

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADAPTİF BULANIK MANTIK METODOLOJİSİ İLE
ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇEKİŞ KONTROL SİSTEMİ
TASARIMI VE MODELLEMESİ

TAQIALDEEN ABOALKIBASH

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ADAPTİF BULANIK MANTIK METODOLOJİSİ İLE
ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇEKİŞ KONTROL SİSTEMİ
TASARIMI VE MODELLEMESİ**

TAQIALDEEN ABOALKIBASH

Doç.Dr. ALİ TÜRKCAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç.Dr. MURAT AYAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi YUSUF ÇİLLİYÜZ
Jüri Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.06.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

- Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.
- Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Taqialdeen Aboalkibash

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Taqialdeen Aboalkibash

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çevresel kaygılar, uluslararası düzenlemeler ve yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmesi nedeniyle otomotiv sektöründe geleneksel araç teknolojilerinden modern elektrikli araç teknolojilerine doğru yaşanan endüstriyel kayma, araçların dinamik kontrol metodolojilerinde teknolojik bir boşluk yaratmıştır. Güç sistemlerindeki ilerlemeler ve farklılıklar, elektrikli araçların modern teknolojisiyle uyum sağlamak ve çağdaş tekniklerden yararlanmak için çeşitli geleneksel dinamik sistemlerin yerine yeni kontrol sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Üzerinde en çok çalışılan sistemlerden biri, çeşitli kontrol metodolojilerinin verimliliğinin değerlendirmek ve alternatif bir kontrol yaklaşımı belirlemek amacıyla araştırılan tekerlek Çekiş Kontrol Sistemidir. Bu doğrultuda, bu çalışma, Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araç için tekerlek Çekiş Kontrol Sistemini, Bulanık Mantık Adaptif Kontrol metodolojisi kullanarak araştırmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşımın amacı geleneksel sistemlere modern ve alternatif bir kontrol metodolojisi olarak etkinliğini değerlendirmektir. Bu metodoloji, Bulanık Mantık Kontrolü ile Oransal-Integral kontrolü birleştirilerek, Tekerlek Kayması Kontrolünü kullanarak tekerlek çekişini yönetmekte ve zorlu sürüş koşullarında optimum araç performansını sağlamaktadır.

Şükür, fazilet ve hamd her şeyin başında ve sonunda alemlerin Rabbi olan Allah'a aittir. İlk öğretmenimiz, sevgili Peygamberimiz Muhammed'e (sallallahu aleyhi ve sellem) salat ve selam olsun.

Öncelikle, sunduğu eğitim fırsatı için Türkiye Cumhuriyeti hükümetine teşekkür ederim. Ayrıca, bu tezi tamamlamama yardımcı olan yapıcı yönlendirmeleri ve çabaları için sevgili danışmanlarım Doç.Dr. Ali TÜRKCAN ve Doç.Dr. Murat AYAZ'a sonsuz teşekkür ve takdirlerimi sunarım. Tezin redaksiyon aşamasındaki yardımlarından dolayı Arş.Gör. Elif KILINÇ YILDIRIM'e teşekkür ederim. İsimlerini ve unvanlarını anmadan geçemeyeceğim, bu tezin ortaya çıkmasında katkıda bulunan tüm hocalarıma da büyük bir minnet ve saygı duyarım.

Özellikle anneme, eğitimim boyunca dualarıyla yanımda olduğu için, ve tüm aile üyelerime bana verdikleri destekten dolayı içtenlikle minnet ve takdirlerimi sunarım. Sürekli desteklerinden dolayı sevgili arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu tezi, özgür Filistin ve ebedi başkenti Kudüs-ü Şerifteki aziz şehitlerimizin ruhlarına ithaf ediyorum.

Haziran, 2024

Taqialdeen ABOALKIBASH

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	4
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ VE DİNAMİKLERİ	14
3.1. Elektrikli Araç Teknolojisi	14
3.1.1. Genel Bakış	14
3.1.2. Tekerlek İçi Motor Teknolojisi	18
3.2. Araç Dinamikleri	20
3.2.1. Tekerlek Dinamiği	21
3.2.1.1. Lastik Koordinat ve Kuvvet Sistemleri	21
3.2.1.2. Lastik Yuvarlanma Direnci	22
3.2.1.3. Tekerlek Uzunlamasına Kuvveti	24
3.2.1.4. Magic Formülü Lastik Modeline Giriş	27
3.2.1.5. Tekerlek Uzunlamasına Hareketi	28
3.2.2. Uzunlamasına Araç Dinamiği	29
3.2.2.1. Uzunlamasına Araç Ağırlık Dağılımı	29
3.2.2.2. Aracın Yol Yükleri	30
3.2.2.3. Aracın Uzunlamasına Hareket Denklemi	32
4. MODELLEME YÖNTEMİ VE KONTROL	34
4.1. Genel Bakış	34
4.2. Elektrikli Araç Modelleri	34
4.2.1. Araç Gövde Modellemesi	34
4.2.2. Tekerlek Modelleme	36
4.2.3. Elektrik Motoru Modelleme	36
4.3. Üst Düzey Kontrol Modelleme ve Yöntemoloji	37
4.3.1. BMK Metodolojisinin Tanıtımı	37
4.3.2. Genel Kontrol Metodolojisi	39
4.3.3. Denetleyici Modelleme	40
4.3.3.1. BMK Modelleme	40
4.3.3.2. BMK-PI Modelleme	43
4.4. Test Metodolojisi	44
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	46
5.1. Birinci Senaryo	46
5.1.1. Birinci Senaryo: Kontrolsüz Model Sonuçları	46
5.1.2. Birinci Senaryo: Kontrollü Model Sonuçları	48
5.1.3. Birinci Senaryo: Sonuçların Tartışması	54
5.2. İkinci Senaryo	57
5.2.1. İkinci Senaryo: Kontrolsüz Model Sonuçları	57

5.2.2. İkinci Senaryo: Kontrollü Modellerin Sonuçları	61
5.2.3. İkinci Senaryo: Sonuçların Tartışması	66
5.3. Verimli Yüksek Seviye Denetleyici	67
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
6.1. Sonuçlar	73
6.2. Öneriler	74
KAYNAKLAR	75
EKLER	81
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	84
ÖZGEÇMİŞ	85



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Güç ve enerji yoğunluğu açısından enerji kaynakları Karşılaştırması	16
Şekil 3.2.	EV güç aktarma organları mimarisi: (a) Merkezi EM, (b) Tekerlek mili başına tek motorlu ünite, (c) Bireysel Dolaylı motor, (d) Bireysel Dolaysız motor	17
Şekil 3.3.	Protean-Pd18-TİM model tasarımı genel bakışı	19
Şekil 3.4.	Tekerlek içi elektrik motorları için WPT teknolojisi	20
Şekil 3.5.	Lastik koordinat sistemi	21
Şekil 3.6.	Tekerlek lastik temas yüzeyindeki normal stres dağılımı	23
Şekil 3.7.	Sürüş ve frenleme durumlarında tekerlek kayma oranına bağlı olarak uzunlamasına sürtünme katsayısı	25
Şekil 3.8.	Kayma oranı ve yan kayma açısı fonksiyonu olarak lastik kuvvetleri; (a) uzunlamasına kuvvet oranı ve (b) yan kuvvet oranı	26
Şekil 3.9.	Magic Formula deneysel parametreler ve lastik kuvveti deneysel eğrisi	28
Şekil 3.10.	Tekerleğin Uzunlamasına Kuvvetler Serbest Vücut Diyagramı	29
Şekil 3.11.	Araç gövdesinin ağırlık dağılımı	30
Şekil 3.12.	Aracın Aerodinamik Sürtünme Kuvveti Temsili	31
Şekil 3.13.	Araç uzunlamasına hareket altındaki serbest cisim diyagramı	33
Şekil 4.1.	TİM-EA modeli	35
Şekil 4.2.	Araç gövdesi ve tekerlek aksları modeli	35
Şekil 4.3.	Tekil Tekerlek İçi Elektrik Motoru Modelleme	37
Şekil 4.4.	BMK'nin konfigürasyonu	38
Şekil 4.5.	Bireysel Tekerlek-Çekiş-Kontrol Diyagramı	40
Şekil 4.6.	BMK'nin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları	41
Şekil 4.7.	BM-kontrolörünün toplam kontrol haritası	42
Şekil 4.8.	BMK-PI denetleyicinin modeli	44
Şekil 4.9.	Longitudinal Sürücü Modeli	45
Şekil 5.1.	Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Gerçek Kayma Oranı Bakışı	46
Şekil 5.2.	Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerlekler için Sürtünme Katsayısı-Kayma Diyagramı	47
Şekil 5.3.	Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Tork Tepkisi	48
Şekil 5.4.	Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Güç Tüketimi	48
Şekil 5.5.	Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Dönüş Hızı	49
Şekil 5.6.	Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; Tekerlek Kayma Tepkisi	49
Şekil 5.7.	Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; Tekerleğin Sürtünme Katsayısı – Kayma Diyagramları	50
Şekil 5.8.	Birinci senaryo; Tekerleğin Sürtünme Katsayısı – Zaman Diyagramları	51

Şekil 5.9.	Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Talep Ettiği Torklar	51
Şekil 5.10.	Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Zaman İçindeki Güç Tüketimi	52
Şekil 5.11.	Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Dönme Hızları	52
Şekil 5.12.	Birinci senaryo; Çarkın Boyuna İtici Kuvvetlerinin Modellenmesi	53
Şekil 5.13.	Birinci senaryo; Araç İvmesinin Modellenmesi	54
Şekil 5.14.	Birinci senaryo; Araç Hızının Modellenmesi	54
Şekil 5.15.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Hızlanma Tepkisi	57
Şekil 5.16.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Hız Tepkisi	58
Şekil 5.17.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; TİM'lerin Tork Diyagramı	59
Şekil 5.18.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; TİM'nin Güç Tüketimi Diyagramı	59
Şekil 5.19.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Aracın Dinamik Ağırlık Aktarma Davranışı	60
Şekil 5.20.	İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Tekerleklerinin Kayma Tepkisi	60
Şekil 5.21.	İkinci senaryo; Araç Hızlanma Tepkisi	61
Şekil 5.22.	İkinci senaryo; Araç Hız Tepkisi	62
Şekil 5.23.	İkinci senaryo; Ön TİM'lerin Talep Ettiği Torklar	63
Şekil 5.24.	İkinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'lerin Güç Tüketimi Diyagramları	63
Şekil 5.25.	İkinci senaryodaki kontrollü modelleri; Araç Tekerleklerinin Kayma Tepki Diyagramları	64
Şekil 5.26.	İkinci senaryo; Araç Tekerleklerinin Sürtünme Katsayısı Diyagramları	65
Şekil 5.27.	İkinci senaryo; Araç Tekerleklerinin Boyuna sürüş Kuvvet Diyagramları	65
Şekil 5.28.	(0.2)'nin ikinci senaryo kontrollü kayma modeli; Aracın Dinamik Ağırlık Aktarma Davranışı	66
Şekil 5.29.	Birinci Senaryo; Üst Düzey Kontrol Faktörleri	68
Şekil 5.30.	Birinci Senaryo; Üst Düzey Denetleyici Parçalarının Kontrol Kazanımları	69
Şekil 5.31.	Birinci Senaryo; Yüksek Seviye Kontrolörün Tork Azaltma Kontrol Çalışması	69
Şekil 5.32.	İkinci Senaryo; Üst Düzey Kontrol Faktörleri	70
Şekil 5.33.	İkinci Senaryo; Üst Düzey Kontrolörün Tork Azaltma Kontrol Çalışması	71
Şekil 5.34.	İkinci Senaryo; Üst Düzey Denetleyici Parçalarının Kontrol Kazanımları	72

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	Uzunlamasına sürtünme katsayılarının ortalama değerleri	25
Tablo 4.1.	Lastik (Magic Formula) modelleme katsayıları	36
Tablo 4.2.	BM-kontrolörünün Kural tabanı	42
Tablo 5.1.	Birinci Senaryo; Modellerin Özellikleri Karşılaştırmalı Tablosu	55
Tablo 5.2.	İkinci Senaryo; Modellerin Özellikleri Karşılaştırmalı Tablosu	67
Tablo A.1.	Modelleme özellikleri tablosu	82



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

F_x	: Tekerleğin uzunlamasına kuvveti.
F_y	: Tekerleğin yanal kuvveti.
F_z	: Tekerleğin normal kuvveti.
F_R	: Tekerleğin yuvarlanma direnci.
F_{aero}	: Aracın aerodinamik sürüklenme kuvveti.
M_x	: Tekerleğin devrilme momenti
M_y	: Tekerleğin yuvarlanma direncinin momenti
M_z	: Tekerleğin ayarlama momenti
R_g	: Lastiğin geometrik yarıçapı.
R_w	: Lastiğin etkili yarıçapı.
f_{ro}	: Tekerleğin yuvarlanma katsayısını.
σ_z	: Tekerleğin normal gerilimi.
s	: Tekerleğin uzunlamasına kayma oranı.
ω_w	: Lastiğin açısal hızı.
V_x	: Lastiğin ileri hızı.
μ_x	: Lastiğin uzunlamasına sürtünme katsayısı.
α	: Tekerleğin yana-kayma açısı.
γ	: Tekerleğin Kamber açısı.
A, B, C, D, E	: Ampirik lastiğin karakteristik parametreleri.
T_w	: Tekerleğe uygulanan tork.
m_w	: Tekerleğin kütlesi.
I_w	: Tekerleğin kütle eylemsizlik momenti (Tekerleğin Ataleti).
C	: Aracın kütle merkezi.
L_f	: Aracın kütle merkezinden (C) ön aksa olan mesafe.
L_r	: Aracın kütle merkezinden (C) arka aksa olan mesafe.
L	: Aracın dingil mesafesi.
h	: Araç kütle merkezinin yerden yüksekliği.
a	: Aracın uzunlamasına ivmesi.
g	: Yerçekimi ivmesi.
ρ	: Havanın kütle yoğunluğu.
C_D	: Aerodinamik sürtünme katsayısı.
A_F	: Aracın eşdeğer ön alanı.
V_w	: Rüzgar hızı.
m	: Aracın kütlesi.

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım (Alternative Current - AC).
ASK	: Araç Stabilite Kontrol sistemi (Vehicle Stability Controlling system - VSC).
AWD	: All-Wheel Drive (Tüm Tekerlekler Çekiş).
BMAK	: Bulanık Mantık Adaptif Kontrol (Fuzzy Logic Adaptive Control - FLAC).
BMK	: Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control - FLC).

BMK-PI	: Bulanık Mantık Kontrol – Oransal-Integral denetleyici.
ÇKS	: Çekiş Kontrol Sistemi (Traction Control System - TCS).
D.I.G.	: Dynamic Integrator Gain (Dinamik İntegratör Kazancı).
DA	: Doğru Akım (Direct Current - DC).
EA	: Elektrikli Araç (Electric Vehicle - EV).
EM	: Elektrik Motoru (Electric Motor).
ESP	: Elektronik Stabilite Programı (Electronic Stability Program).
EYS	: Enerji Yönetim Sistemi (Energy Management System - EMS).
FIS	: Fuzzy Inference System (Bulanık Çıkarım Sistemi).
FWD	: Front Wheel Drive (Ön-Tekerlekten Çekiş).
HEA	: Hibrit Elektrikli Araç (Hybrid Electric Vehicles - HEV).
HEDS	: Hibritle Enerji Depolama Sistemi (Hybrid Energy Storage System - HESS).
HIL	: Hardware-In-Loop simulation (Döngü İçi Donanım simülasyonu).
I.G.	: Integration Gain (İntegral Kazanç).
İYM	: İçten Yanmalı Motor (Internal Combustion Engine - ICE).
KÖS	: Kilitlenmeyi Önleme Sistemi (Anti-lock Braking System - ABS).
P.G.	: Proportional Gain (Oransal Kazanç).
PI	: Proportional-Integral (Oransal-Integral).
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türev).
PMSM	: Permanent Magnet Synchronous Motor (Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor).
RWD	: Rear Wheel Drive (Arka-Tekerlekten Çekiş).
TEA	: Tamamen Elektrikli Araçlar (Full Electric Vehicles - FEV).
THEA	: Tak-çalıştır Hibrit Elektrikli Araç (Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV)
TİM	: Tekerlek İçi Motor (In-Wheel Motor - IWM).
TİM-EA	: Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araç (In-Wheel Motor Electric Vehicle - IWM-EV).
TKK	: Tekerlek Kayma Kontrolü (Wheel Slip Control - WSC).
UK	: Ultra-Kapasitör (Ultra-Capacitor - UC).
VDC	: Vehicle Dynamic Control (Araç Dinamik Kontrol).
WPT	: Wireless Power Transfer (kablosuz güç transferi).
YH	: Yakıt Hücresi (Fuel-Cell – FC).

ADAPTİF BULANIK MANTIK METODOLOJİSİ İLE ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇEKİŞ KONTROL SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLEMESİ.

ÖZET

Elektrikli Araç (EA) teknolojisinin evrimi, geleneksel araç kontrol sistemlerini, EA'ların benzersiz güç dinamiklerine uyum sağlamak için güncelleme ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bu sistemler arasında, Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS), elektrikli güç sistemlerindeki ilerlemeler göz önüne alındığında, kontrol metodolojisinde yeni bir yaklaşım gerektiren önemli bir konumdadır. Dolayısıyla, modern EA'lar içinde tekerlek dinamiklerine odaklanan ve çeşitli güç sistem tasarımlarına yönelik araştırmalarda bir artış yaşanmıştır. Özellikle, Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araçlar (TİM-EA'lar), EA teknolojisi içinde geleceğin teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu tez, TİM-EA'larda uzunlamasına tekerlek dinamiklerini düzenlemek üzere tasarlanmış olan Bulanık Mantık Adaptif Kontrol (BMAK) sisteminin verimliliğini ve etkinliğini anlatmaktadır. Özellikle de kaygan buzlu yollar gibi zorlu sürüş senaryolarında. BMAK sistemi, tekerlek kayma dinamiklerine dayalı adaptif parametreler kullanan Bulanık Mantık Kontrolörü (BMK) ve Oransal-Integral (PI) kontrolcüsünü entegre etmektedir. Kapsamlı MATLAB simülasyonlarıyla, birçok kontrol edilen tekerlek kayma modeli karşılaştırılmış ve en istikrarlı ve verimli yaklaşımı belirlemek için çalışılmıştır. Sonuçlar, tekerlek çekişini ve araç stabilitesini koruma konusunda üstün performansı göstermektedir. BMK-PI kontrolcüsünün işleyişinin detaylı analizi, tork isteklerini dinamik olarak ayarlayarak tekerlek kayma ve araç dinamiklerini optimize etme yeteneğini vurgulamakta ve farklı sürüş koşullarında araç kontrolünü geliştirmede BMAK sisteminin etkililiğini daha da vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: BMAK (Bulanık Mantık Adaptif Kontrol), BMK-PI (Bulanık Mantık Kontrolörü - Oransal-Integral), ÇKS (Çekiş Kontrol Sistemi), TİM-EA (Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araç), TTK (Tekerlek Kayma Kontrolü).

TRACTION CONTROL SYSTEM DESIGN AND MODELING IN ELECTRIC VEHICLES WITH ADAPTIVE FUZZY LOGIC METHODOLOGY.

ABSTRACT

The evolution of Electric Vehicle (EV) technology has spurred the need to update traditional vehicle control systems to accommodate the unique power dynamics of EVs. Among these systems, the Traction Control System (TCS) stands out as requiring a fresh approach to control methodology, given the advancements in electrical power systems. Consequently, there has been a surge in research focusing on wheel dynamics within modern EVs and various power system designs. In particular, In-Wheel Motorized Electric Vehicles (IWM-EVs) have emerged as a future technology within the EVs technology. This thesis delves into the efficiency and effectiveness of a Fuzzy Logic Adaptive Control (FLAC) system designed to regulate the TCS for longitudinal-wheel dynamics in IWM-EVs, especially in challenging driving scenarios such as slippery ice roads. The FLAC system integrates a Fuzzy Logic Controller (FLC) and a Proportional-Integral (PI) controller, employing adaptive parameters based on wheel slip dynamics. Numerous controlled wheel slip models were compared through extensive MATLAB simulations to identify the most stable and efficient approach. The results demonstrate superior performance in maintaining wheel traction and vehicle stability. A detailed analysis of the FLC-PI controller's operation underscores its ability to dynamically adjust torque requests to optimize wheel slip and vehicle dynamics, further emphasizing the efficacy of the FLAC system in enhancing vehicle control in diverse driving conditions.

Keywords: FLAC (Fuzzy Logic Adaptive Control), FLC-PI (Fuzzy Logic Control-Proportional Integral), TCS (Traction Control System), IWM-EV (In-Wheel Motor-Electric Vehicle), WSC (Wheel Slip Control).

1. GİRİŞ

Sanayi Devrimi veya modern küresel sistem olarak adlandırılabilir olan, insan algısını Dünya gezegenindeki yaşam üzerinde devrim niteliğinde değiştirdi. Makineler, insanlık için sürekli birer refakatçi haline geldi, öyle ki, koşullar ve zamanlar ne olursa olsun vazgeçilmez hale geldiler. İnsan yaşam sisteminde sonsuza dek bir değişikliğin duyurulmasıyla 18. yüzyıl sona erdi. Ardından, 19. yüzyıl geldi ve Sanayi Devrimi'ni ileriye taşıdı. Sanayi devrimi insanlık tarihi için eşsiz bir bilimsel ve endüstriyel devrim haline geldi. Yıllar geçti ve Sanayi Devrimi, bugün Bilimsel Teknoloji Devrimi ve akıllı makineler çağı olarak bilinen mevcut durumuna ulaştı (Landes, 2003).

Ancak, bu gelişme ve değişim, doğal hayatın veya insan yaşam biçiminin her seviyesinde kolay olmadı. Bu devrimin başlangıcından beri, insanlar insanlık endüstri-teknolojik gelişimini ilerletmek için tüm mevcut doğal kaynakları sömürmeye çalıştılar. Bununla birlikte, doğal kaynakların aşırı sömürülmesi sadece Dünya'nın doğal kaynaklarını yok etti ve çevresel birliktelik kavramını bozdu. Bu çevresel etki, hemen ortaya çıkmadı, bu da insanlığı doğal kaynakların sorumsuzca kullanımıyla çevresel dengenin bozulmasına teşvik eden güçlü bir itici güç oldu. Ancak, 20. yüzyılın sonuna gelindiğinde, insanlar Sanayi Devrimi'nin çevre üzerindeki olumsuz etkisinin farkına vardılar ve çevre koruma sistemleri kavramının ortaya çıkmasına yol açtılar. Bu kavram, küresel endüstriyel sistemin bir parçası haline geldi ve tüm ülkeleri yeşil teknolojiye, yani çevre dostu teknolojiye geçmeye zorladı (Malik, ve diğ., 2024).

Otomobil endüstrisi, Sanayi Devrimi'nin önemli bir parçasıdır ve kullanılan değişen teknolojilere rağmen dünya çapında medeniyetin ve teknolojinin öncüsü olmuştur, olmaya da devam etmektedir. Ancak, otomobil endüstrisi, Sanayi Devrimi kavramıyla benzerlikler paylaşmaktadır. Otomotiv endüstrisi, önemli ölçüde olumsuz çevresel etkilere neden olmuştur. Geleneksel İçten Yanmalı Motor (İYM) araçlar, başta fosil yakıtlar olmak üzere, çevresel enerji kaynaklarını sömürmeye ve küresel rezervlerini tüketmeye önemli ölçüde katkıda bulunmuşlar ve sürdürülemez enerji tükenmesi riski oluşturmuşlardır. Ek olarak, otomotiv sektörü, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel fenomenlerden sorumlu olan başlıca endüstriyel sektörlerden biridir (Mayyas ve diğ., 2012). Dolayısıyla, otomotiv endüstrisi, çevre düzenlemelerine uymak zorunda

kalmakta ve bu sektörün çevre koruma sistemleri kavramıyla uyumlu yeni endüstriyel çözümler geliştirmesini gerektirmektedir (Bergek ve diğ., 2014).

Elektrikli Araçlar (EA), basit bir kavram olarak, elektrik güç sistemlerine sahip araçlardır. Ancak bu kavram, 19. yüzyılın sonlarında yalnızca endüstriyel bir fikir olmaktan çıkıp, 20. yüzyılın sonlarında geleceğin çevre dostu teknolojik bir bakış açısı haline geldi. 20. yüzyılın sonları ve 21. yüzyılın başı, elektrikli otomobil üretimi tarihinde temel bir dönüm noktası oldu. Bu teknoloji, ikincil bir teknoloji olarak görülmek yerine otomotiv endüstrisinin geleceği olmaya doğru ilerledi. Çevre koruma sistemlerinin uygulanmasına artan ilgiyle birlikte elektrik teknolojisi, otomotiv sektöründe başlangıçta hibrit otomobillerde (çeşitli türleri) görüldüğü gibi ikincil veya yardımcı bir bileşen olarak ortaya çıkmış, daha sonra çevre dostu alternatifin ana konsepti haline gelmiştir. Otomotiv üretim dünyasındaki teknoloji. Bu teknoloji geliştikçe tamamen elektrikli otomobil konseptiyle otomotiv sektöründe öncü rol oynamaya başladı (Situ, 2009).

Tamamen Elektrikli Araçlar (TEA'lar), araçtaki güç sistemi açısından geleneksel araçlardan farklılık gösterir. Geleneksel araçlar, tekerlekleri döndürmek için gerekli mekanik gücü üretmek için içten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtlara dayanır. Buna karşılık, elektrikli araçlar, tekerlekleri döndürmek için gereken mekanik gücü üretmek için bir veya daha fazla elektrik motoruna dayanır. Araçtaki çeşitli elektrik enerjisi kaynakları, aracın elektrikli sisteminde benimsenen enerji sistemi teknolojisine bağlı olarak, depolanmış olabilir (örneğin, pillerde, yakıt hücrelerinde veya güneş pillerinde) (Chan ve Wong, 2004). Geleneksel ve elektrikli araçlar arasında birçok farklılık bulunmasına rağmen, aralarında benzerlikler de vardır. Temelde, her iki araç da aynı dinamik yasalara tabi mekanik varlıklardır, ancak kontrol sistemleri iki sistem arasında değişebilir. Tekerleklerin ve hareketin dinamikleri, geleneksel ve elektrikli sistemler arasında ortaktır, ancak aracın güç sisteminde kullanılan teknolojiye bağlı olarak kontrol sistemlerinde farklılıklar ortaya çıkabilir (Esmailzadeh ve diğ., 2001).

Tekerlek kayma kontrol sistemi, aracın istikrar ve yönlendirme kontrolü kavramını şekillendiren başlıca sistemlerden biridir. Aracın kullanılan enerji teknolojisine bakılmaksızın, bu kontrol konseptinde dinamik sistem aynı kalır. Geleneksel araçlarda, kontrol, tekerlek fren sistemlerini kontrol etmenin yanı sıra içten yanmalı motor torku üzerinedir. Elektrikli araçlarda, kontrol başlıca elektrik motoru torku üzerinedir, fren

sistemleri üzerindeki kontrol ise, elektrikli arabanın güç sistemi tasarımına bağılı olarak ikincil bir parçadır (Yu ve diğ., 2008; Savitski ve diğ., 2019b).

Bu tez, Tekerlek İçi Motor (TİM) teknolojisi kavramıyla birlikte Elektrikli Araçlarda (EA'lar) bir ÇKS olarak tekerlek kayma kontrol sistemi üzerinde ışıık tutmayı amaçlamaktadır. Bu tekerleklerin içine entegre edilmiş motorlarla (TİM teknolojisi) birlikte Elektrikli Araçlar için en önemli gelecek teknolojilerden biri olarak düşünölmektedir. Bu tez, EA'ların tekerleklerinde entegre motor teknolojisinin çalışma prensibini ve bu teknolojinin simölasyon metodolojisini inceleyerek, Matlab/Simulink araçlarını kullanarak mantıksal kontrol sistemlerine dayalı aracın uzunlamasına tekerlek kayma kontrol sisteminin çalışma prensibini incelemektedir. Buradaki amaç, EA'nın zorlu sürüş koşullarında stabilitesini korumaktır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Son on yıllarda, özellikle donanım ve yazılım açısından elektronik kontrol sistemleri gibi teknolojik ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Bu gelişmenin, güç kontrol sistemleri, emniyet ve güvenlik sistemleri, iletişim sistemleri ve araçlardaki akıllı sistemler de dahil olmak üzere modern otomotiv mühendisliği teknolojisi üzerinde açık bir etkisi oldu (Powers ve diğ., 2000). Ayrıca, içten yanmalı motorlarla çalışan geleneksel araçlarda, ateşleme ve yanma sistemlerini yönetmede dikkate değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu sayede, bu motorların verimliliği artırılmış ve çeşitli çevre dostu sistemlerin kullanımıyla emisyonlar azaltılmıştır (Carbot-Rojas ve diğ., 2017; Sinigaglia ve diğ., 2022). Ancak, bu ilerlemelere rağmen, dünya otomotiv endüstrisi sektöründe geleceğin teknolojisi olarak elektrikli araç teknolojisine doğru kaymaktadır (Pavlínek, 2023).

Elektrikli araçlar son yirmi yılda yavaş yavaş ortaya çıkmıştır. İlk olarak, elektrik motorunun araçtaki içten yanmalı motor için ikincil veya yardımcı bir işlev olarak hizmet ettiği hafif hibrit elektrikli araç teknolojisiyle başlamıştır (Frieske ve diğ., 2013). Elektrik enerjisi depolama ve yönetim teknolojisinin ilerlemesi ile daha gelişmiş hibrit araç versiyonları ortaya çıkmıştır. Seri, paralel veya entegre tahrikli hibrit araçlar gibi, elektrik motoru aracın mekanik güç sisteminin bağımsız bir parçası olduğu, ayrıca harici bir kaynağa dayanan şarj edilebilir hibrit araçlardır. Son olarak, harici akü şarjı, ultrakapasitörler, rejeneratif frenleme, yakıt hücreleri vb. gibi çeşitli elektrik enerji kaynaklarına dayanan tamamen elektrikli araçlar ortaya çıktı. Elektrikli araçlar, tek bir araç için birden fazla sürücü motoru ve aracın tekerlek mafsalları arasındaki tahrik sistemlerinin esnekliği ile, kullanılan tasarım güç sistemi türüne bağlı olarak, merkezi veya çift motor sistemleri veya çoklu motor sistemleri (her bir tekerlek için ayrı bir motor) gibi, geleneksel araçlardan ayırt edilir (Chan, 2002; Yuan ve diğ., 2015).

Otomotiv sektöründe modern teknolojinin evrimi, elektrik-elektronik güç sistemleri ve sürüş-elektrikli-tekniki gibi, araçlardaki güç verimliliğini artırma, çeşitli kontrol sistemlerinin yanıtını iyileştirme, enerji tüketimini azaltma ve araçlardaki konfor ve lüks seviyesini yükseltme konusunda önemli bir etkiye sahiptir (Shibahata, 2005). Ancak, araçlardaki modern teknolojinin ortaya çıkması ve mekanik sistemlerin kaybı, mekanik sistemlere doğal olarak bağlı olan geleneksel kontrol sistemlerine alternatif kontrol sistemlerinin tanıtılmasına yönelik yeni araştırma alanları olan direksiyon sistemleri, fren

sistemleri, araç stabilite sistemleri gibi sistemlere yol açmıştır (Indu ve diğ., 2023). Sonuç olarak, modern araçlardaki yeni elektriksel ve elektronik kontrol bileşenlerinin geliştirilmesi, kontrol sistemlerinde yeni teknolojileri ortaya çıkarmıştır.

Araç Stabilite Kontrol sistemi (ASK), geleneksel ve elektrikli araç teknolojileri arasındaki kontrol araçlarının gelişimi tarafından en çok etkilenen sistemlerden biri olarak kabul edilir (Tseng ve diğ., 1999b). Güç kaynağı kontrolünün mekanik sistemlerden elektrik sistemlerine geçmesi, aracın güç aktarma organlarının düzenine bağlı olarak, geleneksel fren sisteminin varlığı veya yokluğu, ASK sisteminde yeni kontrol araçlarının geliştirilmesinin ana nedenleri arasındadır. Bu sistem, başlıca Kilitlenmeyi Önleme Sistemi (KÖS), Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS) ve Elektronik Stabilite Kontrol Sistemi (ESK) olarak bilinen Yaw Stabilite Kontrol Sistemi'ni içerir (Tseng ve diğ., 1999a; Aripin ve diğ., 2014). Kilitlenmeyi Önleme Sistemi, temel olarak, geleneksel fren sistemi içinde entegre hidrolik-elektrik kontrol ünitesi kullanılarak frenleme sırasında tekerlek kilidini önlemek olan birincil işlevi ile 1970'lerin sonlarında ortaya çıkmıştır (Gerard ve diğ., 2012). Çekiş Kontrol Sistemi ise 1980'lerin sonlarına doğru KÖS'den türetilmiş bir yenilik olarak ortaya çıkmıştır. KÖS içinde hem motor yönetim ünitesini hem de frenleme ünitesini yöneterek fazla tekerlek torkunu kontrol etmeyi amaçlar (Jung ve diğ., 2000). 1990'ların sonlarına doğru, Elektronik Stabilite Programının (ESP) üretime dahil edilmesi, aracın yön kontrol sisteminin yanı sıra hem KÖS'yi hem de ÇKS'yi kapsamıştır. ESP sistemi, her bir tekerlek için motor ve fren torklarını ayrı ayrı yöneterek tekerlek torkunu bireysel olarak kontrol eder (Shaout ve McGirr, 2013).

Araç stabilite kontrol teknolojisinin kavramı, araçlarda kullanılan yazılım ve donanım kontrol bileşenlerinin kontrol sistemlerinin gelişimiyle evrim geçirmiştir. Dahası, elektrikli araçlardaki modern elektrik güç sistemleri ve sürüş-elektrikli-tekniki, elektronik kontrol ünitelerinin geliştirilmesiyle birlikte, modern araçlar için stabilite sistemlerinin ilerlemesini artırmış, daha hızlı bir yanıt, daha yüksek verimlilik ve daha düşük enerji tüketimi sunmuştur (Chakraborty ve diğ., 2012). Günümüzde, araç stabilite sistemi kavramı, farklı sürüş koşullarında tekerleklerin toplam tahrik gücü üzerinde bireysel kontrolü içerir (sürüş kuvvetinin uzunlamasına ve yanlamasına bileşenleri). Böylece aracın uzunlamasına ve yanlamasına hareketlerini (ivmelenme, yavaşlama ve yönlendirme içinde) kontrol eder. Bu teknolojik ilerleme içinde, araştırmacılar ve

araştırma merkezleri, yüksek verimli geleceğin teknolojik araçlarının kavramını iletirmek için bu alanda farklı düzeylerde çeşitli araştırmalar geliştirmeye çalışmaktadır (Crolla ve Cao, 2012; Ivanov ve diğ., 2014).

Goodarzi ve Esmailzadeh (2007), kontrol mekanizmasının eski VDC prensibine dayanan diferansiyel frenleme metodolojisinden ziyade dört motorlu-tekerlekli elektrikli araç prensibine dayalı yeni bir Araç Dinamik Kontrol (VDC) sistemi sundular. Yeni VDC sistemi, elektrikli aracın her tahrik tekerleği için çekiş bağımsız kontrol metodolojisi için çok katmanlı bir yapıyı temsil etti. Araç hareket kontrolü, Yaw kontrolü, Yüksek seviyeli kontrol olarak temsil edilmiş, Tekerlek çekiş kontrolü Orta seviyeli kontrol olarak temsil edilmiş ve çok katmanlı araç stabilite kontrol metodolojisinin düşük seviyeli kontrolü olarak elektrik motoru kontrolü temsil edilmiştir. Optimal Kontrol Teorisi, Bulanık Mantık Kontrolü (BMK) ve Kayma Modu Kontrolü (KMK), sırasıyla Yüksek seviyeli, Orta seviyeli ve Düşük seviyeli kontrol stratejileri olarak kullanılmıştır. Araştırma, SIMULINK yazılımını kullanarak araçların kontrol edilen ve kontrol edilmeyen bilgisayar simülasyon modelleri arasında karşılaştırmalı kararlılık sonuçları sunmaktadır.

Zhang ve diğ. (2022), dağıtılmış tahrikli elektrikli otobüslerin yönetim stabilitesini iyileştirdi; araç stabilite kontrol sistemi Doğrudan Yaw-moment Kontrolü (DYC) üzerine, hiyerarşik bir kontrol yapısına dayanmaktadır. Hiyerarşik yapısal kontrol, üst ve alt kontrol seviyeleriyle tasarlanmıştır, üst kontrolör Lyapunov kararlılık teorisine dayalı doğrusal olmayan bir kontrolördür ve alt kontrolör tekerlek torku dağıtım kontrolörüdür. Lyapunov tarafından tasarlanan kontrolörün etkinliğini doğrulamak için Simulink ve Trucksim tabanlı bir eşzamanlı simülasyon gerçekleştirildi. İyileştirilmiş DYC, geleneksel KMK, Lyapunov kontrolü ve kontrolsüz tasarlanmış test sonuçları ile ideal istenen değerler arasında karşılaştırılarak doğrulandı. Sonuç olarak, Lyapunov tabanlı DYC kontrol sistemi, stabilite sisteminin kontrol doğruluğunu ve dinamik izleme performansını artırmıştır.

Li ve diğ. (2009), dört tekerlekten çekişli bir elektrikli araç için istikrar kontrolünü motor torkuna dayalı olarak incelemişlerdir. Aktif Yaw Kontrolü (AYK) yasasını stabilite kontrol metodolojisi olarak kullanmışlardır. AYK, aracın istikrarsızlık dinamiklerinin analizini yaparak Bulanık Mantık Kontrolü (BMK) algoritmasına dayalı olarak tasarlanmıştır. Elektrikli araç modellemesi, motor modeli, batarya dinamik modeli ve

lastik modelini içeren MATLAB/Simulink platformunda oluşturulmuş ve test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, kontrol edilmeyen model, geleneksel ESP kontrol modeli ve Elektrikli Araç ESP (EA-ESP) modeli arasında stabilite performansını karşılaştırmış ve araştırma modeli olarak incelenen EA-ESP modelinin araç stabilitesini artırdığını ve araç manevra kabiliyetini iyileştirdiğini göstermiştir.

Oktay (2008), İYM tarafından güçlendirilen dört tekerlekli geleneksel bir araç için yönlendirme istikrarını, yönlenebilirliğini ve ivme performansını iyileştirmek için bireysel tekerlek çekiş kontrol sistemi üzerine odaklanmıştır. Kontrol metodolojisi, iki seviyeli tekerlek çekiş kontrolünden oluşan Bulanık Mantık Kontrolü (BMK) ile motor torku kontrolcüsü ve kayma kontrolcüsü temellendirilmiştir. Tekerlek istenen torku, tekerlek kayma kontrolcüsü tarafından belirlenmiş ve motor torku kontrolcüsü (gaz kelebeği açısı kontrolü yoluyla) ve geleneksel frenleme kontrol sistemi tarafından uygulanmıştır. Diğer yandan, Doğan (2012), geleneksel İYM ile güçlendirilen araç için alternatif bir sistem olarak motorlu-tekerlek konfigürasyonuna sahip tamamen elektrikli bir araç için üç farklı çekiş kontrol sistemi incelemiştir. Model Takip Kontrolü (MTK), Kayma Oranı Kontrolü (KOK) ve Maksimum Aktarılabılır Tork Kontrolü (MATK), bu kontrolörlerin MATLAB/SIMULINK üzerinde modellerinin simülasyonları yapılarak karşılaştırılmıştır.

TİM-EA'nin otomotiv endüstrisinin gelecek teknolojisi olduğu düşünüldüğünde; Nguyen ve diğ. (2020), çoklu ajan sistem teorisi bakış açısından TİM-EA dinamik kontrol sistemi için uzunlamasına modelleme temellerini tartışmışlardır. Araştırmada, bir hiyerarşik yapıya sahip olmayan bir model, bir bağlantı matrisi ile lineerleştirilmiş bir model ve zamana bağlı durum uzayı modeli olmak üzere üç model tartışılmıştır. Üç modelin etkinliği ve tasarım yaklaşımları, Matlab/Carsim eş simülatörü ile yapılan birkaç örnek üzerinden tartışılmıştır. Savitski ve diğ. (2019a), TİM-EA için geliştirilmiş sürekli Tekerlek Kayma Kontrolü (TKK) sistemi için dört farklı kontrolör mimarisini tartışmışlardır. Araştırılan TKK tasarımı, değişken yapıli oransal-integral (DYOI), birinci dereceden kayma modu (BDKM), integral kayma modu (IKM) ve sürekli burulma algoritması (SBA) olarak sistem tasarımı kontrolörlerini kullanmıştır. Kontrolörler, düşük sürtünme yol yüzeylerinde yapılan simülasyon ve deneysel doğrulama testlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yang ve diğ. (2021), TİM-EA için faz düzlemi tabanlı bir

istikrar kontrol sistemi üzerinde çalışmışlardır; yan kayma açısı ve yan kayma açısı hızı temel istikrar faktörleri olarak kullanılmıştır. Araç yan kayma açısını tahmin etmek için genişletilmiş Kalman filtresine dayalı bir kestirim algoritması tasarlanmıştır. Araç Yaw-moment kontrol metodolojisi, kayma modu kontrolüne dayanmaktadır ve tekerlek sürme/frenleme torkunun dağıtımı metodu üzerinde temellendirilmiştir. Araştırma tarafından tasarlanan kontrol metodolojisini test etmek için, Matlab/Simulink ve Carsim tarafından bir eş simülasyon modeli oluşturulmuştur.

Le ve diğ. (2022), sistem performansını artırmak için yüksek kazanç gözlemcilerle bütünleştirilmiş doğrudan Lyapunov yöntemi uygulayarak bir çeyrek araç Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS) için bir kayma önleyici kontrolörü tanıtmışlardır. Gözlemci, sürücü kuvveti, toplam sürücü direnci ve sisteme etki eden bozucuları tahmin etmek için oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin bütün sistem istikrarının etkinliği, simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir. Özyıldırım (2021), bir çeyrek araç modelinin uzunlamasına hareket kontrolünü, MATLAB/Simulink platformuna bir tekerlek kayma kontrol modeli simüle ederek incelemiştir. Uzunlamasına sürücü kuvveti, belirli bir yol yüzeyi için Büyülü Formül kullanılarak tahmin edilmiştir. Araç ve tekerlek hızları, hareket denklemlerinden hesaplanmıştır ve tekerlek kayma oranı. Tekerlek kayma kontrolörü, sürücünün pedal sınırları içinde referans optimum kayma açısına ilişkin Lyapunov yöntemi ve bir tahmin RBF sinir ağı yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolör metodolojisinin performansını kanıtlamıştır. Diğer taraftan, Colli ve diğ. (2006), tekerlek yapışkanlığı (tekerlek sürtünme katsayısı) kestirimi ve bir yapışkanlık gradyanı kontrolcüsü ile temellendirilmiş bir tekerlek uzunlamasına kontrol yaklaşımını sunmuşlardır. İki yapışkanlık gradyanı kontrolcüsü incelenmiştir; Bunlar, Bulanık Mantık kontrolcüsü ve Kayma Modu kontrolcüsüdür. Çalışma, sayısal simülasyonlara dayanmaktadır ve her iki kontrolör de yol karakteristiklerinde ani değişikliklere iyi tepki veren ve iyi davranış sergileyen deneysel testlerde deneysel olarak doğrulanmıştır.

Geamanu ve diğ. (2012), dört Tekerlekli Elektrik Motorlu (TİM) aracı için zamana bağlı yol yüzeyi yapışma koşulları ile bir uzunlamasına kontrol stratejisi üzerinde çalışmışlardır. Uzunlamasına kontrolcü, her tekerlek için uygun bir kayma önleyici tork elde etmek için tasarlanmıştır, KÖS veya ÇKS tekerlek fonksiyonlarını elde etmek için,

burada elektrik motoru her tekerlek için benzersiz tork aktuatörüdür. Maksimum izin verilen tekerlek torkunu elde etmek için, maksimum tekerlek-yol sürtünme katsayısı değerlerine dayanan çoklu kontrol algoritmaları, örneğin tork doygunluk kontrol yasası, kullanılmıştır. Tekerlek ve yol arasındaki anlık sürtünme tahmin edilmiş ve ardından Dugoff lastik modeline dayanan bir algoritma yardımıyla maksimum sürtünme değeri hesaplanmıştır. Araştırmada tanımlanan kontrol stratejisinin performans doğrulaması, farklı yol koşulu senaryolarını simüle ederek yapılmıştır.

Jalali ve diğ. (2012), dört doğrudan tahrikli Tekerlekli Motorlu şehir içi Elektrikli Araç (TİM-EA) için bir kayma kontrol sistemi tasarlamışlardır. Geliştirilen kayma kontrol sistemi, her tekerlek için uygun bir sürüş torku elde etmek için bireysel Bir Bulanık Mantık Kontrol (BMK) sistemi üzerine dayanmaktadır. Bulanık kayma kontrolcüsü, frenleme sırasında KÖS olarak çalışırken, çekiş çabası sırasında bir ÇKS sistemi olarak çalışır; bu bağlamda, önerilen bulanık kayma kontrolcüsü, her yol koşulunda her tekerleğin en yüksek çekiş veya frenleme kuvvetini, her lastiğin maksimum kayma oranını hızlı bir tepki süresi ile bireysel olarak kontrol ederek garanti eder. Bulanık kayma kontrolcüsü, kontrolör girişleri olarak kayma oranı hatası ve kayma oranı hatasının değişim hızını kullanılarak tasarlanmıştır; düzeltici motor torku ise kayma kontrolcüsünün çıktısıdır. Önerilen bulanık kayma kontrolcüsünün performansı, simülasyon ortamında bir sürücü modeli kullanılarak araç modelini birkaç test manevrası yaparak doğrulanmıştır. Doğrulama adımı olarak, bulanık kayma kontrolcüsü bir donanım ve operatör içinde döngüsel sürüş simülatörüne uygulanmış, kontrolör performansı ve etkinliği doğrulanmıştır.

Khatun ve diğ. (2003), "Bulanık tabanlı kontrol stratejilerinin, etkili kontrolcülerin hızlı bir şekilde geliştirilmesi için bir yaklaşım olarak son zamanlarda büyük tanınma kazandığını" bulmuşlardır. Buna göre, elektrikli araçların kilitlenmeyi önleyen fren sistemleri (KÖS) için tekerlek kayma kontrolünü kontrol etmek için Bulanık Mantık Kontrolü (BMK) metodolojisinin kullanımını açıklamışlardır. BMK'nin, elektrik motorlu tekerleklerin zamanla değişen doğrusal olmayan dinamiklerini kontrol etme yeteneğinin pratik bir anlayışı tartışılmıştır. Araştırma, KÖS/Çekiş kontrol sisteminin sürülen tekerleğin uzunlamasına performansını iyileştirdiğini bulmuş; BMK'nin sistemin

doğrusal olmayan davranışının karmaşıklığını telafi edebileceğini ve değişen yol yüzeylerine uyum sağlama yeteneğine sahip olduğunu belirtmiştir.

Dasanayake ve Perera (2023), Çekiş ve Stabilite Kontrol sistemine sahip bir araç Elektronik Diferansiyel (ED-ÇKS) için BMK tabanlı bir kontrolör geliştirmişlerdir. Burada, ED-ÇKS, bir Arka Tekerlekten Çekiş (RWD) elektrikli araç için bağımsız bir kontrol teknolojisi olup, aracın uzunlamasına ve yanal dinamiklerini yönetmek için kullanılmıştır. Çekiş ve Yaw kontrolörleri, Fuzzy Çıkarım Sistemi'ne (FIS) entegre edilerek, kayma oranı ve istenen Yaw hızına karşı Yaw hızındaki hata kullanılarak düzeltici yawsantrifü anları oluşturulmuştur. FIS, sürücünün istenilen Torkunu, çekiş ve yaw stabilite kontrolörleri ile birlikte göz önünde bulundurarak değiştirir. Entegre kontrol sistemi performansını doğrulamak için sayısal bir simülatör olarak araç simülatörü kullanılmıştır.

Silva ve diğ. (2022), modüler Tekerlekten Çekişli Elektrikli Araçlar (AWD-EA) ve Arka Tekerlekten Çekişli Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) güç konfigürasyonları için optimize edilmiş Bulanık Mantık Kontrolü'nü (BMK) sunmuşlardır. Lastik kayma ve aracın dingil yük transferi davranışlarını tanımlamak için Magic Formula lastik modeli ile dinamik bir model simülasyonu kullanılmıştır. Kontrolcü, standart bir manevra sırasında araç yörüngesini düzeltmek için elektronik bir diferansiyel olarak çalışırken, TİM torklarını bireysel olarak kontrol eder. Genetik algoritmaya dayalı çoklu amaçlı bir optimizasyon, farklı araç parametrelerinin değiştirilmesiyle optimize edilmiş BMK sistemi analiz etmek için BMK yapılandırmasını belirler. MATLAB simülasyon sonuçları, araç davranışında belirgin bir iyileşme gösterirken, donanım içinde döngü (HIL) simülasyonlarından tatmin edici araç sonuçları bulunmuştur.

Tahami ve diğ. (2004), Tekerlekten Çekişli Elektrikli Araç (TİM-EA), E-tekerlek araç teknolojisi için Yol Yardımcı Stabilite Sistemi olarak yeni bir Bulanık Mantık (BM) sürücü-yardımcı stabilite sistemi geliştirmişlerdir. Sürücü-yardımcı stabilite sistemi, yaw referanslı Doğrudan Yawsantrifü Momentler Kontrolü (DYC) sistemi temelinde araç yolunu düzeltme amacına sahiptir. Bir ileri beslemeli sinir ağı, gerekli yaw oranı referansını oluşturmak için araç hızı ve direksiyon açısını sinir ağı haritaları olarak kullanır. En güvenilir kontrol parametre değerini araştırmak için bir BM-DYC ve Bulanık kayma kontrolcüsü kullanılmıştır. Burada, yaw oranı hatası ve hata oranı değişimi BM-

DYC girişleri olarak tasarlanmıştır ve motor torku sapması kontrolör çıktısıdır. Farklı sürüş senaryoları ile bir bilgisayar simülasyonu, stabilite sistemi verimliliğini onaylamak için gerçekleştirilmiş, sistem performansı etkili bir sürücü-yardımcı stabilite sistemi olarak doğrulanmıştır.

Sun ve diğ. (2019), adaptif bir kayan yüzey ile Donanımsız Frenleme Kontrolcüsü (CAB) olarak bir Kayma Modu Tekerlek Kayma Oranı Kontrolcüsü (SMWSC) geliştirmişlerdir. SMWSC, Bulanık Mantık Kontrolcüsü (BMK), PID kontrolcüsü ve Kayan Mod Kontrolcüsü (SMC) olmak üzere birleştirilmiş çoklu kontrolcü sistemi olarak yapılandırılmıştır. BMK, tekerlek kayma oranı hatası ve hata oranının değişimi gibi kontrolcü girişleri ile üç çıkış parametresi olarak PID kontrolcü düzeltme değişkenlerinden oluşmaktadır. BMK ve PID kontrolcüsü, adaptif ve sağlamlık yeteneklerine sahip olmak üzere Bulanık-PID kontrolcüsü olarak bir modül olarak birleştirilir. SMC, belirsiz bozulmalar altında Bulanık-PID kontrolcüsünün stabilite davranışını iyileştirmek için SMWSC'ye entegre edilmiştir. SMWSC'nin performansını doğrulamak için farklı kontrol parametreleri ve test koşulları kullanılarak simüle edilmiş, fren testleri sırasında hızlı bir yanıt ve sağlamlık stabilite davranışına sahip olduğu bulunmuştur.

Li ve diğ. (2016), Farklı kontrol stratejileriyle Doğrudan Yawsantrifü Moment Kontrolü (DYC) kullanarak Araç Stabilite Kontrolü (ASK) hakkında tartışmışlar, bu stratejilerin başlıca BMK ve PID kontrolcülerinden oluşmaktadır. Kontrol stratejileri arasındaki karşılaştırma, BMK ve PID kontrolcüler arasında bireysel ve birleştirilmiş modellerle tasarlanmıştır. Yaw hızının ve kayma açısının ayrı ayrı BMK ve PID kontrolcülerini tarafından kontrol edilmesi, kontrolün bir parçası olan PID kontrolcüsündeki yaw hızının kontrolü, kontrolün BMK kısmı tarafından ayarlanarak Bulanık-PID kontrolcüsü ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, birleştirilmiş Bulanık-PID kontrolcünün, bireysel kontrolcülerden daha iyi bir davranış ve etkili test yanıtına sahip olduğunu bulmuşlardır; BMK kısmının daha iyi bir sağlamlık yanıtı olduğunu ve PID kısmının basit ve pratik bir kontrolcü olduğunu belirtmişlerdir.

Geleneksel araçlardan TEA'lere teknolojik gelişime geçiş nedeniyle, modern EA'lerde sürüş dinamik sistemlerini iyileştirmek için çeşitli araştırma alanları ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar, farklı güç aktarma sistemine sahip EV'leri incelemeye odaklanmışlar ve

özellikle İç Tekerlekli Motor Elektrikli Araçlar (TİM-EAs) teknolojisine önemli bir dikkat göstermişlerdir. TİM teknolojisini kullanan Tüm Tekerlekler Çekiş (AWD) sistemine sahip elektrikli araçlar, araç endüstrisinde bu teknolojiye olan gelecek odaklı yaklaşımlar nedeniyle en çok araştırılan konulardan biri haline gelmiştir. Ayrıca, aracın içindeki sürücü-elektrik motorlarının bireysel kontrol edilme yeteneği, aracın dinamik sistemlerinin yönetim verimliliğini artırmıştır. Araştırmacılar ayrıca, özellikle tekerlek Çekiş Kontrol Sistemleri (ÇKS), Kilitlenmeyi Önleme (KÖS) kontrol sistemleri ve Yaw-Moment kontrol sistemleri için dinamik kontrol sistemlerini incelemişlerdir.

Ayrıca, araştırmacılar, modern kontrol sistemlerini araç dinamikleri için çağdaş kontrol araçları ve algoritmalarını kullanarak keşfetmişlerdir. Ayrı veya diğer kontrol sistemleriyle entegre kontrol metodolojisi olarak Bulanık Mantık Kontrol (BMK) sistemlerini kullanma eğilimi belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Bulanık mantık kontrolcüler, mühendislik bilgisine dayalı olarak doğrusal olmayan zamanla değişen sistemleri kontrol etme performansı, ve modern simülasyon programlarının kolaylıkla kullanılabilir kontrol araçlarının uygulanabilirliği nedeniyle geniş bir yaygınlık kazanmıştır. Araştırmacılar, deneylerini üç farklı seviyede değerlendirmişlerdir: pratik testler, yazılım simülasyonları veya Donanım-İçi Döngü (HIL) sistemleri aracılığıyla entegre test sistemleri kullanarak. Bu nedenle, bu araştırma, modern araçlar bağlamında mevcut araştırma eğilimleri içinde değerlendirilmektedir.

Bu araştırmanın amacı, düşük sürtünme katsayısına sahip kaygan buzlu yollarda İç Tekerlekli Motorlu Elektrikli Araçlar (TİM-EA) için Tekerlek Kayma Kontrolü (TKK) sistemi olarak Çekiş Kontrol sistemini (ÇKS) incelemektir. TKK sistemi, araç lineer dinamikleri içinde Araç Hareket Yanal Olmayan Yönünde Dinamikler (tekerlek yönlendirmesiz) olarak incelenir ve sistemin kontrol metodolojisi olarak Bulanık Mantık Kontrol (BMK) kullanılır. Araştırma modelleri, 'Simulink' platformu içinde MATLAB yazılımı kullanılarak simüle edilir. TKK, her tekerlek için maksimum izin verilen kayma sınırı metodolojisi içinde tekerlek kaymasının kontrol edilmesiyle elde edilir. Tekerlek sürtünme karakteristikleri dikkate alınarak, her bir tekerlek için sürücü talep edilen torku işleyen bireysel kontrol programları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu arada, Bulanık mantık kontrolcüsü (BMK), tekerlek kayma dinamiklerine dayalı adaptif bir parametre olarak Dinamik İntegratör Kazancı (D.I.G.) kullanılarak, elektrik motorlarının

tekerleklerden ayrı olarak talep edilen torkunu adaptif olarak kontrol etmek üzere bir Orantısal-Integral (PI) denetleyici ile (BMK-PI) entegre edilir. Kontrol sistemi, MATLAB'de simüle edilen kaygan buzlu bir yol üzerinde çeşitli sürüş senaryolarıyla test edilir ve farklı tekerlek kayma kontrol değerlerini kullanarak kontrolsüz kayma modelini kontrol edilen kayma modelleriyle karşılaştırarak kontrol metodolojisinin performansını belirlemeyi ve kritik sürüş koşullarında aracın en yüksek uzunlamasına sürüş verimliliğini temsil eden optimal maksimum tekerlek kayma değerini belirlemeyi amaçlar.



3. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ VE DİNAMİKLERİ

3.1. Elektrikli Araç Teknolojisi

3.1.1. Genel Bakış

Elektrikli Araç (EA) teknolojisi, otomotiv endüstrisinde öncü bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Elektrikli araçların kullanımı, elektrik motorunun icadının ilk günlerine kadar uzanmaktadır. 19. yüzyılda, elektrik enerjisi teknolojisinin kullanımı, elektrikli lokomotifler, elektrikli tramvay römorkları ve küçük trenlerle çeşitli araç türlerini itmek için başladı. 19. yüzyılın sonlarına doğru, şarj edilebilir pillerle çalışan elektrikli araçlar ticari olarak piyasaya sürüldü ve bu da içten yanmalı motorların (İYM) alternatif teknolojisinin 20. yüzyılın başlarında ortaya çıkmasından önce otomotiv endüstrisinde elektrikli araçları birincil teknoloji haline getirdi (Larminie ve Lowry, 2012).

20. yüzyılın ortalarında, EA teknolojisi, mekanik motorlara kıyasla, pillerin, güç elektroniğinin ve genel olarak üretim malzemelerinin yeteneklerinin o dönemdeki gelişmemiş teknolojisi nedeniyle İYM teknolojisiyle rekabet edemez hale geldi. Bu durum, mekanik motorlar içinde enerji yönetimindeki elektronik ilerlemelere daha az ihtiyaç duyarak daha uzun seyahat mesafelerini ve daha az yakıt tüketimini mümkün kılarak, nispeten yüksek çıkış gücü ile sonuçlanmıştır. Bu durum, elektrikli araç üretiminin 1930'lara kadar neredeyse sıfıra düşmesine neden oldu. Ancak, 20. yüzyılın sonunda, negatif çevresel etki ve fosil yakıt rezervlerinin azalması, elektrikli ve mekanik araç teknolojileri arasındaki rekabeti yeniden canlandıran bir dönüm noktasını işaret etti. Erken 21. yüzyıl, elektrik güç sistemleri için elektronik güç teknolojilerindeki ilerlemeler ve batarya depolama teknolojisindeki aşamalı iyileştirmeler nedeniyle bu rekabetin güçlü bir şekilde geri dönüşünü gördü. Ayrıca, modern elektrikli güç teknolojisi olarak geliştirilen alternatif veya yardımcı EA enerji kaynakları ortaya çıktı (Chan, 1993; Tie ve Tan, 2013).

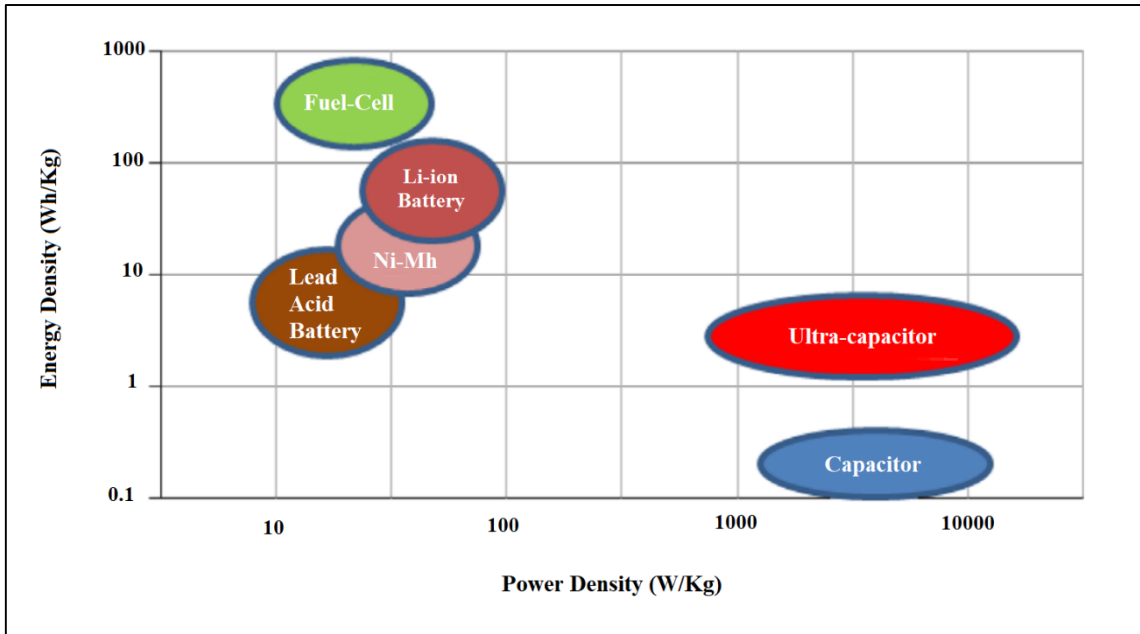
Son on yılda, EA teknolojisinde önemli bir gelişme yaşandı. Bu, geleneksel araçlarda mekanik ve elektrikli güç sistemlerinin farklı hibridleşme seviyelerinde birleştirilmesiyle başladı. Bu seviyeler arasında hafif hibrit, paralel ve seri hibrit sistemler bulunmaktadır (Vidyanandan, 2018). En dikkate değer evrim, şarj edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar

(THEA'ler) teknolojisi ile geldi. Bu, tamamen elektrikli güç sistemlerine dayalı olarak, çeşitli elektrik enerjisi kaynakları kullanılarak Tamamen Elektrikli Araçların (TEA'ler) üretimine doğru bir dönüm noktası oldu (Amjad ve diğ., 2010; Crisostomi ve diğ., 2017). Elektrik güç sistemi, THEA'lerde ve TEA'lerde genişledikçe, farklı sürüş koşullarında araçların güç taleplerini karşılamak için yüksek güç-enerji yoğunluğuna sahip elektrik enerjisi kaynaklarına güvenme ihtiyacı doğdu. Elektrokimyasal pil teknolojisi, EA'lerde şarj edilebilir elektrik enerjisi depolama kaynağı olarak en geniş etkiye sahip olanıdır ve bir EA'nin verimliliğinin temel belirleyicisi olarak hizmet verir. Pil yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir ancak güç sağlama tepkisinde eksiktir. Bu da EA'lerde Hibritle Enerji Depolama Sistemi (HEDS) teknolojisi olarak temsil edilen alternatif güç kaynaklarını bulma motivasyonudur (Sanguesa ve diğ., 2021; Abd-El-Halim ve diğ., 2022).

HEDS göz önüne alındığında, Ultra-Kapasitör (UK) teknolojisi, diğer araç güç kaynaklarına kıyasla hızlı tedarik tepkisi nedeniyle EA'lerde bir elektrik güç sağlayıcısı olarak kullanılan başlıca elektrik enerjisi depolama sistemlerinden biri olarak kabul edilir. UK'nin diğer depolama sistemlerine kıyasla nispeten yüksek güç yoğunluğu ve düşük enerji yoğunluğu vardır. Ayrıca, EA teknolojisi, bir elektrik enerjisi üretim kaynağı olarak Hidrojen yakıtı temel alarak, bağımsız olarak veya pillerle entegre edilmiş olarak Yakıt Hücresi (YH) teknolojisine dayanır. YH, EA'lerde yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan hidrojen yakıtını elektrik üretimi için kullanır (Thounthong ve diğ., 2009; Kasimalla ve Velisala, 2018). Şekil (3.1), Pil, Yakıt Hücresi ve Ultrakapasitörlerin güç ve enerji yoğunluğu açısından karşılaştırmasını göstermektedir. Öte yandan, modern EA'lerde çeşitli elektrik güç sistemleri ve enerji kaynaklarına göre, gelişimsel ve araştırma odaklı eğilim, EA'lerde Enerji Yönetim Sistemi (EYS) teknolojisine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır (Hannan ve diğ., 2014).

EYS teknolojisi, enerji kaynakları teknolojisi ve çeşitli kontrol sistemleri ve stratejileri açısından EA endüstrisindeki teknolojik ilerlemenin önemli bir yönü olarak kabul edilir. Tek enerji sistemine karışık enerji kaynaklarının kullanılması, EYS'lere duyulan ihtiyacın ana nedeniydi; farklı entegre enerji kaynaklarının araç içindeki enerji durumuna göre ve sistem güç taleplerine göre işleyişini düzenlemek. EYS, çeşitli kontrol algoritmalarına (maksimum güç, enerji tasarrufu, yenilenebilir fren sistemleri vb.) uygun enerji

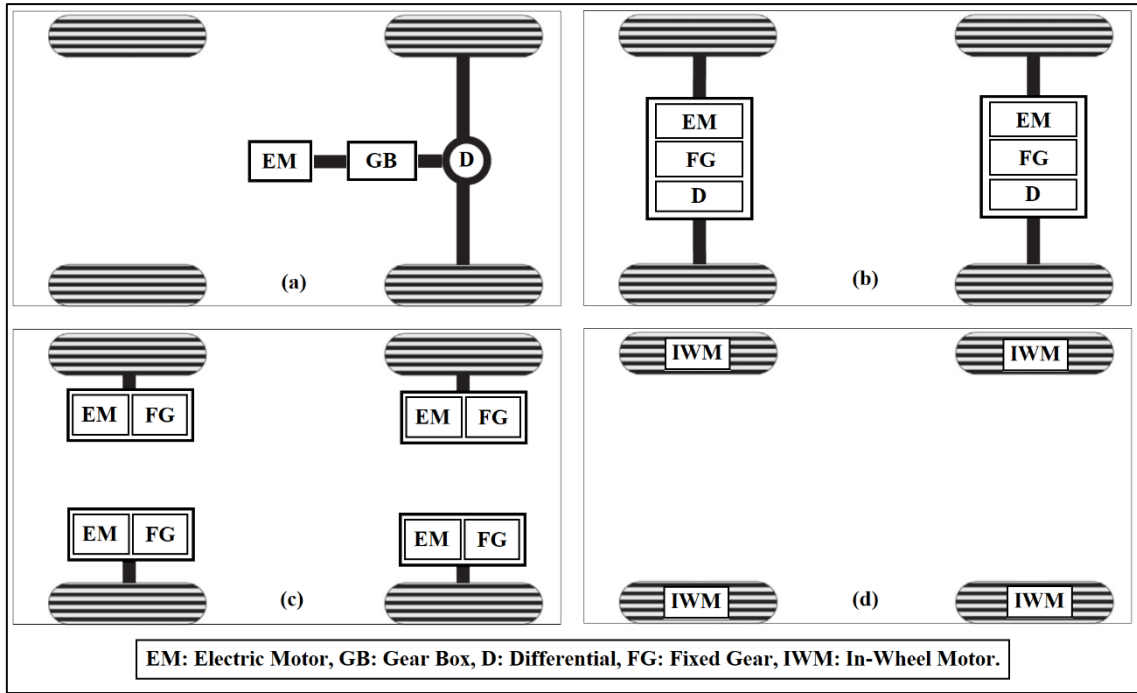
dengeleme ile en yüksek güç tepkisini sağlamayı amaçlar. EA'lerde EYS kontrol metodolojisi iki seviyeye ayrılır: düşük seviye ve yüksek seviye kontrol. Düşük seviye kontrol, aracın elektrik devresinde kullanılan elektrik ve elektronik bileşenlerin yönetimini içerir, örneğin güç dönüştürücü teknolojisi. Öte yandan, toplam güç devresi sistem bileşenleri için kontrol sistemi, yüksek seviye kontrol metodolojileri altında Optimizasyon temelli ve Kural temelli metodolojiler olarak temel kontrol metodolojilerine ayrılır (Hannan ve diğ., 2014; Sulaiman ve diğ., 2015). Elektrikli güç yönetimi teknolojisindeki önemli çeşitlilik, tek bir EA içinde farklı güç tahrik sistemlerine kapıyı açmıştır.



Şekil 3.1. Güç ve enerji yoğunluğu açısından enerji kaynakları karşılaştırması (Hannan ve diğ., 2014).

EA güç tahrik teknolojisi, Farklı Elektrikli Motorlar (EM) türlerine dayanarak ayrılır. Bu türler; Doğru Akım (DA) motorları, İndüksiyon Motorları (IM), Kalıcı Mıknatıslı motorlar (PM), PM-Fırçasız (PM-F) motorlar ya Doğru Akım (PMFDA) motoru ya da Alternatif Akım (PMFAA) motoru ve Rölatif olmayan (SR) motorlar içerir (Kumar ve Jain, 2014; Karki ve diğ., 2020). Öte yandan, elektrik motorları için kontrol sistemleri, EM teknolojisine, kontrol prensibine (hız kontrolü veya tork kontrolü), ve EM'in EA'nin güç tahrik sistemindeki sürüş pozisyonuna (dolaylı tahrik ve dolaysız tahrik sistemleri arasındaki mekanik iletim) bağlı olarak değişir. Ayrıca, EA'nin güç mimarisi, EM

teknolojisine, aracın enerji sağlama teknolojisine ve aracın güç aktarma organı tasarımına bağlı olarak değişir (Ehsani ve diğ., 2018). Şekil (3.2), EA güç aktarma organı mimarisini gösterir ve EA'lerde tekerlek tahrikinde dişli kutusu gibi mekanik bağlantı parçalarını içeren dolaylı tahrik sistemleri ile dişli kutusu olmadan dolaysız tahrik sistemleri arasındaki çeşitliliği gösterir.



Şekil 3.2. EV güç aktarma organları mimarisini: (a) Merkezi EM, (b) Tekerlek mili başına tek motorlu ünite, (c) Bireysel dolaylı motor, (d) Bireysel dolaysız motor.

Doğrudan tahrikli (her bir tekerlek için bir motor mekanizmasına dayanan) tahrik sistemleri, güç tepki verimliliği, tekerlek kontrolünde optimal güç, daha az mekanik kayıpla daha iyi enerji tüketimi ve manevra, hızlanma ve frenleme sırasında daha iyi araç kararlılığı ve kontrolü açısından Dolaylı tahrik sistemlerine (araç güç aktarma organına güç motorunu dağıtma temeline dayanan) göre daha yüksek verimlilik sergiler. Ayrıca, dağıtılmış güç tahrik teknolojisi, aracın farklı sürüş koşullarında Ön-Tekerlekten Çekiş (FWD), Arka-Tekerlekten Çekiş (RWD) ve Tüm-Tekerlekten Çekiş (AWD) gibi çeşitli güç aktarma organı sürüş sistemlerine sahip olma olasılığını sağlar (Wu ve diğ., 2015; Taha ve Aydın, 2022).

3.1.2. Tekerlek İçi Motor Teknolojisi

Tekerlek İçi Motorların (TİM'ler) teknolojisi ilk olarak 1900 yılında Dr. Ferdinand Porsche'un çabalarıyla Lohner-Porsche tarafından tasarlanan araç modeli ile ortaya çıktı (Murata, 2012). Burada araç iki TİM ile donatılmıştı (Deepak ve diğ., 2023). Geçtiğimiz yüzyılda İYM teknolojisi popülerlik kazanırken EA teknolojisine olan ilginin azalmasına rağmen, son on yılda endüstriyel ilginin yeniden artması TİM teknolojisine yeniden dikkat çekti. Sonuç olarak, TİM teknolojisi, EA'ler için gelecek teknolojisini temsil eden önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

TİM teknolojisi, elektrik motorunu tekerlek çemberinin içine mekanik olarak entegre etmeyi amaçlar. Böylelikle geleneksel elektrik sistemlerindeki mekanik güç iletim birimlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. TİM teknolojisinin kavramı, tekerlek ile motor arasındaki aracı mekanik parçaların ortadan kaldırılması etrafında döner, böylece mekanik güç kayıplarını azaltarak güç verimliliğini, sürüş dinamiklerini ve araçtaki konforu artırır, sürüş kuvvetlerinin bireysel tekerleklere bağımsız olarak dağıtılmasını optimize eder ve titreşim ve gürültü seviyelerini azaltır. Şekil (3.3) (URL-1), iç tekerlek elektrik motorlarının Protean-Pd18 modeli aracılığıyla TİM teknolojisini göstermektedir. TİM teknolojisi, modern EA prototiplerinin birçok deneysel prototipinin tasarımında kullanılan çeşitli elektrik motorlarına dayanır. Elektrik motorları, İçsel Rotor (İR) veya Dışsal Rotor (DR) tasarımı olmak üzere Radyal Akış Motorları (RAM'ler) ve Aksiyel Akış Motorları (AAM'ler) olarak sınıflandırılabilir. Kullanılan önemli elektrik motoru örnekleri, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM'ler), Anahtarlı Röle Motoru (ARM), Senkron Röle Motoru (SynRM) ve İndüksiyon Motor (IM) içerir (Murata, 2012; Deepak ve diğ., 2023).

TİM teknolojisi, aracın dinamik davranışlarını (uzunlamasına, yanlamasına ve dikey olarak) iyileştirmeye, aracın genel ağırlığını azaltmaya ve kabin veya batarya bölmesinin iç hacmini artırmaya (daha büyük batarya kapasitesine ve dolayısıyla artan sürüş menziline izin vererek) katkıda bulunmuştur. TİM teknolojisi, yüksek, hızlı tepki veren ve hassas motor üretilen çıkış torkuyla (hem hareket ettirme hem de frenleme açısından) karakterizedir, hatta düşük hızlarda bile kolayca ölçülebilir. Böylelikle sistem kontrolünü kolaylaştırır (Savitski ve diğ., 2019a; Yang ve diğ., 2021). Bu nedenle, TİM teknolojisi, araçlardaki dinamik stabilite kontrol sistemlerinin verimliliğini artıran bireysel tekerlek

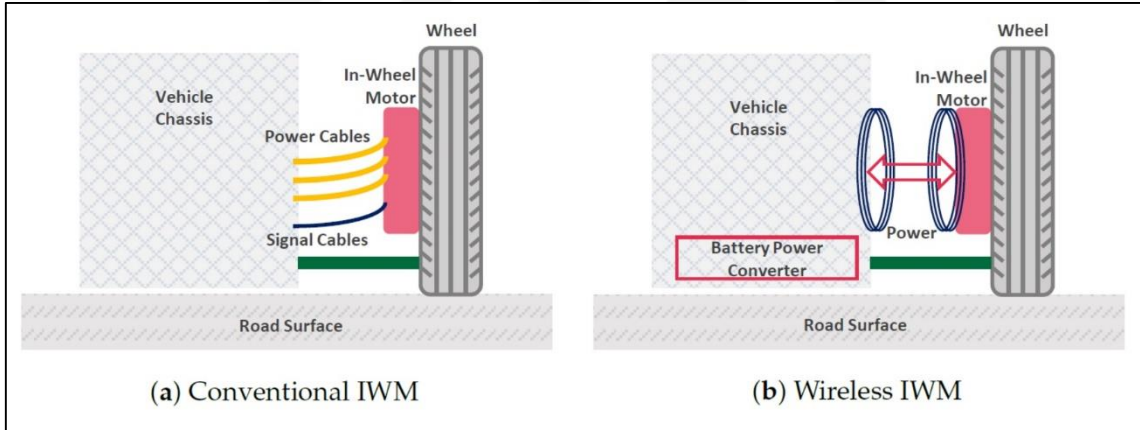
tork kontrolünde esneklik sağlar (Deepak ve diğ., 2023). Bu özellikler, Elektronik Stabilite Kontrolü (ESK) sistemleri, Kilitlenmeyi Önleme kontrol sistemleri (KÖS'ler), tekerlek Çekiş Kontrol Sistemleri (ÇKS'ler) ve araç Yaw Kontrol Sistemleri (YKS'ler) için uygundur (Murata, 2012).



Şekil 3.3. Protean-Pd18-TiM model tasarımı genel bakışı (URL-1).

TiM teknolojisinin belirgin önemine rağmen, bu teknolojinin karşılaştığı çeşitli zorluklar ve engeller nedeniyle bugüne kadar ticari olarak üretilmediği görülmektedir. Bir elektrik motorunu geleneksel bir tekerlek jantının içine entegre etmek, tekerleklerde geleneksel mekanik sistemlerin bulunması nedeniyle nispeten zordur ve bu, entegrasyon sürecini engeller. Tekerlek, geleneksel hidrolik frenleme, amortisör ve direksiyon sistemlerini içerir. Ayrıca, elektrik motorunun boyutu bir tasarım zorluğu oluşturur ve tasarımcıları ya tekerlek boyutunu artırmaya ya da elektrik motorunun boyutunu azaltmaya iter. Bu da üretilen güç özelliklerinin maliyetine yol açmaksızın yapmaya zorlar. Çünkü elektrik motoru için özel sistemlere ihtiyaç duyulmaz. Örnek olarak elektrik ve kontrol bağlantı sistemleri ve birim soğutma sistemleridir. Sonuç olarak, yaydan çıkmayan tekerleğin kütlesi artacak ve sürüş dinamiğini ve araç konforunu etkileyecek, bu da yeni bir amortisör sistemi tasarlama ihtiyacını ortaya çıkarır. Bu durum, tekerlek tahrik ünitesinin tasarımındaki karmaşıklığın artmasına yol açabilir ve bu da tekerlek mekanik arızasına neden olur. Bu nedenlerle, bu tasarım engelleri, TiM teknolojisinin gecikmiş ticarileştirilmesinin ana sebepleridir (Murata, 2012; Deepak ve diğ., 2023).

TİM teknolojisindeki araştırma ve geliştirme çabaları, mümkün olan en yüksek verimliliği en az dezavantajla elde etmek için devam etmektedir. Bu alandaki çalışmalar, tekerlek içi elektrik motorları için kontrol sistemleri, Tüm Tekerlek Çekişli (AWD) modunu kullanan araç dinamik kontrol sistemleri ve motor verimliliğini artıran yeni manyetik malzemelerin ve güç elektroniği sistemlerinin incelenmesi yoluyla güç artırma ve motor boyutunu azaltma yoluyla motor tork yoğunluğunu artırma üzerine çeşitlenmiştir. Ayrıca, tekerlek içindeki elektrik motorlarının mekanik hacim yükünü azaltmayı amaçlayan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu geleneksel elektrik bağlantılarının, motor için güç kaynağı veya kontrol sinyali bağlantılarının yerine kablosuz güç transferi (WPT) teknolojisi ve kablosuz kontrol sinyalleriyle değiştirilmesini içerir (Deepak ve diğ., 2023; Fujimoto ve diğ., 2020). Şekil (3.4), tekerlek içi elektrik motor için WPT teknolojisini göstermektedir (Deepak ve diğ., 2023). Güncel araştırma, TİM teknolojisi için yüksek verimlilikte, düşük kusurlu tasarımların bulunmasını ve bu teknolojinin EA'ler için gelecek teknolojisi olmasını amaçlamaktadır.



Şekil 3.4. Tekerlek içi elektrik motorları için WPT teknolojisi (Deepak ve diğ., 2023).

3.2. Araç Dinamikleri

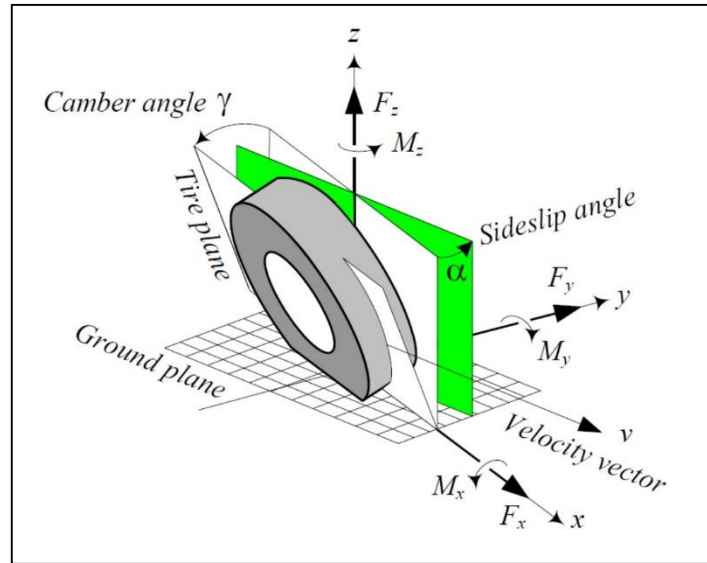
Bu bölüm, aracın uzunlamasına hareketini belirleyen dinamik modellere odaklanırken, uzunlamasına lastik kuvvetleri, aerodinamik drag kuvvetleri ve yuvarlanma direnci kuvvetleri gibi faktörleri dikkate alır. Analiz, hareketin yan dinamiklerini veya tırmanma kuvvetlerini dikkate almaz, çünkü bu yönler tezin kapsamı dışındadır.

3.2.1. Tekerlek Dinamiği

"Tekerlek" terimi genellikle pnömatik basınç içeren kauçuk bir lastik tarafından kaplanmış metal bir jantı ifade eder ve böylece pnömatik lastik oluşturur. Bu lastik, aracın gövdesi ile yol yüzeyi arasındaki kritik aracı temsil eder ve yük taşıma, çekiş, sürüş konforu ve manevra kabiliyeti gibi temel işlevleri kolaylaştırır. Pnömatik lastikler, yol ile araç arasındaki kuvvetlerin aktarımı için tek arayüzdür. Bunların önemi, aracı hareket ettirmek ve kontrol etmek için gerekli kuvvetleri üretme yeteneklerinde yatar ve bu nedenle herhangi bir aracın temel bir bileşeni olarak önemlerini vurgular. Bir aracın performansı büyük ölçüde lastiklerinin özelliklerinden etkilenir (Jazar, 2008; Gillespie, 2021).

3.2.1.1. Lastik Koordinat ve Kuvvet Sistemleri

Lastik-yol etkileşimi ve kuvvet sisteminin açıklığa kavuşturulması için, bir Kartez koordinat çerçevesi, lastik basıncının merkezine, yani lastik-yol temas yamasına yerleştirilmiştir. Şekil (3.5)'te tasvir edildiği gibi (Jazar, 2008). Bu çerçeve, düz ve yatay bir zemin varsayımına dayanır; burada x-ekseni, lastik düzlemi ile yerin kesişim hattıyla hizalanır. Lastik düzlemi, lastiği disk şekline düzleştirerek oluşturulan düzlemdir. Z-ekseni yerle yere dik olup, yerçekimi ivmesine (g) zıt yönde bulunurken, y-ekseni ise sağ el kuralı kuralına uygun olarak koordinat sistemini tamamlar (Jazar, 2008; 2019).



Şekil 3.5. Lastik koordinat sistemi (Jazar, 2008).

Lastiğin yönelimini tanımlarken iki açı kullanılır: Kamber açısı ve Yana Kayma açısı. Kamber açısı, lastik düzlemi ile dikey düzlem arasındaki açıyı ifade eder ve x-ekseni etrafında ölçülür. Bunun karşılığında, yana kayma açısı veya basitçe yana-kayma, hız vektörü ile x-ekseni arasındaki açıyı ifade eder ve z-ekseni etrafında ölçülür. Bu açılar, lastiğin yol yüzeyine göre konumunu ve hareketini analiz etmeye yardımcı olarak lastik dinamikleri ve performans özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar (Jazar, 2008).

Yer tarafından lastiğe uygulanan kuvvet sistemi, x, y ve z eksenleri boyunca ayrıştırılabilir ve üç kuvvet ve üç momentten oluşan üç boyutlu bir kuvvet sistemi oluşturur, Şekil (3.5) 'de gösterildiği gibidir, (Jazar, 2008; Çetinkaya, 2015):

1. Uzunlamasına kuvvet (F_x): x-ekseni boyunca etki eden bu kuvvet, lastiğe uygulanan ileri yönlü kuvveti temsil eder. ($F_x > \text{sıfır}$) ivmeyi, ($F_x < \text{sıfır}$) ise freni gösterir. Bu kuvvete ayrıca tahrik kuvvet denir.
2. Normal kuvvet (F_z): Bu dikey kuvvet, yer düzlemine dik olarak, tekerlek yükünü veya dikey kuvveti oluşturur.
3. Yanal kuvvet (F_y): Yere tangansiyel olarak ve hem (F_x) hem de (F_z)'ye dik olarak, y yönünde uygulanan yanal kuvvettir. ($F_y > \text{sıfır}$), yönünde bir yan hareketiyle ilişkilidir.
4. Devrilme momenti (M_x): Bu x-ekseni etrafında uzunlamasına moment ve lastiği x-ekseni etrafında döndürmeye çalışır.
5. Ayarlama momenti (M_z): z-ekseni etrafında yukarı doğru bir moment olan yaw momenti, lastiği z-ekseni etrafında döndürmeyi amaçlar.
6. Yuvarlanma direnci momenti (M_y): y-ekseni etrafında yanal bir momenti temsil eden dönme direnci momenti, lastiği y-ekseni etrafında döndürmeye ve ileri doğru itmeye çalışır. Tekerlek eksenine göre lastiğe uygulanan momente tekerlek momenti (T_w) denir.

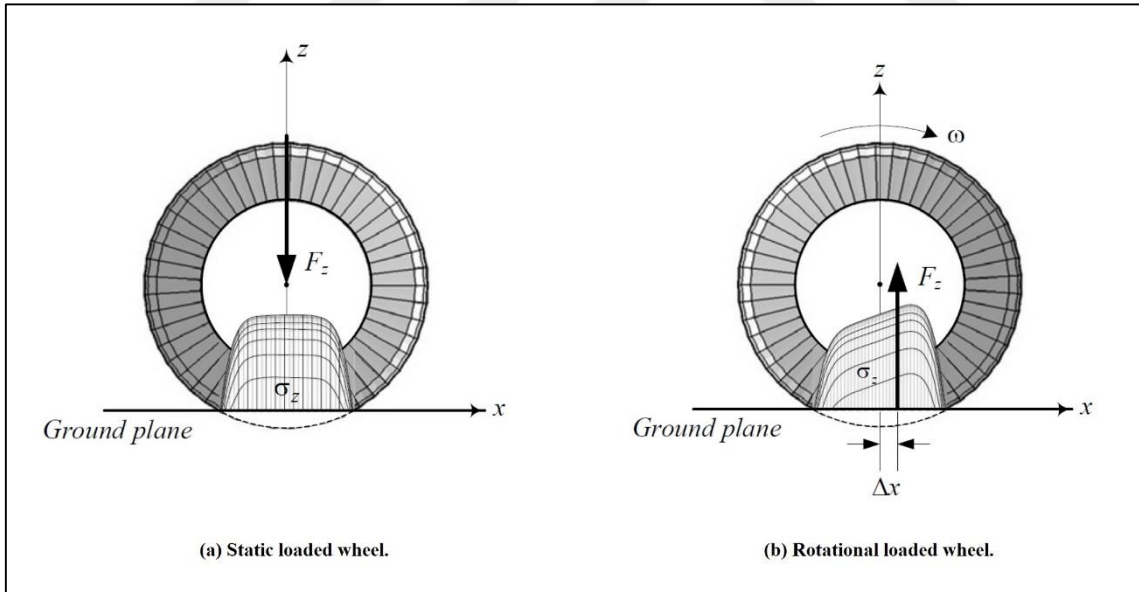
3.2.1.2. Lastik Yuvarlanma Direnci

Lastik yerde döndüğünde, Normal Kuvvet (F_z) üzerinde etki eden yuvarlanma direnci (F_R) adı verilen bir uzunlamasına kuvvet oluşturur. Bu kuvvet, lastiğin hareketine zıt yönde etki eder ve lastik tabanına uygulanan normal kuvvete doğru orantılıdır ve aşağıdaki gibi temsil edilebilir;

$$F_R = f_{ro} \cdot F_z \quad (3.1)$$

burada, (f_{ro}) yuvarlanma sürtünme katsayısını temsil eder ve yuvarlanma direncinin yoğunluğunu ölçer. Önemli bir şekilde, (f_{ro}) sabit bir değer değildir ve lastik hızı, şişme basıncı, kayma açısı ve kambur açısı gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Ayrıca, (f_{ro}) lastiğin mekanik özellikleri, aşınma ve yıpranma, yük, sıcaklık, boyut, sürüş ve fren kuvvetleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Dahası, yol koşulları (f_{ro}) 'nin büyüklüğünü belirlemede önemli bir rol oynar (Jazar, 2008; Pauwelussen, 2014).

Bir lastik yol üzerinde döndüğünde, yol ile temas eden lastiğin çevresinin bir kısmı eğilme yaşar. Bu deformasyon sırasında harcanan enerjinin bir kısmı sonraki rahatlatma sırasında tam olarak geri dönmez. Bu nedenle, temas basıncının dağılımında değişiklik olur. Bu stres dağılımındaki farklılık, enerji ve stres bozulmasının dağılımı ve enerjinin dağılması, yuvarlanma direncine katkıda bulunur (Rajamani, 2011). Şekil (3.6), statik ve dönüş yapan bir lastik için lastik temas yüzeyi boyunca normal stres dağılımının bir modelini ve bunların sonucu olarak oluşan kuvvet (F_z) 'i göstermektedir (Jazar, 2008).



Şekil 3.6. Tekerlek lastik temas yüzeyindeki normal stres dağılımı (Jazar, 2008).

Teker Temas yüzünün ön kısmında yüksek normal stres nedeniyle, sonuçta normal kuvvet öne doğru kayar. Bu normal kuvvetin öne doğru kayması, lastiğin ileriye doğru dönüşüne karşı negatif yönünde bir direnç momenti oluşturur. Dolayısıyla, dönüş sırasında lastik

temas yüzeyi içindeki bu mekanik etkileşimler ve stres dağılımlarının bir sonucu olarak yuvarlanma direnci oluşur.

3.2.1.3. Tekerlek Uzunlamasına Kuvveti

Bir araçta ivmelenme veya frenleme başlatmak için, tekerlek ile yol yüzeyi arasında uzunlamasına kuvvetler üretilmelidir. Sürücü tekerleğine bir moment uygulandığında, kayma oranı sonucunda teker izinde uzunlamasına bir kuvvet (F_x) oluşur. Kayma oranı, (s) olarak adlandırılır ve lastiğin gerçek hızı ile eşdeğer hızı arasındaki fark olarak tanımlanır. Matematiksel olarak, uzunlamasına kayma oranı (s) şu şekilde ifade edilebilir;

$$s = \frac{R_g \omega_w}{V_x} - 1 \quad (3.2)$$

burada, (R_g) lastiğin geometrik ve yüksüz yarıçapını, (ω_w) lastiğin açısal hızını ve (V_x) lastiğin ileri hızını gösterir. Özellikle, kayma oranı ivmelenme durumunda pozitif ve frenleme durumunda negatiftir. Bu nedenle, lastik sadece bir uzunlamasına kayma mevcut olduğunda uzunlamasına (tahrik) bir kuvvet uygulayabilir (Jazar, 2008, 2019; Rajamani, 2011).

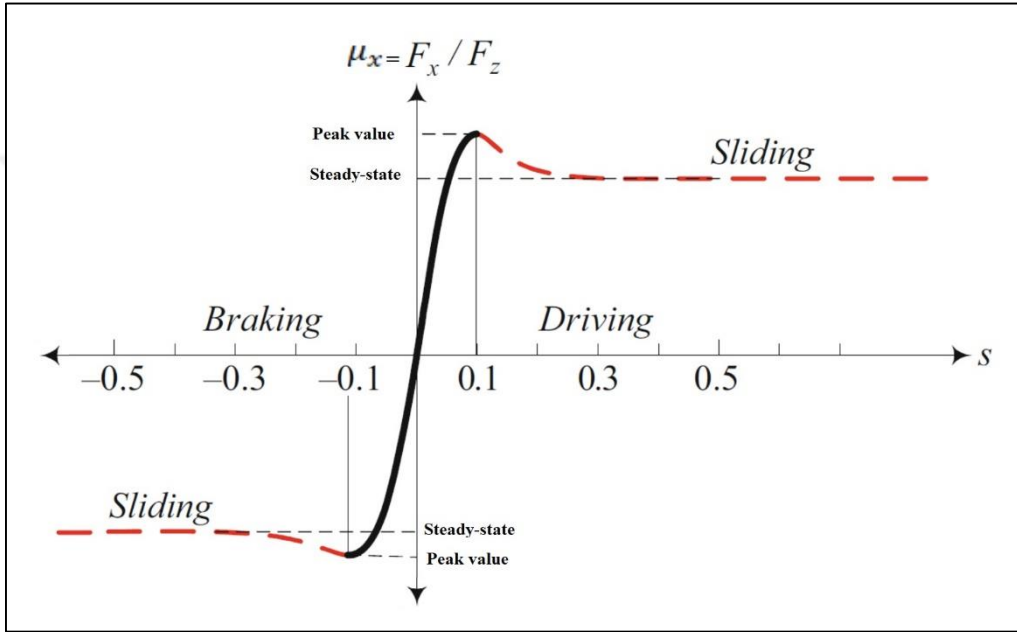
Tekerlek ve yol yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti (F_x), normal yük (F_z), araç hızı (V_x) ve tekerlek açısal hızı (ω_w) gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, lastik basıncı, diş deseni, aşınma ve yol yüzeyinin özellikleri de (F_x) üzerinde etkilidir. Deneysel gözlemler, kuvvetin (F_x) normal kuvvet (F_z) ile doğru orantılı olduğunu ve şu şekilde temsil edilebileceğini ortaya koymuştur;

$$F_x = \mu_x \cdot F_z \quad (3.3)$$

burada katsayı (μ_x), uzunlamasına sürtünme katsayısı olarak adlandırılır ve araç hızı ve tekerlek açısal hızından etkilenir. Bu da onu kayma oranına bağımlı hale getirir. Bu bağımlılık, (μ_x)'in bir kayma oranı (s) fonksiyonu olduğunu ima eder. Şekil (3.7)'de gösterildiği gibidir (Jazar, 2019).

Kuru yol yüzeylerinde, sürtünme katsayısı, sürüş sırasında ($s \approx 0.1$) civarında bir maksimum değer gösterir ve ardından neredeyse sabit bir değere kararlı hale gelir. Çok küçük kayma oranlarında, sürtünme katsayısı $\mu_x(s)$, kayma ile doğru orantılı olarak

kabaca yaklaşık olarak ifade edilebilir. Ancak, ($s > 0.1$) olduğunda, önemli tekerlek kayması gösterildiğinde, sürtünme katsayısı neredeyse sabit kalır ve kararlı bir durum davranışı sergiler. Aynı davranış frenleme sırasında da gözlemlenir; sürtünme katsayısı, ivme ve kararlı durum değerleri sürüş sırasında olduğu gibi tekerlek kayması gösterir (Jazar, 2008, 2019; Pauwelussen, 2014). Tablo (3.1), bir yolcu aracı lastiği için uzunlamasına sürtünme katsayılarının (μ_x) ortalama değerlerini, hem maksimum hem de kararlı durum (kayma) değerlerini sunar (Jazar, 2019).



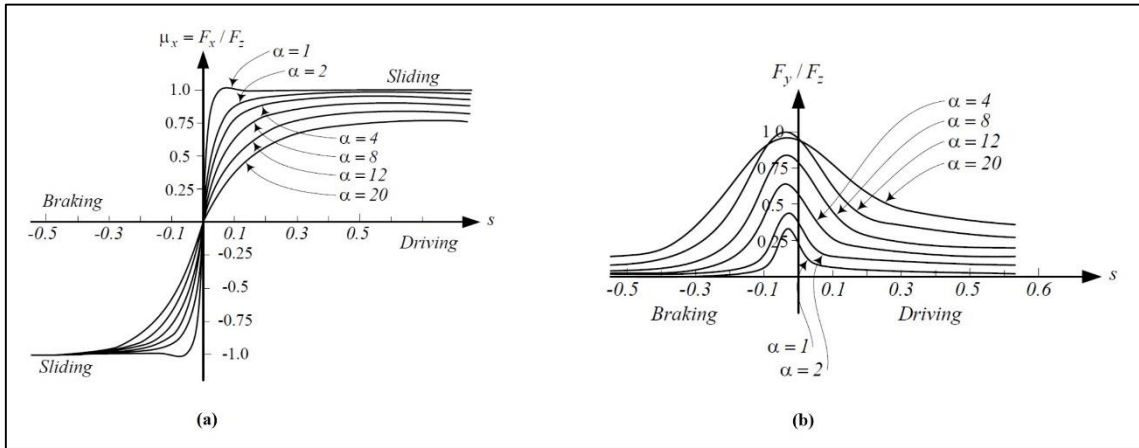
Şekil 3.7. Sürüş ve frenleme durumlarında tekerlek kayma oranına bağlı olarak uzunlamasına sürtünme katsayısı (Jazar, 2019).

Tablo 3.1. Uzunlamasına sürtünme katsayılarının ortalama değerleri (Jazar, 2019).

Yol yüzeyi	(μ_x)'nin tepe değeri	(μ_x)'nin kayan değeri
Asfalt, kuru	0,8-0,9	0,75
Beton, kuru	0,8-0,9	0,76
Asfalt, ıslak	0,5-0,7	0,45-0,6
Beton, ıslak	0,8	0,7
Çakıl	0,6	0,55
Kar dolu	0,2	0,15
Buz	0,1	0,07

Bir lastik, iki temel çıktı üreten bir kuvvet üretici olarak kavramsallaştırılabilir. Bunlar uzunlamasına kuvvet (F_x) ve yanal kuvvettir (F_y). Yanal kuvvetin (F_y) değişimi, herhangi bir yan kayma açısına (α) göre sürüş ve fren kuvvetlerine tepki olarak meydana gelir. Yan kayma açısı, tekerlek-hız vektörü (V) ile x-ekseni arasındaki açıyı temsil eder ve z-ekseni etrafında ölçülür. Şekil (3.5)'te görüldüğü gibidir. Bu ayar, uzunlamasına kuvvetin tekerlek temas yüzeyi sürüş veya frenleme kuvvetinin yönünde çekmesi nedeniyle yan kaydırmanın etkilenmesinden kaynaklanır.

Bir dönüş lastiği, bir kayma oranında (s) çalıştığında uzunlamasına bir kuvvet üretir ($F_x = \mu_x(s) \cdot F_z$). Bir yan kayma açısı tanıtmak uzunlamasına kuvveti azaltırken yan kuvvet oluşturur. Tersine, uzunlamasına kayma oranını (s) azaltmak, yan kuvveti arttırırken aynı anda uzunlamasına kuvveti azaltır. Şekil (3.8-a), bir yan kayma açısının uzunlamasına kuvvet oranı ($\mu_x = F_x/F_z$) üzerindeki etkisini kayma oranı fonksiyonu olarak gösterirken, Şekil (3.8-b), bir yan kayma açısının yan kuvvet oranı ($\mu_y = F_y/F_z$) üzerindeki etkisini kayma oranı fonksiyonu olarak gösterir (Jazar, 2008). Bu şekiller, lastik kuvvetleri ile kayma koşulları arasındaki dinamik ilişki hakkında bilgi sağlar ve çeşitli sürüş senaryolarında lastik davranışının anlaşılmasına ve tahmin edilmesine yardımcı olur (Rajamani, 2011; Pauwelussen, 2014).



Şekil 3.8. Kayma oranı ve yan kayma açısı fonksiyonu olarak lastik kuvvetleri; (a) uzunlamasına kuvvet oranı ve (b) yan kuvvet oranı (Jazar, 2008).

Uzunlamasına kayma oranı küçük olmadığında veya yol yüzeyi kaygan olduğunda, lastiğin davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için doğrusal olmayan bir lastik

modeline ihtiyaç duyulabilir. Bu durumlarda, uzunlamasına lastik kuvvetini doğru bir şekilde hesaplamak için kullanılan iki yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan lastik modeli Pacejka "Magic Formula" modeli ve Dugoff lastik modelidir. Bu modeller, lastik kayması ile lastik kuvvetleri arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiyi değişen koşullar altında yakalayabilir ve özellikle önemli kayma oranları veya kaygan yol yüzeyleri içeren senaryolarda lastik davranışının daha doğru tahminlerini sağlayabilir. Bu nedenle, araç dinamiklerini simüle etmek ve çeşitli işletim koşullarında araç performansını optimize etmek için değerli araçlardır (Jazar, 2008; Rajamani, 2011).

3.2.1.4. Magic Formülü Lastik Modeline Giriş

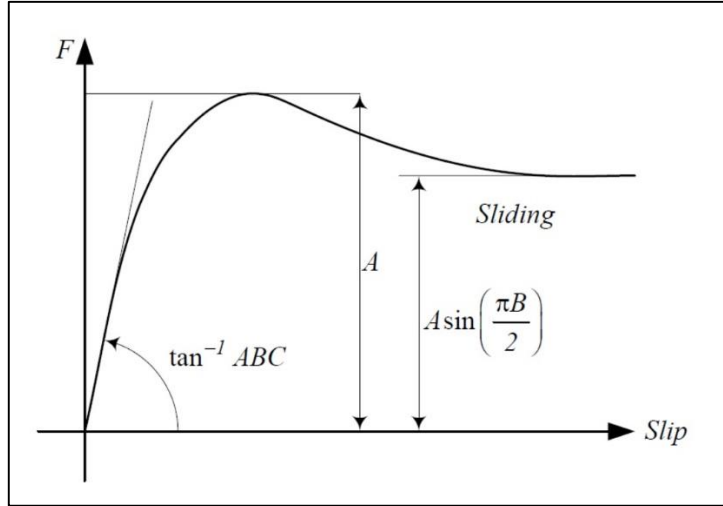
Daha önce tartışıldığı gibi, doğrusal lastik kuvvet davranışı kayma oranı ve kayma açısı küçük olduğunda iyi yaklaşımlar sunar. Ancak, büyük kayma açıları ve kayma oranlarını içeren senaryolarda daha sofistike bir model gereklidir. Magic Formül lastik modeli (Pacejka, 2012), büyük kayma açıları ve kayma oranlarını içeren, ayrıca birleşik yanal ve uzunlamasına kuvvet üretimini içeren geniş bir işletim koşullarında uzunlamasına ve yanal lastik kuvvetleri (F_x , F_y) ve ayarlama momenti (M_z) hesaplamak için kapsamlı bir yaklaşım sunar (Rajamani, 2011).

Basit durumlarda, yalnızca ya yanal ya da uzunlamasına kuvvet üretildiğinde, üretilen kuvvet (F), giriş değişkeni (x) olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [Jazar, 2008];

$$F = A \sin\{B \tan^{-1}[Cx - D(Cx - \tan^{-1}(Cx))]\} \quad (3.4)$$

burada (A , B , C , D), deneysel lastik karakteristik parametreleridir.

Bu basit deneysel formül, ilgili kayma miktarları olan yana-kayma açısı (α) ve uzunlamasına kayma oranı (s) fonksiyonları olarak ölçülen eğrilerle yakından eşleşen karakteristikler üretebilir. Şekil (3.9), parametrelerin bir test kuvvet-kayma deneysel sonucundan nasıl belirlenebileceğini göstermektedir (Jazar, 2008).



Şekil 3.9. Magic Formula deneysel parametreler ve lastik kuvveti deneysel eğrisi (Jazar, 2008).

3.2.1.5. Tekerlek Uzunlamasına Hareketi

Şekil (3.10) bir lastiğin serbest cisim diyagramını sunar. x-yönünde, biri çekiş (veya frenleme) kuvveti (F_x) ve diğeri yuvarlanma direnci kuvveti (F_R) olmak üzere iki kuvvet etki eder. z-yönünde, lastik yükü (F_z) bulunur ve lastik yer ile temasını sürdürdüğü süreçte yer reaksiyonu ile denge halindedir (Jazar, 2019). y-ekseni etrafında, uygulanan bir tork (T_w) gözlemlenir. Böyle bir lastik sisteminin hareketini tanımlayan hareket denklemleri şu şekildedir;

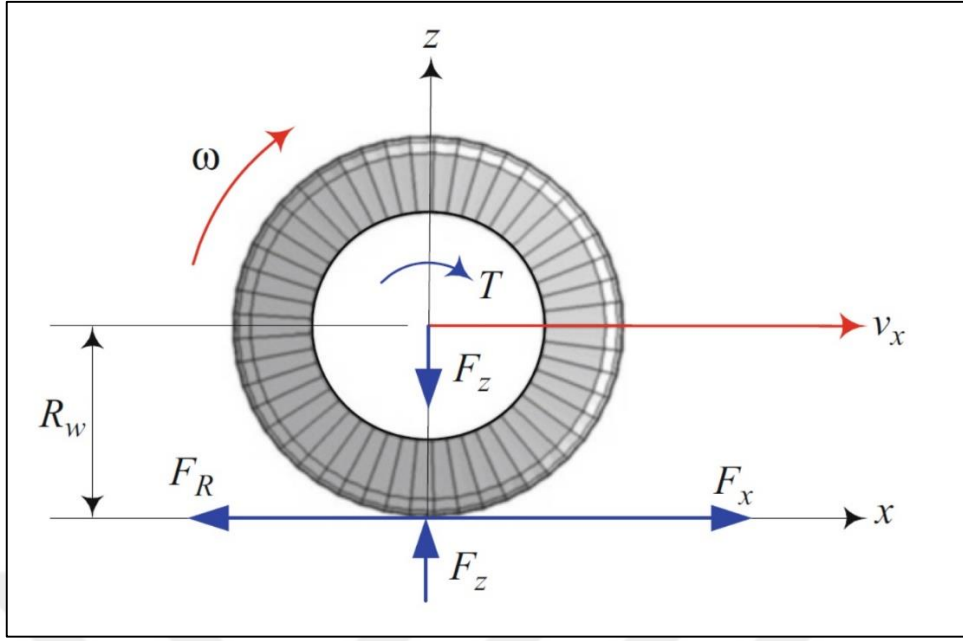
$$m_w \dot{v}_x = F_x - F_R \quad (3.5)$$

$$I_w \dot{\omega}_w = T_w - (F_x - F_R) R_w \quad (3.6)$$

burada (m_w) tekerlek kütleini, (I_w) tekerleğin kütleine eylemsizlik momenti ve (R_w) lastiğin etkin yarıçapını temsil eder. Etkin yarıçap ($R_w = v_x / \omega_w$), lastiğin açısal hızını ($\omega = \omega_w$) ve ileri hızını (v_x) değerlendirerek tanımlanır (Jazar, 2019).

Uzunlamasına sürtünme katsayısını ($\mu_x = F_x / F_z$) tanımlamak için, Denklem (3.6) yeniden yazılabilir;

$$\mu_x = \frac{T_w - I_w \cdot \dot{\omega}_w + F_R \cdot R_w}{F_z \cdot R_w} \quad (3.7)$$



Şekil 3.10. Tekerleğin Uzunlamasına Kuvvetler Serbest Vücut Diyagramı (Jazar, 2019).

3.2.2. Uzunlamasına Araç Dinamiği

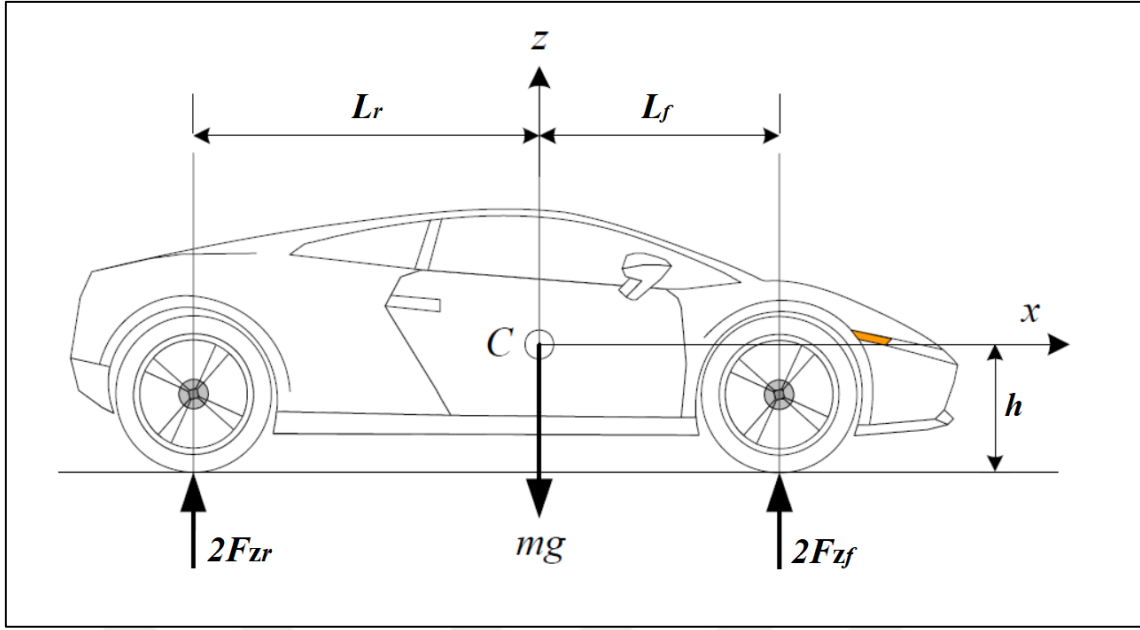
3.2.2.1. Uzunlamasına Araç Ağırlık Dağılımı

Düz bir yolda (herhangi bir eğim olmadan) park edilmiş dört tekerlekli bir aracın durumunda, normal (yük) kuvveti (F_z) ön ve arka tekerlekler arasında (sırasıyla F_{zf} , F_{zr}) şu şekilde dağılır;

$$F_{zf} = \frac{1}{2} mg \frac{L_r}{L} \quad (3.8)$$

$$F_{zr} = \frac{1}{2} mg \frac{L_f}{L} \quad (3.9)$$

burada, (L_f), aracın ağırlık merkezinin (C) ön aksa olan mesafesini temsil ederken, (L_r), aracın ağırlık merkezinin (C) arka aksa olan mesafesini belirtir. Şekil (3.11)'de gösterildiği gibi iki aks arasındaki toplam mesafe araç dingil mesafesi (L) olarak adlandırılır ($L = L_f + L_r$) (Jazar, 2008; Gillespie, 2021).



Şekil 3.11. Araç gövdesinin ağırlık dağılımı (Jazar, 2008).

Araç düz bir yolda hızlanma (a) ile hareket halindeyken, ön ve arka tekerleklerin altına etki eden dikey kuvvetler aşağıdaki gibidir;

$$F_{zf} = \frac{1}{2} mg \frac{L_r}{L} - \frac{1}{2} mg \frac{h}{L} \frac{a}{g} \quad (3.10)$$

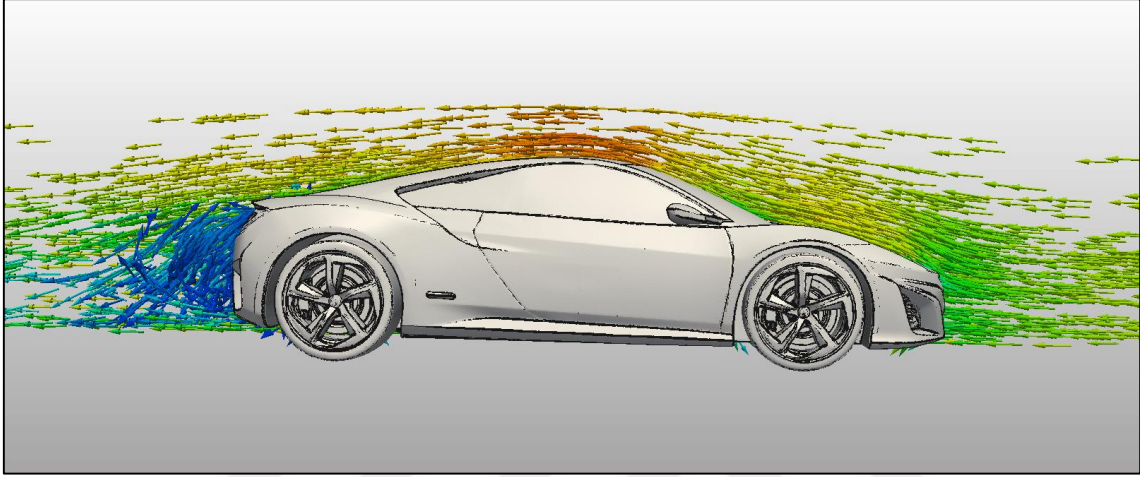
$$F_{zr} = \frac{1}{2} mg \frac{L_f}{L} + \frac{1}{2} mg \frac{h}{L} \frac{a}{g} \quad (3.11)$$

burada, terimler $(\frac{1}{2} mg \frac{L_r}{L})$ ve $(\frac{1}{2} mg \frac{L_f}{L})$ normal kuvvetlerin statik kısımlarını temsil eder. $(\pm \frac{1}{2} mg \frac{h}{L} \frac{a}{g})$ terimleri ise dinamik kısımları temsil eder. Burada (h) araç ağırlık merkezinin yerden yüksekliğini temsil eder. Hızlanma sırasında, dinamik yük ön ve arka akslara aktarılır ve frenleme sırasında tersi gerçekleşir.

3.2.2.2. Aracın Yol Yükleri

Araçların hava akışı içerisinde hareket etmesinden kaynaklanan direnç Aerodinamik sürüklenme (Drag) kuvveti olarak adlandırılır. Bu, aracın yüzeyi ile etrafındaki hava molekülleri arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Sürtünme kuvveti aracın şekli, boyutu, hızı ve akışkanın özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Şekil (3.12)'de gösterildiği gibi hava

akımının ayrılmasından kaynaklanan şekil direnci (basınç direnci) ve araç yüzeyi ile hava molekülleri arasındaki sürtünmeden kaynaklanan yüzey sürtünme direnci olarak iki ana bileşeni vardır (URL-2). Mühendisler, şekilleri düzene koymak ve yüzey düzgünlüğünü optimize etmek gibi teknikleri kullanarak çeşitli uygulamalarda verimliliği ve performansı artırmak için aerodinamik sürtünmeyi en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Gillespie, 2021).



Şekil 3.12. Aracın Aerodinamik Sürtünme Kuvveti Temsili (URL-2).

Bir araçtaki eşdeğer aerodinamik sürüklenme kuvveti şu şekilde temsil edilebilir;

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_D A_F (V_x \pm V_w)^2 \quad (3.12)$$

burada (ρ) havanın kütle yoğunluğunu, (C_D) aerodinamik sürüklenme katsayısını, (A_F) aracın ön alanını yani aracın hareket yönündeki öngörülen alanını ifade eder, (V_x) araç uzunlamasına hızını temsil eder ve (V_w) rüzgar hızını temsil eder. Pozitif değerler karşı (ön) rüzgarı, negatif değerler ise arka rüzgarı belirtir (Gillespie, 2021; Pauwelussen, 2014).

Diğer yandan, her tekerlek dönüşü sırasında karşılaşılan yuvarlanma direnci nedeniyle aracın genel hareketi engellenir. Bu hareket direnci, her bir tekerleğin deneyimlediği yuvarlanma direncinin toplu etkisi olarak ortaya çıkar. Bir tekerleğin yuvarlanma direnci, üzerine etki eden dikey yüke (F_z) ve aracın hareketi sırasında ön ve arka akslar arasındaki

yük dağılımına ve yük transferine doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla, araç üzerinde etkili olan toplam yuvarlanma direnci kuvveti (F_R) şu şekilde ifade edilebilir;

$$F_R = F_{Rf} + F_{Rr} = f_{ro}(F_{zf} + F_{zr}) \quad (3.13)$$

Burada, (F_{Rf}) ön aks tekerleklerinin yuvarlanma direncini, (F_{Rr}) arka aks tekerleklerinin yuvarlanma direncini temsil eder. Hareket sırasında akse yüklenen miktar, Denklemler (3.10, 3.11) ile belirlenir (Jazar, 2008; 2019; Gillespie, 2021).

3.2.2.3. Aracın Uzunlamasına Hareket Denklemi

Düz bir yolda hareket eden bir araç senaryosunda, Şekil (3.13) 'de gösterildiği gibi, araca çeşitli dışsal uzunlamasına kuvvetler etki eder. Bunlar, uzunlamasına lastik kuvvetleri, aerodinamik sürüklenme kuvvetleri ve yuvarlanma direnci kuvvetlerini içerir. Araç uzunlamasına eksenini boyunca bir kuvvet dengesi denklemi şu şekilde ifade edilebilir (Jazar, 2008, 2019; Çetinkaya, 2015);

$$ma = (F_{xf} + F_{xr}) - (F_{aero} + F_{Rf} + F_{Rr}) \quad (3.14)$$

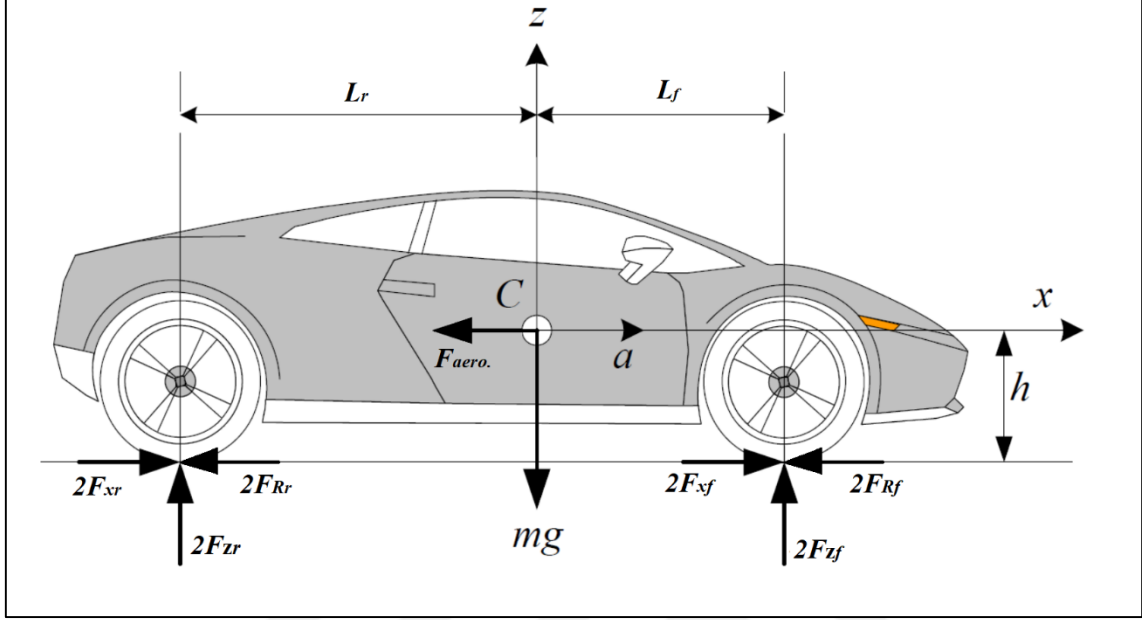
burada;

- (F_{xf}, F_{xr}) ön ve arka tekerleklerde uygulanan uzunlamasına lastik kuvvetlerini temsil eder.
- (F_{aero}) eşdeğer uzunlamasına aerodinamik sürüklenme kuvvetidir.
- (F_{Rf}, F_{Rr}) ön ve arka tekerleklerdeki yuvarlanma direncine atfedilen kuvvetleri temsil eder.
- (m) aracın kütlesini temsil eder.
- aracın uzunlamasına ivmesini temsil eder, burada ($a = \ddot{x}$).

Düz bir yolda hareket eden Dört Çeker (AWD) bir araç durumunda, uzunlamasına lastik kuvvetlerinin her bir tekerlek tarafından ayrı ayrı uygulandığı göz önüne alındığında, aracın üzerine etki eden toplam uzunlamasına lastik kuvveti (F_x), her bir tekerlek tarafından üretilen uzunlamasına kuvvetlerin toplamıdır. Bu nedenle, Denklem (3.14) şu şekilde yeniden yazılabilir;

$$ma = \sum_{i=1}^4 (F_{xi}) - (F_{aero} + F_{Rf} + F_{Rr}) \quad (3.15)$$

burada (i) aracın tekerlek numarasını temsil eder.



Şekil 3.13. Araç uzunlamasına hareket altındaki serbest cisim diyagramı (Jazar, 2008).

4. MODELLEME YÖNTEMİ VE KONTROL

4.1. Genel Bakış

Bu araştırma, tekerlek başına ayrı bir kontrolör olarak bütünleşik bir Bulanık Mantık Kontrolü ile Orantı-Entegrasyon kontrolü (BMK-PI) sistemi kullanarak Dört Tekerlekli Elektrikli Araç için Longitudinal Çekiş Kontrol Sistemi'ni (ÇKS) incelemeyi amaçlamaktadır. Kontrolör, aracı simülasyon sürüş deneylerine tabi tutarak geri mühendislik yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu deneyler, farklı ivme aralıklarında buzlu bir yolda sürüş koşullarını içerecek şekilde yapılarak en kötü sürüş koşullarını yüksek kayganlık aralıklarında elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, araç, aynı sürüş koşullarında tasarlanan kontrolörün verimliliğini incelemek için bir ÇKS sürüş deneyine tabi tutulmuştur.

Araç, kontrolörler ve sürüş senaryoları MATLAB Simulink araçları kullanılarak tasarlanmıştır. Dört tekerleğe (her aks başına iki tekerlek) sahip araç gövdesi simüle edilmiştir, bağımsız elektrik motoru modelleri ve her tekerlek için kontrol üniteleri ile birlikte. Bu bölüm, TİM-EA modellerini, BMK-PI kontrol tasarımını ve çalışmada kullanılan test senaryolarını açıklamaktadır.

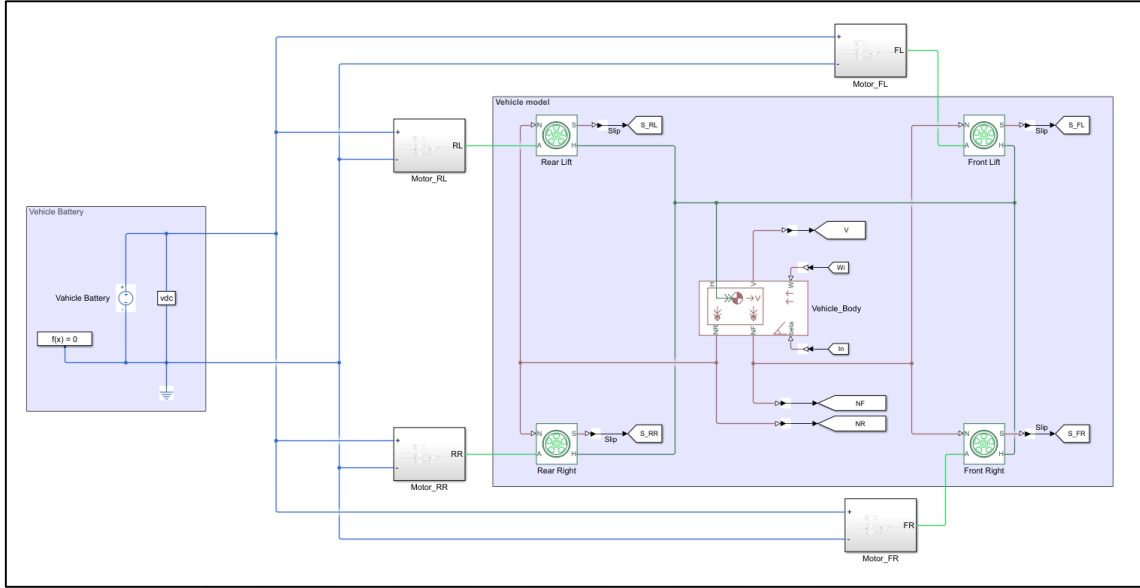
4.2. Elektrikli Araç Modelleri

Şekil (4.1), tüm tekerlekleri bağımsız olarak entegre edilmiş elektrik motorları bulunan (mekanik bağlantı olmadan doğrudan bağlantı), çift tekerlekli akslarla kullanılan araç gövdesi modeli ile birlikte bir Tüm Tekerlek Çekişli (AWD) EA modelini göstermektedir. Ayrıca, aracın elektrik güç ünitesi olarak kullandığı elektrik depolama sistemi olan bataryası da gösterilmektedir. Elektrik bataryasının güç ve besleme sistemi, çalışmanın kapsamının dışındadır. Ayrıca toplam modelleme parametreleri Ek-A'da belirtilmiştir.

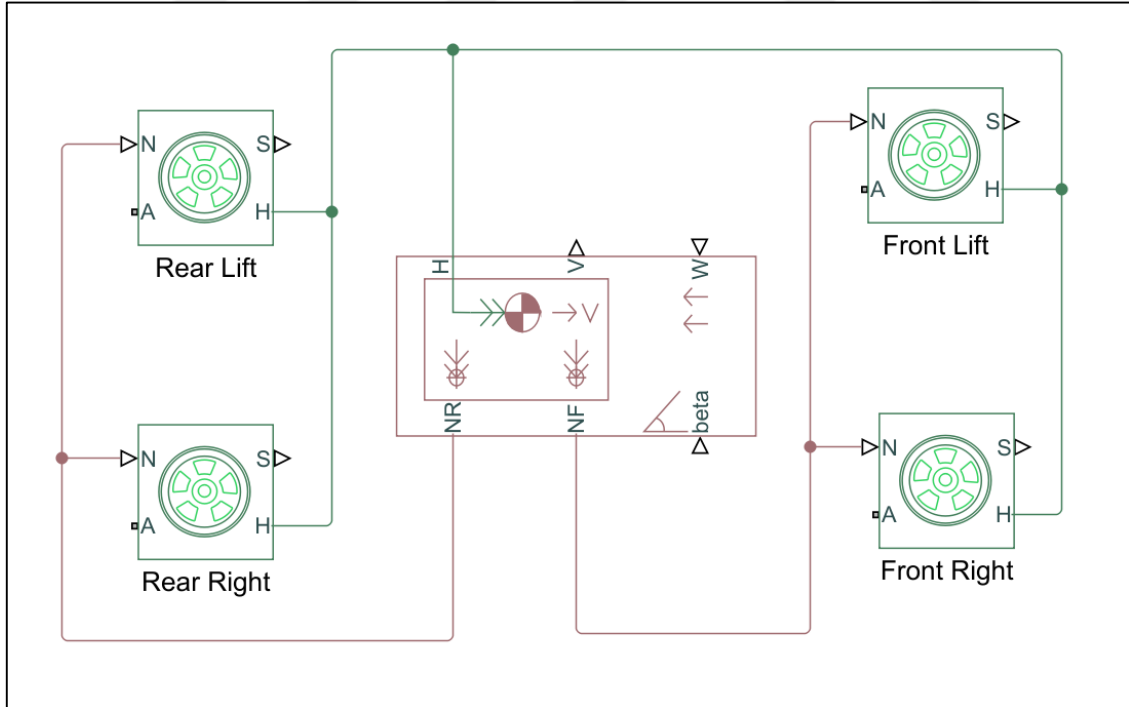
4.2.1. Araç Gövde Modellemesi

Şekil (4.2), iki aks (ön ve arka) boyunca dağıtılmış dört tekerleğe sahip aracın temel yapısal modelini göstermektedir. "Araç Gövdesi" modelleme bloğu, uzunlamasına hareket eden iki akslı bir araç gövdesini simgeler. Bu blok, araç kütlesi, aerodinamik direnç (rüzgar direnci hesabı), yol eğimi (bu bağlamda dikkate alınmamıştır), aracın

uzunlamasına hızı ve ivme ve yol profiline bağlı olarak akslar arasındaki ağırlık dağılımı gibi faktörleri içerir. Bu temsilde aracın sabit bir dikey konumda olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.1. TİM-EA modeli.



Şekil 4.2. Araç gövdesi ve tekerlek aksları modeli.

4.2.2. Tekerlek Modelleme

Şekil (4.2)'de gösterildiği gibi, 'Tekerlek (Magic Formula)' bloğu, dört uyumlu katsayıya sahip Magic Formula ile tanımlanan uzunlamasına davranış sergileyen bir lastiği temsil eder. Bu model, sabit veya değişken zemin koşulları altında lastik dinamiklerinin simülasyonunu sağlar. Sabit Magic Formula katsayıları (B, C, D ve E), Tablo (4.1)'de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi test yolu davranışını temsil etmek için kullanılır (URL-3). Önemli bir şekilde, lastiğin uzunlamasına yönelimi, yolu boyunca hareket ettiği yöne aynı hızda olur. Bu blok lastik modelinin sadakatini artırmak için uygunluk, atalet, yuvarlanma direnci ve yuvarlanma yarıçapı gibi parametreleri belirleyerek Lastik-Yol Etkileşimi (Magic Formula) bloğu içinde temel bir unsur olarak hizmet eder.

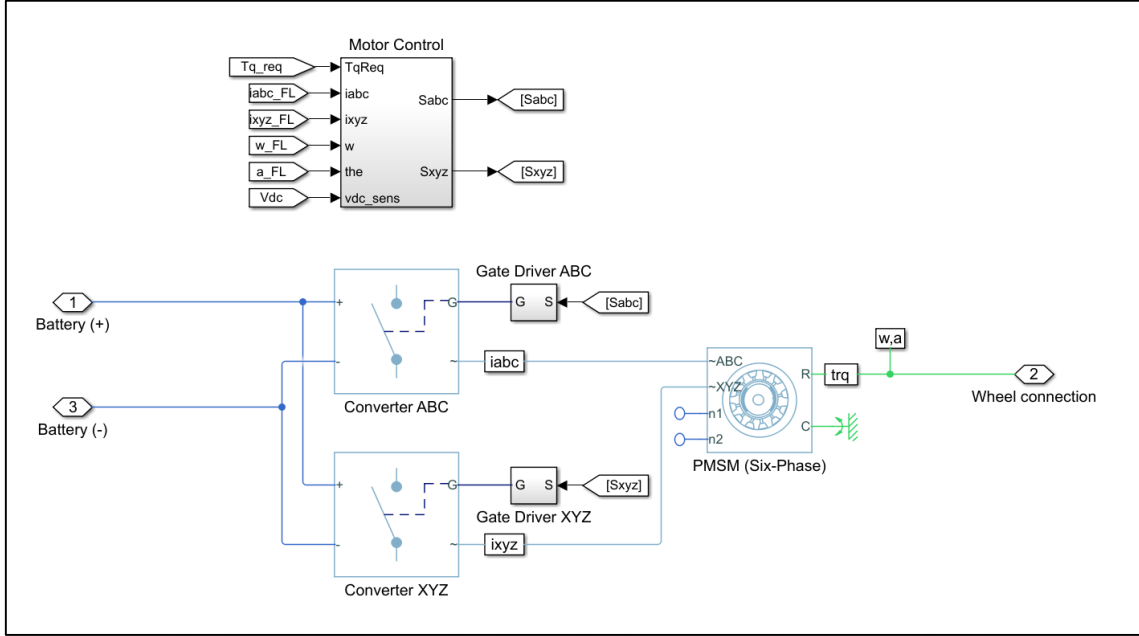
Tablo 4.1. Lastik (Magic Formula) modelleme katsayıları (URL-3).

Yol yüzeyi	B	C	D	E
Kuru asfalt	10	1.9	1	0.97
Islak asfalt	12	2.3	0.82	1
Kar	5	2	0.3	1
Buz	4	2	0.1	1

4.2.3. Elektrik Motoru Modelleme

Bireysel Elektrik Motoru modellemesi, 'Altı-Fazlı PMSM Tork Kontrolü' olarak bilinen bir Matlab tork kontrolü örneğine dayanmaktadır ve Şekil (4.3)'te gösterilmektedir. Bu örnek model, altı fazlı bir kalıcı mıknatıs senkron makinesi (PMSM) kullanarak bir elektrikli tahrik sürücüsündeki torkun nasıl kontrol edileceğini açıklar. Bir DA gerilim kaynağı, PMSM'yi iki kontrol edilebilir üç fazlı dönüştürücü aracılığıyla besler. PMSM, tekerlek-çekiş yüküne bağlı olarak hem motorlama hem de jeneratörleme modlarında çalışır. Kontrol alt sistemi, torkun açık döngü stratejisini ve akım kontrolü için kapalı döngü yaklaşımını benimser. Her örnekleme anında, tork talebi uygun bir q-ekseni akım

referansına dönüştürülür. Akım kontrolü, bir PI tabanlı stratejiye dayanır. Bu alt sistem kontrol modeli, kontrol stratejilerinin Yüksek Seviye tasarımına odaklanan bu çalışmanın kapsamı dışında kalan, aracın Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS) içindeki Düşük Seviye kontrolünü örneklemektedir (URL-3).



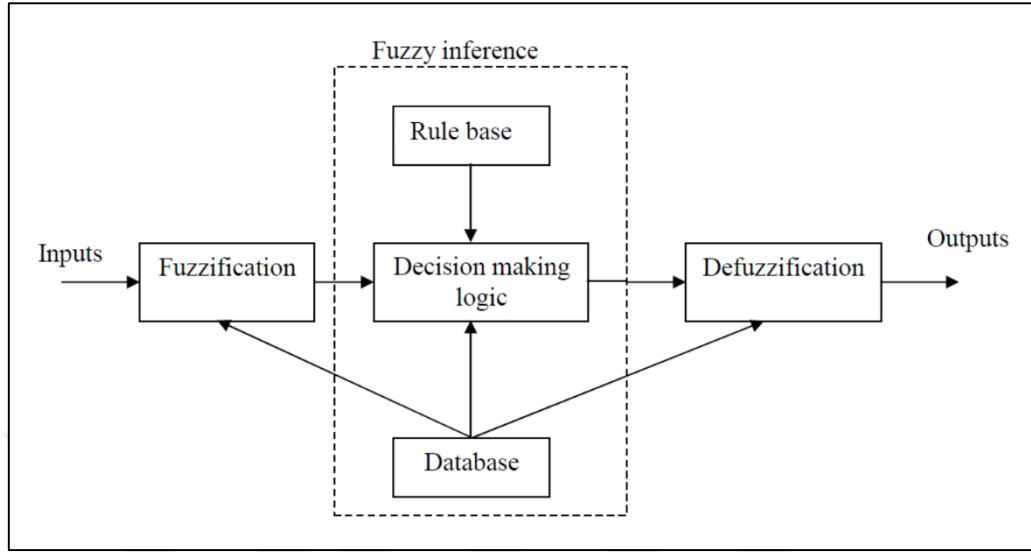
Şekil 4.3. Tekil Tekerlek İçi Elektrik Motoru Modelleme.

4.3. Üst Düzey Kontrol Modelleme ve Yöntemoloji

4.3.1. BMK Metodolojisinin Tanıtımı

Bulanık Mantık (BM), işletimsel yasaları matematiksel denklemlere tamamen güvenmek yerine, dilbilgisel terimlerle ifade ederek benzersiz bir yaklaşım sunar. Hassas modellemenin dahi karmaşık sistemlerde zor olduğu birçok durumda, geleneksel yöntemler pratik olmaktan çıkabilir. Ancak, bulanık mantığın dilbilgisel terimleri, böyle sistemlerin işletimsel özelliklerini tanımlamanın uygun bir yolunu sağlar (Uzunsoy, 2018). Bulanık Mantık Kontrolörü (BMK), üç temel bileşenden oluşur. Bunlar bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulaştırmadır. Bu bileşenler, giriş verilerini işleme, bulanık kurallara dayalı kararlar alma ve bulanık çıktıları kesin kontrol sinyallerine dönüştürme işlevlerinden sorumludur (Kulkarni, 2001; Bai ve Wang, 2006). Şekil (4.4), bir bulanık mantık kontrolörünün blok diyagram formatındaki yapılandırmasını sunar,

kontrolörün bileşenlerinin nasıl etkileştiğini görsel olarak gösterir ve sistem boyunca bilgi akışını gösterir.



Şekil 4.4. BMK'nin konfigürasyonu.

Bulanıklaştırma (Fuzzification), birden çok kesin girişi bulanık üyelik fonksiyonlarına eşlemeyi içerir. Bu süreç, giriş değişkeni değerlerinin aralığını karşılık gelen tartışma evrenlerine dönüştüren bir ölçek eşlemesi gerçekleştirir. Temelde, Bulanıklaştırma giriş verilerini dilbilgisel değerlere dönüştürür, bu değerler bulanık kümelerin etiketleri olarak düşünülebilir. Bulanık mantıkta, dilbilgisel terimler genellikle mantıksal implikasyonlar olan eğer-ise kullanılarak ifade edilir. Bu kurallar, bulanık üyelik fonksiyonları olarak bilinen bir değer aralığını tanımlar. Bulanık üyelik fonksiyonları, üçgensel, yamuk veya diğer uygun şekiller gibi çeşitli formlarda olabilir, bu da belirli bir uygulamaya bağlı olarak değişir (Kulkarni, 2001; Bai ve Wang, 2006).

Bulanık çıkarım (Fuzzy Inference), BMK'nin ikinci aşamasıdır ve bilgi tabanını, kural tabanını ve veri tabanını içeren, karar verme mantığını barındıran yerdir. Bulanık çıkarım sistemi, verilen girişlerden bir çıkışa bulanık mantık kullanarak eşleme oluşturmayı içerir. Bu eşleme, karar verme veya desenleri ayırt etme temelini oluşturur. Veri tabanı, giriş ve çıkış değişkenlerinin tanımlarını içerirken, karar verme mantığı kontrol kurallarını değerlendirir. Denetleyici kural tabanı, denetleyicinin çıkış eylemini elde edilen girişlere bağlamak için geliştirilmiştir. Bulanık Mantık Kutusunda iki tür bulanık çıkarım sistemi

uygulanabilir: Mamdani tipi ve Sugeno tipi. Bu sistemler, çıktıların nasıl belirlendiğinde biraz farklılık gösterir. En yaygın kullanılan metodoloji olan Mamdani'nin bulanık çıkarım yöntemi, bulanık küme teorisi kullanılarak oluşturulan ilk kontrol sistemlerinden biriydi. 1975 yılında Ebrahim Mamdani tarafından önerilmiş olup, bir buhar makinesini ve kazan kombinasyonunu kontrol etmeyi amaçlamış ve deneyimli insan operatörlerinden elde edilen bir dizi dilbilgisel kontrol kuralını sentezlemiştir (Kulkarni, 2001; Bai ve Wang, 2006).

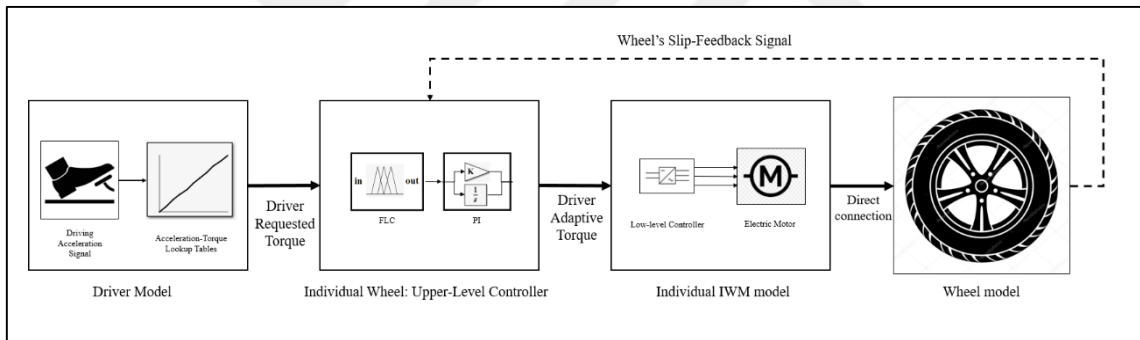
Bulanık mantık kontrolünde kritik bir adım olan Durulaştırma (Defuzzification), bulanık mantık hesaplamaları ile uygulanabilir çıktılar arasındaki boşluğu kapatır. Bu, dilbilgisel terimler veya bulanık kümeler tarafından temsil edilen bulanık çıktı değişkenlerini, bir sistem kontrol etmek için kullanılabilen keskin değerlere dönüştürmeyi içerir. Birkaç durulaştırma yöntemi mevcuttur, her biri keskin çıktı değerini belirleme konusunda kendi yaklaşımına sahiptir. Bunlar maksimum kriter, yükseklik ve merkez yöntemidir. (a) Maksimum Kriter Yöntemi (MAX), bulanık kontrol eyleminin üyelik fonksiyonunun maksimum değerine ulaştığı noktayı seçer. Bu yaklaşım, çıktı uzayındaki en etkili bulanık kümeye odaklanır. Buna karşılık, (b) Yükseklik Yöntemi, her kural için her üyelik fonksiyonunun merkezini hesaplar. Son olarak, (c) Merkez Yöntemi, ayrıca Alanın Merkezi Yöntemi olarak da bilinir ve üyelik fonksiyon eğrisi ile sınırlanan alanın ağırlık merkezini belirler. Bulanık çıktı uzayının merkezini bularak, bulanık mantık çıktısının dengeli bir temsili sağlar. Her durulaştırma stratejisi, kendi benzersiz bakış açılarını ve dengelemelerini sunduğu için kontrol sisteminin belirli gereksinimleri ve özellikleri temelinde en uygun yöntemi seçmek önemlidir (Kulkarni, 2001; Bai ve Wang, 2006).

4.3.2. Genel Kontrol Metodolojisi

Geleneksel Bulanık Mantık Denetleyicileri (BMK'ler), çoklu doğrusal olmayan değişkenlere sahip sistemlerle başa çıkarken sınırlılıklarla karşılaştığında, mühendisler genellikle BMK'lerin yeteneklerini tamamlamak için adaptif sistemlere yönelirler. Özellikle gerçek dünya sistemlerinin karmaşık dinamikleri ile uğraşırken işletme koşullarında, bozulmalarında veya belirsizliklerinde değişikliklerle karşılaştıklarında kullanırlar. Bulanık Mantık Adaptif Kontrolü (BMAK), kontrolün parametrelerini sürekli olarak gerçek zamanlı geri besleme ile ayarlamasını sağlayan adaptif mekanizmaları içererek bu zayıflıklara cevap verir.

BMAK, bulanık kurallarını, üyelik fonksiyonlarını ve diğer kontrol parametrelerini otomatik olarak ayarlamak için adaptif algoritmaları kullanır, böylece dinamik ortamlarda optimize edilmiş performans ve kararlılık sağlar. Bu nedenle, tezde önerilen Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS), BMK ile bütünleşik bir adaptif kontrol sistemi olan Oransal-İntegral (PI) denetleyici ile (BMC-PI) birlikte kullanır. BMK, kontrol ünitesinin çekirdeğini oluştururken, PI denetleyici çeşitli sistem değişkenlerindeki değişikliklere dayanarak BMK çıktılarını hassas ayarlar.

Şekil (4.5)'de her biri dört araç tekerleği için uygulanan bireysel tekerlek çekiş kontrol sisteminin kontrol diyagramını göstermektedir. Kontrol ünitesi, her tekerlekte stabilite sağlamak için önceden belirlenmiş sürüş koşullarına dayanarak sürücünün tork talebini azaltır. Tekerlek kayması, çekiş kontrolünde temel değişken olarak hizmet verir ve kontrol sistemi tekerlek kaymasını maksimum izin verilen sınırlar içinde tutmak için tork talebini ayarlar. Böylece optimal çekiş ve araç stabilitesi sağlanır.



Şekil 4.5. Bireysel Tekerlek-Çekiş-Kontrol Diyagramı.

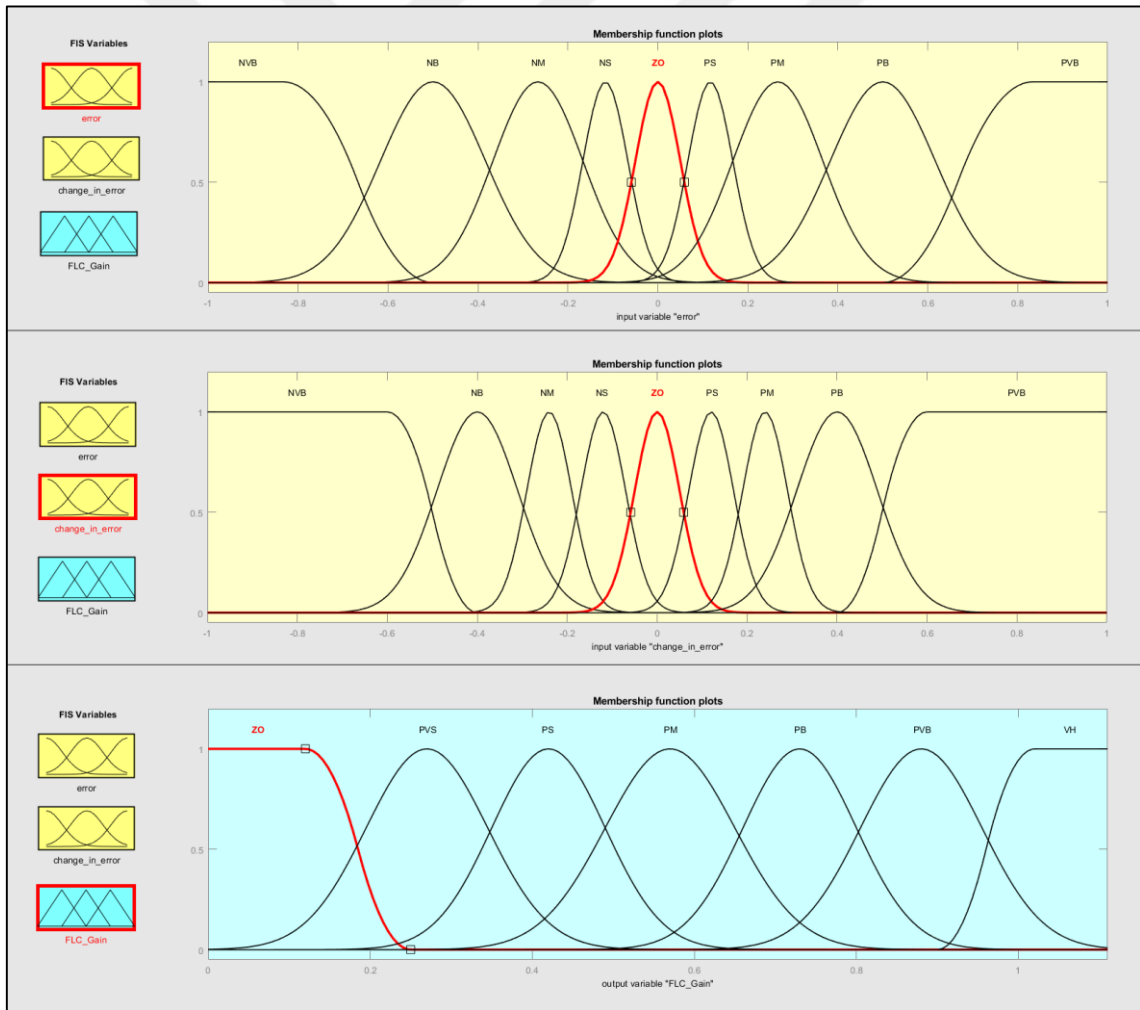
4.3.3. Denetleyici Modelleme

4.3.3.1. BMK Modelleme

BMK birimi, tekerlek kaymasının belirli bir önceden belirlenmiş maksimum izin verilen değeri aşmamasını sağlayarak tekerlek çekişini düzenler. Denetleyicinin tasarım felsefesi, tekerlek kaymasının belirtilen eşiği aşmasını önlemek için sürücünün talep ettiği torku ayarlamaya dayanır. BMK birimi tekerlek kayması istikrarlı durum hatası ve kayma hatası türevi olmak üzere iki temel girişe dayanır. Burada kayma hatası istenen ve gerçek

kayma değerleri arasındaki farkı temsil ederken, hata türevi zaman içindeki kayma hatası değişim hızını temsil eder.

Şekil (4.6)'da bu girişler için tanımlanan bulanık üyelik fonksiyonlarını ve denetleyici çıkışını göstermektedir. Denetleyicinin çıkışı (tork azaltma faktörü), sürücünün talep ettiği torkun azaltılma derecesini belirtir ve (0) ile (1) arasında değişir. Bir (1) değeri torkta herhangi bir azalmayı ima ederken, (0) değeri tekerlek kayma hatası tarafından belirlenen şekilde sürücünün talep ettiği torkun tamamen azaltıldığını gösterir. Üyelik fonksiyonlarının sembolik tanımları; NVB: Negatif-Çok-Büyük, NB: Negatif-Büyük, NM: Negatif-Orta, NS: Negatif-Küçük, ZO: Sıfır, PS: Pozitif-Küçük, PM: Pozitif-Orta, PB: Pozitif-Büyük, PVB: Pozitif-Çok-Büyük, VH: Çok-Yüksek şeklindedir.

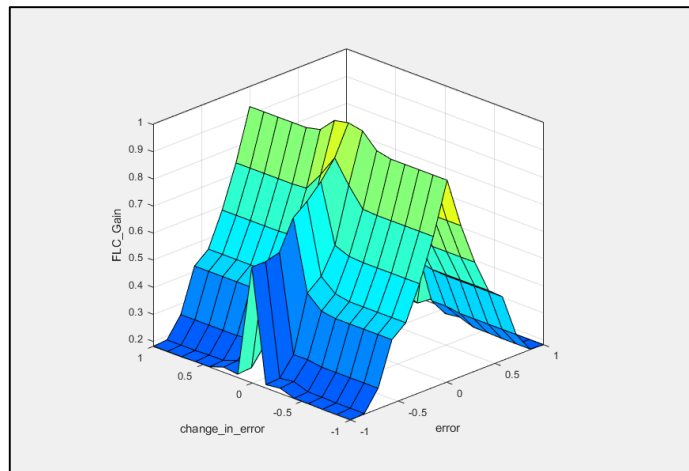


Şekil 4.6. BMK'nin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları.

Tablo (4.2), kontrol ünitesi için formüle edilen kural tabanını sunar ve girişlerin bulanık üyelik fonksiyonları ile denetleyici çıkış arasındaki ilişkiyi belirler. Şekil (4.7) ise son halini almış olan bulanık kontrol ünitesinin kontrol haritasını gösterir. Bu harita, sürücünün torka toleransını belirleyen izin verilen aralığı gösterir. Burada tekerlek kayma hatası sıfır olduğunda ve hata türevindeki değişim sıfır olduğunda tam tolerans oluşur.

Tablo 4.2. BM-kontrolörünün Kural Tabanı.

FLC	Input '2'	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
Input '1'	OTHER	-	-	-	-	VH*2	-	-	-	-
NVB	PVS	ZO	ZO	ZO	ZO	PVS	ZO	ZO	ZO	ZO
NB	PM	PVS	PVS	PVS	PS	PM	PS	PVS	PVS	PVS
NM	PB	PM	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PM
NS	PVB	PB	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB	PB	PB
ZO	VH*2	PVB	PVB	VH	VH	VH	VH	VH	PVB	PVB
PS	PVB	PB	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB	PB	PB
PM	PB	PM	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PM
PB	PM	PVS	PVS	PVS	PS	PM	PS	PVS	PVS	PVS
PVB	PVS	ZO	ZO	ZO	ZO	PVS	ZO	ZO	ZO	ZO



Şekil 4.7. BM-kontrolörünün toplam kontrol haritası.

4.3.3.2. BMK-PI Modelleme

BMK-PI kontrolcüsü, TİM-EA'deki uzunlamasına tekerlek ÇKS'nin kontrolünü geliştiren bir Bulanık Mantık Uyarlamalı Kontrol (BMAK) sistemi olarak çalışır. İşlevi şöyledir;

1. Oransal Kontrol;

Sabit oransal katsayı (Oransal Kazanç - P.G.), bulanık kontrol ünitesinin çıkışını doğrudan etkiler. En iyi performansı sağlamak için integral kısmı göz önünde bulundurmadan deneysel olarak belirlenir.

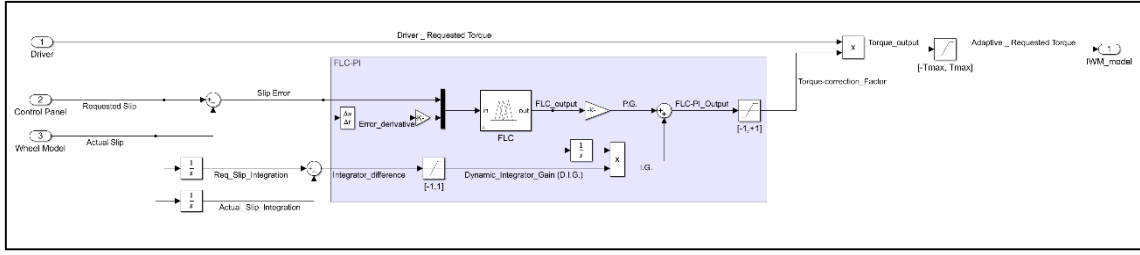
2. İntegral Kontrol;

Sabit integral katsayılarına sahip geleneksel PI kontrolcülerinin aksine, BMK-PI'deki integral katsayısı değişkendir ve tekerlek kaymasındaki değişikliğe bağlıdır. Bu değişken integral katsayısı, Dinamik İntegratör Kazancı (D.I.G.) olarak bilinir ve istenen kayma ile gerçek kayma arasındaki entegrasyon farkına dayalı olarak belirlenir. D.I.G., $[-1, 1]$ aralığında ayarlanır. Burada (1) istenen kayma değerine ulaşmak için sürücünün tork talebini artırmak gerektiğini, (-1) ise tekerlek kaymasını önlemek için tork talebini azaltma ihtiyacını gösterir.

3. Kontrolcü İşlemi;

BMK-PI kontrolcüsü bulanık kontrol ünitesi ve PI kontrolcüsünün çıkışlarını birleştirerek sürücünün talebi için gerçek tork azaltma faktörünü belirler. Son çıkış aralığı $[1, -1]$ arasındadır. Burada (1) tork azaltmaya gerek olmadığını, (-1) ise tekerlek kaymasını önlemek veya tekerlek kaymasını azaltmak için tam tork azaltma gerektiğini gösterir. Bu çıkış gerçek zamanlı tekerlek kayma koşullarına göre dinamik olarak ayarlanır ve böylece tekerlek kaymasını en aza indirirken optimal çekiş kontrolünü sağlar.

Şekil (4.8), BMK ve PI kontrolünü entegre ederek tekerlek kayma değerlerine dayanarak tork azaltma faktörünü adaptif olarak ayarlayan BMK-PI kontrol sisteminin kapsamlı bir genel bakışını sunar. Bu adaptif yaklaşım, çeşitli sürüş koşullarında etkili çekiş kontrolü sağlayarak aracın kararlılığını ve performansını artırır.



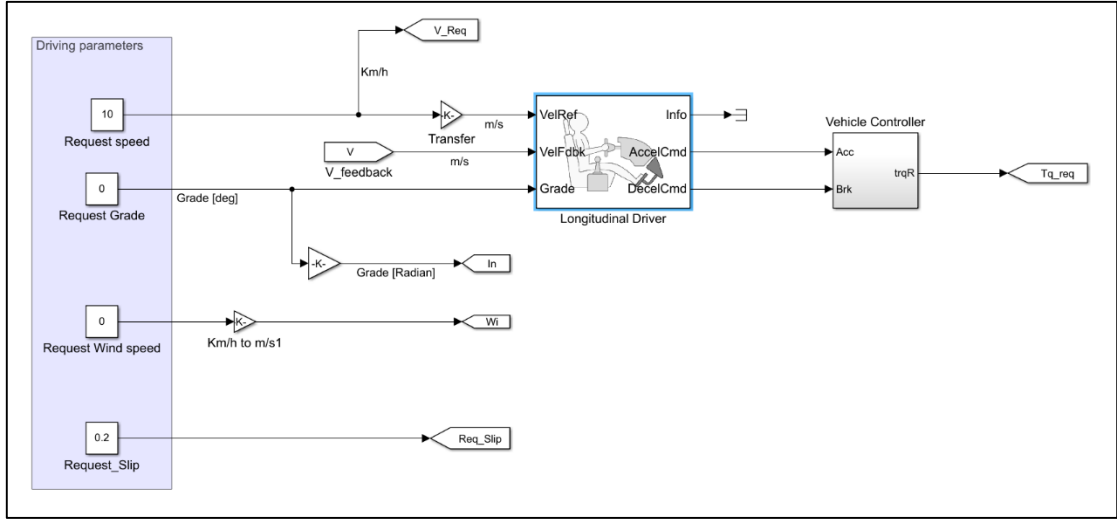
Şekil 4.8. BMK-PI denetleyicinin modeli.

4.4. Test Metodolojisi

Önerilen kontrol sisteminin etkinliğini değerlendirmek için çeşitli sürüş senaryoları geliştirildi ve tasarımını test etmek ve iyileştirmek için odaklanıldı, tekerlek çekişini yönetme yeteneği üzerinde yoğunlaşarak. Kaygan bir buzlu yolda sürüş bağlamında, özellikle iki senaryo geliştirildi:

Birinci senaryoda Tam İvme Sürüş modu olarak adlandırılan, sistem en zorlu sürüş koşullarına maruz bırakılır ve sürücü kaygan bir zeminde tam ivme istemektedir. Buradaki amaç maksimum tekerlek kaymasını indüklemek ve kontrol edilmemiş kayma ile karşılaştırılabilecek önceden belirlenmiş kontrol edilmiş kayma değerlerine ulaşmaktır. Araç maksimum kapasitesine yani yer çekimi ivmesine eşdeğer bir hızla (10 saniye) boyunca hızlandırılır.

İkinci senaryoda Sabit Hızlı Sürüş modu olarak bilinen, aracın hızının (10 km/saat) sabit tutulması sağlanır. Bu senaryo hızlanmayı düzenlemek için 'Longitudinal Sürücü' model bloğunun kullanıldığı bir durumu içerir. Şekil (4.9)'da gösterildiği gibidir. Buradaki amaç, tasarlanan kontrol sistemlerinin kontrolsüz bir senaryo ile karşılaştırıldığında etkinliğini değerlendirmektir. Özellikle kontrol edilen sistem belirli tekerlek kayma değerleri olan (0.1), (0.2), (0.3) ve (0.39) değerleri altında değerlendirilir. Bu değerler kaygan yüzeylerde zorlu sürüş koşullarına uygun seçilmiştir. Genel olarak ikinci senaryo buzlu yollarda zorlu sürüş koşullarında kontrol sisteminin performansını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirir.



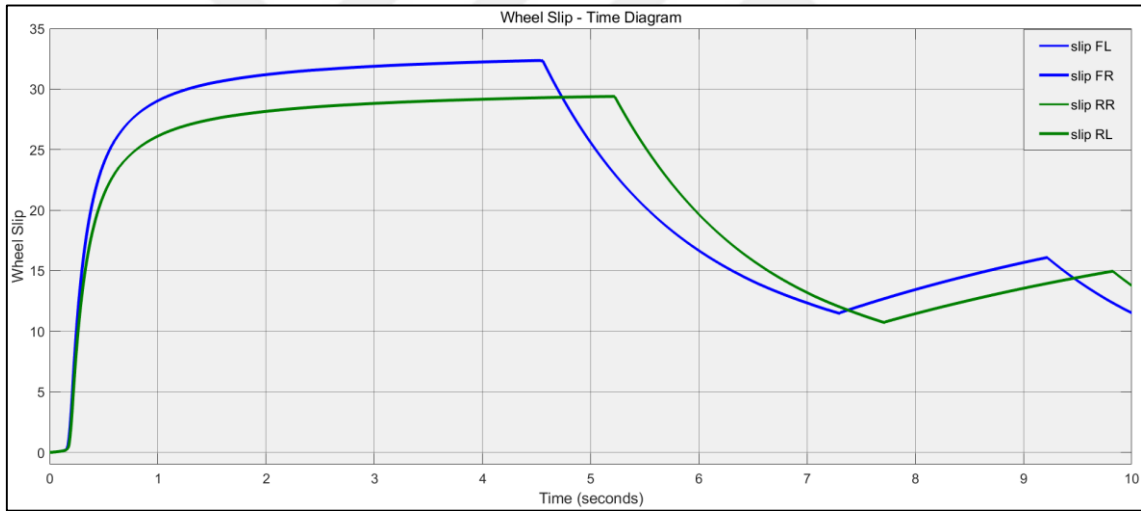
Şekil 4.9. Longitudinal Sürücü Modeli.

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

5.1. Birinci Senaryo

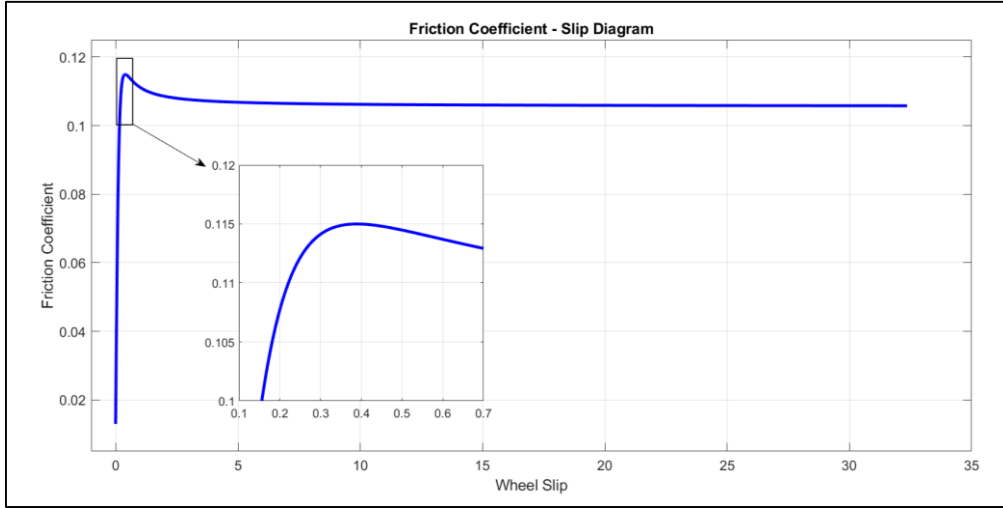
5.1.1. Birinci Senaryo: Kontrolsüz Model Sonuçları

Birinci sürüş senaryosunun kontrolsüz test modellemesinde, talep edilen tork yüksek seviyeli çekiş kontrol sistemi tarafından herhangi bir tork düzeltmesi olmaksızın her tekerleğin elektrik motoru modeline doğrudan iletilir. Şekil (5.1)'de bu kontrolsüz model için gerçek tekerlek kayma oranlarını göstermektedir. Kayma değeri, kaygan yol koşulları, kontrolsüz tekerlek çekişi ve birinci senaryonun tam ivme talebi karakteristiği nedeniyle son derece yüksektir. Ayrıca hem ön tekerlekler hem de arka tekerlekler aksın tekerlekleri arasındaki tutarlı dinamikleri vurgulayan benzer uzunlamasına tekerlek kayma değerlerine sahiptir.



Şekil 5.1. Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Gerçek Kayma Oranı Bakışı.

Tekerlek-yol temas bölgeleri için sürtünme katsayısı, tekerleklerin yüksek dönüş koşullarından dolayı sürtünme katsayısı kayma diyagramında kaygan bir bölge olarak gösterilmektedir. Bu bölgede kontrol sistemi tekerlek dinamiğinin kontrolsüz bir durumda çalışır. Şekil (5.2)'de arka tekerleklerle karşılaştırıldığında yüksek kayma değerleri göz önüne alındığında özellikle ön tekerlekler için tekerlek kaymasına ilişkin sürtünme katsayısı diyagramını göstermektedir.

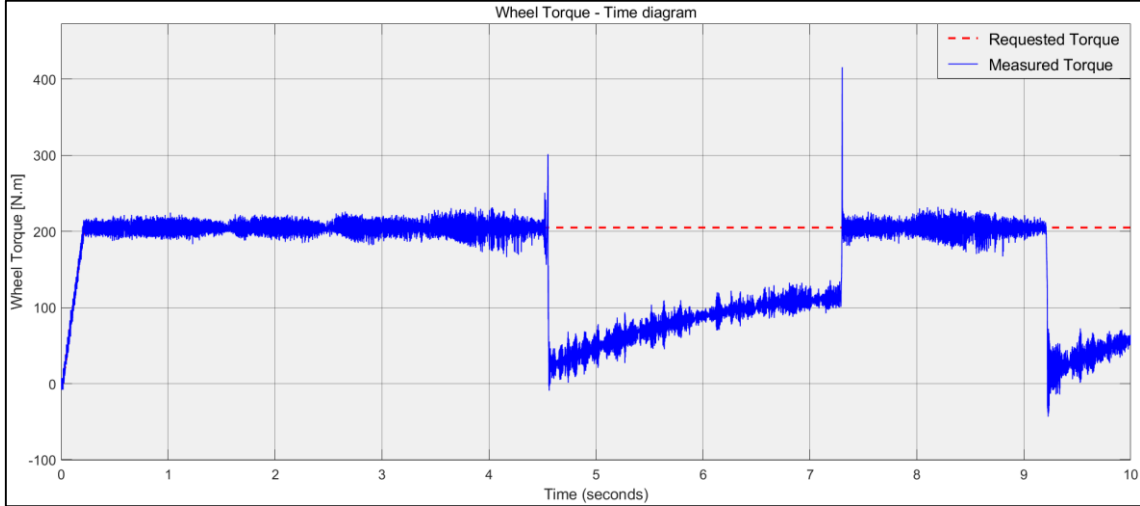


Şekil 5.2. Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerlekler için Sürtünme Katsayısı-Kayma Diyagramı.

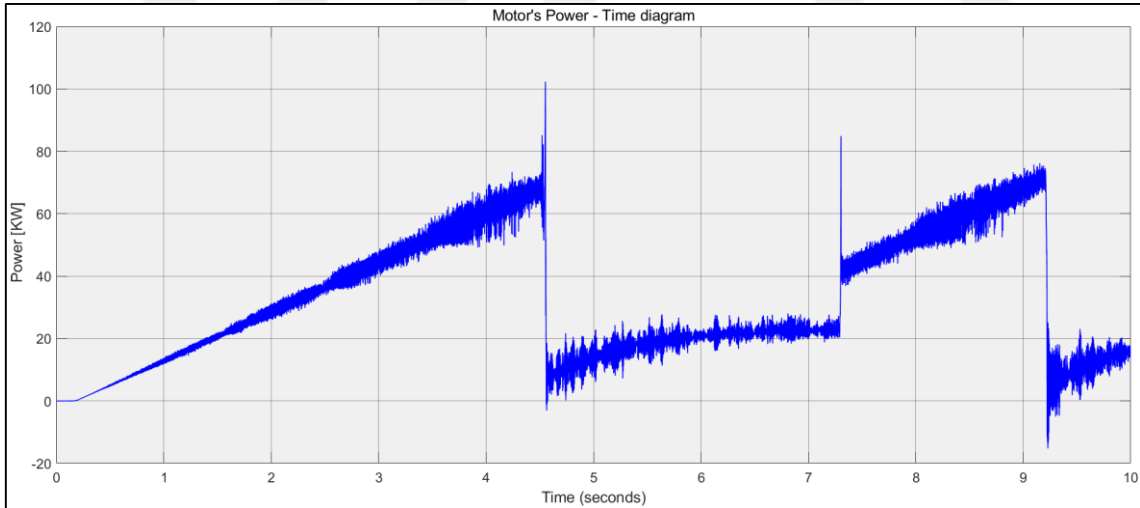
Şekil (5.2)'de görüldüğü gibi, tekerlek sürtünme katsayısının maksimum değeri (0,39) kayma oranında meydana gelir. Bu nedenle çalışmanın hipotezi, tekerlek için maksimum sürtünme katsayısı değeri temel alınarak belirlenen dört kontrollü kayma değeri (0,1), (0,2), (0,3) ve (0,39) etrafında döner. (0,39)'luk kontrollü kayma değeri, izin verilen maksimum kayma oranının kontrol metodolojisi ile tekerleğin maksimum sürtünme davranışını temsil edecek şekilde seçilir. Diğer kontrol edilen kayma değerleri, optimal kontrol bölgesini belirlemek için sürtünme katsayısı kayma diyagramındaki karşılaştırmalı analiz için artımlı adımlar olarak tasarlanmıştır.

Birinci senaryonun kontrolsüz modunda sürücü tarafından talep edilen tork Elektrik Motorunun (EM) maksimum tork değeri olan (205 N.m) olarak ayarlanmıştır. Bu da tam hızlanma talebine denk gelir. Şekil (5.3)'te motorun tork tepkisini gösterilir ve tekerleğin dönme hızı arttıkça bozulma noktalarını sergiler. EM'nin tork tepkisini karakterize etmek için, Şekil (5.4) zaman içinde EM'deki güç tüketimi akışını sunar. Motor güç tüketimi nominal gücünün altında kaldığı sürece istenen değere eşit tork sağlar. Bu değer (35 kW)'nin altındadır. Sonuç olarak, motor tekerleğin dönme hızı EM'nin tork-hız ilişkisindeki dereceli değerlere yaklaştığında veya bunları aştığında nominal izin verilen torkunu sabit tutar. Ancak Şekil (5.5)'te gösterildiği gibi, tekerlek kaymaya ve yol yüzeyi ile sürtünmeyi kaybetmeye başladığında, motorun dönme hızı artar. Sonuç olarak, güç tüketimi maksimum izin verilen değerine yaklaştıkça motorun tork çıkışı azalmaya başlar

ve nihayetinde bir tork çıkışı bozulmasına neden olur. Bu tork çıkışındaki azalma motorun dönme hızının motor gücü yeniden nominal değerine ulaşana kadar azalmasına neden olur. Bu kontrolsüz davranış tekerlek kayma sürekli olarak çekişini kaybetmeye devam ettiği sürece devam eder.



Şekil 5.3. Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Tork Tepkisi.

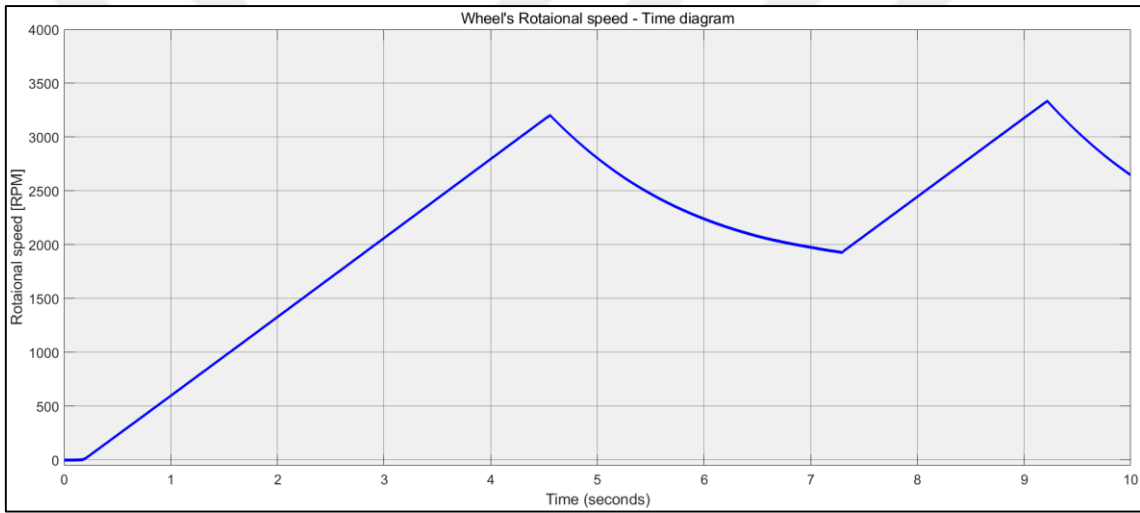


Şekil 5.4. Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Güç Tüketimi.

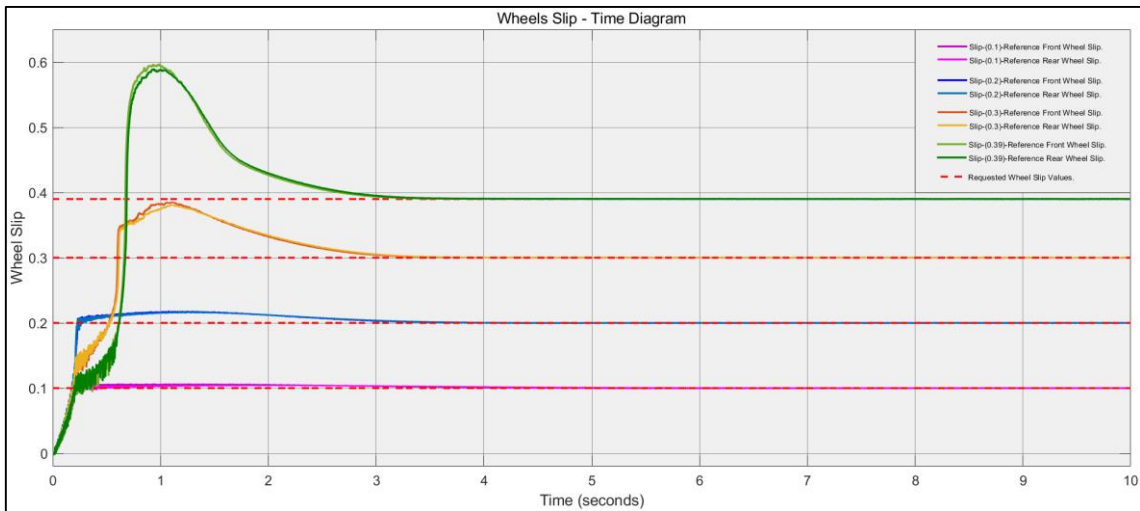
5.1.2. Birinci Senaryo: Kontrollü Model Sonuçları

İlk sürüş senaryosunun kontrol edilen test modellemesinde istenen tork, yüksek seviyeli çekiş kontrol sisteminin tork düzeltme metodolojisi ile her tekerleğin elektrikli motor

modeline iletilir. Şekil (5.6)'da bu kontrol edilen modeller için gerçek tekerlek kayma oranlarını göstermektedir. Özellikle kayma değeri birinci senaryonun kaygan yol koşulları ve tam hızlanma talebinin karakteristikleri göz önüne alındığında dört varsayılan kayma değeri için kontrol edilir. (0,1) ve (0,2) değerleri için kayma yanıtı minimum aşım gösterirken, (0,3) ve (0,39) değerleri daha belirgin aşım gösterir. Ayrıca daha yüksek kayma değerlerinin daha düşük kayma değerlerine kıyasla yanıtta gecikme olduğu gözlemlenmiştir. Bu da daha düşük kayma değerlerinin tekerlek kayma davranışı açısından daha iyi bir kontrol yanıtına sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan ön ve arka tekerlekle, tüm tekerleklerde tutarlı dinamikleri vurgulayan aynı uzunlamasına tekerlek kayma değerlerine sahiptir.

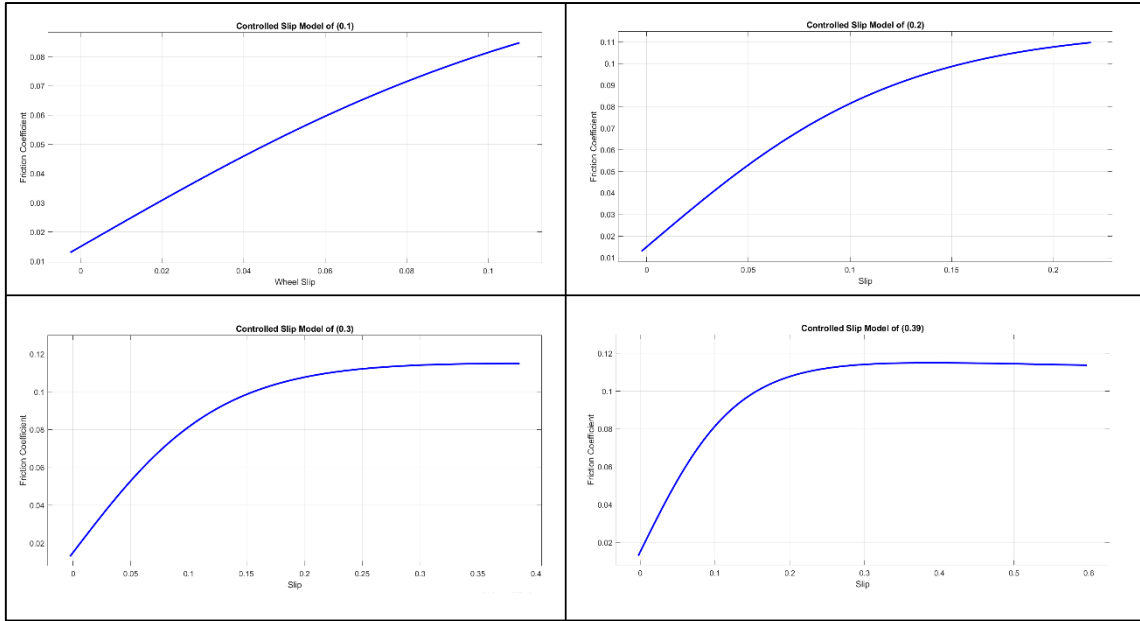


Şekil 5.5. Birinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Ön Tekerleğin Dönüş Hızı.



Şekil 5.6. Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; Tekerlek Kayma Tepkisi.

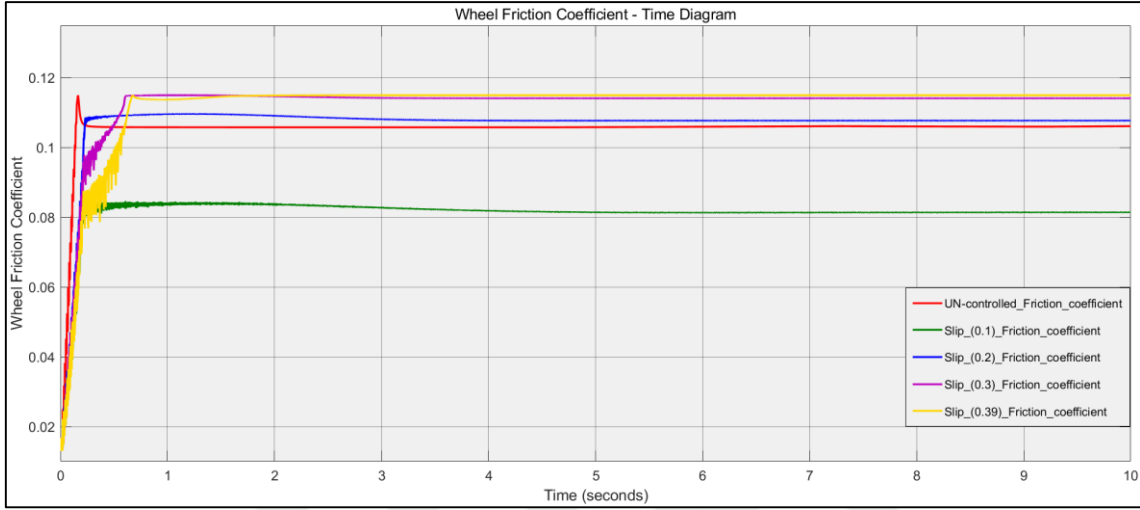
Şekil (5.7)'de tekerlek sürtünme katsayısı açısından kontrol edilen kayma değerlerinin, tekerlek kayma yanıtı açısından kaymayan bir davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil (5.8)'de kontrol edilen ve kontrol edilmeyen modeller için sürtünme katsayısı değerlerini test süresi boyunca karşılaştırmaktadır. Burada, kontrolsüz modelin, kontrol edilen kayma değerlerine (0,2), (0,3) ve (0,39) kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısı ile kaygan bir sürtünme davranışı sergilediği, ancak (0,1) kontrol edilen kayma değerinden daha yüksek bir değere sahip olduğu açıktır. Ek olarak, (0,3) ve (0,39) kontrol edilen kayma değerleri için sürtünme yanıtında belirgin bir gecikme olduğu gözlemlenmektedir.



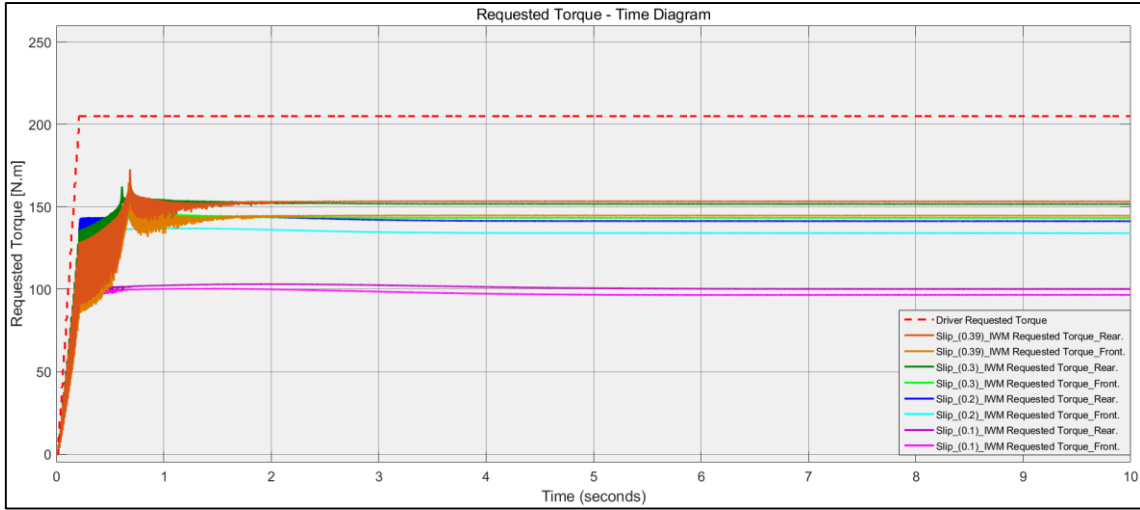
Şekil 5.7. Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; Tekerleğin Sürtünme Katsayısı – Kayma Diyagramları.

İlk senaryonun kontrol edilen modlarında, sürücü tarafından talep edilen tork EM'nin maksimum tork değeri olan (205 N.m) olarak ayarlanmıştır ve bu tam hızlanma talebine karşılık gelir. Her kontrol modelinin yüksek seviye kontrolcüsü, tekerlek kayma yanıtını dikkate alarak her EM'ye adapte talep edilen tork sağlar. Şekil (5.9)'da dört kontrol edilen kayma modeli için yüksek seviyeli kontrolcü tarafından öne ve arkaya EM'ler için adaptif olarak talep edilen torkları göstermektedir. Her kayma değeri için yüksek seviyeli kontrolcü tarafından kayma ile orantılı adapte talep edilen bir torkun etkin bir şekilde tasarlandığı açıktır. Bununla birlikte (0,3) ve (0,39) kayma değerlerinin neredeyse aynı

tork değerine sahip olduğu ve talep edilen torkta bir gecikme olduğu gözlemlenmektedir. Bu da yüksek bir talep edilen kayma değeri ve bu kayma değerlerinin kontrolsüz sürtünme katsayısı kayma diyagramına göre kritik konumunda olmasından kaynaklanan bir yavaşlama veya tork talebinde frenleme durumunu açıklar. Bu tork kontrol davranışı önceden gözlemlenen kayma ve sürtünme katsayısı için gecikmiş yanıtı açıklar.



Şekil 5.8. Birinci senaryo; Tekerleğin Sürtünme Katsayısı – Zaman Diyagramları.



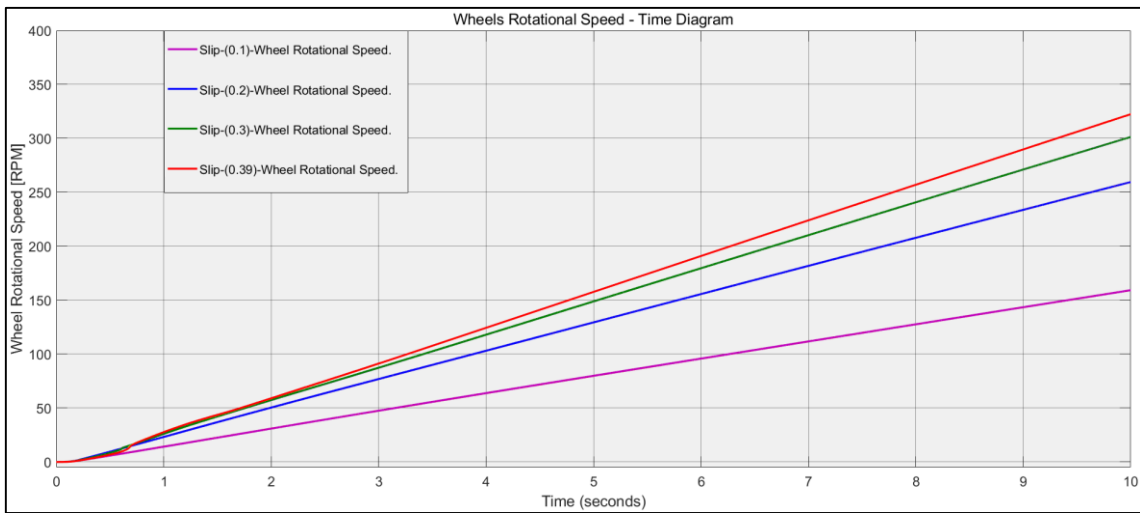
Şekil 5.9. Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Talep Ettiği Torklar.

Sabit kontrollü torkun bir sonucu olarak, EM'nin güç tüketim yanıtı, kontrolsüz model davranışına göre kırılma noktalarını önler. Tekerlek dönme hızı, motorun tork davranışını

olumsuz etkilemeden düzgün bir şekilde artar, böylece güç tüketimi nominal dereceli değerlerin altında kalır. Şekil (5.10), varsayılan kayma değerleri için test süresi boyunca EM'nin güç tüketimini göstermektedir. Kontrollü kayma değeri ile güç tüketiminin arttığı, arka tekerleğin hızlanma sırasında etkilenen araç ağırlığından dolayı daha yüksek talep edilen tork değerinden kaynaklanan daha yüksek güç tüketimi yaşadığı gözlemlenmektedir. Şekil (5.11)'de her kontrol modeli için ön ve arka tekerleklerin aynı dönme hızı değerlerini sergileyerek tekerlek dönme hızı değerlerinde düzgün bir artışı göstermektedir.

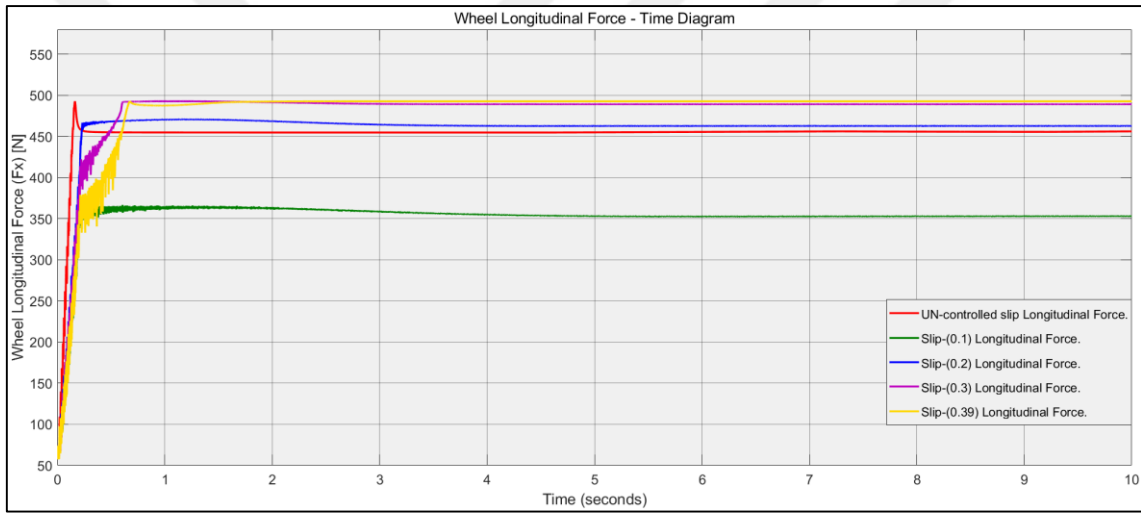


Şekil 5.10. Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Zaman İçindeki Güç Tüketimi.



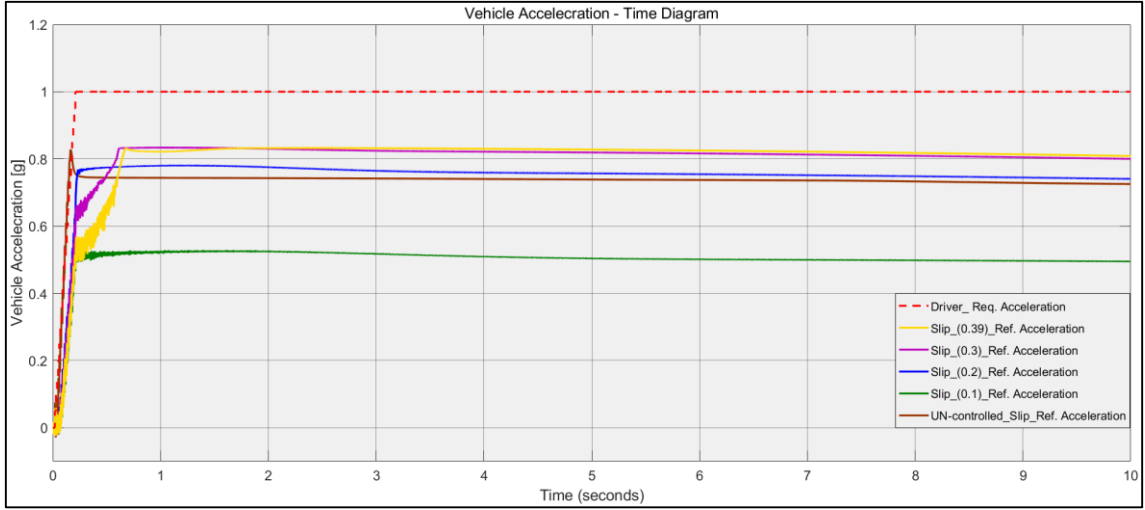
Şekil 5.11. Birinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'nin Dönme Hızları.

Kontrollü IWM'nin torku ve kontrollü tekerlek sürtünme kayma davranışı temel alınarak, tekerleklerin uzunlamasına dinamiğini etkileyen sonuçta ortaya çıkan uzunlamasına sürüş kuvveti üretilir. Bu kuvvet, tekerleğe iletilen torkla ve araç modelleri tarafından karşılaşılan dirençle orantılıdır. Şekil (5.12)'de kontrol edilen ve kontrolsüz modeller arasında üretilen tekerleklerin uzunlamasına sürüş kuvvetlerini karşılaştırır. Kontrollü kayma değerleri olan (0.2), (0.3) ve (0.39) kontrolsüz modelden daha yüksek kuvvetler sergilerken, (0.1) kayma modeli daha düşük kuvvet gösterir. Çünkü sürtünme katsayısı ve tekerleğin iletilen torkunun değeri daha düşüktür. Ayrıca, (0.3) ve (0.39) kontrollü kayma değerlerinin sürüş kuvveti değerlerinde tork-frenleme-gecikme etkileri sergilediği de dikkat çekicidir.

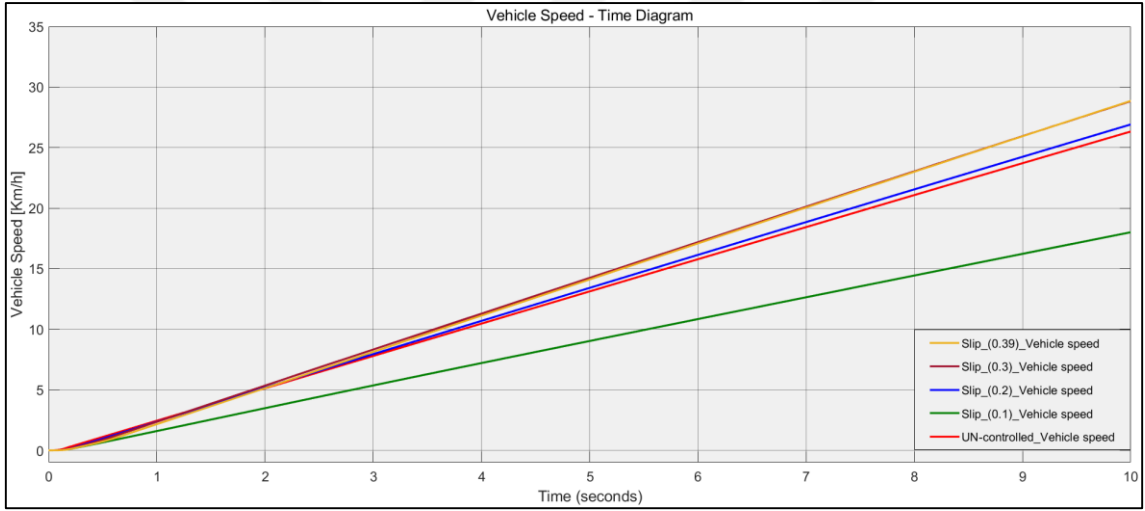


Şekil 5.12. Birinci senaryo; Çarkın Boyuna İtici Kuvvetlerinin Modellenmesi.

Toplam uzunlamasına sürüş kuvvetleri aracın uzunlamasına dinamiğini etkilediği için Şekil (5.13)'de kontrol edilen ve kontrolsüz modeller arasında aracın ivme davranışını birinci senaryoda tam ivme talebi varsayımı altında karşılaştırır. Şekil (5.14)'te kontrol edilen ve kontrolsüz modeller arasında araç hızlarının sonuçlarını karşılaştırır. (0.2), (0.3) ve (0.39) kontrollü kayma değerleri en iyi yanıtı gösterir. (0.2) kayma modeli daha yüksek kontrollü kaymalara kıyasla biraz daha yavaş bir ivme gösterirken (0.3) ve (0.39) kayma modelleri tork gecikme etkileri bile hızı etkileyen benzer ivme davranışını gösterir.



Şekil 5.13. Birinci senaryo; Araç İvmesinin Modellenmesi.



Şekil 5.14. Birinci senaryo; Araç Hızının Modellenmesi.

5.1.3. Birinci Senaryo: Sonuçların Tartışması

KontROLSÜZ ve kontrol edilen modeller arasında yapılan karşılaştırmada, yüksek düzeyli kontrol ünitesinin çalışma verimliliğinin çalışma kapsamındaki farklı varsayılan kayma değerlerinde yüksek olduğu ortaya çıktı. Tablo (5.1)'de test modelleri arasındaki ana karşılaştırmalı özellikleri göstermektedir ve tekerlek çekişini kontrol etmek için birincil ölçüt olarak tekerlek kayma düzeltilme performansına odaklanmaktadır. Kontrollü kayma modellerinin (0.1) ve (0.2) verimliliğinin, kayma tepki yükselme ve sabitleşme süreleri

açısından en yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca (0.1) ve (0.2) kontrollü kayma sistemlerine kıyasla küçük bir aşırı atlama değerine sahipken, (0.3) ve (0.39) kayma modellerinde aşırı atlama değerleri belirgin derecede yüksektir. Yükselme ve sabitleşme tepki süreleri (0.1) ve (0.2) kontrol edilen kayma sistemlerine kıyasla yüksektir. Ayrıca sabitleşme süresinin istenen kayma değerinin ($\pm 10\%$) tolerans aralığı içinde olduğu belirtilmelidir.

Tablo 5.1. Birinci Senaryo; Modellerin Özellikleri Karşılaştırmalı Tablosu.

Özellikler	Kontrolsüz model	Kontrollü Kayma (0.1)	Kontrollü Kayma (0.2)	Kontrollü Kayma (0.3)	Kontrollü Kayma (0.39)
Kayma Tepkisi: Aşım [%]	Kontrolsüz	7	9	28,7	53,8
Kayma Tepkisi: Yükselme zamanı [Saniye]	Kayma (Aralık Dışı)	0,21	0,2	0,6	0,67
Kayma Tepkisi: Yerleşme zamanı [Saniye]		0,21	0,2	2	2
Güç tüketimi [Wh]	370,5	9,129	20,71	25,55	27,39
Güç tasarrufu [%]	-	97,5	94,4	93	92,6
Araç Hızlandırma [g]	0,74	0,52	0,76	0,82	0,82
Araç hızı [Km/saat]	26	18	27	28,8	28,8
Kontrollü Ortalama İstenen Tork [N.m]	Kontrolsüz	100	138	147	149

Önerilen kontrol ünitesi test süresince kontrolsüz modele kıyasla sadece enerji tüketiminin %6'sını tüketerek önemli ölçüde enerji verimliliği kazançları göstermektedir. Kontrollü modellerdeki elektrik motorları ayrıca tekerleklerin elektrik motorlarının gücünü kontrol etmede bir arıza yaşayan kontrolsüz modelin aksine işletme stabilitesi sergilemektedir. Özellikle tekerlekler için kontrol edilen tork değerleri her modelde varsayılan kayma değerine bağlı olarak değişen derecelerde azaltılarak elde edilmiştir. Ancak (0.3) ve (0.39) modellerindeki tork değerleri varsayılan kayma değerlerindeki farklılıklara rağmen neredeyse aynıdır. Bu modellerdeki tork değerlerinin, tekerlek çekiş

kontrolü açısından istikrar veya istikrarsızlık açısından kritik olduğunu düşündürmektedir ve bunu, (0.39) kayma modelinde yüksek aşırı atlama değeri ile vurgulanmaktadır. Burada istenen kayma değerinin %50'sini aşarak bir tork-frenleme-gecikme yanıtına neden olur.

Daha önce belirtildiği gibi kontrol edilen modeller (0.2, 0.3 ve 0.39), diğer modellere kıyasla artan sürtünme katsayısı değerlerine sahiptir ve bu da artan sürüş kuvvetlerine yol açar. Özellikle (0.3) ve (0.39) modelleri neredeyse aynı değerlere sahiptir. (0.2) modeli ise onlardan biraz geride kalır. Sonuç olarak, bu modeller için ivme ve hız değerleri hem kontrolsüz modeli hem de (0.1) kontrol edilen kayma modelini geçmektedir.

Modellerin karşılaştırması şu şekilde özetlenebilir:

- Kontrol edilen kayma modeli (0.39), sürtünme katsayısı, sürüş kuvveti, ivme ve hız açısından en yüksek değerleri sergiler, ancak tekerlek kayma kontrolünde zayıf bir yanıt gösterir.
- Kontrol edilen kayma modeli (0.3), çoğu karşılaştırmada (0.39) modeliyle benzerlikler taşır, ancak tekerlek kayma kontrolünde daha iyi bir yanıt sunar.
- Kontrol edilen kayma modeli (0.2), sürtünme katsayısı, sürüş kuvveti, ivme ve hız açısından önceki modellere yakındır. Ancak daha düşük enerji tüketimi ve tekerlek kayma kontrolünde mükemmel bir yanıt ile öne çıkar.
- Kontrol edilen kayma modeli (0.1), tüm karşılaştırmalarda en zayıf olanıdır. Ancak en yüksek enerji verimliliğini ve tekerlek kayma kontrolünde ideal yanıtı sunar.

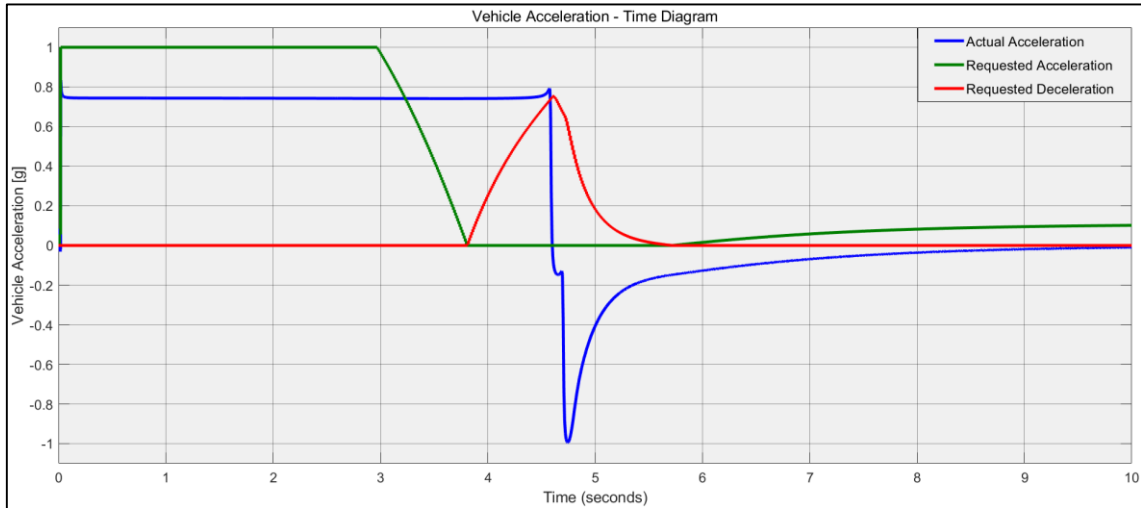
Bu analiz dikkate alındığında, (0.2) kontrol edilen kayma modeli, karşılaştırmanın tüm yönlerinde en istikrarlı olanı olarak ortaya çıkar ve önerilen kontrol edilen modeller arasında en iyi performans gösteren model olarak öne çıkar. Bu yüksek sürtünme katsayısı elde eden optimal kayma kontrol değerinin sürtünme katsayısı kayma ilişkisinin yüksek doğrusal bölgesinde ancak sürtünme katsayısı değerlerinin maksimum zirvesinin altında olduğunu önermektedir.

5.2. İkinci Senaryo

5.2.1. İkinci Senaryo: Kontrolsüz Model Sonuçları

İkinci sürüş senaryosunun kontrolsüz test modellemesinde, istenilen tork doğrudan her tekerleğin elektrik motoru modeline yüksek seviyeli çekiş kontrol sistemi tarafından herhangi bir tork düzeltmesi olmadan iletilir. Sürücünün isteğe bağlı torku, aracın hızının sabit durum hatasına göre değişir ve senaryonun istenilen hız değeri (10 km/saat) olarak belirlenir.

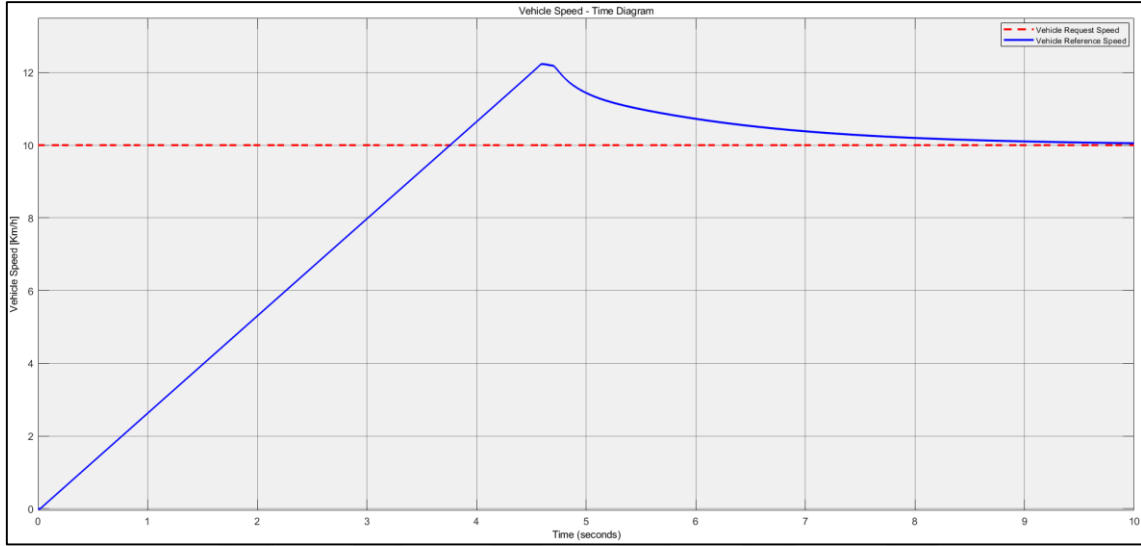
Şekil (5.15)'te bu kontrolsüz model için sürücünün isteğe bağlı hızlanmalarını ve araç tepki hızlarını gösterir ve gerekli hız değerine ulaşmayı amaçlar. Şekil, aracın istenilen hıza ulaşmak ve sabit hızı korumak için hızlanma ve yavaşlama dalgalanmalarını gösterir. Araç hızlanma tepkisi sabit bir hız elde etmek için hızlanma ve yavaşlama arasında gidip gelirken düzensiz görünür. Sürücünün aracın hızını kontrol etmek için ivme ve fren pedalını kullanma çabalarına rağmen hızlanma tepkisi düzgünlükten yoksundur ve araç hızında dalgalanmalara neden olur. Ek olarak, sürücünün aracın yavaşlamasını önlemek ve tekerleğin sürüş direncini yenmek için sürekli olarak ivme pedalını ayarlaması gerekebilir.



Şekil 5.15. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Hızlanma Tepkisi.

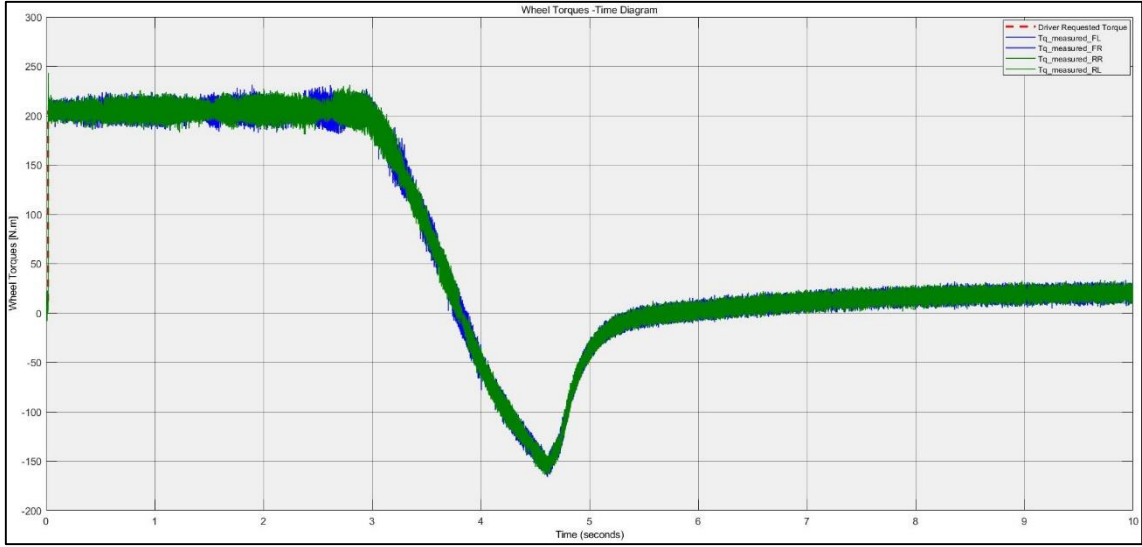
Sürücünün aracın hızını hızlanma ve yavaşlama ile kontrol etme çabalarının bir sonucu olarak Şekil (5.16)'da istenilen değerle karşılaştırıldığında aracın hız tepkisini gösterir.

Şekil, aracın hız tepkisinin, istenilen hız değerini aşarak önce aşırıya çıktığını ve daha sonra yavaşça yaklaştığını göstermektedir. Ek olarak, tepki yavaş hareket eden bir karakteristik gösterir. Çünkü araç hızının istenilen değer etrafında stabilize olması zaman alır. Bu davranış, aracın hız regülasyonunun anında olmadığını ve istenilen hızı korumak için sürücünden sürekli ayarlamalar gerektirebileceğini göstermektedir.

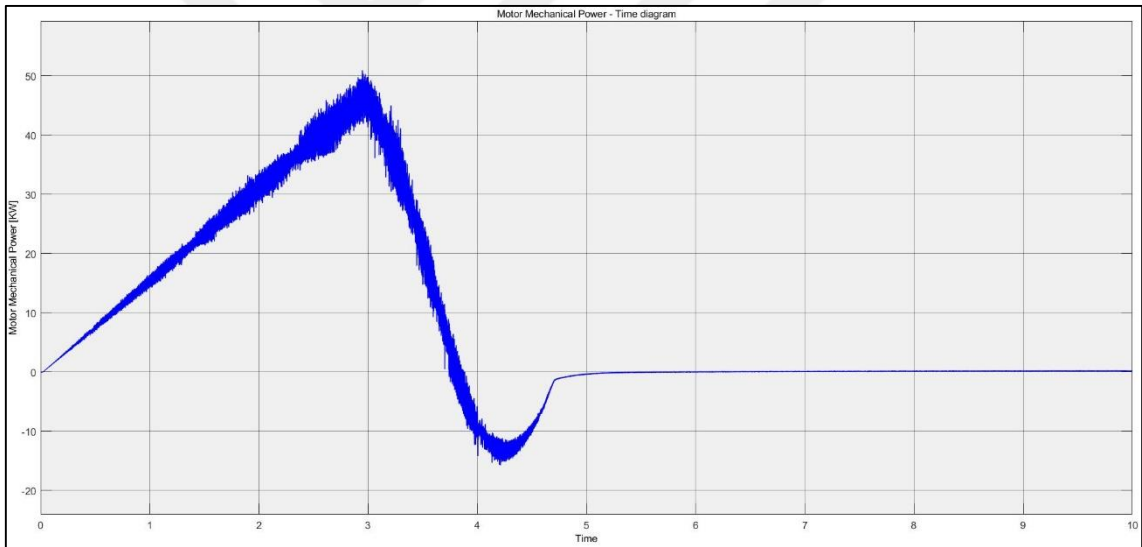


Şekil 5.16. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Hız Tepkisi.

Şekil (5.17)'de tekerlek motorlarının talep edilen ve ölçülen torklarını gösterir ve bunlar sürücünün talep ettiği hızlanma ile ilişkilendirilir. Tork varyasyonları gerekli olduğunda sürücünün hızlanma davranışını yansıtır ve sürüş ve frenleme torkları arasında geçiş yapar. Özellikle test ilerledikçe test süresinin sonuna doğru sabit bir hızı korumak için sürüş torkunun gerektiği açık hale gelir. Diğer yandan Şekil (5.18)'de test boyunca bir tekerleğin motorunun güç tüketimini gösterir. Şekil, batarya güç tüketimindeki dalgalanmaları gösterir. Pozitif değerler hızlanma aşamalarına, negatif değerler ise frenleme aşamalarına karşılık gelir. Bu dalgalanmalar, motorlar tarafından uygulanan sürüş ve frenleme torklarının birbirleriyle etkileşiminin bir sonucudur ve hızlanma, yavaşlama manevraları sırasında aracın güç tüketiminin dinamik doğasını gösterir.

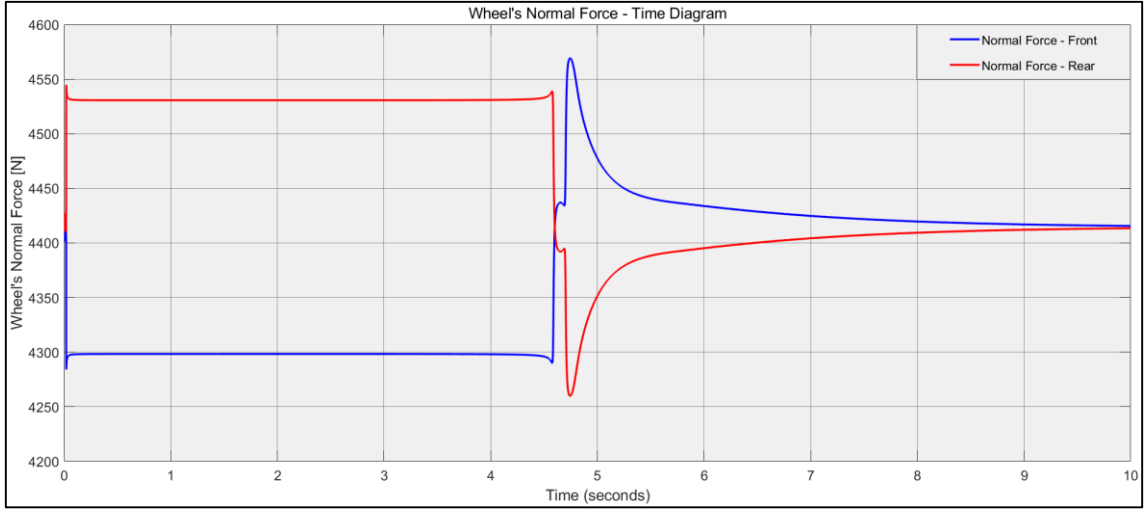


Şekil 5.17. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; TİM'lerin Tork Diyagramı.



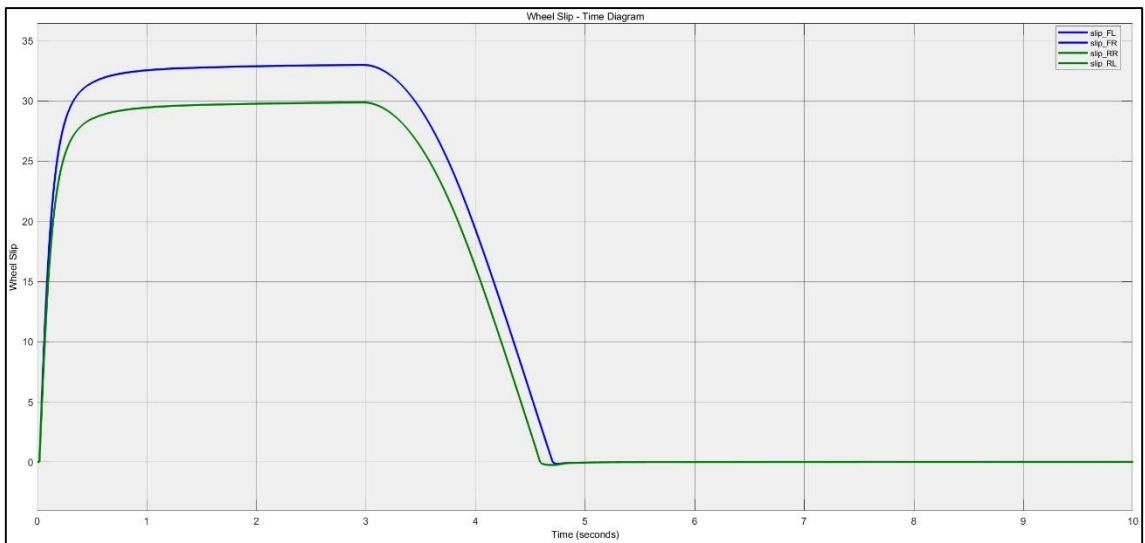
Şekil 5.18. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; TİM'nin Güç Tüketimi Diyagramı.

Şekil (5.19)'da aracın hızlanma yanıtının düzgün olmayan transferini ön ve arka tekerlekler arasındaki dinamik ağırlığın geçişini gösterdiği için doğrudan aracın düzgün olmayan hızlanma yanıtı tarafından etkilenir. Bu ağırlık transferi deseni, tekerlekler arasında yük dağılımının şok edici olduğunu gösterir ve bu da araç dinamiğindeki istikrarsızlıkla karakterize edilen rahatsız edici bir sürüş deneyimine yol açar.



Şekil 5.19. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Aracın Dinamik Ağırlık Aktarma Davranışı.

Şekil (5.20)'de kontrolsüz modelleme senaryosunda motorlara uygulanan sürüş torklarının araç tekerleklerinin kayma davranışın gösterdiği yanıtı gösterir. Başlangıçta, kayma davranışı, kaygan yol koşulları ve sürücünün tam hızlanma talebi nedeniyle yüksek tekerlek dönme hızı gösterir. Ancak sürüş torku azaldıkça kayma değerleri buna uygun şekilde azalır ve sonunda torkun azalmasıyla sıfıra yaklaşır. Bu davranış, kontrolsüz kayma yanıtının uygulanan torka son derece bağımlı olduğunu kaymanın tork azaldıkça azaldığını ve nihayetinde minimal kayma değerlerine yol açtığını göstermektedir.

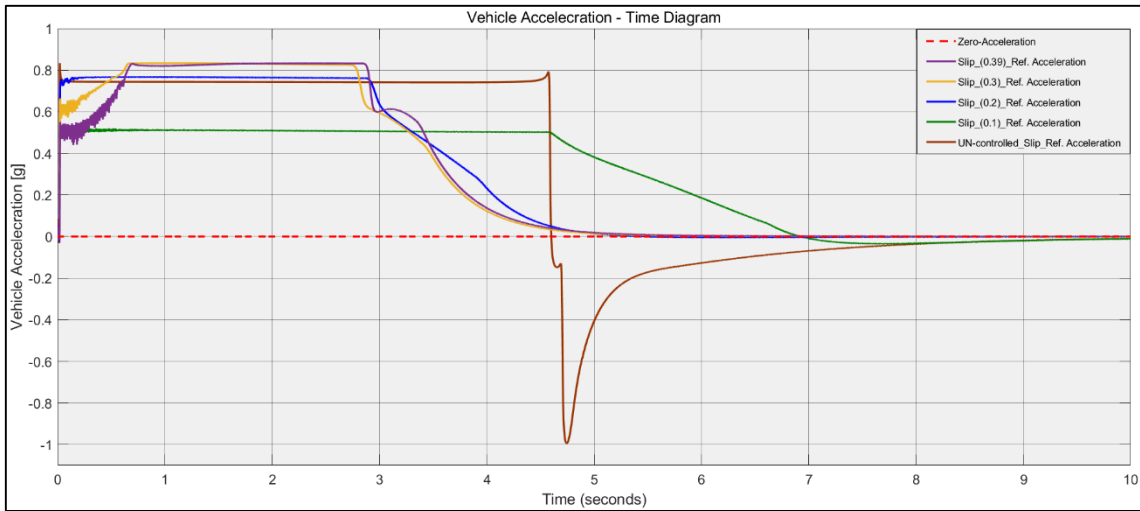


Şekil 5.20. İkinci senaryodaki kontrolsüz modeli; Araç Tekerleklerinin Kayma Tepkisi.

5.2.2. İkinci Senaryo: Kontrollü Modellerin Sonuçları

İkinci sürüş senaryosunun kontrol edilen test modellemesinde, istenen tork her bir tekerleğin elektrik motoru modeline yüksek seviyeli çekiş kontrol sisteminin tork düzeltme metodolojisi ile iletilir. Sürücü talep edilen tork, aracın hızının durağan durum hatasına göre değişir ve senaryonun istenen hız değeri (10 km/saat) olarak ayarlanmıştır.

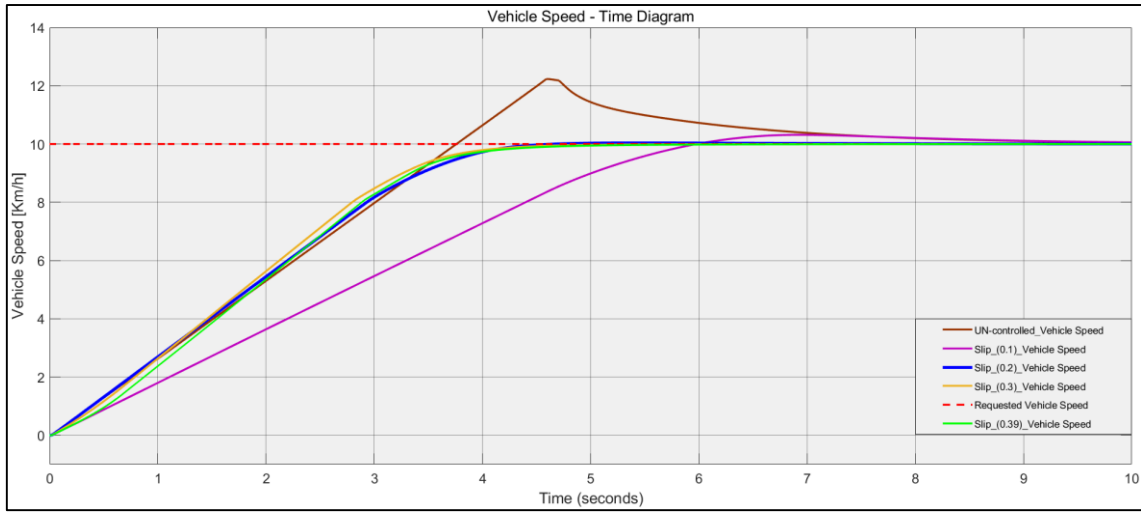
Şekil (5.21)'de gerekli hız değerine ulaşmayı amaçlayan kontrol edilen modeller için aracın gerçek ivmelerini gösterir. Kontrolsüz modelde gözlemlenen dalgalı ivmenin aksine kontrol edilen modeller aracın istenen hızı elde etmeye ve korumaya çalışırken kararlı ivme yanıtları sergiler. Kontrol edilen modellerin ivme yanıtları pürüzsüz görünür ve frenleme gereksinimi olmadan etkili çekiş kontrolünü ve tekerlekler ile yol yüzeyi arasındaki tutarlı sürtünme iletkenliğini işaret eder. Kontrol edilen modeller arasında (0.1) kayma modeli hafif bir frenleme olmaksızın en düzgün yanıtı gösterirken en düşük ivme değerine sahiptir. Öte yandan (0.3) ve (0.39) kayma modelleri yanıtta gecikme ve daha az düzgünlük ile birlikte en yüksek ivme değerlerini gösterir. Dikkat çekici bir şekilde (0.2) kayma modeli hem değer hem de düzgünlük açısından en iyi ivme yanıtını sergiler. İstenen ivmeyi hızlı bir şekilde elde eder ve test süresince istikrarlı bir ivme profili korur. Bu da kontrol edilen senaryolar arasında en etkili modeli yapar.



Şekil 5.21. İkinci senaryo; Araç Hızlanma Tepkisi.

Şekil (5.22)'de hem kontrol edilen hem de kontrolsüz modeller için istenen değerle karşılaştırıldığında aracın hız yanıtını gösterir. Kontrolsüz modelde, araç hızı istenen

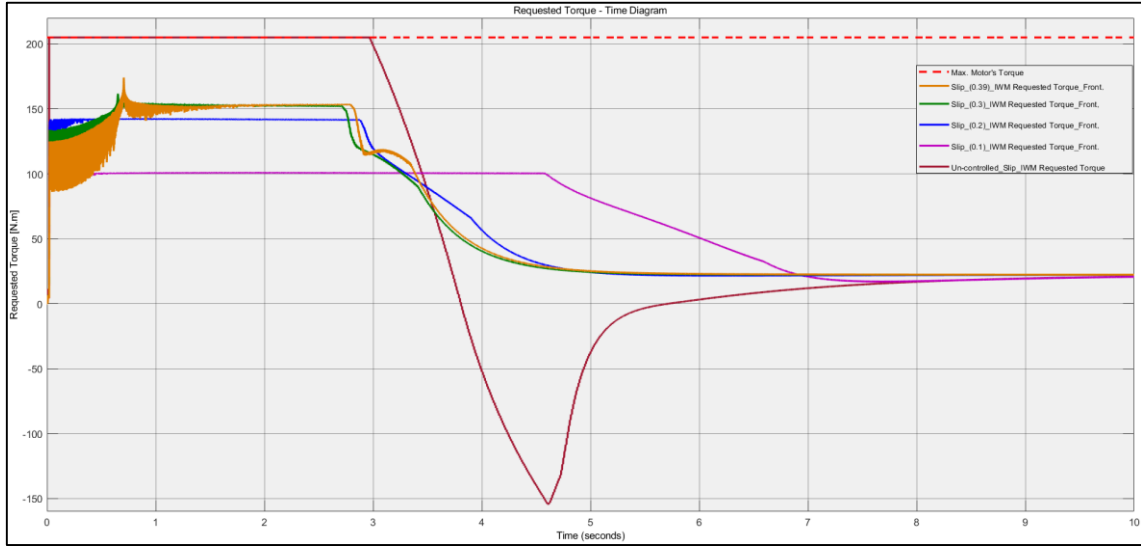
ivmeye göre aşırı çıkma gösterir ve bu da sürücü talep edilen ivmeye karşı istikrarsız bir yanıtı işaret eder. Ancak kontrol edilen modellerde hız yanıtı değişiklik gösterir. (0.1) kayma modeli hafif bir karşı çıkma gösterir. Bu da biraz daha az stabil bir yanıtı işaret eder. Diğer taraftan diğer kontrol edilen kayma modelleri karşı çıkma davranışı sergilemez, bu da sürücü talep edilen ivmeye daha stabil yanıtlar verdiğini işaret eder. Bu modeller arasında (0.2) kayma modeli özellikle düzgün ve stabil bir yanıtla öne çıkar, onu (0.3) ve (0.39) kayma modelleri takip eder. Genel olarak kontrol edilen modeller kontrolsüz modele kıyasla daha stabil ve tutarlı hız yanıtları gösterir. (0.2) kayma modeli en düzgün ve stabil davranışı sergiler.



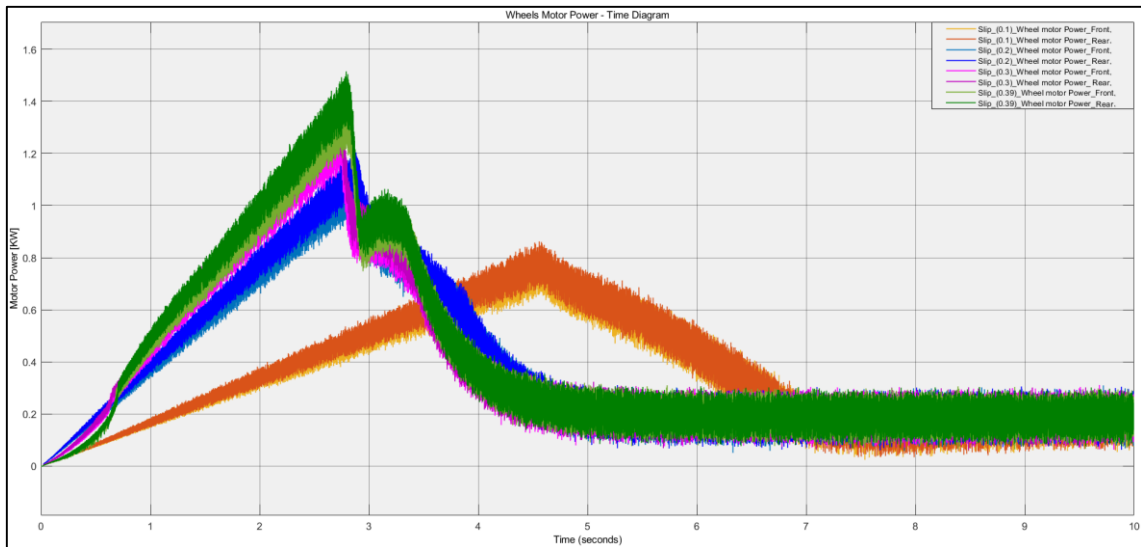
Şekil 5.22. İkinci senaryo; Araç Hız Tepkisi.

Şekil (5.23)'te sürücünün talep ettiği ivmeye karşılık gelen ön tekerlek motorlarının istenen torklarına içgörü sağlar. Önemli bir şekilde ön ve arka tekerlek motorları neredeyse benzer tork yanıtları sergiler. Bu da birinci senaryonun sonuçlarıyla uyumlu bulgularla tutarlıdır. Kontrolsüz modelin aksine, kontrol edilen modellerde frenleme torkları gözlenmez. Tüm modeller test süresinin sonunda tekerleklere aynı tork değerini ileterek bu torkun aracın sabit bir hızını korumak için kullanıldığını gösterir. Kontrol edilen kayma modelleri arasında (0.1) kayma modeli en düşük talep edilen torku düzgün bir yanıt davranışıyla sergiler. Buna karşılık (0.3) ve (0.39) kayma modelleri en yüksek gecikmiş ve daha az düzgün tork yanıtlarını sergiler. Öte yandan Şekil (5.24)'te, kontrol edilen ön ve arka tekerlek motorlarının test boyunca güç tüketimi gösterilmektedir. Şekil, güç tüketiminin dalgalanmasız olduğunu ve pozitif güç değerlerinin ivme artışı

aşamalarına karşılık geldiğini gösterir. Bu kontrol edilen modelde frenleme aşamalarının olmadığını gösterir. Güç tüketimi diyagramları tekerleklerin tork yanıtlarıyla uyumlu olarak (0.2) kayma modelinin düzgün tork iletimi nedeniyle düzgün güç tüketimini gösterir.



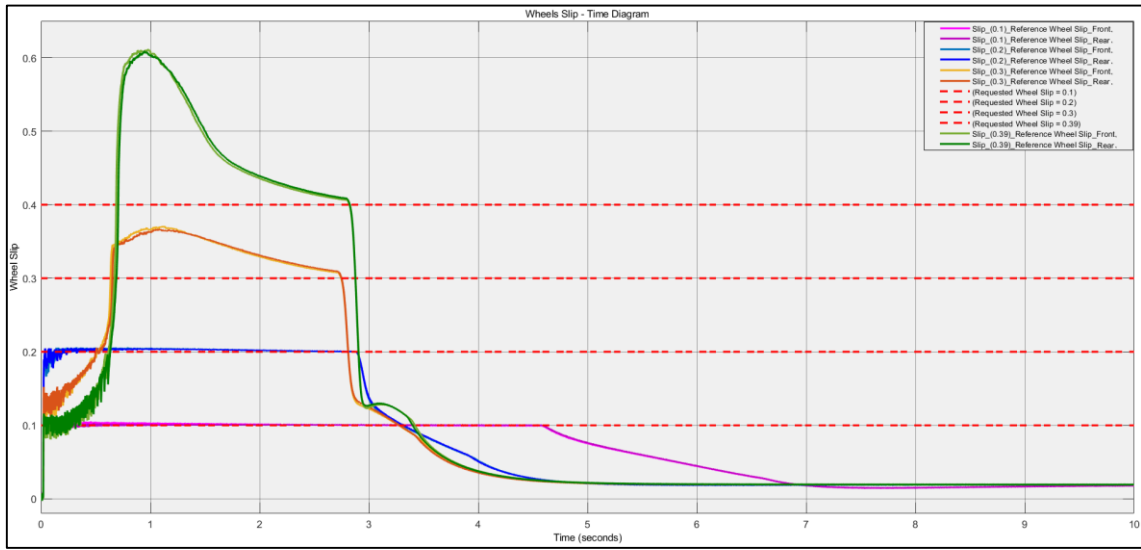
Şekil 5.23. İkinci senaryo; Ön TİM'lerin Talep Ettiği Torklar.



Şekil 5.24. İkinci senaryodaki kontrollü modelleri; TİM'lerin Güç Tüketimi Diyagramları.

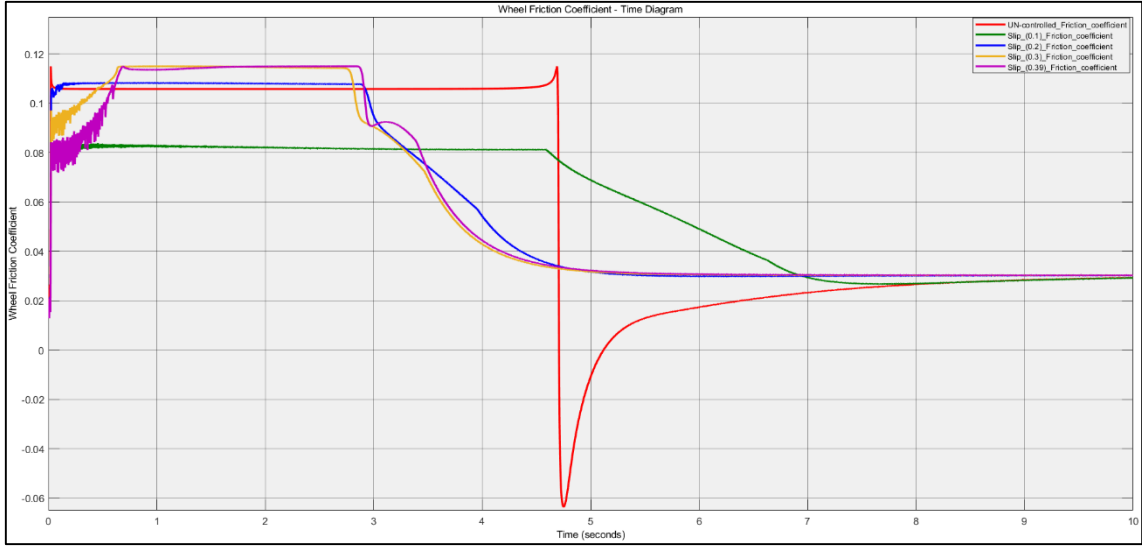
Şekil (5.25)'te ikinci senaryo sırasında kontrol edilen modellerde motorlara uygulanan sürüş torklarının tekerleklerin kayma yanıtlarına içgörü sağlar. Başlangıçta kayma

davranışı birinci senaryoda gözlemlenenlere benzerlikler gösterir. (0.3) ve (0.39) kayma modelleri için tekerlek aşırı kayma gösterirken (0.1) ve (0.2) kayma modelleri kaymayı etkili bir şekilde kontrol eder. Sürücünün talep ettiği torklar modellerde azaldıkça kayma değerleri test süresinin sonunda düşük anlık talep edilen torklara karşılık gelen küçük değerlere düşer. Birinci senaryoda olduğu gibi (0.2) kayma modeli ikinci senaryo testinin yükselme süresi, aşırı kayma, karar süresi ve düzgünlük açısından en iyi kayma yanıtını gösterir.

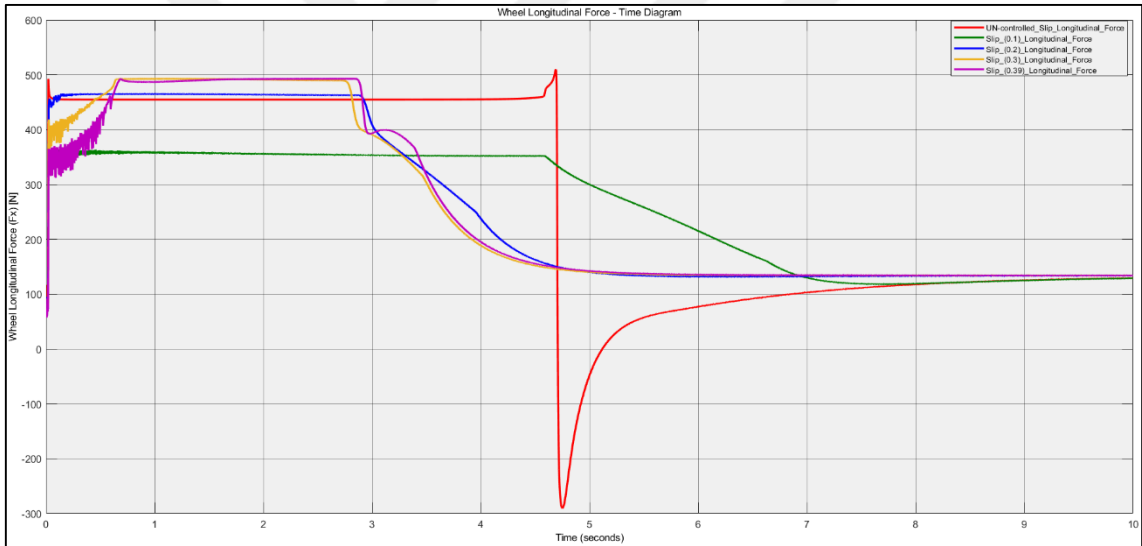


Şekil 5.25. İkinci senaryodaki kontrollü modelleri; Araç Tekerleklerinin Kayma Tepki Diyagramları.

Tekerlek sürtünme katsayısı açısından, Şekil (5.26)'da test süresince kontrol edilen ve kontrol edilmeyen modellerin sürtünme katsayısı değerlerini karşılaştırır. Kontrolsüz model (0.2), (0.3) ve (0.39) kontrol edilen kayma değerlerine kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısı ile kaygan bir sürtünme davranışı sergiler. Özellikle negatif sürtünme katsayısının belirgin değeri ile fren anında bir aracın kayma davranışı gösterilir. Ancak testin sonunda tüm modeller neredeyse aynı sürtünme katsayısı değerine ulaşır. Bu da talep edilen tork ve kayma yanıtlarındaki tutarlılığı yansıtır. Ek olarak Şekil (5.27)'de tekerleklerin test süresince ürettiği uzunlamasına sürüş kuvvetlerini gösterir. Kontrolsüz model negatif bir sürüş kuvveti gösterir ve bu frenleme kuvvetini belirtir. Buna karşılık tüm modeller tork, kayma ve sürtünme katsayısı değerlerine yanıt olarak karşılıklı sürüş kuvvetleri üretir. Daha önce tartışıldığı gibi (0.2) kayma modeli test edilen modeller arasında en iyi sürüş özelliklerini sergiler.



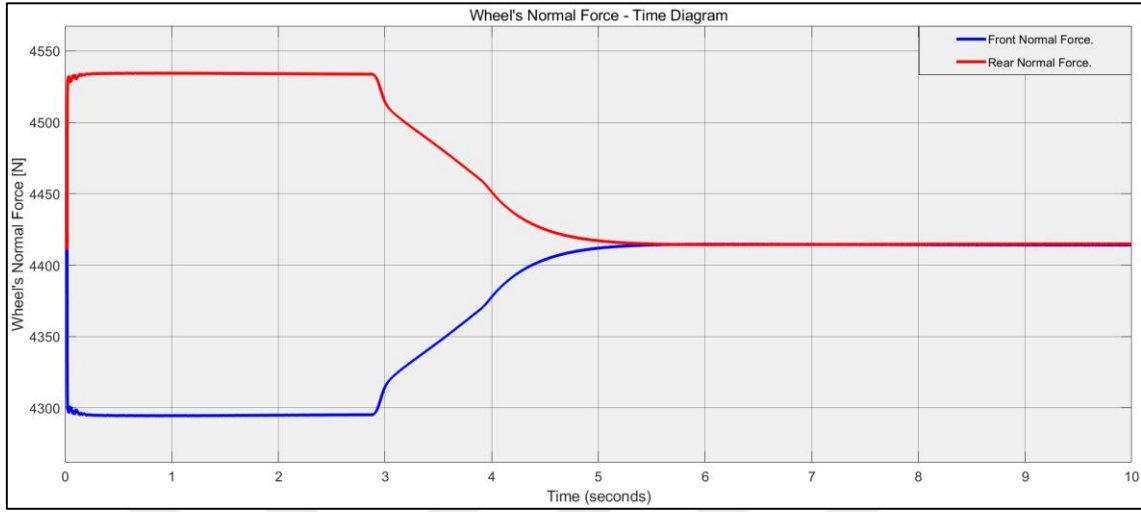
Şekil 5.26. İkinci senaryo; Araç Tekerleklerinin Sürtünme Katsayısı Diyagramları.



Şekil 5.27. İkinci senaryo; Araç Tekerleklerinin Boyuna sürüş Kuvvet Diyagramları.

Şekil (5.28)'de en iyi dinamik yanıt modeli olarak kabul edilen (0.2) kontrol edilen kayma modeli için ön ve arka tekerlekler arasında dinamik ağırlığın düzgün transferini gösterir. Bu düzgün ağırlık transferi modelin düzgün ivme yanıtı tarafından doğrudan etkilenir. Bununla birlikte diğer en hızlı kontrol edilen modeller (0.2) modeline kıyasla daha az düzgünlük sergiler. Ayrıca daha önce tartışılan kontrolsüz model dinamiklerine kıyasla (0.2) kontrol edilen kayma modelinde tekerlekler arasındaki rastgele yük dağılımı yoktur. Bunun yerine sürücünün ivme talebi azaldıkça arka tekerleklerden ön tekerleklere çok

düzgün bir ağırlık transferi vardır. Bu araç dinamiklerinde istikrarla karakterize edilen rahat bir sürüş deneyimi sağlar.



Şekil 5.28. (0.2)'nin ikinci senaryo kontrollü kayma modeli; Aracın Dinamik Ağırlık Aktarma Davranışı.

5.2.3. İkinci Senaryo: Sonuçların Tartışması

İkinci senaryo içinde test edilen kontrolsüz ve kontrol edilen modelleri karşılaştırıldığında, yüksek seviyeli kontrol ünitesinin çalışma verimliliğinin çalışmada farklı kabul edilen kayma değerleri üzerinde yüksek olduğu açıkça görülmüştür. Tablo (5.2)'de test modelleri arasındaki temel karşılaştırmalı özellikleri göstermektedir ve ikinci senaryonun varsayımında bir araç hızını sabit bir değere ayarlama performansına odaklanmaktadır.

Kontrol edilen kayma modellerinin (0.2), (0.3) ve (0.39) araç hızı tepki artışı ve yerleşme süreleri açısından kontrol edilmeyen model ve (0.1) kayma modeline kıyasla en yüksek verimliliğe sahip olduğu bulundu. Kontrolsüz modelin aşırı çıkış değeri önemli ölçüde yüksek olup, hem (0.1) kayma modeli hem de kontrolsüz model diğer kontrol edilen kayma modellerine kıyasla yüksek yerleşme süresine sahiptir. Yerleşme süresi istenen araç hızı değerinin ($\pm 1\%$) tolerans aralığında değerlendirilmiştir.

Tablo 5.2. İkinci Senaryo; Modellerin Özellikleri Karşılaştırmalı Tablosu.

Özellikler	KontROLSÜZ model	Kontrollü Kayma (0.1)	Kontrollü Kayma (0.2)	Kontrollü Kayma (0.3)	Kontrollü Kayma (0.39)
Aracın Hız Tepkisi: Aşma [%]	23	3	0	0	0
Aracın Hız Tepkisi: Yükselme Süresi [Saniye]	3.7	5.7	4.3	4.4	4.6
Aracın Hız Tepkisi: Yerleşme süresi (± 1) [Saniye]	9	9.2	4.3	4.4	4.6
Güç tüketimi [Wh]	88.39	3.765	4.068	4.256	4.411
Güç tasarrufu [%]	-	95.7	95.4	95.2	95

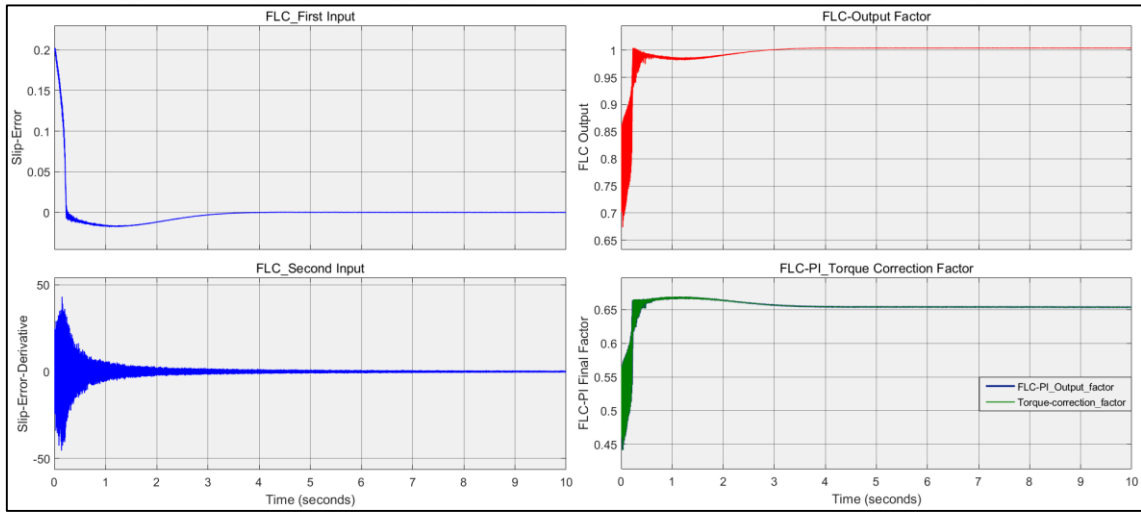
Önerilen kontrol ünitesi test süresince kontrolsüz modele kıyasla sadece enerjinin %5'ini tüketerek önemli bir enerji verimliliği kazanıyor. Bu birinci senaryonun en kötü sürüş koşullarını temsil ettiği ve maksimum enerji tüketimine neden olduğu varsayımı ile uyumludur. İlginç bir şekilde ikinci senaryoda gözlemlenen güç tüketimi değerleri birinci senaryodaki maksimumdan daha düşüktür. Bu ikinci senaryoda elde edilen sonuçların geçerliliğini doğrulayarak, daha az ciddi sürüş koşullarında daha verimli bir kontrol stratejisinin olduğunu göstermektedir.

5.3. Verimli Yüksek Seviye Denetleyici

Sonuç olarak birinci ve ikinci senaryolardaki modeller arasındaki karşılaştırmaların sonuçlarına yakın bir şekilde uyum göstermesi nedeniyle önerilen kontrol edilen kayma modeli (0.2) tüm önerilen kontrol edilen modeller arasında en istikrarlı ve en iyi performans gösteren model olarak ortaya çıkıyor. Bu sonuç kayma yanıtı, sürtünme katsayısı davranışı, sürücü kuvveti üretimi, ivme, hız yanıtları ve enerji verimliliği de dahil olmak üzere çeşitli karşılaştırma yönlerindeki tutarlı performansı temel alınarak çıkarılmıştır. Tezin kapsamı dışında olmasına rağmen '3.2.1.3.' alt bölümündeki tartışma daha düşük kayma değerlerinin daha yüksek yanal sürtünme katsayılarına karşılık geldiğini öne sürmektedir. Bu nedenle bu çalışmada (0.2) kayma modeli varsayılan buzlu

kaygan model yolunda farklı sürüş senaryolarında etkili tekerlek çekiş kontrolü ve genel araç stabilitesi için en uygun seçim olarak değerlendirilebilir.

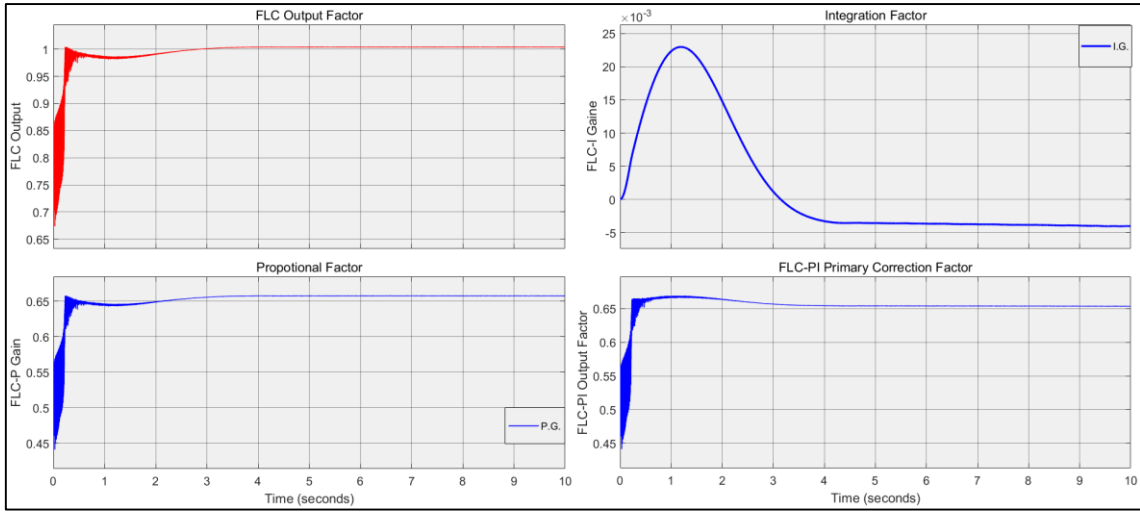
Şekil (5.29)'da BMK-PI kontrolcüsünün etkili işleyişini göstermektedir. Özellikle de verimli kontrol modeli olarak (0.2) kontrol edilen kayma modeli kullanılarak birinci senaryo işlemlerinde. BMK-PI kontrolcüsünün girişleri tekerlek kayma durumunun sabit durum hatası ve hatanın türevidir. Bu girişler verimli tekerlek çekiş kontrolünü sağlamak için uygun tork düzeltme faktörünün belirlenmesi için hayati öneme sahiptir. Şekilde gösterildiği gibi her iki giriş de zaman içinde sıfıra doğru yavaşça yaklaşmaktadır. Bu da kontrolcünün etkili işlemlerini göstermektedir. Şekil ayrıca kontrolcünün BMK kısmının çıktı faktörünü ve toplam yüksek seviyeli kontrolcü BMK-PI'nin nihai tork düzeltme faktörünü sunar. Burada iki benzer sinyal, kontrolcünün aralık sınırlayıcısından önce ve sonra çıktıyı temsil etmektedir. Bu BMK çıktılarının kabul edilebilir tork ayarları aralığına düzeltilmiş bir nihai düzeltme faktörüne dönüştürülmesini gösterir. Genel olarak Şekil (5.29)'da BMK-PI kontrolcüsünün girişlerini, ara çıktıları ve nihai düzeltme faktörünü net bir şekilde görselleştirerek tekerlek çekiş kontrolünü optimize etmek için yüksek seviyeli kontrol prosedürlerinin verimli işleyişini gösterir.



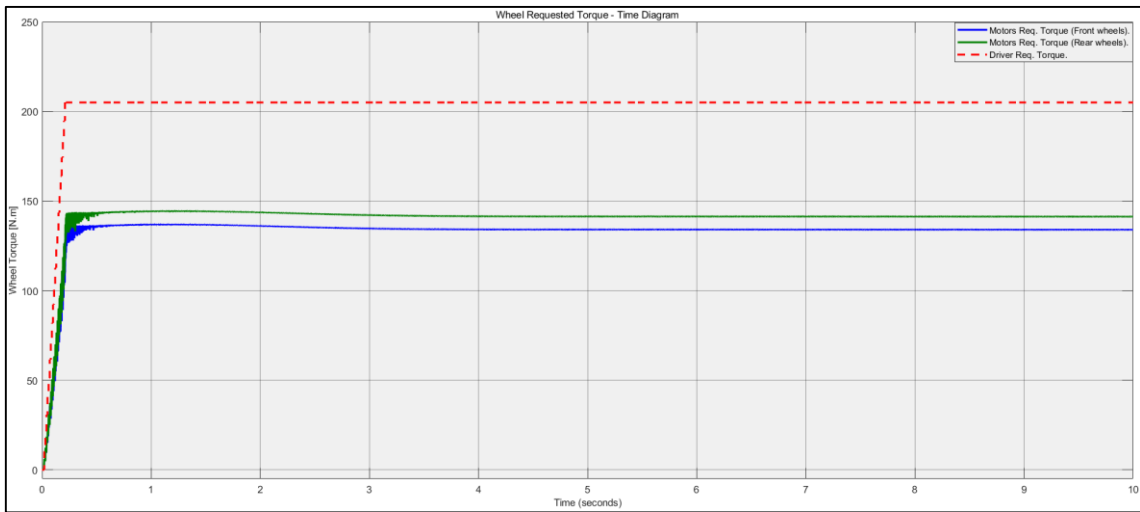
Şekil 5.29. Birinci Senaryo; Üst Düzey Kontrol Faktörleri.

Şekil (5.30)'da birinci senaryo test işlemleri içinde (0.2) kayma modeli için BMK-PI yüksek seviyeli kontrolcünün çıkışının detaylı bir görünümünü sunar. BMK kontrolcüsünün çıkışı PI kontrolcünün iki bileşeni tarafından ayarlanır. Bunlar oransal kısım (P.G.) ve integrasyon kısmıdır (I.G.). Dinamik İntegrasyon Kazancının (D.I.G.)

etkinliği kontrolcünün entegrasyon kazancının dinamik değişiminin görselleştirilmesiyle gösterilir. PI kontrolcünün bu iki parçasının toplamı kontrolcünün aralık sınırlayıcısından önce gösterilen nihai BMK-PI çıktısını oluşturur. Bu şekil BMK-PI kontrolcünün tork düzeltme faktörünü tekerlek çekiş kontrolünü optimize etmek için nasıl ayarladığına dair içgörüler sunar. Öte yandan Şekil (5.31)'de BMK-PI tork düzeltme faktörünün etkisini gösteren sürücünün talep ettiği torkta meydana gelen azalmayı tasvir eder. Tekerleklerin talep edilen torkunun kararlı yanıtı, yüksek seviyeli kontrolcünün stabiliteyi korumadaki etkinliğini gösterir. Bu şekil BMK-PI kontrolcünün istikrarlı ve kontrol edilmiş tork ayarlamalarını nasıl sağladığını görsel olarak temsil eder. Bu da araç performansı ve güvenliğini artırır.

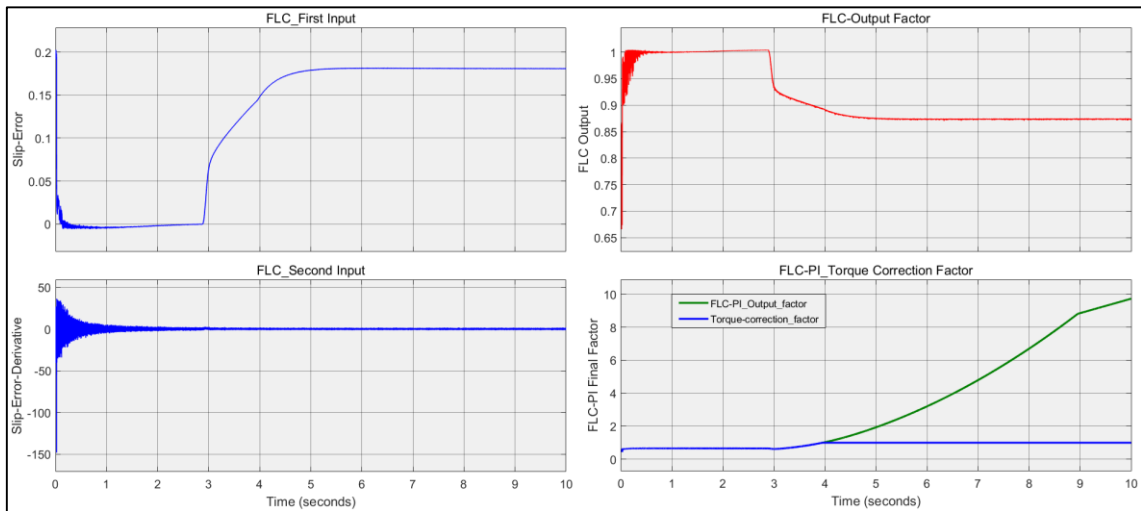


Şekil 5.30. Birinci Senaryo; Üst Düzey Denetleyici Parçalarının Kontrol Kazanımları.

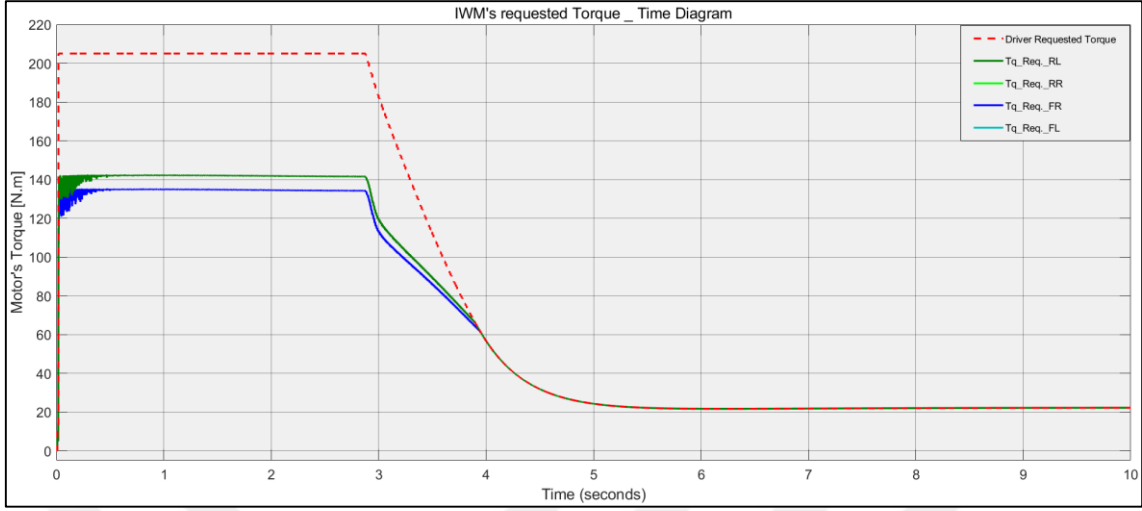


Şekil 5.31. Birinci Senaryo; Yüksek Seviye Kontrolörün Tork Azaltma Kontrol Çalışması.

Şekil (5.32)'de ikinci senaryo bağlamında etkili bir şekilde çalışan BMK-PI kontrolcünün etkin bir kontrol modeli olarak (0.2) kontrol edilen kayma modelini kullanarak işleyişine ışık tutar. BMK-PI kontrolcüsünün girdileri yani tekerlek kaymasının kararlı durum hatası ve hatanın türevi tasvir edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tekerlek kayması sürücü talep ettiği torktaki değişikliklere yanıt olarak değiştiğinde ilk giriş yükselir. Aynı zamanda ikinci giriş zamanla sıfıra yaklaşır, bu da kontrolcünün etkili kontrol işlemlerini belirtir. Şekil ayrıca kontrolcünün BMK kısmının çıktı faktörünü sunar, kontrolcünün toplam yüksek seviyeli kontrolcüsü olan BMK-PI'nin nihai tork düzeltme faktörü ile birlikte, iki sinyal, kontrolcünün aralık sınırlayıcısından önce ve sonra çıktıyı temsil eder. Senaryo içindeki sürüş davranışı değiştiğinde ve tekerlek kayması talep edilen değerin altına düştüğünde, tork düzeltme faktörünün nihai çıktısı maksimum değerde (1) çalışır. Bu çekiş kontrolcüsünün artık tekerlek torkunu azaltmaya ihtiyaç duymadığını gösterir. Çünkü tekerlek kayması kabul edilebilir aralık içindedir ve aşırı dönme riski yoktur. Şekil (5.33)'te gösterildiği gibi sürücünün talep ettiği torkta bir azalma olmaması yaklaşık olarak dördüncü saniyenin ardından sürücünün yüksek seviyeli kontrolcüden herhangi bir müdahale olmadan aracı tam kontrol ettiğini gösterir. Tekerleklerin talep edilen torkunun bu kararlı yanıtı, yüksek seviyeli kontrolcünün stabiliteyi korumadaki etkinliğini ve sürücüye sorunsuz bir sürüş deneyimi sağlamasını gösterir. Genel olarak şekil BMK-PI kontrolcünün stabil ve kontrollü tork ayarlamalarını nasıl sağladığını gösteren görsel bir temsildir ve optimal araç performansı ve güvenliği için maksimum izin verilen kayma kontrol stratejisini tasvir eder.

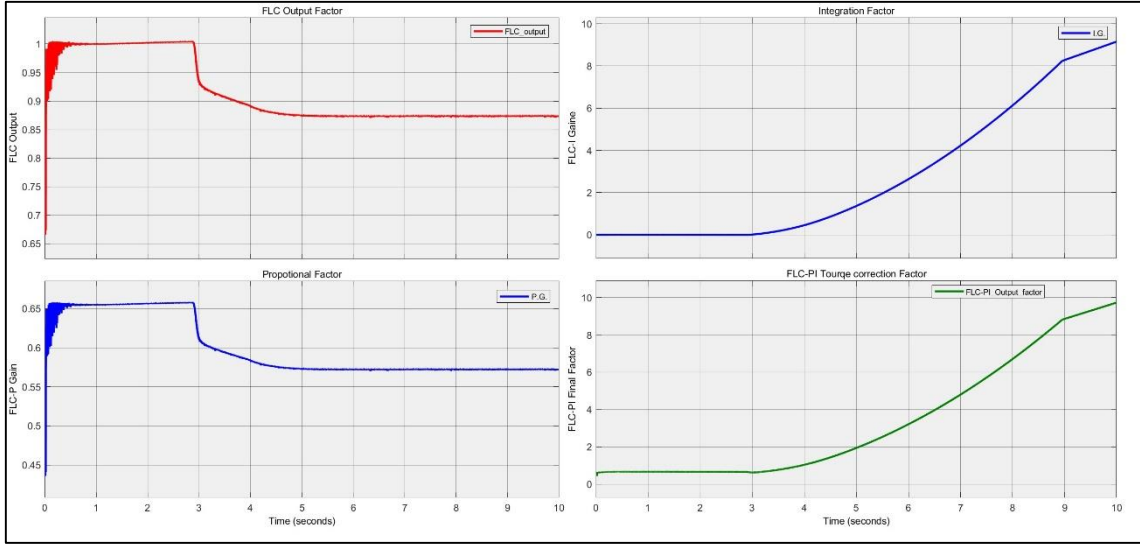


Şekil 5.32. İkinci Senaryo; Üst Düzey Kontrol Faktörleri.



Şekil 5.33. İkinci Senaryo; Üst Düzey Kontrolörün Tork Azaltma Kontrol Çalışması.

Şekil (5.34)'de ikinci senaryonun test işlemleri bağlamında (0.2) kayma modeli için BMK-PI yüksek seviyeli kontrolcünün çıktısının detaylı bir görünümünü sunar. Şekil PI kontrolcüsünün iki bileşeni olan oransal kısım (P.G.) ve integrasyon kısmının (I.G.) BMK kontrolcüsünün çıktısına yaptığı ayarlamaları gösterir. Ayrıca Dinamik İntegratör Kazancının (D.I.G.) etkinliği kontrolcünün entegrasyon kazancının dinamik değişimi aracılığıyla sistemin dinamiklerindeki değişikliklere yanıt olarak adapte edilir ve şekildeki gibi sergilenir. Bu dinamik ayarlama kontrolcünün değişen koşullara etkin bir şekilde yanıt verebilmesini ve tekerlek kaymasını kontrol etmede istikrarı korumasını sağlar. Sonuç olarak PI kontrolcüsünün bu iki kısmının toplamı kontrolcünün aralık sınırlayıcısından önceki son BMK-PI çıktısını verir. Genel olarak Şekil (5.34)'de yüksek seviyeli kontrolcünün iç işleyişine ışık tutar ve bulanık mantığı, oransal ve integral kontrolü bir araya getirerek hassas ve etkili tork ayarlamaları elde etme şeklini açıklar. Öte yandan daha önce açıklandığı gibi Şekil (5.32)'de kontrolcünün işleyişinin daha geniş bir görünümünü sunar. Genel kontrol stratejisini ve belirtilen kontrol aralığı içindeki son düzeltme faktörünün uygulanmasını gösterir.



Şekil 5.34. İkinci Senaryo; Üst Düzey Denetleyici Parçalarının Kontrol Kazanımları.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez Tekerlek Kayma Kontrolü (TKK) sisteminin Tekerlek İçi Motorlu Elektrikli Araçlar (TİM-EA) için Bir Çekiş Kontrol Sistemi (ÇKS) olarak işlev görmesine odaklanmaktadır. Bulanık Mantık Adaptif (Uyarlamalı) Kontrol (BMAK) metodolojisinin kullanımıyla çalışma aracının uzunlamasına dinamiklerinde TKK sisteminin rolü incelenmektedir. BMAK sistemi Bulanık Mantık Denetleyicisi (BMK) ile adaptif bir Oransal-İntegral (PI) denetleyiciyi birleştirerek birleşik bir BMK-PI kontrol ünitesi oluşturur. Bu ünite tekerleklerin istenilen torklarını ayarlar ve tekerlek kayma dinamiklerine dayalı olarak adaptif bir parametre olan Dinamik İntegratör Kazancını (DIG) kullanır.

MATLAB yazılımı, 'Simulink' platformu içinde çalışarak çeşitli araç kontrol modellerini simüle etmek için kullanılmıştır. Bu arada kontrol sisteminin etkinliği kaygan buzlu yollarda Tam İvme Verme ve Sabit Hız modları üzerindeki iki sürüş senaryosuyla değerlendirilmiştir. Kontrollü kayma modelinin (0.1), (0.2), (0.3) ve (0.39) kayma değerleri de dahil olmak üzere kontrolsüz kayma modeli ve kontrollü kayma modelleri arasındaki karşılaştırmalı analizi kontrol metodolojisinin performansını değerlendirmiştir. Ayrıca kaygan yollarda kritik sürüş koşullarında araç için en yüksek uzunlamasına sürüş verimliliğini sunan optimal tekerlek kayma kontrol modeli bu inceleme yoluyla belirlenmiştir.

Sonuç olarak bu tez BMAK sisteminin değişen sürüş senaryoları altında TİM-EA'ların uzunlamasına-tekerlek ÇKS'sini etkin bir şekilde kontrol etmedeki etkinliğini özellikle kaygan buzlu yollarda göstermiştir. Kapsamlı simülasyonlar ve analizler yoluyla (0.2) kayma modeli diğer modellere göre üstün stabilite ve verimlilik sergileyerek optimal seçim olarak ortaya çıkmıştır. Adaptif tork ayarlamalarını mümkün kılan bir Bulanık Mantık Denetleyicisi ile adaptif Oransal-İntegral denetleyiciyi (BMK-PI) entegre etmek, optimal çekiş ve istikrarı sağlarken enerji tüketimini en aza indirir.

6.2. Öneriler

İleri araştırmalar, önerilen kontrol sisteminin etkinliğini pratik senaryolarda uygunluğunu doğrulamak için gerçek dünya uygulamaları ve doğrulamalarını inceleyebilir. Bu Tekerlek ve Araç Modellerinin BMK-PI kontrol metodolojisi kullanılarak uzunlamasına ve yanal analizini içerebilir. Ayrıca araç dinamiklerinde istikrarı artırabilecek bir BMK-PID kontrol metodolojisinin keşfedilmesi de mümkündür. Test prosedürleri, simüle edilmiş testler, Donanım İçi Döngü (HIL) prosedürlerini kullanan simüle edilmiş gerçek testler veya gerçek araç denemelerini içeren tam ölçekli gerçeklik testlerini içerebilir. Bu incelemeler kontrol sisteminin performansı ve gerçek dünya uygulamaları için potansiyeli hakkında kapsamlı bir anlayışa katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- Abd-El-Halim, A.A.E.B., Bayoumi, E.H.E., El-Khattam, W. and Ibrahim, A.M. (2022). Electric vehicles: a review of their components and technologies. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 13(4), 2041-2061.
- Amjad, S., Neelakrishnan, S. and Rudramoorthy, R. (2010). Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1104-1110.
- Aripin, M.K., Md Sam, Y., Danapalasingam, K.A., Peng, K., Hamzah, N. and Ismail, M.F. (2014). A review of active yaw control system for vehicle handling and stability enhancement. *International Journal of vehicular technology*, 2014.
- Bai, Y. and Wang, D. (2006). Fundamentals of fuzzy logic control: fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications. *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*, 17-36.
- Bergek, A., Berggren, C., and KITE Research Group (2014). The impact of environmental policy instruments on innovation: A review of energy and automotive industry studies. *Ecological Economics*, 106, 112-123.
- Carbot-Rojas, D.A., Escobar-Jiménez, R.F., Gómez-Aguilar, J.F. and Téllez-Anguiano, A.C. (2017). A survey on modeling, biofuels, control, and supervision systems applied in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1070-1085.
- Chakraborty, S., Lukasiewicz, M., Buckl, C., Fahmy, S., Chang, N., Park, S., Kim, Y., Leteinturier, P. and Adlkofer, H. (2012). Embedded systems and software challenges in electric vehicles. In *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 424-429. IEEE.
- Chan, C.C. (1993). An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202-1213.
- Chan, C.C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90(2), 247-275.
- Chan, C.C. and Wong, Y.S. (2004). Electric vehicles charge forward. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(6), 24-33.
- Colli, V., Tomassi, G. and Scarano, M. (2006). "Single Wheel" longitudinal traction control for electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3), 799-808.
- Crisostomi, E., Shorten, R., Stüdli, S. and Wirth, F. (2017). *Electric and plug-in hybrid vehicle networks: optimization and control*. CRC Press.

- Crolla, D.A. and Cao, D. (2012). The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems, and energy regeneration. *Vehicle system dynamics*, 50(sup1), 95-109.
- Çetinkaya, S. (2015). *Taşıt Mekaniği* (7th ed). Nobel yayın dağıtım.
- Dasanayake, N. and Perera, S. (2023). Traction and Stability Control using Fuzzy-based Controller Integration. *arXiv preprint arXiv:2306.04782*.
- Deepak, K., Frikha, M.A., Benômar, Y., El Baghdadi, M. and Hegazy, O. (2023). In-wheel motor drive systems for electric vehicles: State of the art, challenges, and future trends. *Energies*, 16(7), 3121.
- Doğan, D. (2012). Intelligent Traction Control System Design and Road Characteristic Estimation by Acoustic Signal Processing in Electric Vehicles. Master's thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, 315250.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. and Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press.
- Esmailzadeh, E., Vossoughi, G.R. and Goodarzi, A. (2001). Dynamic modeling and analysis of a four motorized wheels electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*, 35(3), 163-194.
- Frieske, B., Kloetzke, M. and Mauser, F. (2013). Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 1-12. IEEE.
- Fujimoto, H., Shimizu, O., Nagai, S., Fujita, T., Gunji, D. and Ohmori, Y. (2020). Development of Wireless In-wheel Motors for Dynamic Charging: From 2nd to 3rd generation. In *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, 56-61. IEEE.
- Geamanu, M.S., Cela, A., LeSollic, G., Mounier, H. and Niculescu, S.I. (2012). Maximum friction estimation and longitudinal control for a full in-wheel electric motor vehicle. In *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 856-861. IEEE.
- Gerard, M., Pasillas-Lépine, W., De Vries, E. and Verhaegen, M. (2012). Improvements to a five-phase ABS algorithm for experimental validation. *Vehicle System Dynamics*, 50(10), 1585-1611.
- Gillespie, T.D. (2021). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE international.
- Goodarzi, A. and Esmailzadeh, E. (2007). Design of a VDC system for all-wheel independent drive vehicles. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 12(6), 632-639.

- Hannan, M.A., Azidin, F.A. and Mohamed, A. (2014). Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 135-150.
- Indu, K. and Aswatha Kumar, M. (2023). Electric vehicle control and driving safety systems: A review. *IETE Journal of Research*, 69(1), 482-498.
- Ivanov, V., Savitski, D. and Shyrokau, B. (2014). A survey of traction control and antilock braking systems of full electric vehicles with individually controlled electric motors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(9), 3878-3896.
- Jalali, K., Uchida, T., McPhee, J. and Lambert, S. (2012). Development of a fuzzy slip control system for electric vehicles with in-wheel motors. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 1(1), 46-64.
- Jazar, R.N. (2008). *Vehicle dynamics: theory and application* (1st ed). New York: Springer.
- Jazar, R.N. (2019). *Advanced vehicle dynamics*. Cham: Springer International Publishing.
- Jung, H.S., Kwak, B.H. and Park, Y.J. (2000). *Development of traction control system* (No. 2000-05-0246). SAE Technical Paper.
- Karki, A., Phuyal, S., Tuladhar, D., Basnet, S. and Shrestha, B.P. (2020). Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects. *Applied System Innovation*, 3(3), 35.
- Kasimalla, V.K. and Velisala, V. (2018). A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 42(14), 4263-4283.
- Khatun, P., Bingham, C.M., Schofield, N. and Mellor, P.H. (2003). Application of fuzzy control algorithms for electric vehicle antilock braking/traction control systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(5), 1356-1364.
- Kulkarni, A.D. (2001). *Computer vision and fuzzy-neural systems*. Prentice Hall PTR.
- Kumar, L. and Jain, S. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 924-940.
- Landes, D.S. (2003). *The unbound Prometheus: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present*. Cambridge University Press.
- Larminie, J. and Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons.

- Le, D.T., Nguyen, D.T., Le, N.D. and Nguyen, T.L. (2022). Traction control based on wheel slip tracking of a quarter-vehicle model with high-gain observers. *International Journal of Dynamics and Control*, 10(4), 1130-1137.
- Li, F., Wang, J. and Liu, Z. (2009). Motor torque-based vehicle stability control for four-wheel-drive electric vehicle. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1596-1601. IEEE.
- Li, H.M., Wang, X.B., Song, S.B. and Li, H. (2016). Vehicle control strategies analysis based on PID and fuzzy logic control. *Procedia engineering*, 137, 234-243.
- Malik, A., Sharma, S., Batra, I., Sharma, C., Kaswan, M.S. and Garza-Reyes, J.A. (2024). Industrial revolution and environmental sustainability: an analytical interpretation of research constituents in Industry 4.0. *International Journal of Lean Six Sigma*, 15(1), 22-49.
- Mayyas, A., Qattawi, A., Omar, M. and Shan, D. (2012). Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(4), 1845-1862.
- Murata, S. (2012). Innovation by in-wheel-motor drive unit. *Vehicle System Dynamics*, 50(6), 807-830.
- Nguyen, B.M., Nguyen, H.V., Ta-Cao, M. and Kawanishi, M. (2020). Longitudinal modeling and control of in-wheel-motor electric vehicles as multi-agent systems. *Energies*, 13(20), 5437.
- Oktay, G. (2008). Design and simulation of a traction control system for an integrated active safety system for road vehicles. Master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara, 238591.
- Özyıldırım, D. (2021). Modelling Longitudinal Motion of an Electric Vehicle and Wheel Slip Control Through NN-Based Uncertainty Prediction. Master's thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, 675955.
- Pacejka, H. (2012). *Tire and vehicle dynamics* (3rd ed). Elsevier.
- Pauwelussen, J. (2014). *Essentials of vehicle dynamics*. Butterworth-Heinemann.
- Pavlínek, P. (2023). Transition of the automotive industry towards electric vehicle production in the east European integrated periphery. *Empirica*, 50(1), 35-73.
- Powers, W.F. and Nicastrì, P.R. (2000). Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control engineering practice*, 8(6), 605-618.
- Rajamani, R. (2011). *Vehicle dynamics and control* (2nd ed). Springer Science & Business Media.

- Sanguesa, J.A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F.J. and Marquez-Barja, J.M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404.
- Savitski, D., Ivanov, V., Augsburg, K., Emmei, T., Fuse, H., Fujimoto, H. and Fridman, L.M. (2019a). Wheel slip control for the electric vehicle with in-wheel motors: Variable structure and sliding mode methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(10), 8535-8544.
- Savitski, D., Ivanov, V., Augsburg, K., Shyrokau, B. and Fujimoto, H. (2019b). Recent advancements in continuous wheel slip control. In *The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 1525-1535. Cham: Springer International Publishing.
- Shaout, A. and McGirr, K. (2013). Real-time systems in automotive applications: Vehicle stability control. *Electrical Engineering Research*, 1(4), 83-95.
- Shibahata, Y. (2005). Progress and future direction of chassis control technology. *Annual Reviews in Control*, 29(1), 151-158.
- Silva, F.L., Silva, L.C., Eckert, J.J. and Lourenco, M.A. (2022). Robust fuzzy stability control optimization by multi-objective for modular vehicle. *Mechanism and Machine Theory*, 167, 104554.
- Sinigaglia, T., Martins, M.E.S. and Siluk, J.C.M. (2022). Technological evolution of internal combustion engine vehicle: A patent data analysis. *Applied Energy*, 306, 118003.
- Situ, L. (2009). Electric vehicle development: the past, present & future. In *2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 1-3. IEEE.
- Sulaiman, N., Hannan, M.A., Mohamed, A., Majlan, E.H. and Daud, W.W. (2015). A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 802-814.
- Sun, J., Xue, X. and Cheng, K.W.E. (2019). Fuzzy sliding mode wheel slip ratio control for smart vehicle anti-lock braking system. *Energies*, 12(13), 2501.
- Taha, Z. and Aydın, K. (2022). Comparative Analysis of Single, Double, and Quad Electric Vehicle Powertrain Systems. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6(4), 324-330.
- Tahami, F., Farhangi, S. and Kazemi, R. (2004). A fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 41(3), 203-221.

- Thounthong, P., Rael, S. and Davat, B. (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of power sources*, 193(1), 376-385.
- Tie, S.F. and Tan, C.W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.
- Tseng, H.E., Ashrafi, B., Madau, D., Brown, T.A. and Recker, D. (1999a). The development of vehicle stability control at Ford. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 4(3), 223-234.
- Tseng, H.E., Madau, D., Ashrafi, B., Brown, T. and Recker, D. (1999b). Technical challenges in the development of vehicle stability control system. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No. 99CH36328)*, Vol. 2, 1660-1666. IEEE.
- URL-1: <https://www.proteanelectric.com/protean-drive/>, (Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2024).
- URL-2: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/lift-drag-pitch/what-is-drag-coefficient/>, (Ziyaret tarihi: 12 Nisan 2024).
- URL-3: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>, (Ziyaret tarihi: 19 Nisan 2024).
- Uzunsoy, E. (2018). A brief review on fuzzy logic used in vehicle dynamics control. *Journal of Innovative Science and Engineering (JISE)*, 2(1), 1-7.
- Vidyanandan, K.V. (2018). Overview of electric and hybrid vehicles. *Energy Scan*, 3, 7-14.
- Wu, G., Zhang, X. and Dong, Z. (2015). Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 352(2), 425-448.
- Yang, K., Dong, D., Ma, C., Tian, Z., Chang, Y. and Wang, G. (2021). Stability control for electric vehicles with four in-wheel motors based on sideslip angle. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 42.
- Yu, F., Li, D.F. and Crolla, D.A. (2008). Integrated vehicle dynamics control state-of-the art review. In *2008 IEEE vehicle power and propulsion conference*, 1-6. IEEE.
- Yuan, X., Liu, X. and Zuo, J. (2015). The development of new energy vehicles for a sustainable future: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 298-305.
- Zhang, F., Xiao, H., Zhang, Y. and Gong, G. (2022), March. Distributed Drive Electric Bus Handling Stability Control Based on Lyapunov Theory and Sliding Mode Control. In *Actuators*, (Vol. 11, No. 3), 85. MDPI.



EKLER

EK-A

Tablo A.1. Modelleme özellikleri tablosu.

Parametre	Miktar	Ölçü Birimi
BMK-PI Denetleyici		
(0.1)'in Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Ön Tekerlek.	0,48	-
(0.1)'in Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Arka Tekerlek.	0,487	-
(0.2)'nin Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Ön Tekerlek.	0,655	-
(0.2)'nin Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Arka Tekerlek.	0,69	-
(0.3)'ün Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Ön Tekerlek.	0,695	-
(0.3)'ün Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Arka Tekerlek.	0,735	-
(0,39)'un Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Ön Tekerlek.	0,7	-
(0,39)'un Kontrollü Kayma modeli; Oransal Kazanç, Arka Tekerlek.	0,74	-
Uzunlamasına Sürücü Modeli		
Oransal Kazanç (K_p).	10	-
İntegral Kazanç (K_i).	5	-
Araç Gövde Modeli		
Araç Kütlesi	1800	Kg
Ağırlık merkezinin (C) yerden yüksekliği (h).	0,5	m
C'den ön aksa olan yatay mesafe (L_f).	1,44	m
CG'den arka aksa olan yatay mesafe (L_r).	1,44	m
Yerçekimi İvmesi (g).	9,81	m/s ²
Eşdeğer Ön Alan (A_F).	3	m ²
Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti katsayısı (C_D).	0,4	-
Hava Yoğunluğu (ρ_{air}).	1,18	Kg/m ³
Rüzgar hızı (V_w).	0	m/s
Yol Eğim Açısı	0	degree

Tablo A.1. (Devam) Modelleme özellikleri tablosu.

Lastik Modeli		
Magic Formül B katsayısı	4	-
Magic Formül C katsayısı	2	-
Magic Formül D katsayısı	0,1	-
Magic Formül E katsayısı	1	-
Yuvarlanma Yarıçapı	0,33	m
Yuvarlanma sabiti Katsayısı (f_{ro}).	0,015	-
Lastik Ataleti (I_w).	1	Kg/m ²
PMSM Motor Modeli		
Kutup Çifti Sayısı	8	-
Kalıcı Mıknatıs Akı Bağlantısı.	0,0437	Wb
Stator d-ekseni endüktansı (L_d).	2,4368 e-4	H
Stator q-ekseni endüktansı (L_q).	2,9758 e-4	H
Stator sıfır-dizi endüktansı (L_0).	1,2184 e-4	H
Faz başına stator direnci (R_s).	0,0101	Ohm
Anma (Nominal) gücü.	35	KW
Maksimum Tork (T_{max}).	205	N.m
Araç Akü Modeli		
Sabit DA Gerilimi.	350	V

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aboalkibash, T., Ayaz, M., Türkcan, A. (2024). IWM Electric Vehicle; Wheel's Slip Control by Adaptive Fuzzy Logic Methodology. *Bursa 2nd International Conference on Mathematics and Engineering*, Bursa, 10-12 Mayıs 2024.



ÖZGEÇMİŞ

Taqialdeen ABOALKIBASH, ilk, orta ve lise eğitimini Filistin'de tamamladı. 2014 yılında Palestine Polytechnic University (PPU) Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne katılarak Otomotiv Mühendisliği alanında uzmanlaştı ve 2019 yılında otomotiv mühendisi olarak birinci sınıf onur derecesiyle mezun oldu. 2019-2021 yılları arasında, Palestine Polytechnic University (PPU), Mühendislik Fakültesi'nde "Modern Taşıtlarının Elektronik Sistemleri" Laboratuvar Sorumlusu ve araştırma ve öğretim asistanı olarak görev yapmaktadır. 2021-2024 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

