430.464
<b>15</b>	384.219	445.468	374.498	437.112	368.918	432.340
<hr/>						
<b>Direksiyon</b>	<b>PID Kontrolün Sonuçları</b>					
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
<b>0</b>	456.047	456.047	456.047	456.047	456.047	456.047
<b>1</b>	453.930	458.618	453.875	458.586	453.847	458.563
<b>2</b>	451.732	461.146	451.548	460.971	451.461	399.189
<b>3</b>	449.699	463.801	449.285	463.402	449.060	463.185
<b>4</b>	447.747	466.549	447.021	465.834	446.613	465.453
<b>5</b>	445.919	469.408	444.790	468.305	444.131	467.705
<b>6</b>	444.429	472.549	442.512	470.993	441.877	470.118
<b>7</b>	442.898	475.633	440.643	473.525	439.223	472.344
<b>8</b>	441.235	478.671	438.248	475.924	436.573	474.375
<b>9</b>	439.931	481.989	436.144	478.541	433.987	476.581
<b>10</b>	438.751	485.442	434.036	481.179	431.354	478.755
<b>11</b>	437.747	489.000	431.998	483.884	428.718	480.969
<b>12</b>	436.834	492.635	429.927	486.529	426.011	483.067
<b>13</b>	436.095	496.399	427.923	489.302	423.270	485.216
<b>14</b>	435.479	500.320	425.966	492.092	420.504	487.370
<b>15</b>	435.026	504.323	424.007	494.834	417.689	489.518

<hr/>						
<b>Direksiyon</b>	<b>Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları</b>					
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
<b>0</b>	403.143	403.143	403.143	403.143	403.143	403.143
<b>1</b>	401.114	405.275	401.075	405.236	401.053	405.214
<b>2</b>	399.189	407.510	399.030	407.354	398.941	407.266
<b>3</b>	397.371	409.846	397.011	409.497	396.808	409.301
<b>4</b>	395.658	412.284	395.015	411.666	394.653	411.319
<b>5</b>	394.054	414.822	393.043	413.861	392.473	413.320
<b>6</b>	392.560	417.461	391.095	416.083	390.269	415.306
<b>7</b>	391.178	420.200	389.171	418.332	388.038	417.278
<b>8</b>	389.909	423.039	387.271	420.609	385.780	419.235
<b>9</b>	388.756	425.979	385.396	422.914	383.493	421.180
<b>10</b>	387.721	429.020	383.545	425.248	381.176	423.112
<b>11</b>	386.807	432.161	381.719	427.613	378.827	425.033

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

12	386.015	435.405	379.918	430.008	376.445	426.942
13	385.350	438.752	378.143	432.434	374.029	428.840
14	384.814	442.202	376.395	434.894	371.576	430.729
15	384.409	445.756	374.674	437.386	369.086	432.607

**Çizelge 8.24** 6x6 İki Aks 13. Saniyede Taşıtın Hızı 60 km/h iken Tekerlekler

Direksiyon	Matematik Modelin Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	402.923	402.923	402.923	402.923	402.923	402.923
1	400.898	405.052	400.858	405.013	400.836	404.991
2	398.976	407.283	398.817	407.128	398.728	407.040
3	397.160	409.616	396.801	409.268	396.598	409.071
4	395.450	412.049	394.808	411.433	394.446	411.086
5	393.849	414.584	392.839	413.624	392.270	413.084
6	392.357	417.218	390.894	415.843	390.069	415.067
7	390.977	419.953	388.973	418.088	387.841	417.035
8	389.710	422.787	387.076	420.361	385.587	418.990
9	388.558	425.722	385.203	422.662	383.303	420.931
10	387.525	428.758	383.355	424.993	380.990	422.860
11	386.612	431.895	381.532	427.354	378.644	424.778
12	385.822	435.134	379.734	429.745	376.266	426.684
13	385.158	438.475	377.962	432.168	373.853	428.579
14	384.622	441.919	376.216	434.623	371.405	430.464
15	384.219	445.468	374.498	437.112	368.918	432.340

Direksiyon	PID Kontrolün Sonuçları					
Açısı	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
0	402.260	402.260	402.260	402.260	402.260	402.260
1	400.293	404.387	400.236	404.426	400.216	404.407
2	398.318	406.704	398.205	406.488	398.114	406.421
3	396.525	408.934	396.223	408.663	395.863	408.392
4	394.810	411.443	394.072	410.677	393.854	410.408
5	393.293	413.962	392.224	412.722	391.573	412.315
6	391.497	416.343	390.148	414.959	389.251	414.157
7	390.170	419.118	388.170	417.240	387.080	416.172
8	389.144	421.894	386.385	419.594	384.888	418.129
9	388.026	424.993	384.505	421.888	382.608	420.039

**EK 5.(Devam) İki Akstan Yönlendirme 6x6 Çizelgeleri**

<b>10</b>	386.900	428.003	382.703	424.169	380.320	421.985
<b>11</b>	385.827	431.159	380.790	426.562	378.156	424.035
<b>12</b>	385.121	434.066	379.045	428.822	375.582	425.767
<b>13</b>	384.473	437.416	377.393	431.261	373.192	427.771
<b>14</b>	384.056	440.843	375.560	433.893	370.753	429.645
<b>15</b>	383.671	444.384	373.841	436.302	368.269	431.565

<b>Direksiyon</b>	<b>Fuzzy PID Kontrolün Sonuçları</b>					
<b>Açısı</b>	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
<b>0</b>	403.113	403.113	403.113	403.113	403.113	403.113
<b>1</b>	401.085	405.245	401.045	405.206	401.023	405.184
<b>2</b>	399.161	407.479	399.002	407.323	398.912	407.236
<b>3</b>	397.342	409.815	396.982	409.466	396.780	409.270
<b>4</b>	395.630	412.252	394.987	411.635	394.625	411.287
<b>5</b>	394.027	414.790	393.015	413.829	392.446	413.288
<b>6</b>	392.533	417.428	391.068	416.050	390.241	415.274
<b>7</b>	391.151	420.166	389.144	418.299	388.011	417.245
<b>8</b>	389.882	423.005	387.245	420.575	385.754	419.202
<b>9</b>	388.729	425.944	385.370	422.880	383.467	421.146
<b>10</b>	387.694	428.984	383.519	425.214	381.150	423.078
<b>11</b>	386.780	432.125	381.694	427.578	378.802	424.998
<b>12</b>	385.989	435.369	379.893	429.972	376.421	426.907
<b>13</b>	385.324	438.714	378.119	432.398	374.005	428.805
<b>14</b>	384.788	442.163	376.371	434.857	371.553	430.693
<b>15</b>	384.384	445.717	374.650	437.349	369.063	432.571

\* Tüm değerler rpm cinsinden verilmiştir.