

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARINDA BULANIK MANTIK TABANLI TAM
ELEKTRİKLİ FRENLEMENİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI**

DOKTORA TEZİ

Can GÖKÇE

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Doktora Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARINDA BULANIK MANTIK TABANLI TAM
ELEKTRİKLİ FRENLEMENİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI**

DOKTORA TEZİ

**Can GÖKÇE
(504052002)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Doktora Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504052002 numaralı Doktora Öğrencisi Can GÖKÇE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARINDA BULANIK MANTIK TABANLI TAM ELEKTRİKLİ FRENLEMENİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hacı BODUR**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Levent OVACIK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Salih Barış ÖZTÜRK
Okan Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Haziran 2015**

Savunma Tarihi : **10 Eylül 2015**

Gelmesini sabırsızlıkla beklediğim kızıma...

ÖNSÖZ

Öncelikle, seferber ettiği tüm imkânlar ve çalışmamdaki desteklerinden ötürü, doktora danışmanım Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN'e teşekkürü bir borç bilirim. Araştırmaya karşı olan platonik ilgimin, hayatımı yönlendirmekte olan bir gerçeğe dönüşmesinde emekleri bulunan, değerli hocam Prof. Dr. Nejat Tuncay'a da, ilk dersini aldığım 2000 yılından bu yana bana gösterdiği inanç, destek ve sabır için teşekkür ederim. Tezin hazırlığı boyunca yaptıkları değerlendirmeler ve katkılar nedeniyle izleme komitesinin değerleri üyeleri Prof. Dr. Hacı BODUR ve Yrd. Doç. Dr. Levent OVACIK'a teşekkürlerimi sunarım. Deney düzeneği ve diğer uygulamalı çalışmalarda desteği ve ayırdığı zaman nedeniyle Elektronik Mühendisi Gürkan "Fatfinger" TOSUN'a, projeye destek veren TOFAŞ Türk Otomobil Fab. A.Ş.'ne ve Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı SANTEZ programına teşekkürlerimi sunarım.

Ziyadesi ile uzun süren eğitim hayatıma her türlü maddi ve manevi desteği veren ailem ve nasıl olacak da bitecek diye, kendim dahi inanmadığımda bana inanan eşim Mevzun olmadan bu çalışma olamazdı.

Haziran 2015

Can GÖKÇE

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	1
1.3 Bilimsel Katkıların İrdelenmesi	7
1.3.1 Kontrol sistemleri başlığında tezin yeri	7
1.3.2 Araç dinamiğinin iyileştirilmesi başlığında tezin yeri	9
1.3.3 Güç elektroniği başlığında tezin yeri	10
1.3.4 Diğer başlıklarla tezin ilişkisi	11
2. ELEKTRİKLİ ARACIN GÜÇ AKIŞININ MODELLENMESİ VE BENZETİMİ.....	13
2.1 Elektrikli Araç ve Bileşenlerinin Modellenmesi	14
2.1.1 Aerodinamik sürüklenme kuvveti	15
2.1.2 Doğrusal tekerlek kuvvetleri	16
2.1.3 Tekerlek dinamikleri	17
2.1.4 Elektrikle sürüş	19
2.1.5 Araç aktarma modeli	22
2.1.6 Araç modeli	23
2.2 Benzetimlerle Araç Doğrusal Dinamiklerinin İncelenmesi	26
2.2.1 Frenleme kuvvetlerinin hesaplanması	27
2.2.2 Tekerlek normal yüklerinin değişimi	28
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARI FRENLEME YÖNTEMLERİ	31
3.1 Elektrikli Frenleme Yöntemlerinin Karakteristikleri	31
3.1.1 Enerji geri kazanımlı frenleme karakteristiği	33
3.1.2 Dinamik frenleme karakteristiği	34
3.1.3 Ters akım/gerilim ile frenleme.....	34
3.2 Elektrikli Frenlemenin Sınırları	35
3.2.1 Motor ve generatör çalışma.....	36
3.2.2 Elektrikli frenleme yöntemlerinin sınırlarının deneylerle incelenmesi.....	37
3.3 Araç Dinamiği Sınırlamaları	43
3.3.1 Frenlemenin ideal karakteristiği ve güvenli çalışma bölgesi	44
3.3.2 Elektrikli aracın güvenli frenlenmesi	49
3.3.3 Frenleme ile ilgili kanuni düzenlemeler	51

3.4 Konforlu Frenleme Kriterleri	52
3.5 Frenleme Kaynaklarının Dağılımı	54
3.5.1 Seri frenleme	54
3.5.2 Paralel frenleme	56
3.5.3 Elektrikli frenlemede pedal hissiyatı	56
4. TAM ELEKTRİKLE FRENLEME KONTROL SİSTEMİ	59
4.1 Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması	59
4.1.1 Kontrol sisteminin girişleri	59
4.1.2 Kontrol sisteminin çıkışları	63
4.1.3 Bulanık mantık kontrol yapısı	64
4.2 Deney Düzeneklerinin Geliştirilmesi	65
4.2.1 Elektrikli motosiklet	69
4.2.2 Motor sürücü	70
4.2.3 Senkron çevirici	71
4.2.4 Dinamik frenleme direnç bankosu	74
4.2.5 Elektronik kontrol birimi (ECU)	75
4.3 Kontrol Yazılımının Geliştirilmesi	79
4.3.1 Ana kontrol ekranı	81
4.3.2 Giriş – çıkış yöneticisi	81
4.3.3 Sürüş ve frenleme yöneticisi	84
4.3.3.1 Bulanık mantık kontrol bloğu	85
4.3.3.2 Senkron çevirici sürücüsü	86
4.3.3.3 Araç çalışma durumları	87
4.4 Kontrol Yazılımının Üretilmesi ve Deney Düzenekleri Üzerine Uygulanması	87
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	89
5.1 Deney 1: Doğal Yavaşlama	89
5.2 Deney 2: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren Oranı %10	90
5.3 Deney 3: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren Oranı %20	91
5.4 Deney 4: Hız 0,36pu, SOC %95, Fren Oranı %20	92
5.5 Deney Sonuçlarının Yorumlanması	93
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
6.1 Teknik ve Ticari Katkıların İrdelenmesi	95
6.2 Tez Çalışması Sonrası İçin Öneriler	98
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	107

KISALTMALAR

ABS	:Kilitlenme önleyici frenleme sistemi
CAN	:Kontrolcü alanı ağı
DGM	:Darbe genlik modülasyonu
EBD	:Elektronik fren kuvveti dağıtımı
ECE	:Avrupa Ekonomik Komisyonu
ECU	:Elektronik kontrol ünitesi
EMK	:Elektromotor kuvvet
EPO	:Avrupa Patent Ofisi
ESP	:Elektronik kararlılık programı
FDAM	:Fırçasız doğru akım motoru
FEB	:Tam elektrikli frenleme
FIS	:Bulanık mantık etkileşim sistemi
FOC	:Alan yönelimli kontrol
HEA	:Hibrit elektrikli araç
HIL	:Döngüde donanım
ICE	:İçten yanmalı motor
İYM	:İçten yanmalı motor
MIL	:Döngüde model
MOSFET	:Metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör
MPRD	:Ana güç rölesi sürücüsü
PD	:Alt referansa çeken
PID	:Oransal integral türevsel
PU	:Üst referansa çeken
pu	:Birim başına
SANTEZ	:Sanayi Tezleri programı
SIL	:Döngüde yazılım
SMSM	:Sabit mıknatıslı senkron motor
SOC	:Şarj durumu
TEA	:Tam elektrikli araç
TEF	:Tam elektrikli frenleme
TOFAŞ	:Türk Otomobil Fabrikası Anonim Şirketi
TPE	:Türk Patent Enstitüsü
TTL	:Transistör - transistör mantığı
UN-ECE	:Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomi Komisyonu
USB	:Evrensel seri veri yolu

SEMBOLLER

μ_p	:Maksimum yapışkanlık değeri
μ_s	:Patinaj yapışkanlık değeri
A_f	:Aracın ön yüzey izdüşümü alanı
C_d	:Aerodinamik sürüklenme katsayısı
c_t	:Tekerlek sürtünme katsayısı
C_x	:Aerodinamik katsayısı
E_a	:Frenleme esnasında endüklenen gerilim
F_{aero}	:Eşdeğer doğrusal aerodinamik sürüklenme kuvveti
$F_{b\ max}$	:Maksimum fren kuvveti
$F_{f\ arka}$	:Arka frenleme kuvveti
$F_{f\ ön}$	:Ön frenleme kuvveti
F_{fren}	:Aracın tekerleklerindeki toplam frenleme kuvveti
F_{max}	:Maksimum kuvvet
f_r	:Tekerlek normal yükü
F_{xf}	:Ön tekerleklerdeki doğrusal tekerlek kuvveti
F_{xr}	:Arka tekerleklerdeki doğrusal tekerlek kuvveti
$F_{yük}$	:Tekerleğe indirgenmiş toplam araç yükleri
F_{zf}	:Ön tekerlek için normal kuvvet
F_{zr}	:Arka tekerlek için normal kuvvet
g	:Yerçekimi ivmesi
h_{aero}	:Aerodinamik kuvvetin ön yüzeydeki merkez kabul edilebilecek noktanın yerden yüksekliği
h_g	:Ağırlık merkezinin yerden yüksekliği
I_{fr}	:Fren akımı
I_{DC}	:Bara akımı
i_a	:Armatür akımı
j	:Frenleme ivmesi
J_{wf}	:Ön tekerlek + aks eylemsizlik momenti
J_{wr}	:Arka tekerlek eylemsizlik momenti
k_e	:Armatürde endüklenen EMK ile elektrik makinesi hızı arasındaki oran
K_f	:Frenleme Oranı
k_t	:Armatür akımı ile moment arasındaki oran
l	:Akslar arası uzaklık
L_a	:Armatür eşdeğer endüktansı
L_b	:Ön aksın araç ağırlık merkezine olan uzaklığı
l_f	:Ağırlık merkezinin ön tekerin yol ile temas noktasına olan uzaklığı
l_r	:Ağırlık merkezinin arka tekerin yol ile temas noktasına olan uzaklığı
m	:Tam yükte araç kütlesi
$M_{araç}$	:Araç kütlesi
$M_{n\ wheel}$	:Tekere ilişkin nominal yük
P_{EM}	:Elektrik makinesinin gücü

P_{mot}	:Motor gücü
P_n	:Normalize tekerlek yükü
P_{tk}	:Aracın tekerleklerine indirgenmiş gücü
r	:Tekerlek yarıçapı
R_a	:Armatür eşdeğer direnci
R_{bt}	:Bataryanın iç direnci
R_d	:Dinamik Frenleme Oranı
r_e	:Efektif tekerlek yarıçapı
R_e	:Enerji Geri Kazanımlı Frenleme Oranı
R_p	:Ters Akımla Frenleme Oranı
R_{pp}	:Elektrik makinesinin 2 faz arası direnci
R_{sc}	:Yarı iletkenlerin gerilim düşümleri ile ilişkili direnci
r_{stat}	:Yüklü durumda tekerlek yarıçapı
r_{tk}	:Aracın tekerlek yarıçapı
r_w	:Tekerlek yarıçapı
R_{xf}	:Ön tekerleklerdeki yuvarlanma direnci
R_{xr}	:Arka tekerleklerdeki yuvarlanma direnci
s	:Kayma
T	:Elektrik makinesinin milindeki moment
T_{fren}	:Aracın üzerindeki toplam frenleme moment
V	:Araç hızı
V_a	:Armatür gerilimi
V_{ah}	:Araç hızı
V_{bat}	:Bataryanın frenleme anındaki uç gerilimi
V_{DC}	:Bara gerilimi
V_{wind}	:Rüzgârın hızı
V_x	:Aracın doğrusal hızı
ε	:EMK
η_{EM}	:Elektrik makinesinin verimi
η_{ev}	:Sürücü devresinin verimi
η_{ak}	:Aktarma organlarının verimi
θ	:Aracın ilerlediği yolun eğimi
μ	:Lastik ve yer arası temas katsayısı
μ_b	:Frenleme anında tekerlek ile yol arası temas katsayısı
ρ	:Havanın kütleli yoğunluğu
τ_{tk}	:Tekerlek momenti
ω	:Elektrik makinesi dönüş hızı
ω_{tk}	Tekerlek hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Sürüş Çevrimi Karakteristikleri ve Enerji Tüketimi Verileri [10].	2
Çizelge 1.2 : Lityum İyon Batarya Verileri.	5
Çizelge 2.1 : Elektrikli Araç Verileri.	14
Çizelge 2.2 : Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti Parametreleri.	15
Çizelge 2.3 : Doğrusal Tekerlek Kuvveti Parametreleri.	17
Çizelge 2.4 : Doğrusal Tekerlek Kuvveti Parametreleri.	19
Çizelge 2.5 : Parametre Giriş Dosyası.	24
Çizelge 3.1 : Maxon EC60 Teknik Verileri.	38
Çizelge 3.2 : Frenleme Direnci ile Yavaşlama Deneyi 2200-0 min ⁻¹ .	40
Çizelge 3.3 : Çeşitli Yol Yüzeyleri için Temas Katsayıları [63].	46
Çizelge 4.1 : Bulanık Mantık Kontrolcü Üyelik Fonksiyonları.	60
Çizelge 4.2 : Bulanık Mantık Kural Tablosu.	64
Çizelge 4.3 : Elektrikli Motosiklet Teknik Verileri.	69
Çizelge 4.4 : ECU Giriş-Çıkış Sinyal Tablosu.	77
Çizelge 4.5 : Giriş/Çıkış Blokları İşaretleri.	84
Çizelge 4.6 : Sürüş/Frenleme Yöneticisi İşaretleri.	85
Çizelge 4.7 : Bulanık Mantık Kontrol Bloğu İşaretleri.	86
Çizelge 4.8 : Senkron Çevirici Sürücüsü Bloğu İşaretleri.	87
Çizelge 5.1 : Deney Sonuçları.	94
Çizelge 6.1 : ECE 101 Çevriminde Tüketim Değerleri.	96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Paralel Hibrit Fonksiyonlarına Göre Yakıt Tasarrufu Olanakları [11].	3
Şekil 1.2 : FTP75 Çevrimi için Frenleme Enerjisinin Araç Hızı ile Bağlantısı [10]..	4
Şekil 2.1 : x Yönünde Hareket Eden Araca Etkiyen Doğrusal Kuvvetler.	15
Şekil 2.2 : Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti Simulink® Modeli.	16
Şekil 2.3 : (a)Normalize Tekerlek Yükleri (b) Yuvarlanma Direnci.	18
Şekil 2.4 : (a) Doğrusal Tekerlek Kuvvetleri (b) Etkin Tekerlek Çapı.	19
Şekil 2.5 : Elektrik Makinesi Hız – Moment Karakteristiği.	20
Şekil 2.6 : Elektrikli Tahrik Modülü.	21
Şekil 2.7 : Elektrik Tahrik Sistemi Sürekli Durum Modeli.	21
Şekil 2.8 : Elektrik Tahrik Sistemi Yüksek Güç Durumu Modeli.	22
Şekil 2.9 : Elektrik Makinesi Kontrol Potansiyometresi Modeli.	22
Şekil 2.10 : Transmisyon Modeli.	23
Şekil 2.11 : Genel Araç Modeli.	23
Şekil 2.12 : Araç Hızlanma: (A)Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.	25
Şekil 2.13 : Elk. Mak. Gücü: (A) Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.	26
Şekil 2.14 : Elk. Mak. Momenti: (A) Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.	26
Şekil 2.15 : Fren Modeli.	27
Şekil 2.16 : 100-0 km/h 40 m Hız Profili.	27
Şekil 2.17 : Frenlemede (A) Arka – (B) Ön Tekerlek Kuvvetleri.	28
Şekil 2.18 : ECE Çevriminde Tekerleklere Etkiyen Ağırlık: (A) Arka (B) Ön.	29
Şekil 2.19 : ECE Çevrimine İlişkin Araç Hızı – Zaman.	29
Şekil 3.1 : Fırçasız DA Makinesi ve Sürücüsü Bağlantı Şeması [60].	33
Şekil 3.2 : Deney Düzeneği Tasarımı.	37
Şekil 3.3 : Deney Düzeneği.	37
Şekil 3.4 : Motor Çalışma Akım – Gerilim Şekilleri.	38
Şekil 3.5 : Generatör Çalışma Akım – Gerilim Şekilleri.	39
Şekil 3.6 : Açık Devre Yavaşlama (t-E _a grafiği, 10s/aralık, 36V-14V).	39
Şekil 3.7 : 22 Ω ve 5 Ω Yavaşlama (t-E grafiği, 10 s/aralık, 36 V-0 V).	40
Şekil 3.8 : Maks. Frenleme Akımı – Durma Süresi İlişkisi.	41
Şekil 3.9 : Geri Kazanımlı Frenleme Eşdeğer Devresi.	42
Şekil 3.10 : Geri Kazanımlı Frenleme Deney Sonuçları.	43
Şekil 3.11 : Pozitif Moment Altında Lastik Tabanında Basınç Dağılımı [63].	44
Şekil 3.12 : Kayma ve Temas Katsayısı Arası İlişki [63].	45
Şekil 3.13 : Araca Düz Yolda Etkiyen Frenleme Kuvvetleri.	47
Şekil 3.14 : Ön ve Arka Akslarda İdeal Fren Kuvveti Dağılımı (I Eğrisi) [63].	48
Şekil 3.15 : Gerçek ve İdeal (β ve I) Frenleme Eğrileri [63].	49
Şekil 3.16 : UN-ECE 13-H Düzenlemesine Göre z ve μ Arası İlişki [62].	52
Şekil 3.17 : Fren Kuvvetleri Dağılımı Çalışma Bölgesi Sınırları.	52
Şekil 3.18 : Çeşitli Durumlar için Frenleme İvmeleri (G=10m/s ²).	53
Şekil 3.19 : Seri (a) ve Paralel (b) Frenleme Stratejisi.	56

Şekil 4.1 : Batarya SOC Değeri ile İlgili Üyelik Fonksiyonları.	61
Şekil 4.2 : Frenleme Oranı ile İlgili Üyelik Fonksiyonları.	62
Şekil 4.3 : Araç hızı ile ilgili üyelik fonksiyonları.	62
Şekil 4.4 : Bulanık Mantık Kontrol Yapısı.	65
Şekil 4.5 : Frenleme Oranları (R_e, R_d, R_p) – SOC – V_a	66
Şekil 4.6 : Frenleme Oranları (R_e, R_d, R_p) – K_f – SOC.....	67
Şekil 4.7 : Frenleme Oranları (R_e, R_d, R_p) – K_f – V_a	68
Şekil 4.8 : Elektrikli Motosiklet.....	69
Şekil 4.9 : Ön Konsol Kablolama ve Montaj Çalışmaları.	70
Şekil 4.10 : Arka Kısım Kablolama ve Montaj Çalışması.....	70
Şekil 4.11 : Senkron Çevirici İçeren Yapı.	71
Şekil 4.12 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumunda Senkron Çevirici.....	72
Şekil 4.13 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumu için Yük Gerilimi.	72
Şekil 4.14 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumu için Yük Akımı.....	72
Şekil 4.15 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Senkron Çevirici.....	73
Şekil 4.16 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Yük Gerilimi.....	73
Şekil 4.17 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Yük Akımı.	73
Şekil 4.18 : Dinamik Frenleme Direnç Bankosu.	74
Şekil 4.19 : Kontrol ECU'su Blok Diyagramı [69].	75
Şekil 4.20 : Kontrol ECU'su Teknik Resmi.	76
Şekil 4.21 : ECU Ana Güç Devresi Şeması [69].	76
Şekil 4.22 : Analog Girişler için PU/PD Bağlantı Şemaları.	77
Şekil 4.23 : Model Tabanlı Geliştirme Adımları.	79
Şekil 4.24 : Ana Kontrol Ekranı.	81
Şekil 4.25 : Kontrol Yöneticileri Ekranı.....	82
Şekil 4.26 : Normalizasyon Bloğu.....	82
Şekil 4.27 : Giriş Blokları.....	83
Şekil 4.28 : Çıkış Blokları.....	83
Şekil 4.29 Sürüş ve Frenleme Yöneticisi.	84
Şekil 4.30 : Bulanık Mantık Kontrol Bloğu.....	85
Şekil 4.31 : Bulanık Mantık Kontrolcüsü.	86
Şekil 4.32 : Senkron Çevirici Sürücüsü Bloğu.	86
Şekil 5.1 : Doğal Yavaşlama Deney Sonucu.	89
Şekil 5.2 : SOC %70, Kb %10 (Hız ve Fren oranı).	90
Şekil 5.3 : SOC %70, Kb %10 (Batarya Akımı).	91
Şekil 5.4 : SOC %70, Kb %20 (Hız ve Fren oranı).	91
Şekil 5.5 : SOC %70, Kb %20 (Batarya Akımı).	92
Şekil 5.6 : SOC %95, Kb %20, Kp sabit (Hız ve Fren oranı).....	93
Şekil 5.7 : SOC %95, Kb %20, Kp %10 ölçekli (Hız ve Fren oranı).	93

ELEKTRİKLİ YOL TAŞITLARINDA BULANIK MANTIK TABANLI TAM ELEKTRİKLİ FRENLEMENİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

ÖZET

Elektrik enerjisi ve devimsel (kinetik) enerjinin birbirine dönüştürülebilir olması, elektrikli taşıtları geleneksel içten yanmalı motorlu (İYM) araçlardan ayıran bir doğal olaydır. Elektrik makineleri sayesinde gerçekleşen bu olay ile geleneksel taşıtlarda frenleme ile kampana ve disklerde ısı enerjisine dönüştürülerek çevreye atılan devimsel enerji, elektrikli taşıtlarda elektrik enerjisine dönüştürülerek batarya ve ultrakapasitör sistemleri üzerinde depolanıp tekrar kullanılabilir. Bu olay enerji geri kazanımlı (rejeneratif) frenleme olarak adlandırılır.

Enerji geri kazanımlı frenleme, taşıtın toplam verimi ile erimini arttıran bir özelliktir ancak enerjinin depolanabileceği belirli koşullarda mümkündür. Ticarileşmiş ya da araştırma aşamasında olan hemen hemen tüm elektrikli araçlar ile elektrik ile hafif ve üzeri seviyede melezlenmiş araçlarda enerji geri kazanımlı frenleme kullanıldığı görülebilir.

Özellikle lokomotif gibi çok büyük devimsel enerjiye sahip raylı taşıtlarda ve vinç gibi yüksek frenleme gücü isteyen aletlerde dinamik frenleme yapıldığı da görülmektedir. Bu yöntemde de yine devimsel enerji elektrik enerjisine dönüştürülür, ancak depolama yerine, bir direnç üzerinden ısı enerjisine çevrilir. Bu tip araçlarda dinamik frenleme kullanılmasında asıl amaç mekanik frenlerin çabuk eskimesini engellemektir. Benzer bir uygulama da otobüs ve kamyon gibi ağır karayolu taşıtlarındaki, temelde Foucault Akımları oluşturarak taşıtların yavaşlamasına yardımcı olan “*retarder*” sistemlerinde de görülür. Otomobil gibi, nispeten daha düşük kütle ve dolayısıyla devinim enerjisine sahip taşıtlarda direnç üzerinden ya da Foucault akımları ile frenleme üzerine bir uygulamaya rastlanmamıştır.

Elektrik ile frenleme uygulamalarından biri de, pozitif referansta dönen bir elektrik makinesine tersi yönde dönmesini sağlayacak bir döner alan uygulamaktır. Literatürde ters akımla-gerilimle frenleme ya da “*plugging*” yöntemi olarak geçmektedir. Bu yöntem uygulandığında ters yönde oluşan alan nedeniyle mevcuttaki gerilim-akım seviyelerinde hızlı bir artış olur. Ayrıca, frenleme için enerji harcanmaktadır. Bu da yöntemin kullanım alanlarını azaltır. Bu yöntem genellikle yüksek eylemsizliğe sahip parçaların bulunduğu üretim hatlarında kullanılır (haddehaneler vb.).

Günümüzde, elektrikle sürülenler de dâhil olmak üzere, tüm taşıtlarda mekanik frenleme sistemleri vardır. Bu sistemler genellikle solenoid valfler ile sürülen çok karmaşık hidrolik yapılarıdır ve günümüz otomotiv güvenlik gereklilikleri olan kilitlenme engelleme (ABS), elektronik kararlılık sistemleri (ESP) gibi şasi kontrol fonksiyonlarını da gerçekleştirecek kapasitedelerdir.

Günümüz elektrikli taşıtlarında kullanılan frenleme sistemleri yukarıda bahsi geçen geri kazanımlı ve mekanik frenleme sistemlerinin bileşimi şeklinde tasarlanmaktadır.

Elektrikli frenleme yalnızca elektrikli sürüşün olduğu tekerleklerde mümkün olabildiği için, ileri elektrikli araç frenleme sistemlerinde elektrik ve mekanik frenleme arasında araç dinamiğini tehlikeye atmayacak paylaşım algoritmaları geliştirilmektedir. Elektrikli taşıt üzerinde taşınan enerjinin batarya tarafından sınırlanması ve bu nedenle çok değerli olması nedeniyle, en yüksek geri kazanımın sağlanması önemlidir. Ancak bataryanın dolu olduğu, ya da enerjiyi istenildiği seviyede soğuramadığı durumlarda elektrikli frenleme yerini daha fazla mekanik frenlemeye bırakır. Ayrıca, bataryayı geri kazanılan enerji ile doldurabilmek için bataryanın mevcut gerilim seviyesinin üzerine çıkmak, aradaki farkın ise istenilen frenleme gücünü sağlayabilecek bir akım oluşturmalarını sağlamak gerekir. Bu da özellikle düşük hızlarda yeterli ters elektromotor kuvvet (*EMK*) oluşturulamadığında mümkün olamamaktadır.

Bu tez çalışmasında ana amaç, elektrikli bir taşıtın elektrikli frenleme etkisi ile durmasını sağlayacak frenleme algoritmasının oluşturulmasını sağlayarak mekanik frenlemenin durmaya etkisini en düşüğe indirmek ya da tamamen ortadan kaldırmaktır. Tam elektrikli frenleme için 3 ana elektrikli frenleme yönteminden faydalanılacaktır. Geri kazanımlı elektrikli frenleme, aracın üzerindeki devinim enerjisinin en yüksek seviyede geri kazanımını sağlamak üzere tasarlanacaktır. İstenilen geri kazanımın ya da frenleme etkisinin sağlanamadığı durumlarda dinamik frenleme devrede olacaktır. Özellikle araç çok yavaşladığında, artık frenleme etkisini oluşturacak yeterli akım-gerilim oluşmadığında ters akımla frenlemeden faydalanılması öngörülmüştür.

Elektrikli taşıtlarda kullanılan bileşenler elektrik-mekanik-kimyasal sistemlerdir. Bu nedenle çevresel etmenlerden çok fazla etkilenirler. Ayrıca bir taşıt, farklı yükleme, çevresel etkiler ile yolun tipi ve eğimi gibi nedenlerle bir normal çalışma döngüsünde dahi farklı dinamiklere sahip olabilir. Bu gibi nedenlerin çokluğu nedeniyle, bu tez çalışmasında belirli bir kontrol sistemi yerine bulanık kontrol tabanlı bir sistem kullanılması öngörülmüştür. Bu sayede istenilen frenleme yöntemleri içerisinde istenilen etkiyi görmek üzere bir geçiş sağlanabilecektir.

Tez çalışmasının temelinde iki çıktısı olacaktır. İlk çıktıda bahsi geçen tüm elektrikli frenleme yöntemlerinin ilk kez bir taşıtta uygulanacağı bir yapı tanımlanacaktır. Elektrikli araçlar üzerindeki elektrik enerjisinin maliyeti düştükçe bu yapının kullanım alanı artabilir. İdeal durumda taşıtlar mekanik frenleme kullanmadan, bu tezde tanımlanacak Tam Elektrikli Frenleme (TEF) yöntemi ile durdurulabilir. Bulanık kontrol tabanlı böyle bir sistem bilimsel açıdan da daha önceden uygulanmamıştır ve tezin getirdiği bir yeniliktir. Diğer bir çıktı ise enerji geri kazanımlı frenlemenin bulanık mantık kontrolcü ile kontrol edilmesidir. Bu çıktının mevcut bir elektrikli araçta kullanılması mümkündür. Tezin bu kısmının taşıdığı ticari potansiyel nedeniyle İstanbul Teknik Üniversitesi ve TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. ortaklığında bir proje kurgulanmıştır. Proje Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı SANTEZ programı tarafından tez ile aynı isimde “Elektrikli Yol Taşıtlarında En İyi Elektriksel Frenleme için Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulanması” başlığı ile ve “1591.STZ.2012-2” numarası ile desteklenmiş ve Mayıs 2014’te başarı ile sonlandırılmıştır.

Tez çıktısı olan tam elektrikli fren kontrol algoritmasını içeren “Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi” başlıklı TR20120009307 numaralı başvuru Türk Patent Ofisi, “Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren” başlık ve DE102013215763 numaralı başvuru Alman Patent Ofisi tarafından incelenme aşamasındadır. Tez

araştırmaları esnasında karşılaşılan fren pedalının elektrikli frenleme esnasındaki geri beslemesi sorununun çözümlü için öngörülen bir çözümlü yöntemi, EPO'ya yapılan "A Brake System for Vehicles with Electric Drive" başlıklı ve EP2463163(B1) numaralı başvuru olumlu sonuç alarak patentlenmiştir. Tez çalışmalarından ayrıca bir uluslararası konferans yayını yapılmış ve bir de ulusal hakemli dergi yayını kabul edilmiş, uluslararası bir yayın başvurusu da tezin yazıma hazırlandığı zamanda incelenme aşamasındadır.

DEVELOPMENT AND APPLICATION of FUZZY LOGIC BASED FULL ELECTRICAL BRAKING FOR ELECTRIC ROAD VEHICLES

SUMMARY

The bi-directional conversion between electrical energy and kinetic energy is the fundamental natural phenomenon that separates electrical and conventional internal combustion engine (ICE) vehicles. With this conversion, which occurs thanks to electrical machines, kinetic energy; that is converted to heat in the drums or discs of the conventional vehicles and dissipated to environment, can be stored in the batteries and ultra-capacitors and re-used in the electrical vehicles. This is called regenerative braking.

Regenerative braking is a method which increases the total efficiency and range of an electrified vehicle, but it is only possible on certain circumstances where the electrical energy can be stored. Almost all commercial or prototype full electric vehicles and mild and more hybridized electric vehicles utilize regenerative braking.

Vehicles with very large kinetic energy, especially rail vehicles like locomotives and some equipment that require very large braking power like cranes are also utilize dynamic electrical braking. In this method, it is seen that the kinetic energy is converted to electrical energy, but instead of storing, it is converted to heat on some resistor units. The main reason to use dynamic braking in such systems is to avoid the mechanical brakes to run off quickly. Similar application is seen on retarder systems that use Foucault currents to help slowing down of heavy-duty vehicles such as buses and trucks. Application of a retarder mechanism or dynamic braking was not seen on vehicles like automobiles, which have relatively less mass and kinetic energy.

Another application of electric braking is to apply a field to rotate an electrical machine in reverse, while it is already rotating on a positive reference. In the literature, this method is called braking with reverse current-voltage or plugging-plug braking. When this method is applied, voltage-current levels will increase fast, due to the reverse field. In addition, energy is consumed for braking. That would reduce the application fields of this method. Generally, this method is applied on production lines with high inertia parts (i.e. metal mills), where instantaneous braking is needed to increase overall line efficiency.

Today, all vehicles including the electrically driven ones, utilize mechanical braking systems. These systems are generally very complicated hydraulic systems, driven by solenoid valves and they are capable of applying chassis applications such as anti-blockage systems (ABS) or electronic stability programs (ESP) which are also safety requirements to be met.

Modern electric vehicle braking systems are designed as combinations of regenerative and mechanical braking systems, which have been described above. Since electrical braking is only possible in the electrically driven wheels, algorithms to share the braking force between electrical and mechanical brakes, without risking the vehicle

dynamics are being developed. Since the on-board electrical energy is limited by the capacity of the battery pack and it is very precious because of that, it is extremely important to have maximum amount of regenerative braking. Nevertheless, when the battery is fully charged or in case the braking energy cannot be absorbed, electrical braking is replaced by more mechanical braking. Additionally, to be able to charge a battery with regenerative energy, generated voltage must be above the battery voltage and the difference must produce enough current to have desired braking force. This is especially not possible in low speeds, where adequate the inverse electromotive force cannot be produced.

The main purpose of this thesis is having the novel braking algorithm to stop an electric vehicle with electrical braking effect thus minimizing or eliminating mechanical braking effect. For full electrical braking, three main electrical braking methods will be used. Regenerative braking will be designed to regenerate maximum available kinetic energy. When the desired regeneration or braking effect is not obtained, dynamic braking will be available. Especially, when the vehicle is very slow to induce enough current-voltage, plugging method is planned to be used.

Components in electrical vehicles are combination of electrical-mechanical-chemical systems. Therefore, environmental effects easily affect them. In addition, a vehicle may have different dynamics due to loading, ambience, type and slope of the road, etc., even in the same running cycle. Due to numerous such reasons, instead of using a definitive control method, a fuzzy based control system is used in this thesis work. Thus, it will be possible to switch through desired braking methods to see desired effect.

To be able to define how the electrical braking methods should be taken into braking process, first of all, dynamics and limits of these braking methods are investigated. A small scale test platform, consisting of a BLDC machine driving a large metal disk, which is used as an inertia, is built. Using this platform, limitations of the braking methods are investigated and the dynamics of these methods are defined.

The proposed fuzzy controller uses vehicle speed, braking rate and state of charge as inputs. Purpose of this controller is to use these inputs to calculate duty ratios for three different electrical braking methods; regenerative, dynamic and plugging, with respect to their limitations. The calculated ratios, which are going to be 100% in total, represents that the whole braking effect is realized by these electrical braking methods, thus defining a Full Electrical Braking (FEB) as a new method. The control system is also applied on a controller ECU, coded by means of model based control system development methods, using Matlab[®], Simulink[®] and relevant toolboxes and software. This controller also realized on an electric scooter.

Braking ratios calculated by the controller is used to control a synchronous DC/DC converter. This DC/DC converter in buck mode, is used to control the motor mode of the scooter by adjusting the proper speed. Boost mode in opposite direction is used to boost the voltage on the terminals of the motor driver, to charge up the batteries. Also in the boost mode, a controlled chopper is added to direct braking power to be dissipated on a resistor bank. In very low speeds, again the buck mode is used in very low ratios but the driver is used to apply a field, opposite to the electric motors turning direction.

To realize all this control actions, the ECU is also used as an upper level controller for the scooter. So the gas, brake, mechanical brake or SOC and tachometer of the scooter is connected to the ECU, as well. Standard gas-brake potentiometers, original motor

and the batteries of the vehicle are kept. Only the motor driver is changed to have more control on the unit. Overall prototype unit is later used to make tests of the developed control method. With the tests, also some small calibrations on the controller is possible.

There will be two main outcomes of the thesis. First outcome will define a structure where all mentioned electrical braking methods would be applied on a vehicle. As the cost of on board electrical energy would reduce, this structure could be used widely. In the ideal case, vehicles can be stopped by only electrical braking, which will be defined as Full Electrical Braking (FEB), in this thesis. Scientifically, a fuzzy controlled such system is not applied before, which will also be the novelty of the thesis. The other outcome will be application of regenerative braking with fuzzy controller. It is possible to use this output on a present electrical vehicle. Due to the commercial potential of this outcome, a project is defined with partnership of Istanbul Technical University and TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.. This project is supported by the Republic of Turkey Ministry of Science, Technology and Industry, Industrial Theses Program (SANTEZ), under the same name with thesis “Development and Application of a New Method for Optimal Braking of Electric Vehicles” numbered “1591.STZ.2012-2” and successfully ended in May 2014.

Patent applications regarding novel control algorithm have been done to Turkish Patent Institute under topic name “Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi” with filing number TR20120009307 and to German Patent Office under topic name “Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren” with filing number DE102013215763 and are in pending state. In addition, during thesis research, a solution to brake pedal feedback problem during electrical braking was patented with another patent application under topic name “A Brake System for Vehicles with Electric Drive” to European Patent Office (EPO) and granted the patent rights with the grant number EP2463163(B1). There were also an international conference paper and a national refereed journal paper published. An international cited journal paper is in the evaluation phase, as the thesis is being prepared.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, elektrikle sürülen bir taşıtın geri kazanımlı, dinamik ve ters akımlı elektrikli frenleme yöntemleri ile tam elektrikli frenleme algoritmasını tanımlamak ve bunu bir bulanık mantık kontrolcü kullanarak bir elektrikli araca uygulamaktır. Ayrıca, elektrikli frenlemenin sınırları tanımlanarak bir elektrikli taşıtın yalnız elektrikli frenleme yöntemleri kullanılarak durdurulmasının mümkün olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Elektrik taşıtlar sürüş unsurlarına göre ikiye ayrılmaktadır:

- a. Tam elektrik araç (TEA); sürüş unsuru olarak yalnızca elektrik makinesi kullanır. Şebekeden şarj olan batarya elektrikli araç ve hidrojen yakıt hücresi elektrikli araçlar bu tipe örnektir.
- b. Hibrit elektrikli araç (HEA); sürüş unsuru olarak hem içten yanmalı motor, hem de elektrik makinesi kullanır. Paralel hibrit elektrikli araç, karmaşık hibrit elektrikli araç ve şebekeden şarj olabilen (*plug-in*) hibrit elektrikli araçlar bulunmaktadır.

Petrol kaynaklarının sınırlı olması ve neticesinde yaşanan petrol krizleri ile küresel ısınma gibi çevresel etkiler başta olmak üzere çeşitli nedenler, elektrik araçlar üzerine yapılan çalışmaların hızlanmasına, paralelinde de hem uluslararası otoritelerin ve hükümetlerin, hem de sivil toplum kurumlarının ve kamuoyunun bu konuda ilgi ve hassasiyet göstermesine neden olmuştur. Çeşitli kamu kuruluşlarının [1-4] ve özel araştırma firmalarının [5-7] teknoloji öngörülerinde de elektrik tahrikli araçların piyasada hızla yer alacağı görülmektedir.

Bu denli kullanımı artan ve artacak olan elektrikli araçlarda klasik içten yanmalı motorlu araçlardan farklı olan birçok teknolojinin de kullanıldığı görülmekte,

üzerlerinde araştırma ve iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi de elektrikli fren teknolojileridir. Elektrik tahrikli araçlarda devinimi elektrikten sağlayan makine, aracın devinim enerjisinin elektrik enerjisine tekrar dönüştürülmesini de sağlar ve bu sayede aracı frenler.

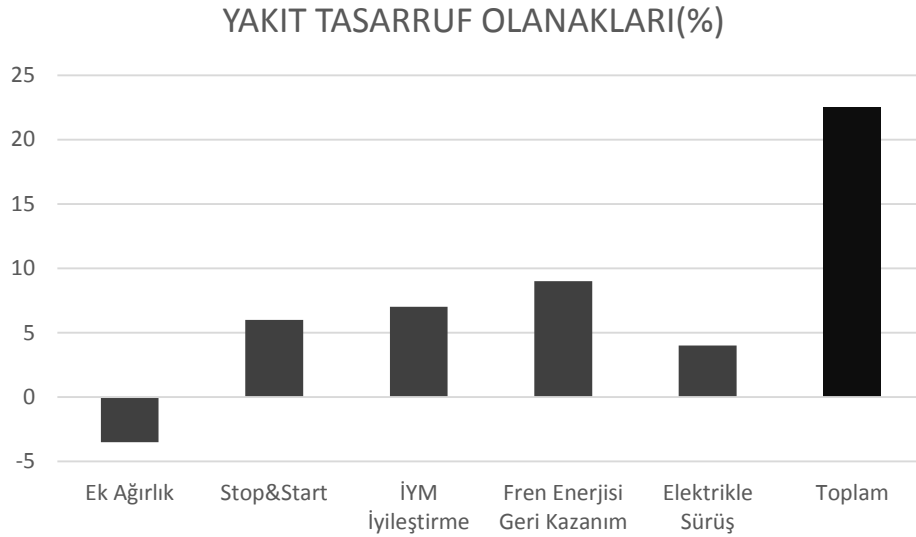
Elektrikli araçların yaygınlaşma hızını azaltan en büyük etken batarya teknolojisinin henüz fosil yakıtların sağladığı menzil değerlerini sağlayamamasıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar sürmektedir. Ancak çevreci bir teknoloji olan elektrikli araç, kavram olarak ele alındığında enerjiyi ideal kullanan, verimi çok yüksek bir sistem olmalıdır. Bu nedenle elektrikli araç kavramı üzerinde yapılan araştırma çalışmaları yalnızca batarya teknolojisi konusunda değil, daha hafif, az kayıplı ve enerjiyi ideal kullanan araçlar geliştirmek üzerine de yapılmaktadır. Enerjinin ideal kullanımı ve araçların verimini artırılması üzerine yapılan çalışmalar içerisinde enerji geri kazanımlı frenleme en önemli uygulamalardandır. Hibrit ve tam elektrik tahrikli araçların elektrikli fren sistemleri üzerine yapılan uygulamalar [8, 9] ve çalışmalar incelendiğinde, frenleme yöntemi olarak enerji geri kazanımlı frenlemenin bütün araçlarda kullanıldığı ve bu yöntem üzerine geliştirme ve iyileştirmenin devam ettiği görülmektedir.

Frenleme esnasında aracın devinim enerjisi üzerinden alınan enerji incelediğinde; konu ile ilgili yapılmış olan önceki çalışmalarda elde edilen veriler Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Sürüş Çevrimi Karakteristikleri ve Enerji Tüketimi Verileri [10].

Sürüş Çevrimi	FTP75 Urban	LA92	US06	New York	ECE15
Maksimum Hız (km/h)	86,4	107,2	128,5	44,6	120
Ortalama Hız (km/h)	27,9	39,4	77,4	12,2	49,8
Çevrim Başına Gidilen Yol (km)	10,63	15,7	12,8	1,9	7,95
Sürüşte Kullanılan Enerji (kWh/çevrim)	1,1288	2,3559	2,2655	0,296	0,9691
Sürüşte Kullanılan Enerji (kWh/km)	1,1062	0,15	0,1769	0,1555	0,1219
Frenlemede Çevreye Yayılan Enerji (kWh/çevrim)	0,6254	1,3666	0,9229	0,2425	0,3303
Frenlemede Çevreye Yayılan Enerji (kWh/km)	0,0589	0,087	0,0721	0,1274	0,0416
Frenlemede Çevreye Yayılan Enerjinin Sürüşte Kullanılan Enerjiye Oranı (%)	55,4	58,01	40,73	81,9	34,08

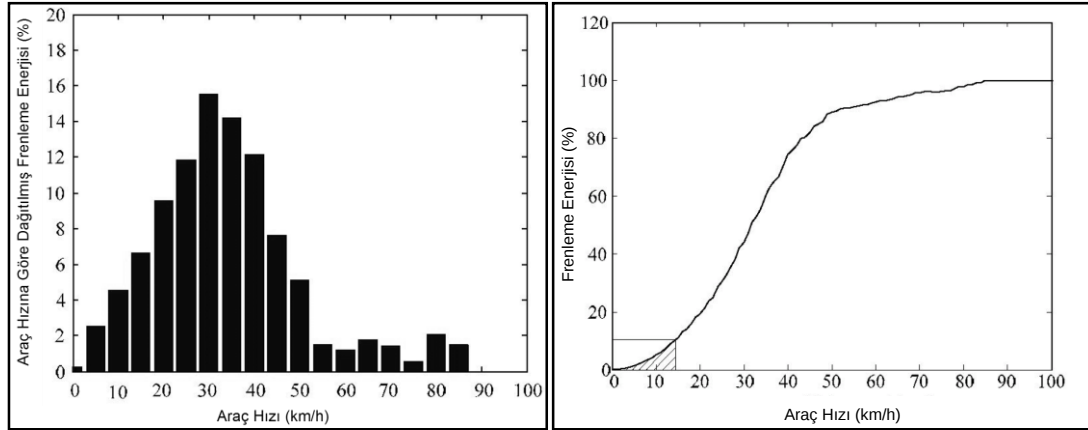
Bu ve benzer çalışmalarda görülen, New York ve benzer karakteristiğe sahip İstanbul gibi trafiğin yoğun olduğu şehirlerde, geri kazanımlı frenleme araç veriminin arttırılmasında çok önemli bir yere sahip olacaktır. Şekil 1.1’de hibrit elektrikli araç fonksiyonları ile ne miktarda yakıt tasarrufu olanağı getirdikleri gösterilmiştir. Bu verilere göre, en yüksek verim kazancının enerji geri kazanımlı frenlemeden elde edildiği görülmektedir [11, 12]. Tam elektrik tahrikli bir araç için yapılmış çalışmada [13] ise, elektrikli aracın geri kazanımlı frenlemeden elde ettiği enerji sayesinde bir şarjda %16 daha fazla yol yaptığı görülmüştür. Tüm bu veriler incelendiğinde, Çizelge 1.1’de gösterilen frenleme enerjilerinin çok az bir kısmının uygulamada geri kazanıldığı görülmektedir.



Şekil 1.1 : Paralel Hibrit Fonksiyonlarına Göre Yakıt Tasarrufu Olanakları [11].

Enerji geri kazanımlı frenlemenin karakteristiği incelendiğinde, belirli hızların altında geri kazanımlı frenleme enerjisinin sınırlı olduğu görülür. Ayrıca, bu hızlarda elektrik makinesinin frenleme esnasında batarya gruplarını şarj edebilecek ters elektromotor kuvvetini (EMK) oluşturması da zordur. Bu nedenle uygulanan paralel frenleme sisteminde belirli hızların üzerinde enerji geri kazanımlı frenleme yapılmakta, belirli hızın altında ise araçların mekanik fren sistemi devreye girmektedir. Şekil 1.2’de FTP75 çevriminde 15km/h’ın altında frenleme enerjisinin toplam frenleme enerjisinin %11’i seviyesinde olduğu görülebilir. New York çevrimi gibi yoğun şehir içi sürüşlerde bu oran %21 seviyelerine çıkmaktadır [10]. Özellikle tek dişli oranı ile aktarma sağlanan elektrikli araçlarda bu düşük hızlar geri kazanımlı frenleme için

yeterli EMK oluşmasına imkân veremeyecek ve bu hızlarda elektrikli frenleme olamayacaktır.



Şekil 1.2 : FTP75 Çevrimi için Frenleme Enerjisinin Araç Hızı ile Bağlantısı [10].

Frenlemeden geri kazanılan enerjinin veriminin düşmesinde ikinci bir unsur da elektrikli araçların yapısıdır. Araçlar genel olarak ön ya da arkadaki iki tekerlek üzerinden sürülürler. Bu nedenle, yalnız sürüş olan tekerleklerde enerji geri kazanımlı frenleme yapmak mümkündür. Ön-arka fren kuvveti dağılımının iyi tanımlanması ile daha verimli bir elektrikselsel frenleme elde edilebilir [14]. Frenleme kuvvetlerinin dağılımı incelendiğinde, idealde yaklaşık %60 ön fren, %40 arka fren gücüne ihtiyaç olduğu görülmektedir [10]. Bu da dolayısıyla önden çekişli bir elektrikli araçta tüm toplam frenleme enerjisinin %60'ının geri kazanımlı frenleme ile elde edilebileceği anlamına gelir. İncelenen çalışmalarda enerji geri kazanımlı frenleme sistemlerinin ön ve arka mekanik frenleri ayrı kontrol edebilen akıllı sistemlerle uygulandığı görülmüştür [15].

Burada anlatılan konulardan da görüldüğü üzere, elektrikli araçların enerji geri kazanımlı frenleme ile önemli bir miktarda enerji tasarrufu olanaklıdır. Bunun yanı sıra, klasik İYM'lu araçlarda mevcut hidrolik fren sistemlerinde kullanılan disk, tambur ve kaliper gibi parçalar, frenleme enerjisini dağıttıklarından aşınma gibi sorunlarla karşı karşıya kalırlar ve yenilenmeleri gerekir. Elektrikselsel frenleme ile bu enerji ilgili mekanik parçaların üzerinden alındığı için bu parçaların güvenilirlik ve ömürleri artar. Bu nedenle elektrikselsel frenleme alanının en geniş aralığı kapsamalı önemlidir.

Mevcut durumda ele alınması önemli konulardan biri de, elektrikli araçların önemli unsurlarından biri olan batarya ya da daha geniş kapsamla elektrikselsel enerji depolama

sistemleridir. Mevcutta en öne çıkan batarya tipi lityum iyon, lityum polimer ve lityum fosfatlı bataryalardır. Bu bataryalar enerji ve güç yoğunlukları yüksek bataryalardır. Çizelge 1.2’de lityum bataryalar ile ilgili yapılmış özgün bir ürün araştırması görülmektedir. Bu çizelgeden de görüleceği üzere yeni teknoloji lityumlu bataryalarda akım sağlayabilme/soğurabilme özellikleri oldukça gelişmiştir, örneğin Firma 3’ün sağladığı 6Ah’lık ürün 750A ile deşarj olabilmektedir ve ultrakapasitör sistemleri ile rekabet eder düzeylere yaklaşmıştır. Bu özelliklerine rağmen lityum bataryaların fazla şarj ve fazla deşarj durumlarında ömürlerinin azaldığı, hatta belli seviyenin altında deşarj olduktan sonra tekrar şarj olmalarının olanaksız olduğu bilinmektedir [16, 17].

Çizelge 1.2 : Lityum İyon Batarya Verileri.

<i>Firma</i>	<i>Firma 1</i>		<i>Firma 2</i>	<i>Firma 3</i>		
Kapasite	90 Ah	160 Ah	10 Ah	6Ah	45 Ah	41 Ah
Maks. Deşarj Akımı	270 A	3C	120 A	750A	100A	150 A
Darbe Akımı	900 A	10C	140 A	1100A	250A	300 A
Maks. Şarj Akımı	270 A	3C	30 A	-	-	-
Spesifik Enerji (Wh/kg)	-	-	80	-	149	136
Enerji Yoğunluğu (Wh/l)	-	-	170	-	313	285
Spesifik Güç (W/kg)	-	-	600	-	664	794
Güç Yoğunluğu (W/l)	-	-	1230	-	1392	1667
Ömür (%80'e kadar)	2000	2000	<3000	5000	3500	3000
Maks. Çalışma Sıcaklığı	75°C	75°C	45°C	55°C	55°C	55°C
Min. Çalışma Sıcaklığı	-25°C	-25°C	-10°C	-60°C	-40°C	-40°C
Ağırlık	3.2 kg	5.6 kg	0.36 kg	0.35kg	1 kg	1 kg
Nominal Gerilim	~3.4 V	~3.4 V	3.2 V	3.65 V	3.6 V	3.6 V
Boyut	L220x W145x D61	L279x W182x D71	L171xR38	L173x D35	L222x D55	L222x D55

Elektrikli aracın frenlemesi konusunda, bataryalar haricinde araç üzerinde başka etkin parçalar da vardır. Frenleme sistemi tasarlanırken, araç üzerinde bulunan bu parçalar da kullanılabilir. Bu parçalar üretici ve modellerine göre değişiklik gösterse de örnek bir üretici [18] için şunlar bulunmaktadır:

- i. Fiziksel Bileşenler – ABS (Anti Blokaj Sistemi)/ESP (Elektronik Kararlılık Programı): Aracın mevcut frenleme sisteminde ABS/ESP bulunur. Bu sistem aşağıdaki bileşenlerden oluşur.

- a. Hidrolik Kontrol Ünitesi

- i. Hidrolik devreyi oluşturan, her tekerlek için basınç ayarlayıcı valfler
 - ii. Akümülatörler/Sönümleyiciler
 - iii. Pompa motoru
 - iv. Hidrolik ara yüzler
- b. Kontrol elektroniği
- c. Tekerlek Hız Sensörleri
- d. Basınç Sensörü
- e. Savrulma oranı/Yanal İvmelenme Sensörleri
- f. Direksiyon Açısı Sensörü
- ii. Fonksiyonel Bileşenler – ABS/ESP ile Bağlantılı Fonksiyonlar
 - a. EBD (Elektronik Fren Dağılımı) Fonksiyonu
 - b. ABS (Anti Blok Frenleme) Fonksiyonu
 - c. Savrulma Kontrolü/Doğrusal Kararlılık
 - d. Çekiş Kontrolü
- iii. Diğer Bileşenler: Frenleme sisteminde yapılacak değişikliklere bağlı olarak ek bazı sistemlerin de tanımlanması gerekebilir. Bunlardan bazıları fren pedalı simülatörü (elektrikli frenlemeden dolayı eksilecek pedal basınç hissi – frenleme kuvveti ilişkisinin sağlanabilmesi için), frenleme göstergeleri ve diğer kol, düğme vb. sistemler olabilir.

Tezin kapsamındaki elektrikli araç başlığında birçok tasarım projesi mevcuttur. Bunlar arasında birçoğunun ortak özelliği araçların öncelikle modelleme ve benzetim çalışmaları ile kullanılacak bileşenlerin büyüklüklerinin belirlenmesi şeklindedir [12] [16, 17, 19]. Araç tekerlek yükleri yine bu modelleme ve benzetim çalışmaları ile görülebilir.

Çeşitli çalışmalarda ön ve arka tekerleklerin yüklenme oranlarına göre normalize yükleri tahmin edilmesi ile optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmüştür [20, 21]. Bu çalışmalardan bazıları gürbüz (robust) kontrol [22, 23] gibi tanımlı kontrol yöntemlerini kullanırken, bazısında ise yapay sinir ağı, genetik algoritma [14] ya da

bulanık mantık [24] gibi akıllı kontrol sistemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar optimizasyon parametreleri olarak aracın frenleme anında doğrusal eksenindeki yük dağılımından yola çıkar ve sürüş olan tekerleklerdeki normalize kuvvetten uygulanabilecek fren kuvveti seviyesini ayarlarlar. Sürüş olan tekerleklerde mekanik ve elektriksel frenlemenin paylaşımı ile ilgili de çalışmalar vardır.

1.3 Bilimsel Katkıların İrdelenmesi

Literatür araştırması esnasında, elektrikli taşıtlarda elektrikle frenleme üzerine yapılan çalışmaların geri kazanımlı frenlemenin verimini ve işlevselliğini artırma üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Bu tezde ortaya konacak bilimsel katkının, farklı elektriksel frenleme yöntemlerini bir araya getirerek, doğru bir çalışma algoritması ile bir elektrikli aracın frenlenmesini sağlayacak şekilde düzenlenmesinin mümkün olduğunun gösterilmesi üzerine olacağı öngörülmüştür. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar ile geliştirilen algoritmanın işlevselliği gösterilmiştir. Konu ile ilgili bir konferans bildirisi ve bir de ulusal hakemli dergi yayını yapılmıştır [25, 26].

Tez çalışmaları süresince literatüre eklenen, benzer konularda yapılan çalışmalar incelenmeye devam edilmiş ve tezin takip adımlarının belirlenmesine katkı sağlanmaya çalışılmıştır. İncelenen kaynaklardan bazıları tez içerisinde bahsi geçen konuları destekler niteliktedir. Bir kısmı da, yine tez içerisinde bahsedilen, ancak kapsam içerisine alınmamış konulardadır. Özellikle bu tip konular, bu tez kapsamında yapılan katkının gösterilmesinde ve ileriki adımlarının geliştirilmesinde önem arz edecektir.

1.3.1 Kontrol sistemleri başlığında tezin yeri

Bu tezde bulanık mantık kontrolcüsüyle yapılan optimizasyona benzer bazı diğer çalışmalar mevcuttur. Örneğin, [27] kaynağında, geri kazanımlı frenlenmenin iyileştirilmesi için bir bulanık mantık kontrolcüsü kullanılmıştır. Bu çalışmada giriş işaretleri olarak şarj durumu ve gerekli fren kuvveti girdileri kullanılarak geri kazanımlı frenlemeye ilişkin frenleme kuvvetinin yüzde değeri belirlenir. Ancak bu çalışmada yalnız geri kazanımlı frenleme için bir kuvvet belirlenmekte, diğer frenleme sistemlerine ilişkin bir çalışma yapılmamaktadır. Ayrıca, giriş olarak, tezde ortaya konduğundan farklı olarak, araç hızı frenlemede bir giriş olarak kullanılmamaktadır ancak aynı grup [28] çalışmasında araç hızını da hesaba katan bir kontrolcü

geliştirmiştir. Burada da bu tezden farklı olarak elektriksel frenleme kuvvetinden ziyade toplam frenleme kuvvetinin içerisinde geri kazanımlı frenlemenin alması gereken oran hesaplanmıştır.

Frenleme kuvvetinin ön ve arka tekerlekler arasındaki dağılımına ilişkin durum, önceki çalışmalarda bahsedilmiştir. Ancak, araç dinamiği konuları ile ilgili olan bu kavram, tez kapsamına alınmamıştır. Literatüre bakıldığında, ön ve arka tekerlekler ile mekanik ve geri kazanımlı fren dağılımı konularında çeşitli çalışmalar olduğu görülür. Örneğin, [29] çalışmasında, frenleme kuvvetini ön arka tekerlekler ve mekanik ve geri kazanımlı fren kaynakları arasında dağıtan bir sistem anlatılmıştır. Diğer bir çalışmada [30], ECE regülasyonlarından yola çıkarak mekanik ve geri kazanımlı frenleme sistemleri arasında yük paylaşımını iyileştirmiştir. Yine diğer bir çalışmada [31] bir bulanık mantık kontrolcü ile gaz pedalı pozisyonu ve pozisyonun değişim hızı kullanılarak aracın hızlanma ve frenlemesi ile frenlemenin ön ve arka tekerlekler üzerinde paylaşımı tek pedal üzerinden çalışılmıştır. Bu çalışmada ve benzer bazı çalışmalarda [32], özellikle mekanik fren ara yüzleri kullanılmadan, sadece gaz pedalı üzerinden bir frenleme yaptırıldığı için, mekanik etki kapsam dışındadır ve tam elektrikli bir frenleme mümkün olmaktadır.

Bunlar haricinde, mekanik fren ile elektriksel fren arasındaki güç paylaşımının kontrolü üzerinde çalışmalar mevcuttur. Örneğin [33] çalışmasında, güç paylaşımı için model kestirimci bir kontrol sistemi tasarlanmış ve özellikle moment harmanlama esnasındaki geçici (*transient*) tepkileri konusunda başarılı sonuçlar alınmıştır. Bir diğer çalışmada [34], ön ve arka tekerleklerin ideal dağıtım eğrisi, ECE regülasyonu ve tekerlek kilit noktaları üzerinden sınırlama yapılarak bir frenleme stratejisi belirlenmiştir. Aynı ekip, bir diğer çalışmada [35], genetik algoritma ile dağılım iyileştirilmesine çalışmıştır. Diğer bir çalışmada da [36], ani frenlemede ihtiyaç duyulacak yüksek frenleme kuvvetlerinin elektrik ve mekanik kaynaklar arasında farklı topolojilerde nasıl paylaşıldığı incelenmiştir.

Bu kısımda bahsi geçen çalışmalar ve benzerleri incelendiğinde, tezin önerdiği, mekanik fren ihtiyacını dışarda bırakan, araç hızı, batarya şarj durumu ile fren oranını girdi olarak kullanan, yalnız elektrikli frenleme yöntemleri arasında fren talebini paylaştıran bulanık mantık tabanlı kontrol algoritmasının bilimsel açıdan da özgün olduğu görülmektedir.

1.3.2 Araç dinamiğinin iyileştirilmesi başlığında tezin yeri

Elektriksel frenleme kaynağının araç üzerine eklenmesi ile kullanılan fren yöntemi sayısı mekanik ve elektrikli fren olmak üzere ikiye çıkmaktadır. Üstelik elektriksel frenlemenin, genellikle ön ya da arka tekerlekler üzerinde olması, araç dinamiği açısından çözülmesi gereken problemler doğurur. Bu problemlerin detayları bu çalışma dâhilinde belirlenmişti. Ancak çalışma kapsamında araç doğrusal dinamikleri haricinde, özellikle yanal dinamiklerin ve kayma (*slip*) dinamiklerinin iyileştirilmesi, daha çok otomotiv ve makine mühendisliği başlıkları olduğu için incelenmedi. Her halükarda, bu konuyla ilgili, literatürde yapılmış çeşitli çalışmalara rastlanmıştır.

Elektrikli frenleme üzerinde ABS, ESP vb. şasi güvenlik fonksiyonlarının uygulanmadığından bahsedilmiştir. [37] kaynağında ayrı ayrı kontrol edilen elektrik motorları ile sürülen elektrikli araçlarda ABS ve çekiş kontrol fonksiyonları üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırma, özellikle kontrol yöntemleri ve topolojilerin incelenmesi açısından iyi bir çalışma olarak öne çıkmaktadır. ABS ile ilgili [38] kaynağında, yinelemeli öğrenen bir algoritma ile bir melez (*hibrit*) elektrikli araçta elektrik makinesi ile bu şasi fonksiyonunun gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Konu ile yapılan başarılı bir çalışmada da [37] doğrudan hız ve kayma kontrolü yapılarak, arka tekerlekleri süren iki ayrı elektrik makinesini ile bir elektrikli aracın ABS fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

Konu ile ilgili yapılan bir diğer ilginç çalışma da [39], tekerlek içi doğrudan sürüşlü bir fırçasız DA makinesi (FDAM) kullanılarak sensörsüz ABS sistemi geliştirmek üzerinedir. Burada, FDAM üzerindeki ters elektromotor kuvveti dalgacık sinyal analizleri ile incelenerek aracın doğrusal kaymaya başladığı noktalar bulunmakta ve ABS fonksiyonları etkinleştirilmektedir.

Bilindiği üzere kayma, çok düşük sürtünme katsayısı olan karlı, buzlu, yağmurlu vb. durumdaki yollarda daha fazla olur ve tekerleklerin kilitlenmesi ihtimali artar. Ön ve arka tekerleklerden ayrı ayrı sürülen araç üzerinde yapılan bir çalışmada [40], düşük sürtünme katsayılı yolda, hem doğrusal hem de yanal dinamik kontrolü üzerinde bir frenleme stratejisi geliştirilmiştir.

Tekerlek içi motor, araç dinamiği üzerinde yeni uygulama şekillerinin de gelişmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, optimal moment kontrol yöntemi ile hızlanma ve yavaşlama kontrol edilerek doğrusal ve yanal dinamiklerinde iyileşmeler sağlanan

alışmalar vardır [41]. Yine farklı tekerleklerin ayrı ayrı tahrik edildiği bazı uygulamalarda da [42] optimal moment dağılımı yöntemi ile dinamikte iyileşmeler sağlandığı görölmektedir.

Tez ile önerilen tam elektrikli frenleme, üzerinde elektriksel tahrik olan tekerleklerde uygulanmaktadır. Yalnız ön ya da arka tekerleklerden sürüşlü elektrikli araçlarda bu durumun araç dinamiği açısından sorun yaratacağı öngörülmektedir. Tezin çıktılarının bu anlamda sunduğu yalnız elektrik ile frenleme durumunda araç dinamiklerinin ne derecede izin vereceğı mutlaka incelenmelidir. Ancak, dört tekerlekten çekişli araçlarda, ya da raylı taşıtlarda, yöntemin bu hali ile yapılacak uygulamaların sorun yaratmayabileceğı öngörülebilir.

1.3.3 Güç elektroniğı başlığında tezin yeri

Tez çalışması, uygulama için bir senkron DA/DA çevirici önermektedir. Tezde kullanılan bu topolojinin, önerilen algoritmaların uygulamaya konması, özellikle geri kazanımlı frenlemenin çalışma aralığının arttırılması ve çift yönlü enerji akışı ile hem frenleme hem de sürüş esnasında kullanılması sebebiyle etkin bir çözüm olduğu gösterilmiştir. Çeşitli diğerk çalışmalarda da bir çift yönlü DA/DA çevirici kullanıldığı görölmektedir. Genel olarak bu çalışmalarda öne çıkan, DA/DA çeviricinin frenleme etkin aralığını arttırdığı yönündedir [43]. İdeal durumda, iki yönlü enerji akışını kontrollü bir şekilde sağlayacak farklı uygulamaların da bulunması söz konusudur.

İncelenen çalışmalar arasında öne çıkan bir çalışmada [44], yalnız motor eviricisinin anahtarlarını kullanarak bir yükselten/indiren DA/DA çevirici ile ilgili fonksiyonellik sağlanmış, fazladan anahtar kullanılmamıştır. Benzer bir çalışma da yine bir hafif elektrikli araç için [13] görölmüştür. Bir diğerk çalışmada [45] da ultrakapasitör kullanan bir sistem de bulunmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron makineler (SMSM) üzerinde de 6 adımlı komütasyon kontrolü ve alan yönelimli kontrol (*FOC – Field Oriented Control*) yöntemleri ile [46], ayrıca seri uyarmalı DC makinelerin da geri kazanımlı frenlemesi [47] adına yapılan uygulamalar mevcuttur. Bir diğerk göze çarpan çalışma [48] da yine SMSM üzerinde ultrakapasitör ve batarya sistemlerinin birleşiminden oluşan bir hibrit enerji depolama önerisi sunmaktadır. Genel olarak ultrakapasitörlü sistemlerin verimi üzerine de çalışmalar vardır [49].

İncelenen çalışmalardan bir diğerkinde [50] bir FDAM üzerinde bir bulanık mantık kontrolcü tarafından hesaplanan fren momentinin, diğerk bir PID kontrolcü ile sabit bir

fren momenti üretimi için yöntem anlatılmıştır. Özellikle bulanık mantık kontrolcünün yavaş kaldığı durumlarda, kurulan PID kontrolcü doğru DGM değerini üretmek için çalışmaktadır.

Tezde kullanılan senkron DA/DA çevirici, tezin ana çıktısı olan kontrol sisteminin uygulanması için özgün bir çözüm sunmaktadır. Ancak, sistem mühendisliği açısından bakıldığında optimal bir çözüm, sistemdeki mevcut aktif ve pasif elemanları kullanarak fazladan maliyet getirmez. Bu nedenle, bu bölümde anlatılan değişik topolojiler üzerine tez sonrasında çalışmalar yapılarak sistemin daha da sadeleştirilmesi mümkün görünmektedir.

1.3.4 Diğer başlıklarla tezin ilişkisi

Tezin kapsamında incelenen elektrikli araç ve elektrikli frenleme kavramları çevresinde yapılan farklı ve alternatif başlıklarda da yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Tezin önerdiği dinamik frenleme ile paralel olarak, aracın fren enerjisi bir direnç üzerinde harcandığında ortaya çıkacak olan ısı enerjisinin aracın verimini arttırdığını gösteren bir çalışma [51] bulunmaktadır. Bu çalışmaya göre, aracın fren direnci üzerinde oluşan ısı, soğuk koşullarda elektrikli araç çalıştırıldığında bataryalardan talep edilen enerjiyi %12 oranında düşürebilmektedir. Bu çalışma, özellikle tezde direnç üzerinde kaybolduğu varsayılan enerjinin ikincil bir kullanımla araç verimini daha da arttırdığını göstermekte, tezin önerdiği TEF yönteminin, global olarak bakıldığında verimini arttırabileceğini göstermektedir ve bu açıdan önemlidir.

Enerji geri kazanımlı frenlemenin performansının incelenmesi üzerine deneysel çalışmalar da vardır [52, 53]. Bunlardan [53], Rotterdam’da çalışmakta olan iki araç üzerinde yapılan gözlemlerde %20’yi aşan verim artışlarının geri kazanımlı frenleme ile mümkün olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, özellikle tezde bahsedilen çok dur kalk olan ortamlarda geri kazanımlı frenlemenin ne kadar elzem olduğunu desteklemektedir. Yine başka bir ölçüm çalışmasında [54], geri kazanımlı frenin getirisi, yüksek frenleme oranlarında performans ve verimin artması ile en iyi frenleme karışımının belirlenmesi için çalışmalar yapılması gerekliliği görülmektedir.

Tez çalışması esnasında göze çarpan bir unsur, elektrikli aracın düşük hızlarda kötü bir geri kazanımlı frenleme göstermesiydi. Yapılan araştırmalarda görülen çalışmalarda, enerji geri kazanımlı frenlemenin bir otomatik vites ile berber ele alındığında [55, 56] veriminin artabileceğidir. Ancak burada, dikkat edilmesi gereken,

otomatik vites üzerinde kaybolacak enerji ile bu şekilde fazladan kazanılacak enerji karşılaştırıldığında, otomatik vites ünitesinin araç üzerine getireceği fazladan maliyetlerin kabul edilebilir ölçülerde olması gerektiğidir.

Frenleme sistemlerinin güvenli olması gerekir. Tezin kapsamında bahsi geçen ancak kapsama dâhil edilmemiş hata tanı koyma, güvenlik unsurları içerisindedir. İncelemelerde tanı koyma üzerine çalışmaya [57] da rastlanmıştır. Bu çalışmada geri kazanımı frenleme için veri tabanlı bir hata tanıma süreci tanımlanmıştır.

2. ELEKTRİKLİ ARACIN GÜÇ AKIŞININ MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Frenleme performansının incelenebilmesi için araç üzerinde bataryadan tekerleklerle ve oradan tekrar bataryalara kadar olan güç akışının modellenmesi gerekir. Tez kapsamında geliştirilmesi planlanan kontrolcünün performans analizleri bu model üzerinde yapılacaktır. Kontrolcüye girdi sağlayacak bazı konularda model üzerinde yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen veriler kullanılacaktır.

Elektrikli araçta, klasik içten yanmalı motorlu araçlara benzer şekilde, elektrik motorunun fiziksel olarak bağlı olduğu 2 ya da 4 tekerlek olabilir. 2 tekerlekten sürüşün olduğu durumda ön ya da arka tekerleklerin sürüşte kullanımı mümkündür. Frenleme esnasında bu tekerlekler kullanılacağından frenleme karakteristikleri hangi tekerleklerin enerjili olduğundan etkilenecektir. Bunun için aracın tekerleklerine etkiyen normalize yüklerin geliştirilecek model üzerindeki benzetim çalışmaları ile incelenmesi gerekir. Burada ortaya çıkacak sınırlamalar, iyi bir frenleme için enerjili tekerleklerde yapılabilecek maksimum fren oranını belirlemede kullanılacaktır.

Frenlemeden beklenen performans duruş süresi ile ölçülebilir. Aracın, üzerindeki devinim enerjisine karşın, beklenen duruş sürelerini elde etmek için ne miktarda fren gücüne ihtiyacı olduğu yine benzetim çalışmaları ile görülebilir. Kullanılan elektrik makinesinin ve bataryaların bu enerjiyi üretme ve soğurma performansları benzetim çalışmaları ile incelenebilir. Ayrıca, istenilen frenleme performansı için ihtiyaç duyulacak akım-gerilim seviyeleri de benzetim çalışmaları ile incelenebilir.

Bu kapsamda önceki çalışmalardan [12, 17, 19, 58] yola çıkarak Matlab®-Simulink® programları kullanılarak bir araç modeli geliştirilmiş ve doğrusal dinamikleri incelenmiştir. Bu çalışmada model olarak TOFAŞ'ta geliştirilen Doblo EV elektrikli araç kullanılmıştır. Bu aracın kullanılma nedeni tez ile paralel yürütülen SANTEZ projesi [59] kapsamında ortaya çıkacak yazılımın kullanılacağı araç olmasıdır. Performans beklentileri incelenirken yine bu araçtan yola çıkılacaktır.

2.1 Elektrikli Araç ve Bileşenlerinin Modellenmesi

Çizelge 2.1’de TOFAŞ’ta tasarlanan elektrikli aracın teknik verileri gösterilmiştir. Şekil 2.1’de ise herhangi eğimli bir yolda x yönünde hareket eden aracın doğrusal ekseninde üzerine etkiyen kuvvetler görülebilir. Doğrusal ekseninde kuvvetler dengesi kurulduğunda (2.1) denklemi elde edilir. Burada x konum, birinci türevi $\dot{x}$ hız, ikinci türevi $\ddot{x}$ ise ivmeyi simgelemektedir.

$$m \cdot \ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin(\theta) \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

F_{xf} Ön tekerleklerdeki doğrusal tekerlek kuvvetini

F_{xr} Arka tekerleklerdeki doğrusal tekerlek kuvvetini

F_{aero} Eşdeğer doğrusal aerodinamik sürüklenme kuvvetini

R_{xf} Ön tekerleklerdeki yuvarlanma direncini

R_{xr} Arka tekerleklerdeki yuvarlanma direncini

m Araç kütlesini

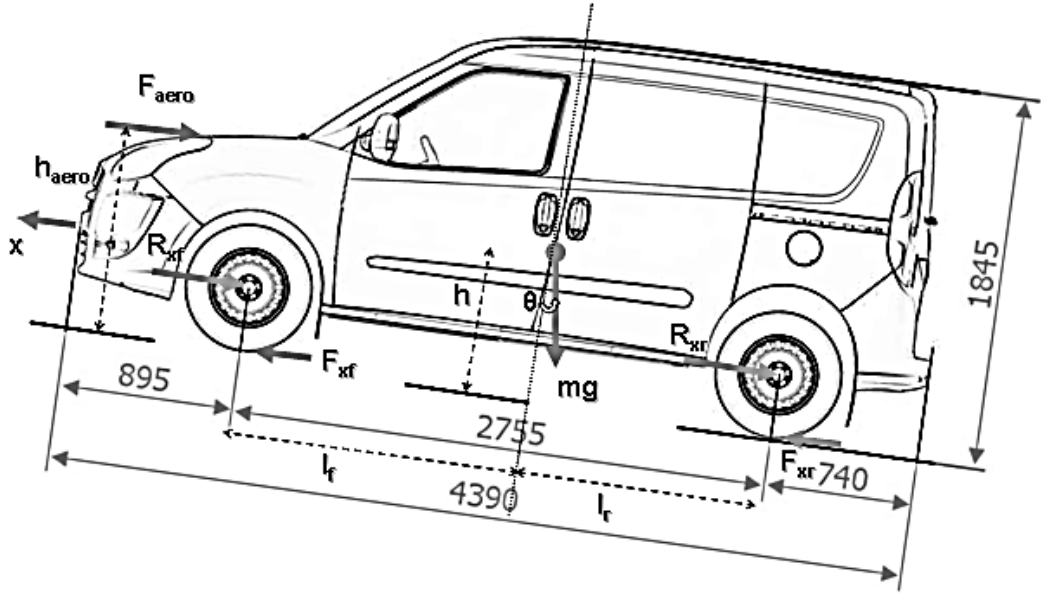
g Yerçekimi ivmesini

θ Aracın ilerlediği yolun eğimini

göstermektedir. Bu kuvvetlerin nasıl hesaplandığı bu bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

Çizelge 2.1 : Elektrikli Araç Verileri.

Araç Kütlesi	1600 kg
Ön Alan A_f	3,06 m ²
Aerodinamik Katsayısı C_x	0,3 (100 km/h hızda)
Motor Yerleşimi	Önde yerleşimli
Tekerlek Tipi	195/60 R16
Tekerlek Normal Yüğü f_r	~11 kg/ton
Test yükü: Araç Ağırlığı + 700 kg	2300 kg
Azami Hız	110 km/h
İvmelenme 0–50 km/h	~5 s (Yüksek Güç Modunda)
İvmelenme 0–100 km/h	~11 s (Yüksek Güç Modunda)
%20 Eğimde Performansı	Normal güç modunda durur halden harekete geçebilir ve 50 km/h hızı koruyabilir
Menzil	140 km



Şekil 2.1 : x Yönünde Hareket Eden Araca Etkiyen Doğrusal Kuvvetler.

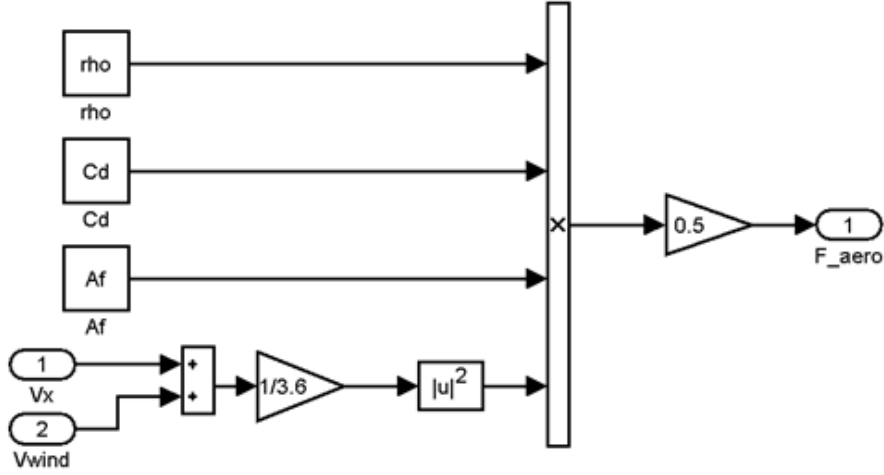
2.1.1 Aerodinamik sürüklenme kuvveti

Araç üzerinde hava sürtünmesi ile oluşan harekete ters yönde olan kuvvettir. Bu kuvvet aracın ön yüzey izdüşüm alanının ve gövde geometrisinin etkisi ile oluştuğundan doğrusal modelde yerden h_{aero} olarak gösterilebilecek bir noktada olduğu düşünülebilir. Hesaplama denklemi (2.2)'de gösterilmiştir. Bu denklemde kullanılan, elektrikli araca ilişkin parametreler Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Bu parametrelerden aracın ön yüzey izdüşümü alanı ve aerodinamik sürüklenme katsayısı TOFAŞ Ar-Ge'de sayısal analiz çalışmaları ile hesaplanmıştır. Rüzgâr kuvvetini hesaplamak için geliştirilen Matlab®-Simulink® modeli Şekil 2.2'de görülebilir.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot (V_x + V_{wind})^2 \quad (2.2)$$

Çizelge 2.2 : Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti Parametreleri.

Kısaltma	Tanım	Değeri ve Birimi
ρ	Havanın Kütlesel Yoğunluğu (rho)	1,225 kg/m ³
C_d	Aerodinamik Sürüklenme Katsayısı	0,302
A_f	Aracın Ön Yüzey İzdüşümü Alanı	3,058 m ²
V_x	Aracın Doğrusal Hızı	m/s
V_{wind}	Rüzgârın Hızı	m/s



Şekil 2.2 : Aerodinamik Sürüklenme Kuvveti Simulink® Modeli.

2.1.2 Doğrusal tekerlek kuvvetleri

Tekerlek yuvarlanma direnci hesaplanırken aracın her bir tekerlekteki normal yükü hesaplanmalıdır. Bu normal yük, tekerlek ile yol arasındaki sürtünme katsayısı ile çarpıldığında tekerleğin üzerindeki yuvarlanma direnci bulunur.

Her bir tekerleğin üzerine düşen normal yükü hesaplamak için, Şekil 2.1’de görülen araçta, sırasıyla arka tekerlek temas noktasına ve ön tekerlek temas noktasına göre moment alındığında ön tekerlek ve arka tekerlek için normal kuvvetler (F_{zf} ve F_{zr}) şu şekilde bulunur:

$$F_{zf} = \frac{-F_{aero} h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh \sin(\theta) + mgl_r \cos(\theta)}{l_f + l_r} \quad (2.3)$$

$$F_{zr} = \frac{F_{aero} h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh \sin(\theta) + mgl_r \cos(\theta)}{l_f + l_r} \quad (2.4)$$

Bu normal kuvvetler her tekerleğe ait yuvarlanma direnci katsayısı ile çarpıldığında o tekerlek üzerinde bulunan yük kuvveti (2.5) denklemindeki gibi bulunmuş olur. Üzerinde çalışılan araç için üreticiden elde edilmiş, (2.3-5) denklemlerinde kullanılan katsayılar Çizelge 2.3’de görülebilir:

$$R_{xf} + R_{rf} = c_w \cdot (F_{zf} + F_{zr}) \quad (2.5)$$

Çizelge 2.3 : Doğrusal Tekerlek Kuvveti Parametreleri.

Kısaltma	Tanım	Değeri ve Birimi
c_w	Tekerlek Yuvarlanma Direnci Katsayısı	11 kg/ton
m	Araç Kütlesi (Tam Yükle)	2300 kg
h	Ağırlık Merkezinin Yerden Yüksekliği	0,59 m
h_{aero}	Aerodinamik kuvvetin ön yüzeydeki merkez kabul edilebilecek noktanın yerden yüksekliği	0,6 m
l_f	Ağırlık merkezinin ön tekerin yol ile temas noktasına olan uzaklığı	1,704 m
l_r	Ağırlık merkezinin arka tekerin yol ile temas noktasına olan uzaklığı	1,051 m

(2.3-5) denklemlerinde yapılmış bazı kabuller bulunmaktadır. Bu kabullerde, bu aşamada aracın çekiş kontrolü ve ABS gibi fonksiyonlar üzerine çalışılmayacağı için doğrusal kaymayı içeren bir önerme sunulmamıştır. Bu nedenle birinci varsayım yol ve lastik arasındaki bağıl kayma doğrusal yönde tüm yükleri ve tahrikleri iletebilecek şekildedir. Diğer bir ihmal de; detaylı sanal analiz çalışmaları gerektiren aerodinamik kuvvetleri ile ilgilidir. Bu çalışmada aerodinamik kuvvetlerin yalnızca doğrusal yönde olduğu, aracı ağırlaştırıcı ya da hafifletici bir etkisinin bulunmadığı durum için hesap yapılmıştır. Bu denklemlerde tanımlanan matematiksel ifadeler için geliştirilen Matlab®-Simulink® modelleri Şekil 2.3'te görülebilir.

2.1.3 Tekerlek dinamikleri

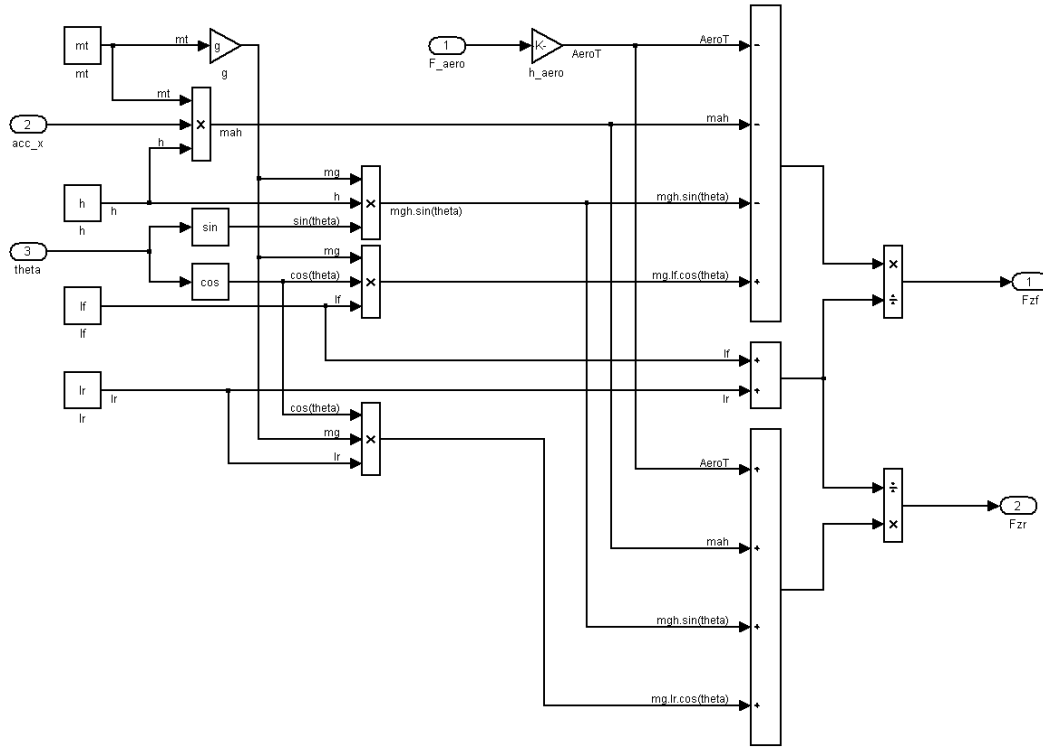
Tekerlek üzerindeki yükler hesaplandıktan sonra, aracı ilerletecek olan yüklerin de hesaplanması gerekir. Modellenen araçta tekerleğe kadar gelen tahrik momenti tahrik gören tekerlekte:

$$J_{wf} \dot{\omega}_{wf} = T_{wheel} - r_{eff-f} F_{xf} \quad (2.6)$$

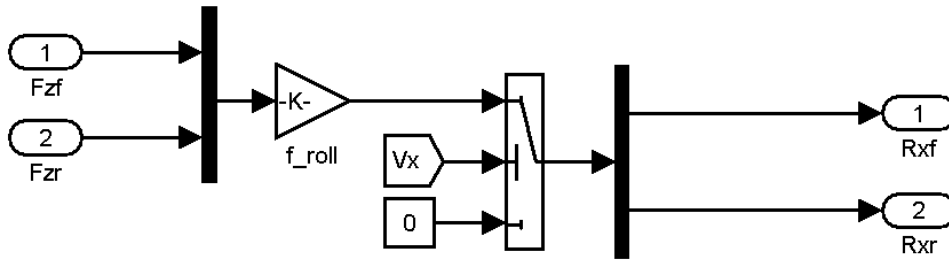
üzerinde tahrik momenti bulunmayan tekerlekte ise;

$$J_{wr} \dot{\omega}_{wr} = -r_{eff-r} F_{xr} \quad (2.7)$$

şeklinde hesaplanabilir.



(a)



(b)

Şekil 2.3 : (a) Normalize Tekerlek Yükleri (b) Yuvarlanma Direnci.

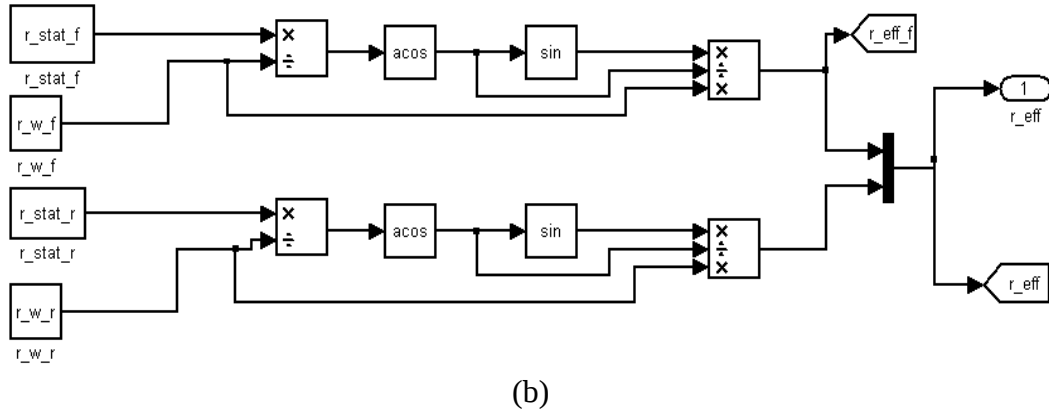
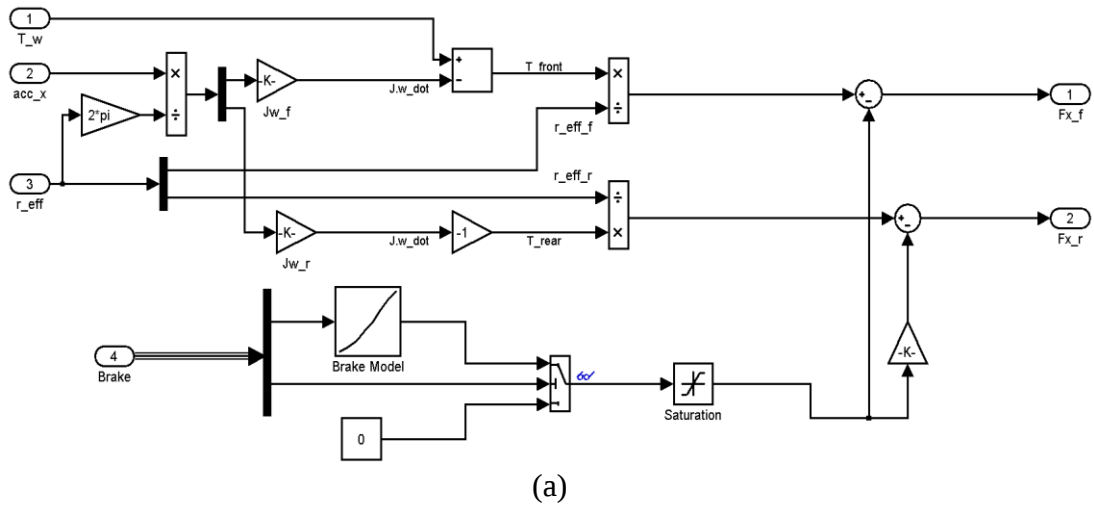
Burada modeli kurulan araç önden çekişli olduğu için ön tekerleklerde bir tekerlek momenti değeri hesaba katılmıştır. Etkin tekerlek yarıçapları ön ve arka için farklı bulunmuştur. Etkin yarıçapları hesaplamak için (2.8) denkleminde yararlanılır.

$$r_{eff} = \frac{\sin \left[\cos^{-1} \left(\frac{r_{stat}}{r_w} \right) \right]}{\cos^{-1} \left(\frac{r_{stat}}{r_w} \right)} \cdot r_w \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde kullanılan parametreler ve açıklamaları Çizelge 2.4’te gösterilmiştir. Şekil 2.4’te ise bu bölümde bahsedilen denklemlerin Matlab®-Simulink® ortamında ifade edilişleri görülebilir.

Çizelge 2.4 : Doğrusal Tekerlek Kuvveti Parametreleri.

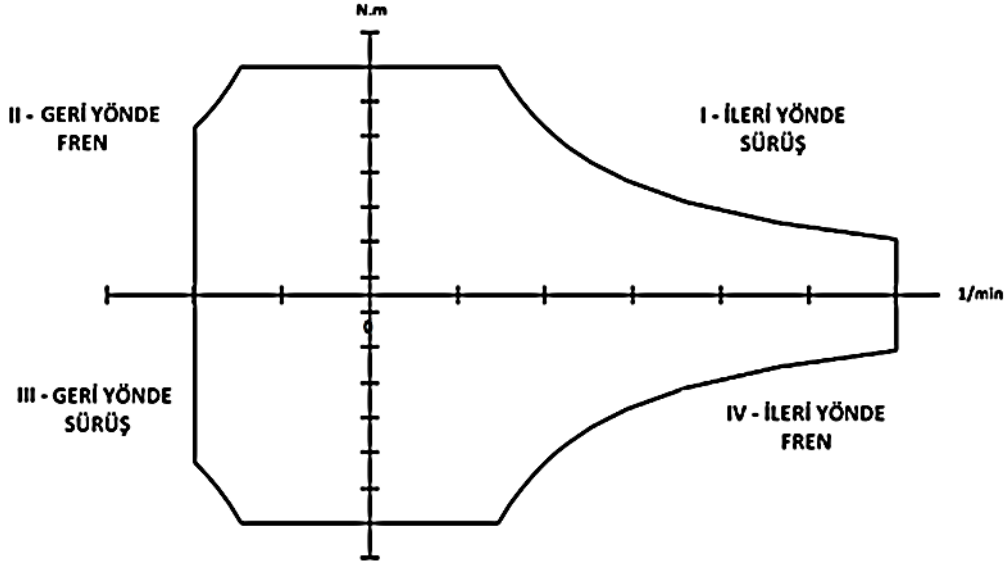
Kısaltma	Tanım	Değeri ve Birimi
J_{wf}	Ön Tekerlek + Aks Eylemsizlik Momenti	1,34 kg.m ²
J_{wr}	Arka Tekerlek Eylemsizlik Momenti	1,00 kg.m ²
r_w	Tekerlek Yarıçapı	0,3202 m
r_{stat}	Yüklü Durumda Tekerlek Yarıçapı	Ön: 0,3012 m Arka: 0,2975 m



Şekil 2.4 : (a) Doğrusal Tekerlek Kuvvetleri (b) Etkin Tekerlek Çapı.

2.1.4 Elektrikle sürüş

Yukarda bahsedilen ön tekerleklerdeki T_{wheel} momentinin bulunması için aracın tahrik unsuru olan elektrik makinesinin modeli gerekmektedir. Tasarımın başında, henüz belirlenmiş bir makine olmadığı için burada araçta istenilen özelliklerden yola çıkılarak Şekil 2.5’te görülen hız-moment karakteristiği zarfı oluşturulmuştur.



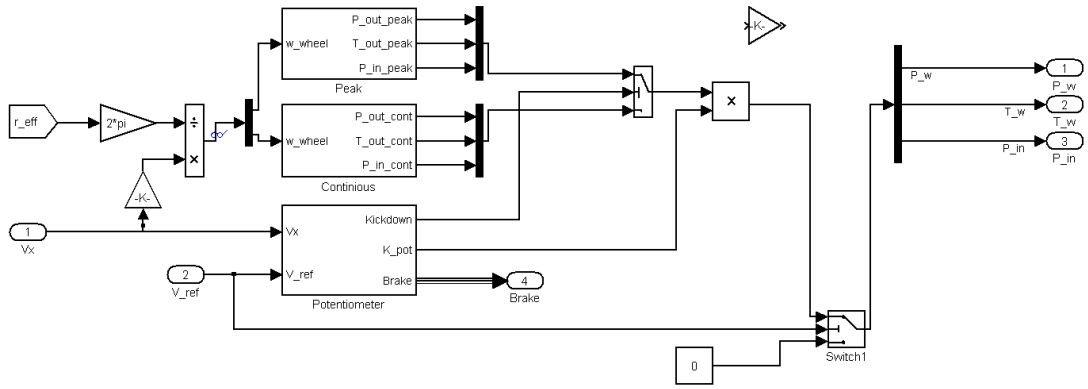
Şekil 2.5 : Elektrik Makinesi Hız – Moment Karakteristiği.

Buna göre, ideal bir sürekli mıknatıslı makinenin araçta sağlaması istenen kontrol aralıkları da tanımlanmış olur. I. Bölge'ye karşılık düşen aralık boyunca moment ve hız pozitif olduğundan araç motor çalışma gösterecektir. Motorun karakteristiği gereği belirli bir bölgede sabit moment üretilecek, daha sonra sabit güç bölgesinde çalışılacak, moment hız ile beraber azalacaktır. Geri giderken yapılacak bir frenleme II. Bölge'de tanımlanır. III. Bölge'de moment hareket ile aynı yönde ve geriye doğru olacağından araç geri gidecektir. Burada çıkılacak maksimum hız sınırlandırılacaktır (örn. 20 km/h). IV. Bölge ise hızın pozitif yönde ancak momentin negatif olduğu frenleme bölgesidir. Aracın tüm çalışması esnasında yapılacak kontrol ve iyileştirme çalışmaları bu bölgeler dâhilinde olacaktır.

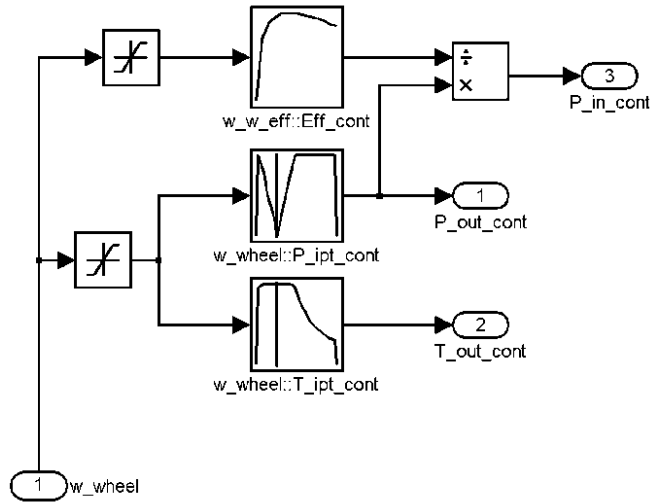
Bir başka öngörü de sistem tek dişli oranı üzerinden tahrik edildiğinden elektrik makinesinin iki fazda çalıştırılması yönünde olmuştur. Şekil 2.5'te belirlenen zarfın moment ve bunun karşılığı olan ($P = T \cdot \omega$) güç değerleri belirli bir çarpan ile çarpıldığında ortaya çıkan tepe güç ve moment zarfı da aracın kısa sürelerde istediği bir performanstır. Piyasada mevcut olan elektrik makineleri incelendiğinde 30-60s arasında nominalde verdiğinin iki katına kadar moment ve güç üretimine izin verdiği görülmüştür. Bu bilgilerden yola çıkarak, Şekil 2.6'da görülen elektrik makinesi modeli kurulmuştur.

Şekil 2.6'da görülen "Peak" ve "Continuous" olarak tanımlanmış iki blokta elektrik makinesinin bu yüksek güç ve sürekli iki modunu temsil eden hız-moment ve hız-güç değerleri ile mevcuttaki verim eğrilerinden yola çıkarak yaklaşık bir güç-verim eğrisi

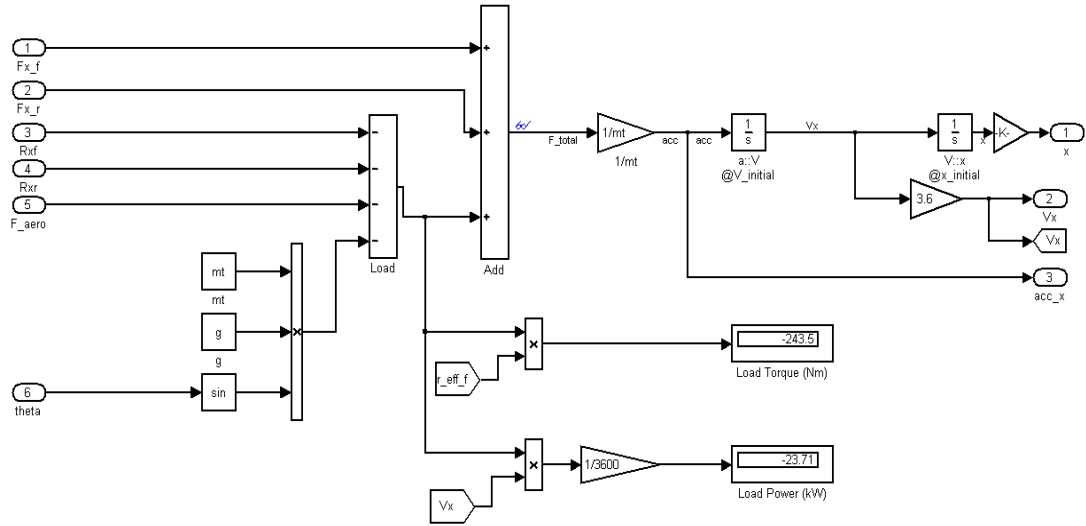
tanımlanmıştır. “*Potentiometer*” bloğu altında referans hız ile gerçek hız karşılaştırılarak aracın ne miktarda moment ve güç ihtiyacı olduğu bilgisi K_{pot} bilgisi ile benzetimde belirlenir. Ayrıca, “*Peak*” ve “*Continuous*” modları arasındaki geçiş de “*Kickdown*” komutu ile belirlenir. Burada dikkat edilen bir unsur da yüksek güç (*peak*) durumunda motorun yalnızca belirlenen kısa süre boyunca (örn. 30 s) çalışmasına izin verileceğidir. Elektrikli tahrik modülünün içerisinde bulunan bu blokların detayı Şekil 2.7-9’da gösterilmiştir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilen eğrilerin aracın tekerleklerine indirgenmiş değerlerdir. Buna göre verim eğrileri de öngörülürken tahrik sisteminin elektrik girişi olan evirici girişinden tekerleklerde çıkışa kadar olan, evirici, elektrik makinesi ve aktarma organlarının verimi hesaba katılmıştır.



Şekil 2.6 : Elektrikli Tahrik Modülü.



Şekil 2.7 : Elektrik Tahrik Sistemi Sürekli Durum Modeli.

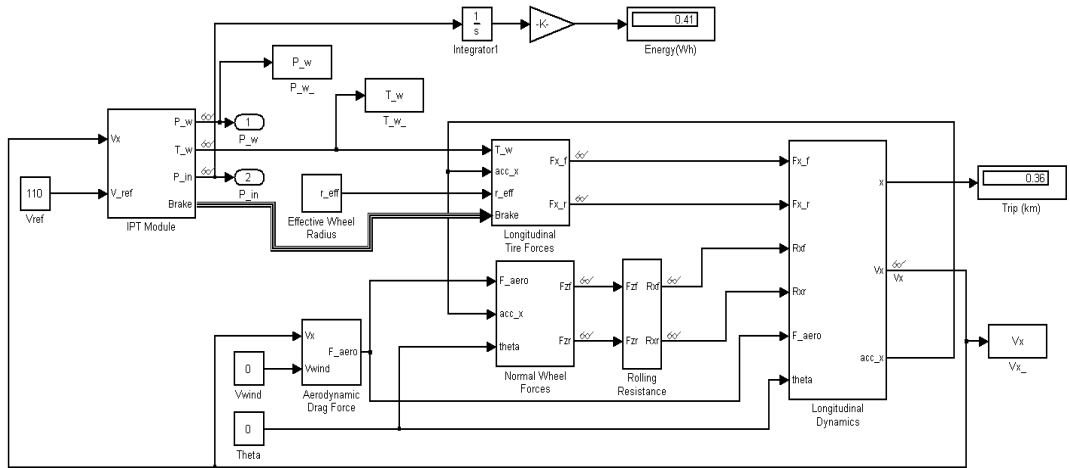


Şekil 2.10 : Transmisyon Modeli.

$$\ddot{x} = \frac{F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin(\theta)}{m} \Rightarrow \dot{x} = V_x \Rightarrow x \quad (2.9)$$

2.1.6 Araç modeli

Önceki bölümlerde detayları verilen bileşenlerin modelleri kullanılarak araç modeli Şekil 2.11’de görüldüğü şekilde kurulmuştur. Benzetimde esneklik sağlayabilmek için Simulink® modelinin içerisinde bütün değişkenler parametrik olarak tanımlanmış, araç ile ilgili Çizelge 2.1’de verilen değerler Çizelge 2.5’te görülen parametre dosyasında m.file formatında Matlab®’da yazılmıştır.



Şekil 2.11 : Genel Araç Modeli.

Çizelge 2.5 : Parametre Giriş Dosyası.

```
mt=2293; %total mass (kg)* 1270kg 1.3 - 1370 LWB - 750kg payload - 1000 LWB
h=0.591; %height of CoG (m)*
lf=1.704; %lf=1.489; %projected distance between front axle and CoG (m)*
lr=1.051; %lr=1.266; %projected distance between rear axle and CoG (m)*
g=9.82; %gravitational constant (m/s^2)*

h_aero=0.6; %height of contact point of the aerodynamical force (m)

f_roll=11/1000; %rolling resistance of the wheel N/kg*

%if front and rear different, both should be entered separately as follows

%f_roll_f    %front wheel rolling resistance
%f_roll_r    %rear wheel rolling resistance

rho=1.225; %mass air density (kg/m^3)
Cd=0.302; %aerodynamic drag coefficient*
Af=3.058 %Af=3.048; %frontal area (m^2)*

%r_stat=0.3012; %static radius of the wheel due to the tire elasticity(m)
%r_w=0.3202; %radius of the wheel (m)*

%if front and rear different, both should be entered separately as follows

r_stat_f=0.3012;    %front wheel static radius
r_w_f=0.3202;    %front wheel radius
r_stat_r=0.2975; %rear wheel static radius
r_w_r=0.3202; %rear wheel radius

Jw_f=0.67*2; %front wheel inertia (from differential)
Jw_r=0.5*2; %rear wheel inertia (from differential)

r_kd=1.1; %Kickdown (triggering peak power & torque mode) occurs when Vx/V_ref < this value (percent)
t_kd=330; %Max. time for the kickdown (s)

x_initial=0;
V_initial=0; %divide by 3.6
```

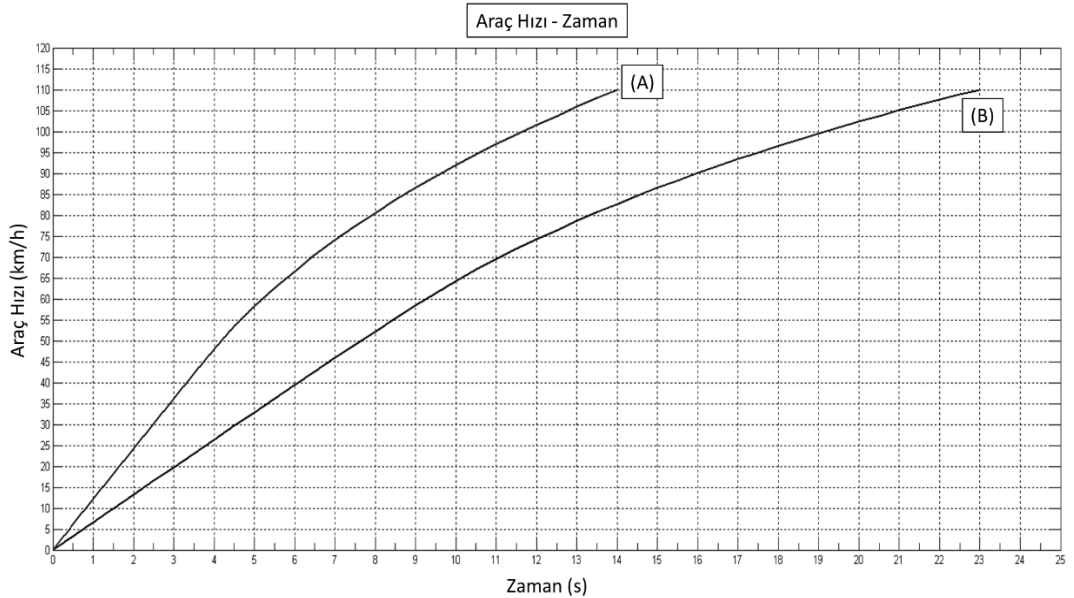
Modelleme çalışmalarında Matlab®-Simulink® programı kullanılarak elektrikli aracı istenilen performansta hareket ettirebilmek için aşağıda belirlenen sınır koşullarına göre hesaplamalar yapılmıştır. Bütün bu hesaplamalarda aracın tam yüklü olduğu varsayılır.

En Yüksek Hız: Aracın ulaşması istenen maksimum hızı 110 km/h olarak tanımlanmıştır. Buna göre rüzgâr ve tekerlek sürtünmesi gibi yüklerin benzetimi yapıldığında aracın bu hıza çıkmak için ihtiyaç duyduğu en yüksek moment ve güç değerleri bulunur. Yapılan benzetimlerin sonucunda, tanımlanan 110 km/h hızda aracın yük momenti 244 Nm, yük kuvveti 24 kW olarak görülmüştür.

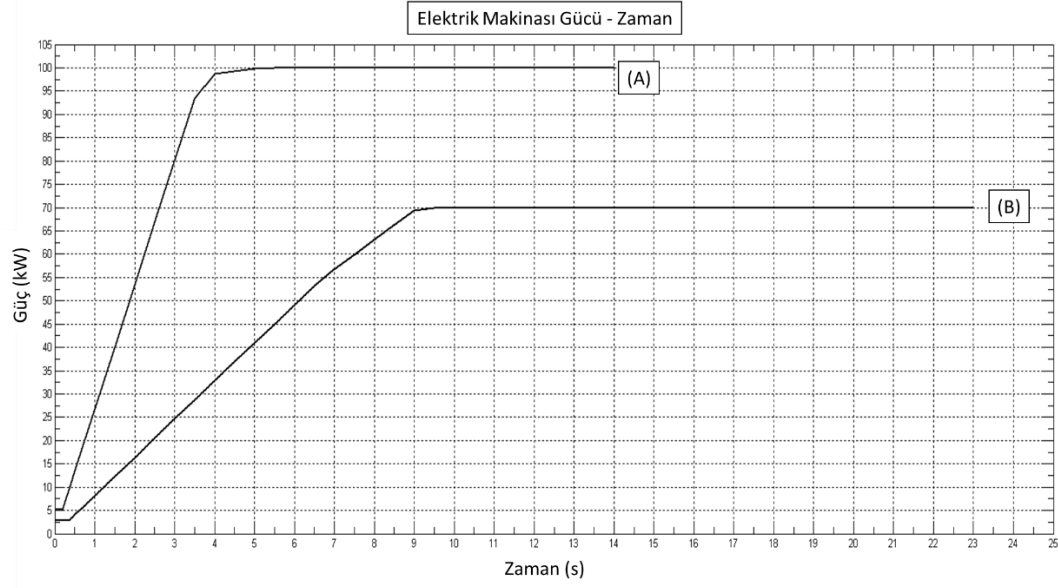
Yokuş Tırmanma Performansı: Firmanın standartlarına göre, aracın %20 eğimli yokuşa 50 km/h hızla girip hareketine devam edebilmesi, ayrıca makul bir sürede durur halden hareketli hale geçmesi beklenmektedir. Benzetimlerde tam yüklü aracın %20 eğimde 50 km/h hızda yük momenti tekerleğe indirgendiğinde 1496 Nm, yük gücü ise 67 kW olduğu görülmüştür. Uygulanacak elektrik makinesi sürekli halde bu değerleri verebilmelidir.

İvmelenme: Aracın 100km/h hıza hızlanma süresinin hedeflerde 11s civarında olması beklenmektedir. Buna göre aracın belirlenen sürede hızlanabilmesi için Şekil 1.5'te belirlenen zarfta moment ve güç değerleri uygulanması gerekmektedir. Buna göre 11s civarında 0-100km/h hızlanmasını gerçekleştirebilecek bir araç için tekerleğe indirgenmiş moment yüksek güç modunda en az 2500 Nm olmalıdır. Yine bu performansı yakalayabilecek elektrik makinesinin gücü yüksek güç modunda 100 kW olarak öngörülmüştür.

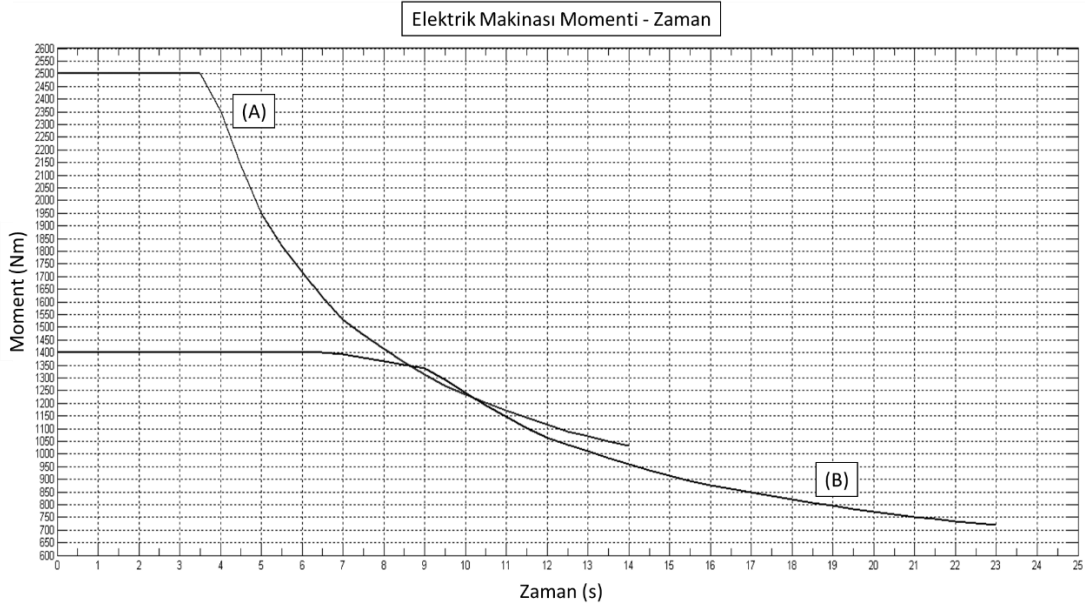
Bu verilere istinaden, karakteristikleri belirlenen elektrik makinesinin sürekli çalışmada maksimum gücü 70 kW tekerleğe indirgenmiş momenti 1500 Nm, yüksek güç çalışmada gücü 100 kW, tekerleğe indirgenmiş momenti 2500 Nm olmalıdır. Bu değerlerde çalıştırılan modelde araç hızlanma performansları Şekil 2.12-14'te görülebilir.



Şekil 2.12 : Araç Hızlanma: (A)Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.



Şekil 2.13 : Elk. Mak. Gücü: (A) Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.



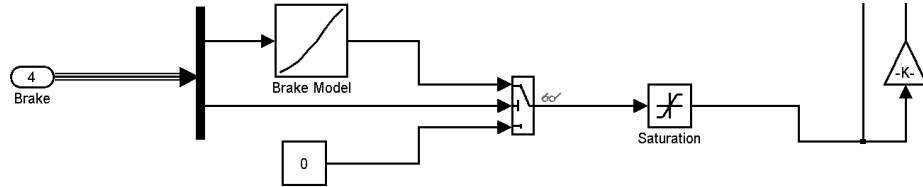
Şekil 2.14 : Elk. Mak. Momenti: (A) Yüksek Güçte (B) Sürekli Çalışmada.

2.2 Benzetimlerle Araç Doğrusal Dinamiklerinin İncelenmesi

Önceki bölümde anlatılan çalışmalarda elde edilen araç modeli üzerinde, çeşitli durumlar için araç doğrusal dinamikleri incelenmiştir. Bu model sayesinde, aracın ön ve arka tekerlekleri arasında hızlanma ve frenleme sırasında yük dağılımları gözlemlenmiş, aracın frenleme için gereken fren kuvvetleri hesaplanmıştır.

2.2.1 Frenleme kuvvetlerinin hesaplanması

Aracın kuru yol şartlarında 100-0 km/h duruş performansını 40 m içerisinde sağlaması beklenir. Bunun için model üzerinde fren kuvvetlerinin hesaplandığı Şekil 2.4-a'da gösterilen blok içerisinde Şekil 2.15'te gösterilen fren modeli oluşturulmuştur. Bu blok normalde mekanik frenlemeyi temsil etmektedir. Ancak, frenleme kuvvetlerinin hesaplanmasında çıkış noktası olarak kullanılacaktır.



Şekil 2.15 : Fren Modeli.

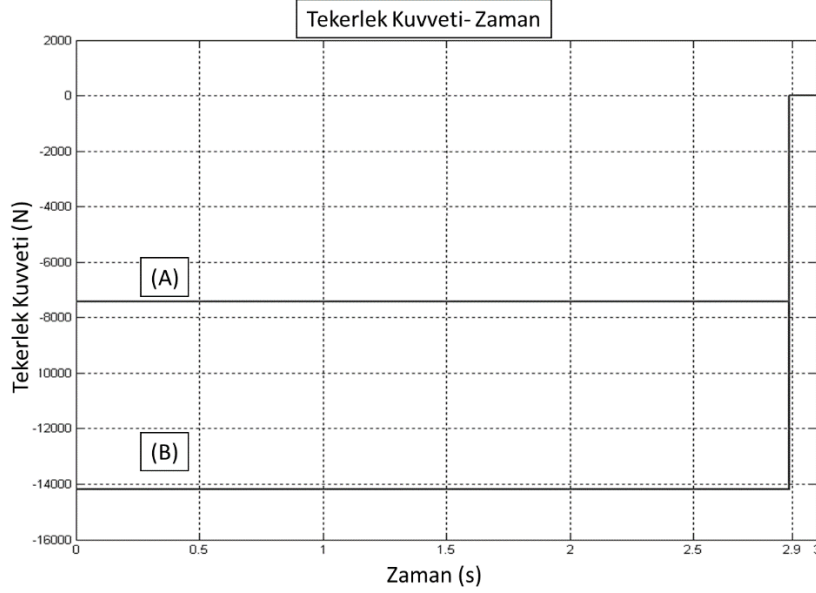
Bu modelde, elektrik makinesi kontrol bloğundan gelen fren işareti izlenir. Bu işaretin 0'dan farklı olması Şekil 2.15'teki fonksiyonu tetikler. Fren pedalının konumu "*Brake Model*" haritasına göre gerekli görülen frenleme kuvvetini belirler. Burada frenleme kuvvetinin en üst seviyesi doyma bloğu ile tanımlanır. Hesaplanan bu toplam fren kuvveti bu modelde ön ve arka tekerlekler arasında sabit oranda paylaştırılmıştır (bu model için %65 ön %35 arka tekerlekler).

Uygulamada aracın 100 km/h hızla ilerlerken duruşunu 40 m içerisinde tamamlaması hedeflenmiştir. Bunun için yapılan benzetim çalışmalarında Şekil 2.16'da görülen hız profili izlendiğinde aracın 40 m'de duracağı hesaplanmıştır. Bu duruşu sağlayabilmesi için geçen süre yaklaşık 2,9 s olacaktır.



Şekil 2.16 : 100-0 km/h 40 m Hız Profili.

Yapılan çeşitli benzetimler sonucunda aracın bu performansı sağlayabilmesi için Şekil 2.15’te gösterilen fren modelinde sağlanması gereken fren kuvveti toplamda yaklaşık 21,6 kN olarak hesaplanmıştır. Bahsedildiği üzere bu kuvvet frenleme esnasında ön tekerleklerde 14,18 kN, arka tekerleklerde 7,44 kN olarak dağılır. Frenleme esnasında tekerlek kuvvetleri Şekil 2.17’de görülebilir.

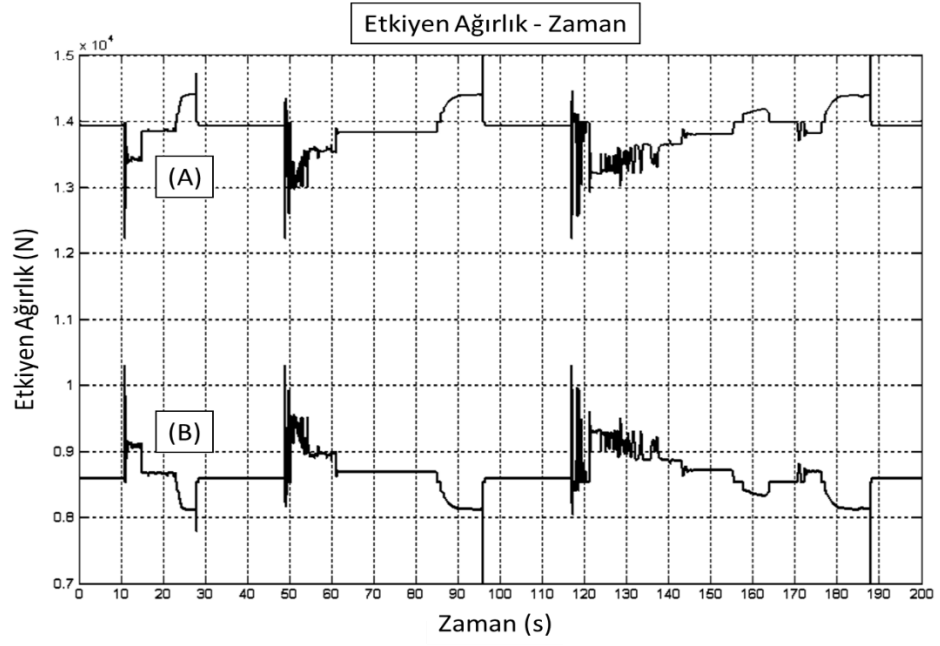


Şekil 2.17 : Frenlemede (A) Arka – (B) Ön Tekerlek Kuvvetleri.

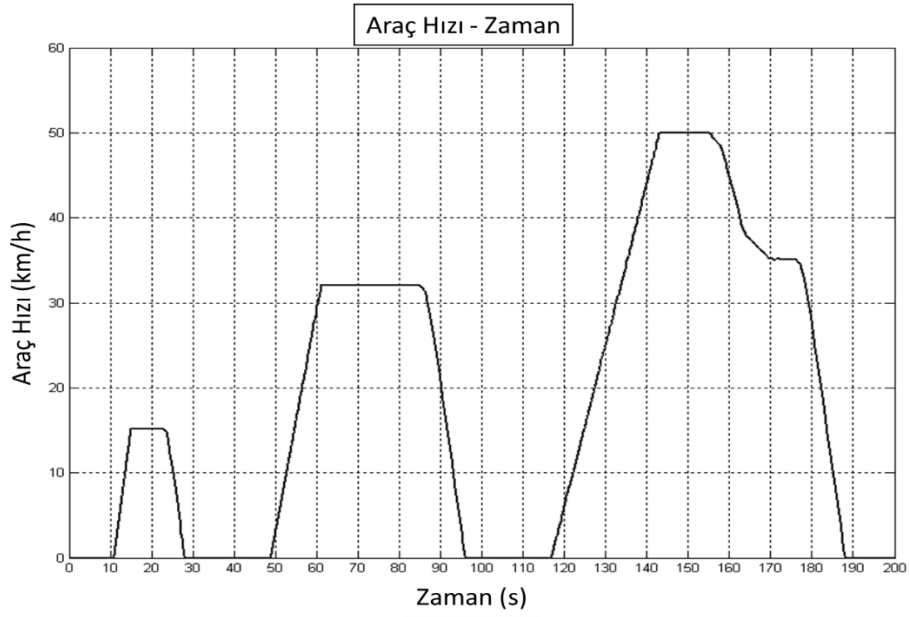
2.2.2 Tekerlek normal yüklerinin değişimi

Tekerlek normal yükleri, frenleme ve hızlanma esnasında aracın üzerine binen ivme nedeniyle ön ve arka tekerlekler arasında farklı oranlarda dağılır. Normal koşullardaki bir sürüşte görülebilecek değişimler Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Bu şekildeki veriler, araç Şekil 2.19’da görülen ECE (Avrupa Ekonomik Komisyonu) çevriminde koşutularak toplanmıştır. Burada görülen, aracın normal kullanım esnasında ön tekerleklerinde görülen ağırlık dağılımları 1500 kg ile 1250 kg arasında değişebilmektedir. En uç durum olan 40 m’de 100-0 km/h yavaşlaması incelendiğinde ise araç ağırlığının tekerlekler etkiyen miktarı, ön tekerlekler için 1860 kg, arka tekerlekler için 390 kg olarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalardan çıkan sonuca göre araç frenleme esnasında tekerlekler arası yük paylaşımında büyük farklar oluşmaktadır. Her tekere etkiyen ağırlık o tekerlekler uygulanan fren kuvvetinin de hesaplanmasında etkilidir. Bu bölümde hesaplanan tüm değerler, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde tekerlek yüklerine göre ön ve arka tekerleklerde frenleme ihtiyaçlarının belirlenmesinde kullanılacaktır.



Şekil 2.18 : ECE Çevriminde Tekerleklere Etkiyen Ağırlık: (A) Arka (B) Ön.



Şekil 2.19 : ECE Çevrimine İlişkin Araç Hızı – Zaman.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLARI FRENLEME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde elektrikli aracın frenlemesi esnasında kullanılacak elektrikli ve mekanik frenleme yöntemlerinden bahsedilecektir. Frenlemenin araç dinamik performansına olan etkileri üzerinde durulacaktır. Elektrikli frenleme yöntemlerinin sınırları incelenecek, algoritma için girdiler elde edilecektir.

Literatür araştırması esnasında da, elektrikli frenleme için üç farklı yöntem olduğu görülmüştür. Bunlardan ilki, enerji geri kazanımlı frenlemede aracın üzerinde bulunan hareket enerjisi, mevcut elektrik makinesi tarafından elektrik enerjisine daha sonra kullanılmak üzere çevrilir. Elektrikli araçların tam elektrikli frenlemesi için önerilen yöntemlere bakıldığında tüm frenleme teknikleri arasında araç verimini arttıran tek yöntem enerji geri kazanımlı frenlemedir. Diğer bir yöntem olan dinamik frenleme, verim artışı sağlamayacağından güvenlik unsurları paralelinde incelenmesi gereken bir yöntemdir. Son olarak, ters gerilimle frenlemede de enerji kullanımı söz konusu olduğundan güvenlik ve konfor unsurlarınca incelenecektir. Mekanik frenleme ise bilindiği üzere araçların üzerinde hâlihazırda bulunan hidrolik aktuatörler ve disk ya da tambur sisteminden oluşan fren sistemidir. Klasik İYM'lu araçlarda frenleme için tek bu sistem kullanılırken, geliştirilecek elektrikli frenleme sisteminde, araç durduğunda tekerlekleri kilitlemek gerekliliğinde olduğu gibi, gerekli olduğu durumlarda mekanik frenleme kullanılabilir.

3.1 Elektrikli Frenleme Yöntemlerinin Karakteristikleri

Elektrikli frenleme yöntemlerinin karakteristiklerini inceleyebilmek için basit olarak tekerlekten elektrik makinesine, oradan bataryaya kadar olan enerji akışının incelenmesi gerekir. Bilindiği üzere döner sistemlerde güç (3.1) denkleminde ifade edildiği gibi, moment ve açısal hızın çarpımına eşittir. Tekerleğe indirgenmiş bu güç değeri motor miline indirgendiğinde (3.2) denklemi elde edilir. Bu değer DC bara gücüne (3.3) denkleminde görüldüğü gibi orantılanabilir.

$$P_{tk}(t) = \omega_{tk}(t) \cdot \tau_{tk}(t) \quad (3.1)$$

$$P_{tk}(t) = \eta_{ak} \cdot P_{EM}(t) \quad (3.2)$$

$$P_{EM} = \eta_{EM} \cdot \eta_{ev} \cdot V_{DC} \cdot I_{DC} \quad (3.3)$$

Bu denklemlerde P_{tk} ; aracın tekerleklerine indirgenmiş gücü (Watt), ω_{tk} ; tekerlek hızı (1/s), τ_{tk} ; tekerlek momenti (N.m), η_{ak} ; aktarma organlarının verimi, P_{EM} ; elektrik makinesinin gücü (Watt), η_{EM} ; elektrik makinesinin verimi, η_{ev} ; sürücü devresinin verimi, V_{DC} ; bara gerilimi (V) ve I_{DC} ; bara akımıdır (A).

Denklem (3.4) ve (3.5)'te bir mıknatıslı DA makine için basitçe elektrik makinesinin hızı ile endüklenen gerilim arasındaki ilişki gösterilmiştir.

$$\omega = k_e \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

$$T = k_t \cdot i \quad (3.5)$$

Burada ω ; elektrik makinesi dönüş hızını, k_e ; endüvide endüklenen EMK ile elektrik makinesi hızı arasındaki oranı, ε ; EMK'ni, T ; elektrik makinesinin milindeki momenti, k_t ; endüvi akımı ile moment arasındaki oranı, i ; endüvi akımını göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken unsur elektrik makinesinin hızının gerilim ile momentinin ise akım ile orantılı olduğudur.

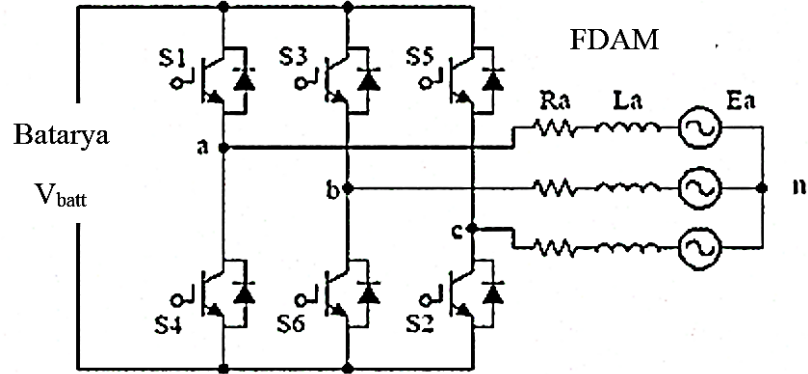
Bir fırçasız DA makinesi için endüklenen gerilim ile batarya arası şeması Şekil 3.1'de görülebilir. Buna göre sargı ve anahtarlarda kayıp olduğu ortadadır. Bataryalardan beslenen bir fırçasız DA makinesi için sürekli durumda geçerli koşullar 3.6 ve 3.7'de gösterilmiştir.

$$E_a - V_{bt} = I_{fr} \cdot (R_{bt} + R_{PP} + R_{SC}) \quad (3.6)$$

$$T = k_t \cdot I_{fr} = k_t \cdot \frac{E_a - V_{bt}}{R_{bt} + R_{PP} + R_{SC}} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki denklemlerde, E_a ; frenleme esnasında endüklenen gerilim, V_{bt} ; bataryanın frenleme anındaki uç gerilimi, I_{fr} ; fren akımı, R_{bt} ; bataryanın iç direnci, R_{pp} ; elektrik

makinesinin iki faz arası direnci; R_{SC} ; yarı iletkenlerin gerilim düşümleri ile ilişkili direnci, T ; frenlemede oluşan momenti göstermektedir.



Şekil 3.1 : Fırçasız DA Makinesi ve Sürücüsü Bağlantı Şeması [60].

3.1.1 Enerji geri kazanımlı frenleme karakteristiği

Enerji geri kazanımlı frenlemenin karakteristiği incelendiğinde, belirli hızların altında geri kazanımlı frenleme enerjisinin sınırlı olduğu görülür [25]. Geri kazanımlı frenlemenin yapılabilmesi için EMK'nin tüm gerilim düşümleri çıkarıldıktan sonra batarya geriliminden yüksek olması gerekir. Buna göre, geri kazanımlı frenleme için endüklenmesi gereken gerilim seviyesi (3.8) numaralı denklemde görülmektedir. Bu durum haricinde geri kazanımlı frenleme olamayacaktır.

$$E_a > V_{bt} + (R_{bt} + R_{PP} + R_{SC}) \cdot I_{fr} \quad (3.8)$$

Elektrikli aracın teorik olarak maksimum hızı batarya gerilimi oranlı da olsa frenleme esnasında gerilimin yükseltilerek bataryalara gönderilmesi mümkündür. Bu durumda dikkat edilmesi gereken; yükseltmeyi yapacak çeviricinin girişindeki akımın istenilen frenleme momenti seviyesini sağlayacak seviyede kalmasıdır.

Burada diğer bir sınırlayıcı unsur da bataryaların dolu olması durumudur. Her ne kadar istenilen akım seviyelerine ulaşılsa da bataryalar dolu olduklarında direnç olarak davranmaya başlar, sonunda ısınarak, yanar ya da patlarlar. Bataryalar, birer elektrokimyasal makineler oldukları için, bir tepki zamanları vardır. Bu tepki zamanları üzerlerine uygulanan ya da üzerlerinden çekilen akım ile doğrudan orantılıdır. Denklem (3.8)'de gösterilen I_{fr} akımı bataryanın kabul edebileceği maksimum akım değerini geçtiğinde de geri kazanımlı frenlemenin performansı sınırlanmaya başlar.

Çalışmada batarya ile ilgili sınırlandırıcı etkiler farklı bir çalışma konusu olduğundan detaylı olarak araştırılmamıştır. Tezin ilerleyen bölümlerinde tasarlanacak kontrol sisteminde ve tam elektrikli frenleme algoritmalarında da batarya üreticilerinin sağladığı verilerden yola çıkarak tasarımlar yapılacaktır. Ancak bu konuda, farklı batarya kimyaları ve reçeteleri ile sıcaklık, sistemin soğutma performansı ve iç direnç gibi etmenlerin de incelendiği farklı bir çalışma yapılması mümkündür.

3.1.2 Dinamik frenleme karakteristiği

Dinamik frenlemede enerji geri kazanımlı frenlemeden farklı olarak, bataryanın yerini bir R_{fr} direnci alır. Karakteristiğini ise (3.9) ve (3.10) numaralı denklemlerde görüldüğü şekilde ifade etmek mümkündür.

$$E_a = I_{fr} \cdot (R_{fr} + R_{PP} + R_{SC}) \quad (3.9)$$

$$T = k_t \cdot I_{fr} = k_t \cdot \frac{E_a}{R_{fr} + R_{PP} + R_{SC}} \quad (3.10)$$

Dinamik frenleme, herhangi bir hızda dolayısı ile uç geriliminde, yükselme ihtiyacı duymadan yapılabilir. Sınırlama, ihtiyaç duyulan frenleme momentinin yüksek, buna karşın araç hızının düşük olduğu durumlarda görülür. Dış direnç sıfır olsa (motor kısa devre edilse) dahi, özellikle eylemsizliği yüksek olan ağır sistemler durabilmek için yüksek momente (yüksek akım endükleme) ihtiyacı duyar. Burada da yükseltme yapılması mümkündür, yine fren momenti için gerekli akımın oluştuğundan emin olmak gereklidir. Özellikle düşük hızlarda istenilen akım değerlerine ulaşılama ihtimali artacaktır.

3.1.3 Ters akım/gerilim ile frenleme

Ters akımla/gerilimle frenleme yöntemi, hadde makinesi vb. yüksek eylemsizliği olan ancak çabuk durdurulması gereken sistemlerde mevcutta da kullanılmaktadır. Temel mantığı faz sekansını terse çevirerek ters yönde akım akmasını sağlayarak ve enerji harcayarak frenleme olmasını sağlamaktır [61]. Referans hız (gerilim) pozitif yönde iken, elektrik makinesinin negatif yönde motor gibi çalıştırılması durumu olarak da düşünülebilecek bu çalışmada ters yönde yüksek bir akım oluşur. Akım ve gerilimin referansları ters yönde olduğu için enerji yönü bataryadan makineye doğru olacak ancak frenleme gerçekleşecektir. Karakteristiği ise şu şekilde bulunabilir:

$$V_{ters} + E_a = I_{fr} \cdot (R_{PP} + R_{SC}) \quad (3.11)$$

$$T = k_t \cdot I_{fr} = k_t \cdot \frac{V_{ters} + E_a}{R_{PP} + R_{SC}} \quad (3.12)$$

Ters akımla frenleme sistemini tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken bir unsur, sistemin üzerinde hızla yükselecek bir akım oluşacağıdır. Elektronik bileşenlerin seçiminde buna dikkat etmek gerekecektir. Ayrıca sistem enerji harcayan bir sistem olduğu için çalışırken maliyetli olacağını unutmamak gerekir. Bu nedenlerle bu frenleme yöntemi diğer elektrikli frenleme yöntemlerini tamamlayıcı bir unsur olarak kullanılmalıdır.

3.2 Elektrikli Frenlemenin Sınırları

Elektrikli araçların yaygınlaşma hızını ve başarı olasılığını azaltan etkenlerden en önde geleni batarya teknolojisidir. Bu teknoloji henüz, fosil yakıtlar ile çalışan içten yanmalı motor teknolojisi ile rekabet edebilecek maliyete ve performansa ulaşamamıştır. Batarya teknolojisinin iyileştirilmesine yönelik, başta malzeme, kimya ve elektrik mühendisliği olmak üzere, çok çeşitli dallar bir araya gelerek çalışmalarını sürdürmektedir. Ancak çevreci bir teknoloji olan elektrikli araç kavramı bütün olarak ele alınmalı ve enerjiyi ideal kullanan, verimi çok yüksek bir sistem olmalıdır. Bu nedenle elektrikli araç kavramı üzerinde yapılan araştırma çalışmaları yalnızca batarya teknolojisi konusunda değil, daha hafif, az kayıplı ve enerjiyi ideal kullanan araçlar geliştirmek üzerine de yapılmaktadır.

Enerjinin ideal kullanımı ve araçların verimini artırılması üzerine yapılan çalışmalar içerisinde enerji geri kazanımlı frenleme en önemli uygulamalardandır. Elektrikli araçların fren sistemleri üzerine yapılan uygulamalar [8, 9] ve çalışmalar [10, 12, 20] incelendiğinde, frenleme yöntemi olarak enerji geri kazanımlı frenlemenin bütün araçlarda kullanıldığı ve bu yöntem üzerine geliştirme ve iyileştirmenin devam ettiği görülmektedir.

Literatür araştırması bölümünde de öne çıkan bir konu, araçların frenleme esnasında geri kazanım için mevcut olan devinim enerjisinin çok küçük bir miktarının geri kazanılabilmesidir. Bu bölümde bu farkın ve dolayısı ile de enerji geri kazanımlı frenlemenin sınırları incelenmiştir.

3.2.1 Motor ve generatör çalışma

Tezin kapsamı frenleme kontrolü ve tam elektrikli frenleme algoritmasının tanımlanması üzerine olduğu için, makine tipinden çok da bağılı olmadan, yalnız elektrikli frenlemeyi daha detaylı anlamak için, basitçe Şekil 3.1’de gösterilen fırçasız DA makinesinin çalışmasını incelemek faydalı olacaktır. Bu şekilde eşdeğer devresi gösterilen makine, hem motor hem de generatör olarak çalışabilir. Bu çalışma durumları arasındaki temel fark endüvi akımının yönüdür. Bu makineye 3 fazlı AA gerilimin doğru sıra ile ve rotorun pozisyonu ile uygun olarak uygulanması gerekir. Bu nedenle genelde bu tip makineler üç fazlı evirici ile sürülürler. Makinede bulunan Hall Etkisi duyargaları ile rotorun pozisyonu belirlenebilir. Bu duyargaların işaretleri sürücü kontrol devresi tarafından yorumlanarak doğru anahtarların doğru sıra ile açılması sağlanır. Normal bir DA motorundan farkı komütasyonun elektronik olması olduğu varsayılırsa, bir fırçasız DA motorunun gerilimi, motor çalışma esnasında aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E_a \quad (3.13)$$

$$P_{mot} = V_a \cdot i_a \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde, E_a ; elektromotor kuvveti, V_a ; endüvi gerilimi, i_a ; endüvi akımı, R_a ; endüvi eşdeğer direnci, L_a ; endüvi eşdeğer endüktansı; P_{mot} ; motor giriş gücünü göstermektedir.

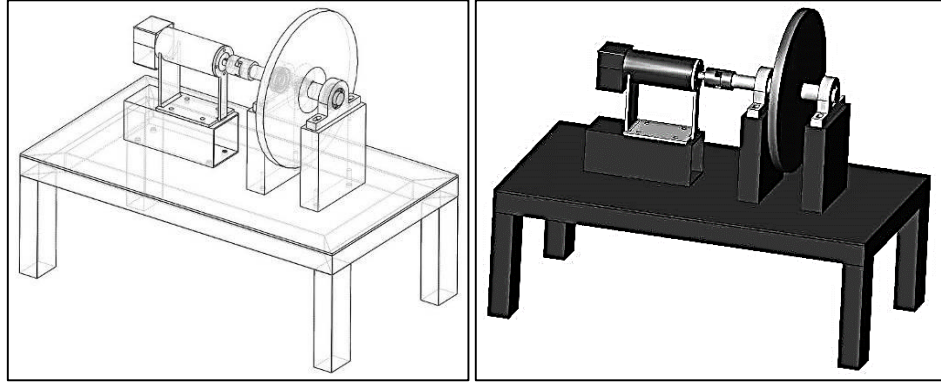
FDAM, generatör olarak çalıştığında ise, endüvi akımı yönünü değiştirir ve endüviden DC hatta doğru akmaya başlar. Bu durumda devre denklemi ve oluşan generatör gücü; P_{gen} , (3.15) ve (3.16)’da görülebilir. Burada gücün de negatif çıkması makineden kaynağa doğru olduğunu gösterir. Elektrikli frenleme düşünüldüğünde makineyi döndürecek olan aracın üzerindeki devinim enerjisi, enerjinin depolanacağı kaynak ise bataryalar olacaktır.

$$V_a = E_a - R_a \cdot i_a - L_a \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (3.15)$$

$$P_{gen} = -V_a \cdot i_a \quad (3.16)$$

3.2.2 Elektrikli frenleme yöntemlerinin sınırlarının deneylerle incelenmesi

İlk etapta frenleme karakteristiklerinin incelenmesi, sonrasında geliştirilecek frenleme algoritmalarının küçük ölçekli deneylerinin ve ilk kalibrasyonlarının yapılabilmesi için bir deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Düzenek, bir kaide üzerine yerleştirilmiş bir fırçasız DA makinesi ve onun döndürdüğü, bir metal diskten oluşmaktadır. Döner diskin eylemsizlik momenti harekette olan bir taşıtı temsil etmektedir. Tasarımları Şekil 3.2’de görülebilir. Şekil 3.3’de kurulu hali görülen deney düzeneğinde kullanılan bileşenler aşağıda verilmiştir. Kullanılan motorun teknik verileri ise Çizelge 3.1’de görülebilir.:



Şekil 3.2 : Deney Düzeneği Tasarımı.



Şekil 3.3 : Deney Düzeneği.

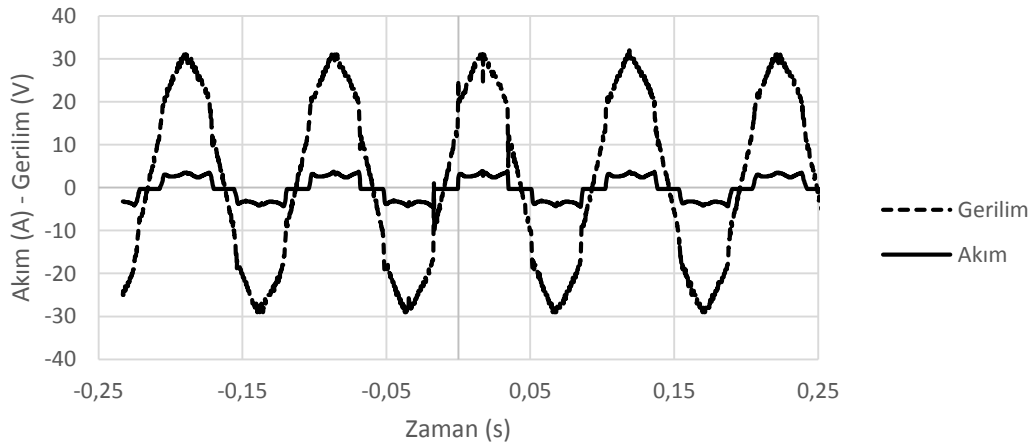
- i. Maxon EC60 Fırçasız DA Motoru (Şekil 3.3-a)
- ii. Yükleme için metal disk / kaplin (Şekil 3.3 –b)
- iii. Motor sürücü (Şekil 3.3 –c)
- iv. Osiloskop (Şekil 3.3 –d)

- v. Güç kaynağı (Şekil 3.3 –e)
- vi. Yükleme dirençleri ve ilgili anahtarlar (Şekil 3.3 –f)

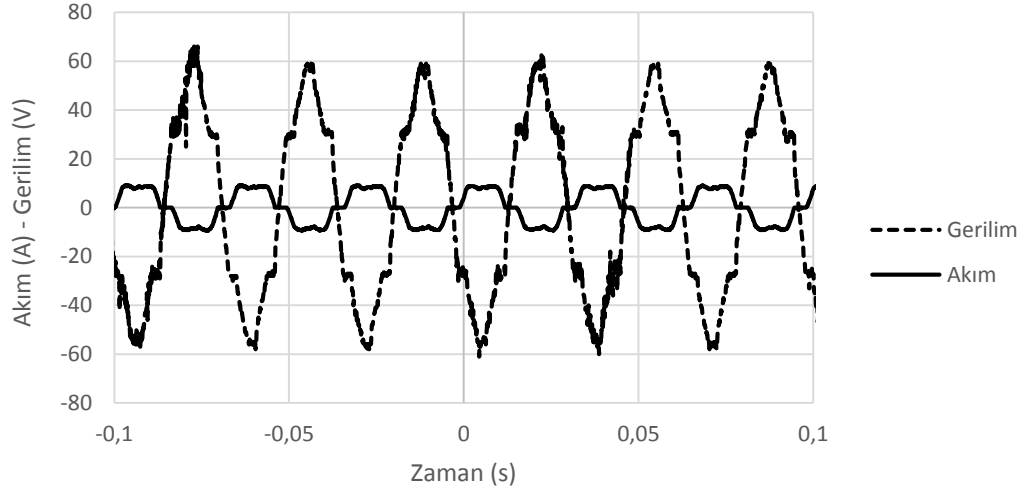
Çizelge 3.1 : Maxon EC60 Teknik Verileri.

#	Teknik Veri	Birim	Değer
1	Güç Değeri	W	400
2	Nominal Gerilim	Volt	48
3	Yüksüz Hız	min ⁻¹	3100
4	Rotor Kilit Momenti	mN.m	6300
5	Hız/Moment	min ⁻¹ /mN.m	0,49
6	Yüksüz Akım	mA	300
7	Faz-Faz Terminal Direnci	Ohm	1,12
8	Maks. İzin Verilen Hız	min ⁻¹	7000
9	5000 min ⁻¹ Maks. Akım	A	5,30
10	5000 min ⁻¹ Maks. Moment	mN.m	687
11	Maks. Verim	%	84
12	Moment Sabiti	mN.m/A	147
13	Hız Sabiti	min ⁻¹ /V	65
14	Mekanik Zaman Sabiti	ms	4,3
15	Rotor Eylemsizliği	gcm ²	831
16	Faz-Faz Terminal Endüktansı	mH	0,820

Kullanılan elektrik makinesi hem motor hem de generatör olarak çalışır. Bölüm 3.2.1’de anlatılan motor ve generatör çalışmaya ilişkin bu makinenin üzerinden alınan akım-gerilim şekilleri Şekil 3.4 ve 3.5’te görülebilir. Kurulan düzenek kullanılarak elektrik motorunun yavaşlama karakteristikleri konusunda bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bunun için aşağıda bahsedilen deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde aksi belirtilmedikçe kaynak gerilimi 36 V olarak ayarlanmıştır. Bu uç gerilimi seviyesinde motor hızı 2200 min⁻¹’dır.



Şekil 3.4 : Motor Çalışma Akım – Gerilim Şekilleri.



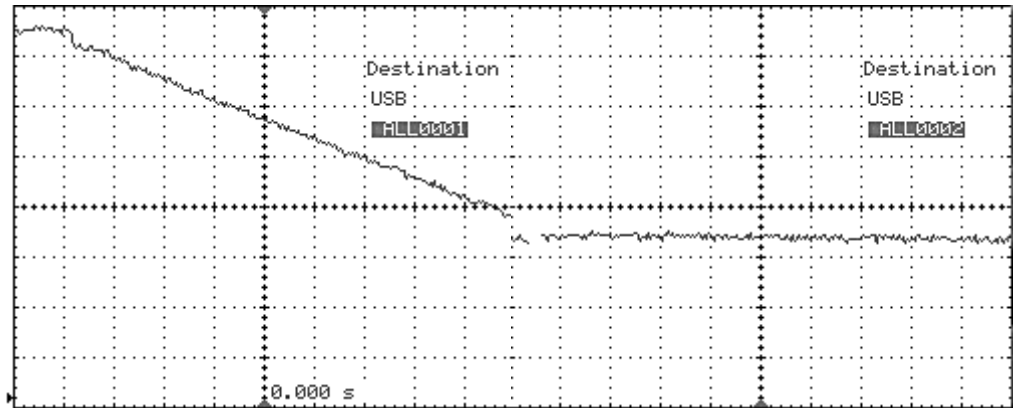
Şekil 3.5 : Generatör Çalışma Akım – Gerilim Şekilleri.

i. Hızlanma deneyi: 0-2200 min⁻¹

Motor 36 V ile beslendiğinde durağan halden sabit hıza ulaşana kadar geçen süre ve hızlanma bittiğindeki yük akımı ölçümleri yapılmıştır. Buna göre elde edilen ölçümler şu şekildedir: endüvi akımı, $I_a=2\text{ A}$, süre $t=40\text{ s}$.

ii. Açık devre yavaşlama deneyi: 2200-0min⁻¹

36 V gerilim altında 2200 min⁻¹ hızda dönen motorun besleme gerilimi kaldırıldığında durma süresi ölçülmüştür. Buna göre osiloskopta elde edilen yavaşlama karakteristiği (açık devre uç gerilimi karakteristiği) Şekil 3.6’da görülebilir. Ölçümler sürücünün giriş tarafından alınabildiğinden sürücünün giriş filtresinin uç gerilimi olan 14 V civarlarında sabit kaldığı görülmektedir. Ancak süreölçer ile yapılan ölçüm ile durduğu andaki süre ölçümlenebilmiştir. Buna göre elde edilen durma süresi $t=145\text{ s}$ ’dir.



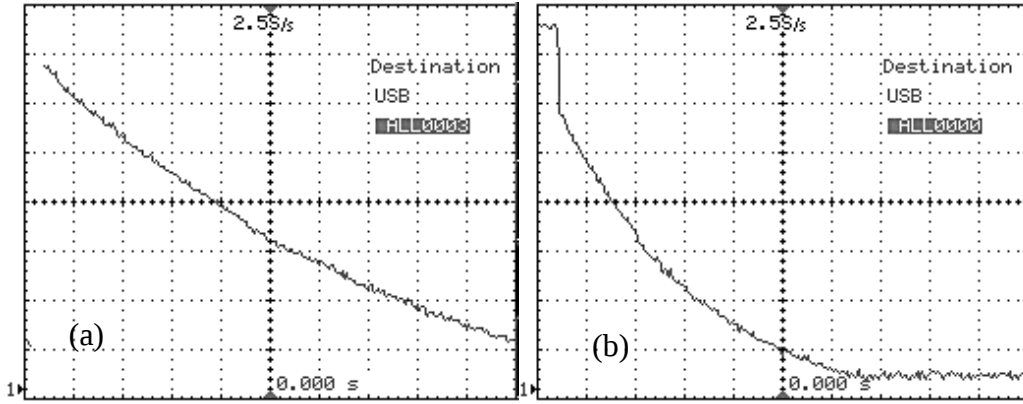
Şekil 3.6 : Açık Devre Yavaşlama (t- E_a grafiği, 10s/aralık, 36V-14V).

iii. Frenleme direnci ($22\Omega - 8\Omega - 5\Omega$) ve kısa devre yavaşlama: $2200-0 \text{ min}^{-1}$

Şekil 2.2-f’de görülen anahtar kullanılarak motor çeşitli dirençler üzerinden frenlenmiştir. Ayrıca motorun 3 fazı kısa devre edilerek frenleme de yapılmıştır. Bu deneylerde ters EMK ile orantılı bir frenleme akımı altında motorun durma süreleri incelenmiş, ayrıca elde edilen veriler karşılaştırılarak sürücünün ve anahtarın direnci ile motorun iç direnci de hesaplanabilmiştir. Buna göre yapılan hesaplar ve ölçümler Çizelge 3.2’de görülebilir.

Çizelge 3.2 : Frenleme Direnci ile Yavaşlama Deneyi $2200-0 \text{ min}^{-1}$.

<i>Dış Direnç</i>	<i>Toplam Fren Direnci</i>	<i>En Yüksek Akım</i>	<i>Durma Süresi</i>
$R_{dış}$	R_{fren}	$Akım$	$Süresi$
22 Ω	29.94 Ω	1.2 A	93 s
8 Ω	15.94 Ω	2.33 A	75 s
5 Ω	12.94 Ω	2.6 A	58 s
0 Ω	1.44 Ω	25 A	17 s



Şekil 3.7 : 22 Ω ve 5 Ω Yavaşlama (t-E grafiği, 10 s/aralık, 36 V-0 V).

Yukarıda yapılan 22 Ω ve 5 Ω için yapılan ölçümler Şekil 3.7’de de gösterilmiştir. Bu ölçümlerde devrenin tam modelinin kurulabilmesi için frenlemenin yapıldığı anahtarın ve devrenin de direncinin görülebilmesi gerekmektedir. Buna göre motor 36 V altında dönerken yapılan 3 faz kısa devre deneyinde görülen $I_{maks}=25 \text{ A}$ alınarak hesaplama yapıldığındaki iç direnç aşağıdaki denklemlerden iç direnç değeri $R_{iç} = 1.44 \Omega$ olarak bulunur. Bu değer katalogta verilen 1.12 Ω ile de yakınlık göstermektedir. Fark arada kullanılan anahtar ve kısa devre etmekte kullanılan kablonun direncinden kaynaklanır.

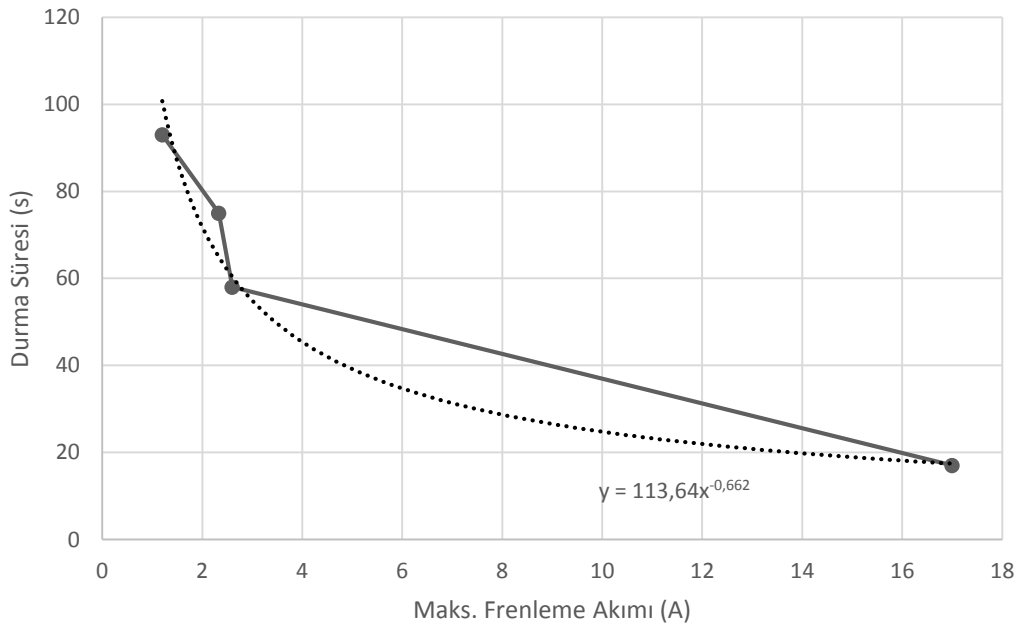
$$E_{maks} = I_{maks} \cdot R_{iç} \quad (3.17)$$

$$36 \text{ V} = 25 \text{ A} \cdot R_{iç} \quad (3.18)$$

Bu veriden yola çıkarak, geri besleme diyotları üzerinden doğrultulan gerilim kullanılarak, direnç üzerinden yapılan frenlemelerde elde edilen devrenin denklemi 36 V için (3.19) denkleminden bulunur. Burada I_{maks} yerine Çizelge 3.2’de gösterilen 1.2 A, 2.33 A ve 2.6 A akımları konulduğunda elde edilen değerlerin ortalaması olarak $R_{diğer} \cong 6.5 \Omega$ olarak bulunur. Bu direnç değeri kullanılan anahtar, kablo ve diğer aksamın dirençlerinin toplamıdır. Çizelge 3.2’de gösterilen frenleme direnci R_{fren} , $R_{dış}$ ile 1.44Ω bulunan $R_{iç}$ ve 6.5Ω bulunan $R_{diğer}$ dirençlerin toplamını göstermektedir.

$$E_{maks} = 36 \text{ V} = I_{maks} (R_{dış} + R_{iç} + R_{diğer}) \quad (3.19)$$

Bu verilerden de anlaşılacağı üzere, frenleme akımı arttığında, durma süresi onunla doğru orantılı olarak azalmamaktadır. Bunun da nedeni gerilimin hız ile orantılı olarak düşmesi, buna karşın sabit direnç durumunda düşük hızlarda akımın yeterli frenleme sağlayacak kadar büyümemesidir. Her ne kadar alınan ölçüm noktası sayısı tüm karakteristiği kapsayacak kadar çok olamasa da, maksimum fren akımı ile durma süreleri karşılaştırıldığında Şekil 3.8’de görülen üstel azalan eğri elde edilebilir.



Şekil 3.8 : Maks. Frenleme Akımı – Durma Süresi ilişkisi.

iv. Düşük Hız Yavaşlama Deneyleri: $300-0 \text{ min}^{-1}$

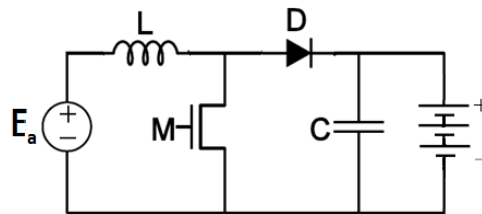
Yavaşlama deneylerine bakıldığında, özellikle düşük hızlarda, dolayısı ile düşük endüklenen gerilim seviyelerinde, dinamik ya da geri kazanımlı frenlemenin anlamının azaldığı görülmektedir. Bu nedenle düşük hızlarda frenleme için 3 farklı deney daha yapılmıştır. Bunun için uç geriliminin yaklaşık 4.6 V olduğu 300 min^{-1} hızında deneyler yapılmıştır. Açık devre, kısa devre durma deneylerinin yanı sıra, ters EMK uygulama yöntemi de motor ters yöne döndürülmeye çalışılarak denenmiştir. Buna göre elde edilen süreler şu şekildedir:

- Açık devre durma süresi: 25 s
- Kısa devre durma süresi: 10 s
- Ters yöne anahtarlama durumunda (36 V) durma süresi: 3.5 s

Bu verilerden, ters gerilimle frenleme yönteminden özellikle düşük hızlarda iyi bir akım kontrolü ile başarılı bir frenleme performansı elde etmek mümkün görünmektedir.

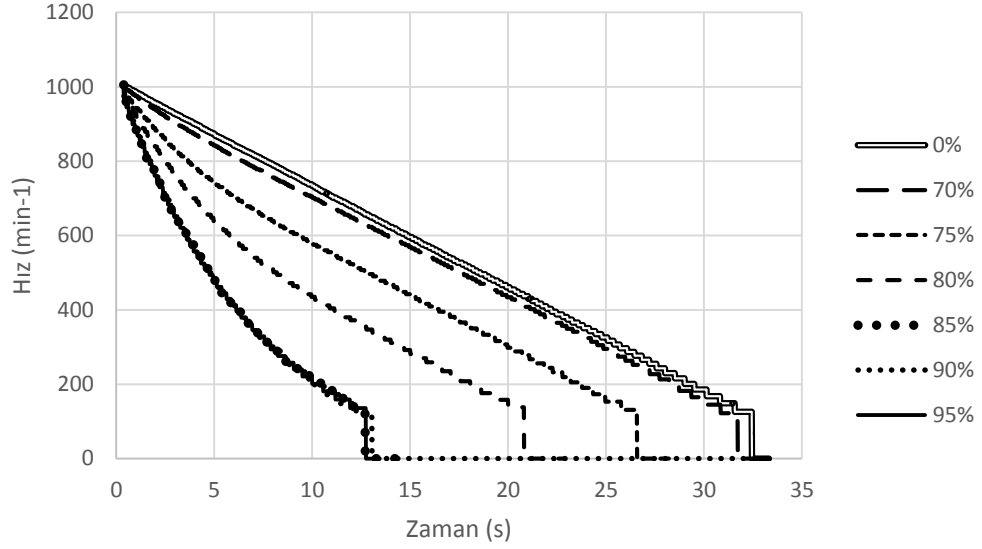
v. Enerji Geri Kazanımlı Frenleme Deneyi: $1000-0 \text{ min}^{-1}$

Son olarak, enerji geri kazanımlı frenleme karakteristiğini gözlemlemek üzere bir deney gerçekleştirilmiştir. Bu deney için güç kaynağı 36 V batarya paketi ile değiştirilmiştir ve FDAM generatör olarak çalıştırılmıştır. Armatür gerilimi motor hızı ile orantılı olarak düştüğü için, normal devre düzeneği ile 36 V bataryaların sürdüğü motorun tekrar bu bataryaları beslemesi mümkün olmadığından, endüvi gerilimini yükseltecek basit bir DA çevirici de kullanılmıştır. Bu devrenin eşdeğeri Şekil 3.9'da görülebilir.



Şekil 3.9 : Geri Kazanımlı Frenleme Eşdeğer Devresi.

Frenleme deneyleri 1000 min^{-1} devirde başlatılmış ve yük olmadan farklı çevirme oranları için tekrarlanmış ve motor hızı Hall Etkisi duyargaları üzerinden ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 3.10'da görülebilir.



Şekil 3.10 : Geri Kazanımlı Frenleme Deney Sonuçları.

Bu deneyde, geri kazanımlı frenlemenin belirli çevirme oranları için kayda değer olduğu görülmüştür. Örneğin, %70 çevirme oranında, yükselme başarılı olamamış ve geri kazanımlı frenleme mümkün olmamıştır. %75-90 arasında yükselme başarıya ulaşmıştır. Bu aralıkta geri kazanımlı frenlemenin etkisi net olarak görülmektedir. %95 çevrim oranında ise %90 ile aynı performans görülmüştür, bu nedenle %90'ın geri kazanımlı frenleme için bu örnekte sınır oluşturduğu görülmektedir.

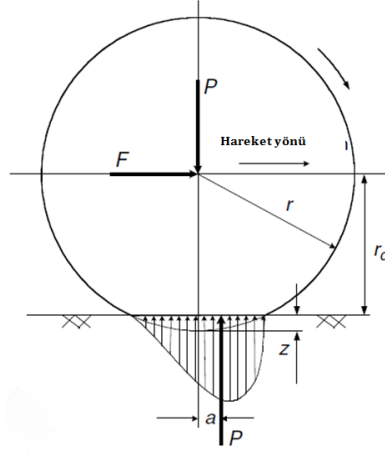
Deney süresince bataryanın açık devre gerilimi 38,7 V olarak ölçülmüştür. Frenleme başında, 1000 min⁻¹ devirde, FDAM endüvi gerilimi 15,3 V olarak ölçülmüştür. Aradaki oran 2,53'tür. Bu da neden en az 2,5-3 kat yükselmeye denk gelen çevirme oranlarına (örn. yükselten DA çeviricide çalışma oranı d=%70 için yükselme oranı $n = \frac{1}{1-d} = 3,33$) ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

3.3 Araç Dinamiği Sınırlamaları

Bölüm 3.1'de elektrikli aracın tam elektrikli frenleme yönteminin bulunması esnasında, elektrikli frenleme yöntemlerinin getireceği sınırlamalar incelenmişti. Bu sınırlamalar genellikle frenlemenin verimi ile ilgili tanımlamaların oluşmasına yardımcı olacaktır. Bu bölümde ise, araçların frenleme süresince gösterdikleri davranışlar incelenmiştir. Bu kapsamda, araç dinamiği ile ilgili bilgiler derlenmiş, daha güvenli bir frenleme için tam elektrikli frenleme algoritmasına ne gibi girdiler olması gerektiği araştırılmıştır.

Tüm araçların frenleme sistemi, araç üzerinde güvenliğin en temel unsurudur. Bu nedenle, ulusal ve uluslararası kabul gören tüm standartlarda frenlemenin güvenliği hem homologatif gereklilikler arasında belirtilmiş, hem de araç ömrü boyunca sürekliliği standartlarca belirlenmiştir [62].

3.3.1 Frenlemenin ideal karakteristiği ve güvenli çalışma bölgesi



Şekil 3.11 : Pozitif Moment Altında Lastik Tabanında Basınç Dağılımı [63].

Frenlemenin güvenli olabilmesi için öncelikle araç dinamiği konusunun irdelenmesi gerekir. Bir aracın güvenli olarak hareket ettirilebilmesi için yol ile temas noktaları olan tekerleklerin her durumda yola tutunmaları gerekir. Aslında araçların hareketini, lastik tekerleklerin tabanında meydana gelen “kayma” hareket ettirir ve yönlendirir. Pozitif moment uygulanan bir lastik tekerleğin yolla temas noktasında, ilerleme yönünde lastik sıkışacak, arka tarafında ise gerilecektir. Şekil 3.11’de lastiğin üzerinde oluşan basınç dağılımı görülebilir. Bu olay, tekerleğin merkezinin iz düşüm noktasından daha önde, tekerlek tabanında bir basınç noktası oluşturacak, sonuçta oluşan çekiş kuvveti tekerleğin bağlı bulunduğu aksın ve dolayısı ile de aracın ilerlemesini sağlayacaktır.

Benzer şekilde, frenleme esnasında da oluşan negatif moment, bu basınç noktasının aks izdüşümünün gerisinde olmasını sağlayacak, ters yönde oluşacak bir frenleme kuvveti sayesinde araç yavaşlayacaktır. Aynı özellik tekerleklerin dönüş eksenlerinin döndürülmesi ile aracın gideceği yönün tayini için de kullanılır.

Tabanda oluşan bu olaya kayma denir. Bir tekerleğin kayması pozitif ve negatif moment altında aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$s = \left(1 - \frac{V}{r \cdot \omega}\right) \times 100\% \rightarrow \text{Pozitif Moment Altında} \quad (3.20.a)$$

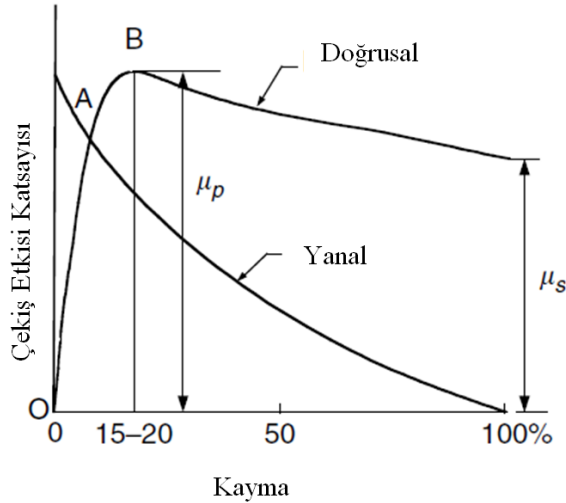
$$s = \left(1 - \frac{r \cdot \omega}{V}\right) \times 100\% \rightarrow \text{Negatif Moment Altında} \quad (3.20.b)$$

Burada, s ; kayma, V ; araç hızı, ω ; tekerlek dönüş hızı, r ; tekerlek yarıçapıdır. Etkin tekerlek yarıçapı $r_e = V/\omega$ olduğundan kaymayı efektif ve reel yarıçap oranından da bulmak mümkündür.

Tekerleğin üzerine bir moment uygulandığında oluşan bu taban reaksiyonu bir noktadan sonra teker ile yol arasındaki bağı kaldıracak kadar büyür. Bir aracın çekiş veya frenleme performansı itki ve fren birimleri haricinde, tekerleklerinin bu birimlerin etkilerini yola iletebilmelerine de bağlıdır. Bu da tekerlek ile yol arasında bulunan “yapışkanlık” etkisi olduğu sürece mümkündür. Çoğu durumda tüm araç performansı bu etki ile sınırlıdır [10, 14, 63]. Özellikle ıslak, çamurlu ya da buzlu yollarda bu etki düşük seviyelerde olduğu için aracın hareket ve durma yetenekleri çok azalır. Bir tekerleğin maksimum yol temas kuvveti şu şekilde ifade edilir:

$$F_{maks} = P_n \cdot \mu \quad (3.21)$$

Burada, F_{maks} ; maksimum kuvvet, P_n ; tekerlek yükü (normalize), μ ; temas katsayısıdır. Temas katsayısı kaymanın fonksiyonudur ve Şekil 3.12’de görüldüğü üzere bir ilişki içerisindedir.



Şekil 3.12 : Kayma ve Temas Katsayısı Arası İlişki [63].

Bu şekilden de görüleceği üzere, kaymanın çok düşük olduğu (OA arasında) değerlerde çekiş katsayısı ile kayma hemen hemen doğrusal bir ilişki içerisindedirler.

Bunun nedeni bu aralıkta etkin olan elastik tekerlek yapısıdır. Kayma oranı arttıkça tekerleğin bir kısmı yol üzerinden kurtulur (kısmi patinaj başlar). Bu da çekiş kuvveti ile kayma arasındaki ilişkinin doğrusallığını bozar (AB arasında). Belirli bir μ_p maksimum noktasından sonra tekerleğin kurtulan kısmının artması nedeniyle kararsız durum artar ve kayma ile çekiş arasındaki ilişki ters orantılı olarak değişir. Tekerleğin tam patinaja geçtiği μ_s noktasında ise tekerlek ile yol arasındaki temas kaybolur [10, 14, 63].

Normal çalışma koşullarında araçların kayma noktalarının %15-20 kayma gelen μ_p civarında olmasına çalışılır. μ_p ve μ_s değerleri çeşitli yol koşulları için değişkenlik gösterir. Çizelge 3.3'te farklı yol koşulları için maksimum çekiş ve patinaj için kayma değerleri verilmiştir [63].

Çizelge 3.3 : Çeşitli Yol Yüzeyleri için Temas Katsayıları [63].

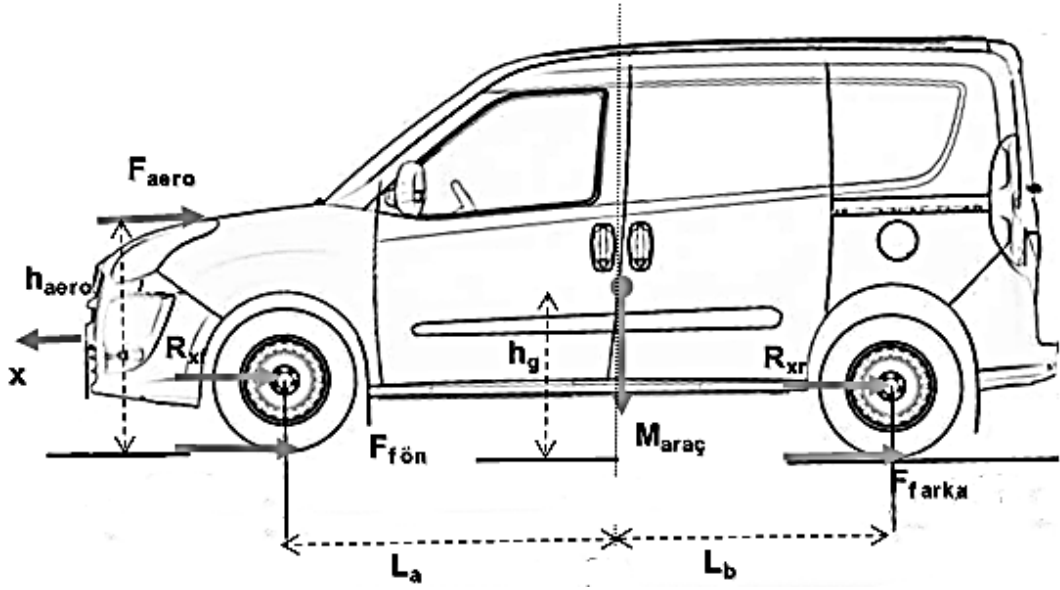
<i>Yüzey</i>	<i>Maksimum Değer, μ_p</i>	<i>Patinaj Değeri, μ_s</i>
Asfalt, Beton (kuru)	0,8 – 0,9	0,75
Beton (ıslak)	0,8	0,7
Asfalt (ıslak)	0,5 – 0,7	0,45 – 0,6
Çakıl	0,6	0,55
Toprak (kuru)	0,68	0,65
Toprak (ıslak)	0,55	0,4 – 0,5
Kar (sıkışmış)	0,2	0,15
Buz	0,1	0,07

Yukarıda bahsedilen tekerlek yol arası temas, aracın hem hızlanması, hem de frenlemesi ile ilişkili performans sınırlayıcı unsurlardan biridir. Frenleme performansı açısından bakıldığında, araç tekerleğine uygulanan frenleme momenti, o tekerleğin maksimum temas kuvveti ile sınırlı bir frenleme kuvveti oluşturur. Her tekerlek için ayrı ayrı düşünüldüğünde, maksimum frenleme kuvveti aşağıdaki şekilde bulunur.

$$F_{b \max} = \mu_b \cdot M_{n \text{ wheel}} \quad (3.22)$$

Burada, $F_{b \max}$; maksimum fren kuvveti, μ_b ; frenleme anında tekerlek ile yol arası temas katsayısı, $M_{n \text{ wheel}}$; tekere ilişkin nominal yüküdür. Frenlemekte olan bir aracın üzerine etkiyen kuvvetleri göstermek üzere Şekil 3.13 oluşturulmuştur. Bu aracın frenleme ivmesi aşağıdaki denklemden bulunur.

$$j = \frac{F_{f \text{ ön}} + F_{f \text{ arka}}}{M_{\text{araç}}} \quad (3.23)$$



Şekil 3.13 : Araca Düz Yolda Etkiyen Frenleme Kuvvetleri.

Burada, $F_{fön}$, F_{farka} ; ön ve arka frenleme kuvvetleri, $M_{araç}$; araç kütlesi, j ; frenleme ivmesi'dir. Frenleme esnasında ön ve arka akslara etkiyen normalize yükler ön ve arka tekerleklerin yola dokundukları noktalardan moment alındığında:

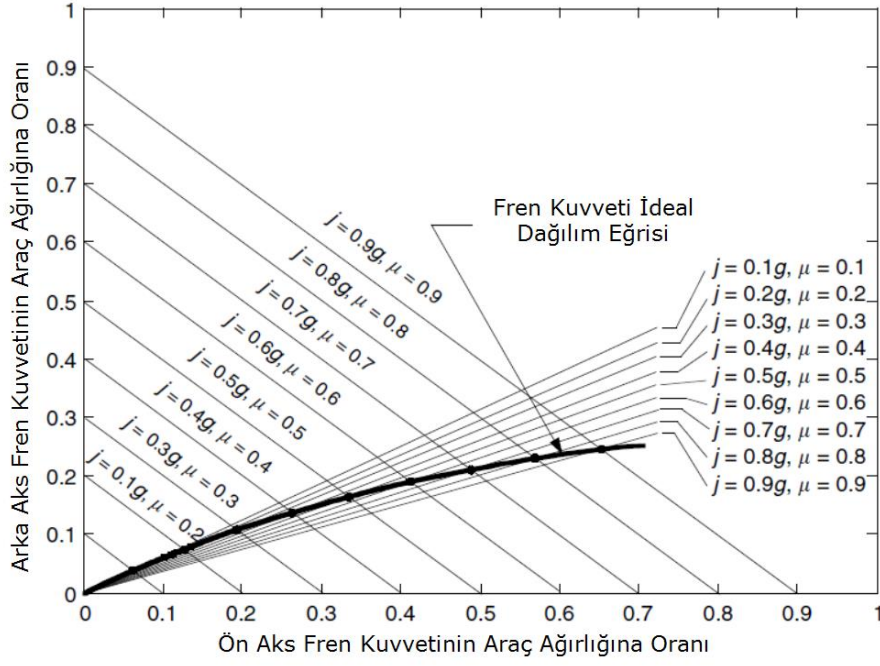
$$W_{ön} = \frac{M_{araç} \cdot g}{L} \left(L_b + h_g \frac{j}{g} \right) \quad (3.24.a)$$

$$W_{arka} = \frac{M_{araç} \cdot g}{L} \left(L_a - h_g \frac{j}{g} \right) \quad (3.24.b)$$

denklemlerinden bulunur. Frenleme kuvvetleri ön ve arka tekerleklerde normalize yükler ile orantılı olacağından:

$$\frac{F_{fren ön}}{F_{fren arka}} = \frac{\left(L_b + h_g \frac{j}{g} \right)}{\left(L_a - h_g \frac{j}{g} \right)} \quad (3.25)$$

olacaktır. Aracın frenlemesi için yazılan denklem ile bu oran birleştirildiğinde ön ve arka akstaki frenleme kuvvetleri Şekil 3.14'te görüldüğü gibi olacaktır. Burada j , yapışkanlık katsayısı μ olan yolda elde edilebilecek en yüksek frenleme ivmesini göstermektedir. İdeal frenleme eğrisi de denilen bu doğrusal olmayan hiperbolik eğri izlendiğinde ön ve arka tekerlerin aynı anda kilitlenmeye gireceği söylenebilir. Bu sayede frenleme anında yol durumuna göre araçta elde edilebilecek en yüksek frenleme kuvveti bulunmuş olur [10, 63].



Şekil 3.14 : Ön ve Arka Akslarda İdeal Fren Kuvveti Dağılımı (I Eğrisi) [63].

Standart frenleme sistemine sahip araçlarda ön ve arka tekerlekler arasındaki frenleme kuvveti dağılımı için gerçekte sabit bir oran tasarlanır. Bu oran ön tekerleklerdeki fren kuvvetinin toplam fren kuvvetine oranı olan β katsayısı ile gösterilir:

$$\beta = \frac{F_{fren\ ön}}{F_{fren}} \quad (3.26)$$

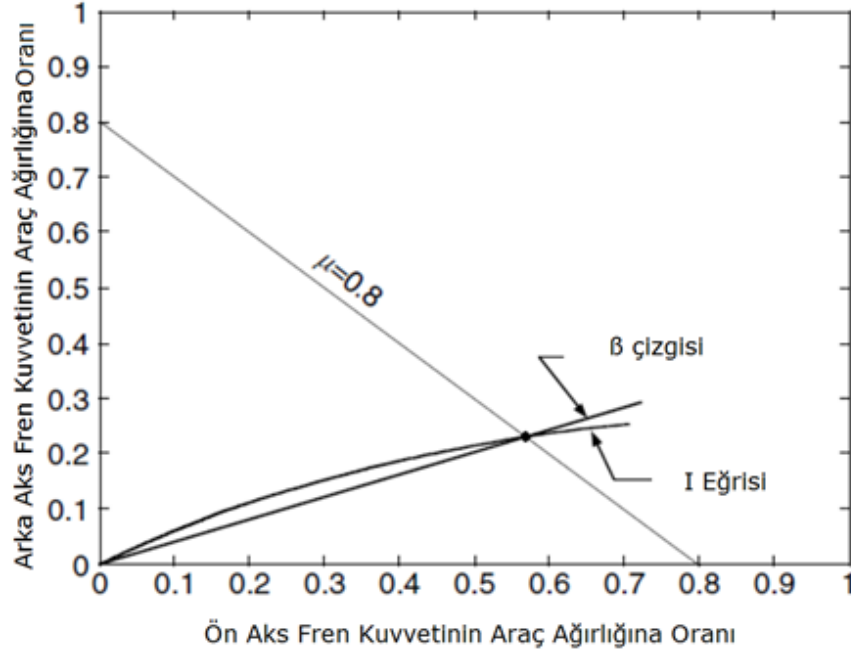
Buna göre standart araçlarda ön ve arka fren arasındaki frenleme kuvveti dağılımı:

$$\frac{F_{fren\ ön}}{F_{fren\ arka}} = \frac{\beta}{1 - \beta} = \frac{\left(L_b + h_g \frac{j}{g}\right)}{\left(L_a - h_g \frac{j}{g}\right)} \quad (3.27)$$

olarak bulunabilir. İdeal frenleme eğrisi ile gerçek frenleme eğrileri karşılaştırıldığında Şekil 3.15'te de görüldüğü üzere yalnızca bir noktada kesişim olduğu bulunur. Bu şekilde örnek olarak gösterilen tasarıma göre yol yapışkanlık katsayısının $\mu = 0,8$ noktasından küçük, yani β eğrisinin I eğrisinden altta olduğu yollarda frenleme yapıldığında ön tekerlekler arkadan önce kilitlenecektir.

Araç dinamiği açısından, her durumda arka tekerleklerin kilitlenmesi ön tekerleklerin kilitlenmesinden çok daha fazla tehlike arz etmektedir [63]. Arka tekerlekler kilitlendiğinde, bu tekerleklerin yanıl yüklerle herhangi bir direnci kalmaz. Bu haldeyken araca, rüzgâr, merkezci kuvvetler, yalpa ya da yol kamperi gibi nedenlerle herhangi bir yanıl yük etki ettiğinde aracın ön aksındaki yalpa (yaw) eksenine göre bir

kuvvet oluşacak, araç savrulması arttıkça moment kolu büyüyeceğinden savrulma daha da artacaktır. Ön tekerleklerin kilitlenmesi durumunda ise pilot direksiyonu kullanamaz. Ancak bu durumda arka aksdaki savrulma ekseninde aracı gittiği yönde tutacak bir moment oluşacaktır [63]. Bu da aracı yolda tekrar yolda tutmak için bir destek olacaktır.



Şekil 3.15 : Gerçek ve İdeal (β ve I) Frenleme Eğrileri [63].

Arka tekerleklerin kilitlenmesi durumunda pilot bir miktar fren kuvvetini azaltarak kontrolü tekrar kazanmaya çalışır, ancak belirli bir savrulma noktasından sonra aracın kontrolünü elde etmek mümkün olmayacaktır. Bu durum nedeniyle, fren sistemleri tasarlanırken ön tekerleklerin önce kilitleneceği sistemler (β katsayıları) seçilir. Günümüzde kullanılan ABS sistemleri de, kilitlenme anını her tekerlek üzerinde bulunan hız sensörleri ile sezerek fren kuvvetini azaltır ve tekerlekleri tekrar döner duruma getirir.

3.3.2 Elektrikli aracın güvenli frenlenmesi

Önden tahrikli elektrikli araçlarda güvenli frenleme için talep edilen fren kuvvetinin ön tekerleklerle binen yüke göre yolun verebileceği maksimum fren kuvvetinden az olması gerekir. Aynı zamanda, aracın öne doğru yapacağı yığılma hareketi nedeniyle, arka aksın yükü hafifleyeceğinden, bu tekerleklerde yol ile sürtünme nedeniyle bulunan yanal ve doğrusal kuvvetlerin yol yapışkanlık katsayısı ile ilgili Şekil 3.12'de gösterilen kayma ve çekiş kuvveti ilişkisine göre süreklilik göstermesi gerekir. Yanal

kararlılık kapsamlı bir inceleme konusu olduğundan bu çalışma kapsamına alınmamıştır, ancak doğrusal olarak arka tekerleklerin kararlı olması, yani arka tekerlerde kaymanın %100 olmaması gerekir. 2. bölümde, geliştirilen araç modeli kullanılarak çeşitli frenleme ivmeleri için arka tekerleklerdeki nominal yükler ve buna karşılık gelen maksimum doğrusal kuvvetler incelenmiş, en yüksek frenleme oranı olan 100-0km/h yavaşlamada ön ve arka tekerlekler arası yük paylaşımının 1860kg ön, 390kg arka olduğu görülmüştü. Yine 2. bölümde belirtildiği üzere, tekerlek yuvarlanma direnci katsayısı 11 kg/ton, arka tekerleklere düşen ağırlığı 390kg olan bu araçta en yüksek frenleme ivmesini ön tekerleklerin verebildiğini varsaydığımız durumda en fazla $11 \text{ kg/ton} \times 0,390 \text{ ton} = 4,29 \text{ kgf}$ luk bir sürtünme kuvveti oluşacaktır. Bu da Denklem (3.21)'den yola çıkarak $\mu = F / P_n = 4,29 \text{ kg} / 390 \text{ kg} = 0,011$ yapışkanlık katsayısından düşük değere sahip yollarda arka tekerleklerin kilitlenmesine neden olur. Ancak her halükarda bu katsayıya sahip yolda, ön tekerleklerin verebileceği frenleme kuvveti de sınırlanarak $F = P_n \cdot \mu = 1860 \times 0,011 = 20,46 \text{ kg}$ olacağından aracın bu denli yüksek bir ivme ile frenleme yapması mümkün olmayacak, dolayısı ile aracın ağırlık dağılımı yukarıda verilen 1860/390 kg dağılımına ulaşmayacaktır.

Bu hesaplamalardan da anlaşılacağı üzere, yalnız elektrikle, yani sadece ön tekerleklerde yapılan frenleme her ne kadar maksimum enerji geri kazanımı sağlıyor olsa da, güvenlik açısından ön tekerleklerin kilitleneceği değerlere kadar frenleme kuvveti sağlayabilir. Sürtünmeleri ve rüzgâr yükler ihmal edildiğinde bir aracın yalnızca ön tekerlekleri tarafından verilebilecek maksimum frenleme kuvveti:

$$F_{f \text{ ön}} = \mu \cdot M_{\text{araç}} \cdot \frac{(L_b + h_g \cdot j/g)}{L} \quad (3.28)$$

Burada, $F_{f \text{ ön}}$; limit ön tekerlek frenleme kuvveti, $M_{\text{araç}}$; araç ağırlığı, j ; frenleme ivmesi, L : akslar arası uzaklık, L_b ; ön aksın araç ağırlık merkezine olan uzaklığı, h_g ; ağırlık merkezinin yerden yüksekliği, μ ; lastik ve yer arası yapışkanlık katsayısı, g ; yerçekimi ivmesidir.

Buradan da anlaşılacağı gibi, bir aracın yalnız ön tekerlerden frenlemesi araç dinamiği açısından sınırlayıcı bir nokta oluşturur. Ön tekerlekten çekişli elektrikli araçlarda ön tekerleklerin kilitlenme noktası, performans açısından da bir sınır nokta oluşturur. Bu sınır koşul ilerleyen bölümlerde elektrikli frenlemenin çalışma bölgesi hesaplanırken kullanılacaktır.

3.3.3 Frenleme ile ilgili kanuni düzenlemeler

Tüm araç üreticilerinin seri üretime çıkabilmesi için uyması gereken uluslararası nizamların tümü “homologasyon” başlığı altında toplanır. Türkiye için Avrupa Birliği ve Birleşmiş Milletlerin hazırladığı “UN-ECE” düzenlemeleri esas alınarak araçlar tip onay testlerine girer ve uygun olan araçlar satılabilir belgesi alır. Homologasyon gereklilikleri birer kanuni düzenleme olduğu kadar, bazı karşılaşılabilecek sorunların, ya da güvenlik unsurlarının en genelleştirilmiş ve kapsadığı her araç tipi için geçerli olabilecek bazı düzenlemeler de getirirler.

Homologasyon gerekliliği olan parçaların ya da sistemlerin başında gelenlerden biri de frenleme sistemleridir. Binek ve hafif ticari araç sınıfını kapsayan araçların fren sistemleri Birleşmiş Milletlerin yayınladığı 17 Ocak 2008 tarihli ve 13-H numaralı, “*Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars with Regard to Braking*” isimli düzenlemeye uygun olarak üretilmemişlerse satılamazlar [62].

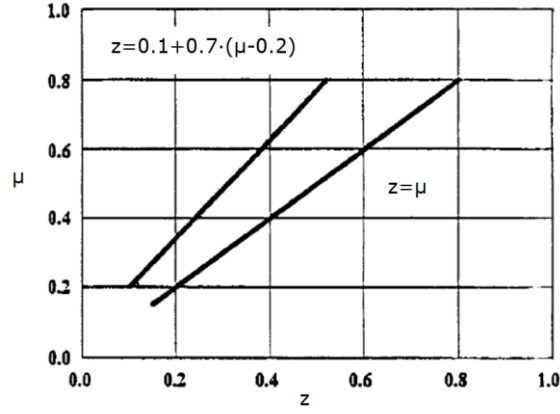
13-H sayılı düzenlemenin 5. Madde’si “Frenleme Kuvvetlerinin Akslar Arasında Dağılımı” konusunu düzenlemektedir. Bu maddede belirlenen kurala göre:

I. 0,15 ile 0,8 arasında değişen frenleme oranları ($z=j/g$) için ön tekerlekler her zaman arkadan önce kilitlenmelidir

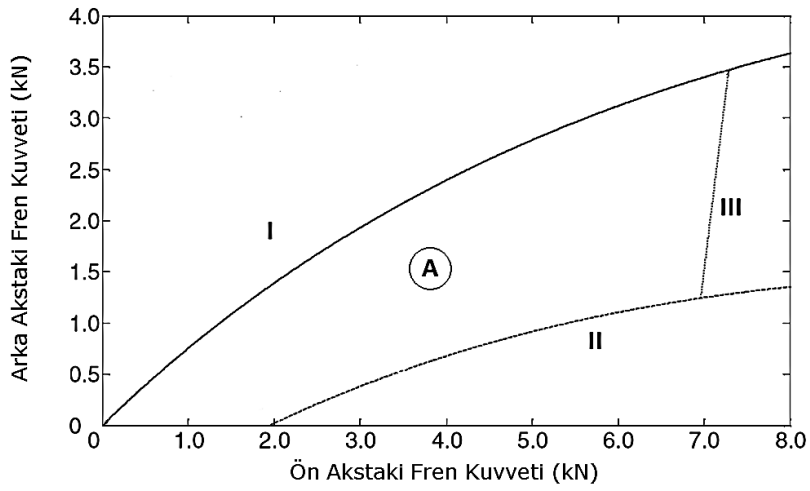
II. 0,2 ile 0,8 arasında değişen k değerleri için; $z \geq 0,1 + 0,7 \cdot (\mu - 0,2)$ olmalıdır.

Burada, z ; araç frenleme katsayısı; j ; frenleme oranı, g ; yerçekimi ivmesi, μ ; tekerlek yapışkanlık katsayısıdır.

Buradan da anlaşılacağı üzere, önceki bölümlerde $z=\mu$ için çizilen ideal eğri izlendiğinde I. Kurala göre ideal eğrinin aşağısında kalınması gerekir. Önceden $z=\mu$ için çizilen ideal eğri, II. Kural’da bahsedildiği üzere $z=0,1+0,7 \cdot (\mu-0,2)$ durumu için çizilmelidir. Bu durumda Şekil 3.16’daki karakteristik göz önüne alınarak önceki bölümlerde anlatılan dağılım eğrisi tekrar çizilir. II. Kural, z ’nin verilen denklemden büyük-eşit olduğu durumlar için geçerli olduğundan bu karakteristiğin üst tarafında kalan bölge çalışma için elverişli olacaktır.



Şekil 3.16 : UN-ECE 13-H Düzenlemesine Göre z ve μ Arası İlişki [62].



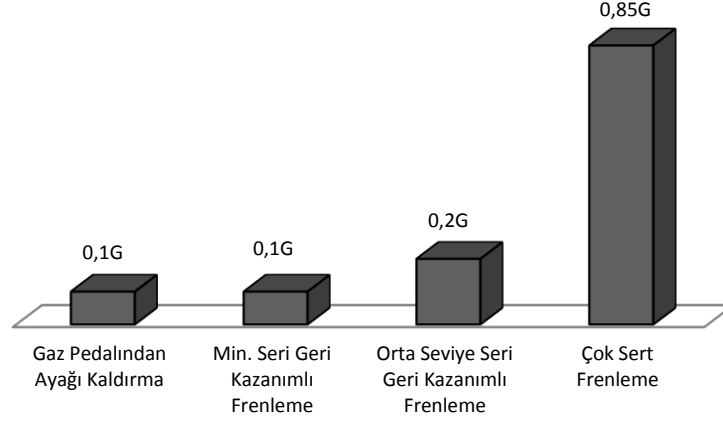
Şekil 3.17 : Fren Kuvvetleri Dağılımı Çalışma Bölgesi Sınırları.

Ön tekerleklerin kilitlenme durumu da bir önceki bölümde bahsedildiği üzere göz önüne alındığında; frenleme kuvvetleri ön ve arka tekerlekler arasında, Şekil 3.17’de görülen, I (ideal dağılım), II (normda belirlenen dağılım) ve III (ön tekerleklerin kilitlenme noktası) eğrileri ile tanımlanan, “A” bölgesi içerisinde kalacak şekilde dağıtılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

3.4 Konforlu Frenleme Kriterleri

Günlük hayatta kullanılan otomobillerin frenlemesinde kullanılan giriş komutunun kullanıcı tarafından uygulandığı olduğu mekanik frenleme sistemlerinde, pilot, sürüş deneyimi ile ters orantılı bir sürede aracın fren pedalına ne kadar bastığında ne seviyede frenleme kuvveti oluşacağına adapte olur. Benzer şekilde, hangi hızda ve viteste olduğuna bağlı olarak, ayağın gaz pedalından çekildiğinde oluşacak kompresyon momentinin aracı ne kadar yavaşlatacağı da pilot tarafından bilinir.

Alışlagelmiş içten yanmalı motora sahip araçlardaki bu kullanım şeklinin elektrikli araçlarda da sağlanması kullanıcıların konforlu bir sürüş yapmaları için gerekecektir.



Şekil 3.18 : Çeşitli Durumlar için Frenleme İvmeleri ($G=10\text{m/s}^2$).

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere, araç üzerinde 0,1 G ile 0,85 G arasında frenleme ivmeleri görülebilir. Literatürde konforlu bir yavaşlamada aracın ivmesinin maksimum 3 m/s^2 ’dir. Araç içerisindeki serbest cisimlerin yerinden uçması $3,5 \text{ m/s}^2$ ’den itibaren başlar. Binek ve hafif ticari araçlar için maksimum yavaşlama ivmesi $5\text{-}10 \text{ m/s}^2$ ’dir [64].

Bu verilere göre geliştirilmiş olan araç modelleri kullanılarak üzerinde çalışılan araca ilişkin uygun yavaşlama kuvveti karakteristikleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_{fren} = (M \cdot j) - F_{yük} \quad (3.29.a)$$

$$T_{Fren} = r_{tekerlek} \cdot F_{Fren} \quad (3.29.b)$$

Burada, F_{fren} ; aracın tekerleklerindeki toplam frenleme kuvvetini, M ; araç kütlesini, $F_{yük}$; tekerleğe indirgenmiş toplam araç yüklerini, T_{fren} ; aracın üzerindeki toplam frenleme momentini, $r_{tekerlek}$; aracın tekerlek yarıçapını gösterir.

Bu denklemlerden de anlaşılacağı üzere, bir aracın boylamasına yavaşlama ivmesi, o aracın üzerine etkiyen boylamasına yükler ile frenleme momentine bağlıdır. Önceki bölümlerde, boylamasına eksende araca etki eden kuvvetlerin nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Araçta belirli bir ivme değerini sağlamak için araç hızı ile gereken fren momenti arasında bir ters orantı görülmektedir. Bunun nedeni, sabit ivme için gereken toplam kuvvet sabit iken aracın hızı ile yük kuvveti arasında hızın karesi ile orantılı

bir ilişki vardır. Tasarlanacak sistem irdelenirken bu verilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

3.5 Frenleme Kaynaklarının Dağılımı

Bahsedildiği üzere, frenleme kuvvetleri hem ön hem de arka tekerleklerle uygulanması araç dinamiklerini bozmamak ve güvenli bir sürüş sağlayabilmek için ECE normlarınca zorunlu kılınmıştır [14]. Önden çekişli elektrikli araçlarda bu zorunluluk nedeniyle elektrik makinesinin bağlı, enerji kazanımlı frenlemenin mümkün olduğu tekerlekler haricinde arka tekerleklerle de fren uygulamak gerekir. Bu da geri kazanım miktarında düşüşe neden olur.

Çeşitli çalışmalarla ön-arka fren kuvveti dağılımının iyileştirilmesi ile daha verimli bir elektrikli frenleme elde edilebileceği görülmüştür [14]. Frenleme kuvvetlerinin dağılımı incelendiğinde, idealde yaklaşık %60 ön fren, %40 arka fren gücüne ihtiyaç olduğu görülmektedir [10]. Bu da dolayısıyla önden çekişli bir elektrikli araçta tüm toplam frenleme enerjisinin %60'ının geri kazanımlı frenleme ile elde edilebileceği anlamına gelir. İncelenen çalışmalarda enerji geri kazanımlı frenleme sistemlerinin ön ve arka mekanik frenleri ayrı kontrol edebilen akıllı sistemlerle uygulandığı görülmüştür [15].

Elektrikli araçta elektrikli ve mekanik frenlemenin uygulanması seri ve paralel olmak üzere iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir [63, 65, 66].

3.5.1 Seri frenleme

Seri frenlemede elektrikli frenleme mekanik frenlemeden bağımsız olarak elektrik makinesinin bağlı olduğu tekerlekleri frenleyebilir. Bu yapıda, bir elektronik kontrol birimi frene basıldığında elektrik frenleme miktarını ve mekanik freni sağlayan kontrol valflerini kontrol edebilir şekilde tasarlanır. Pilot frene bastığında elektrik makinesi generatör olarak çalışarak bir negatif moment ve elektrik enerjisi üretir. Elektrikli frenlemenin yetersiz kaldığı durumda, ya da, tahrik alan tekerleklerdeki frenleme miktarının araç dinamiğini etkiler duruma geldiği koşullarda, kontrol birimi mekanik frenlemeyi de kademeli olarak ön ve arka tekerleklerde devreye sokabilir. Yapılan çeşitli çalışmalarda [14, 65] frenleme kuvvet dağılımlarının bir araçta nasıl olması gerektiği, bunların araç dinamiğine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalardan yola çıkarak, seri frenlemenin verim açısından en verimli sistem olmasına karşın, araç

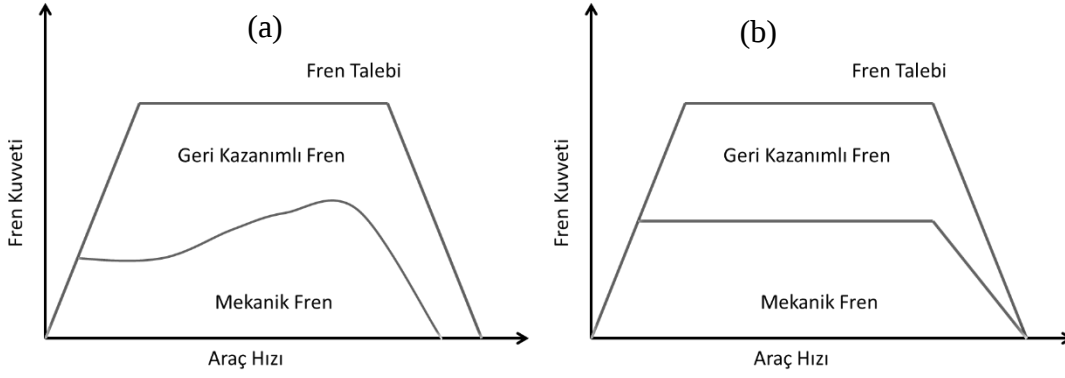
dinamiğinde sorun teşkil ettiği [65] görülmektedir. Ayrıca, mevcutta olan homologatif düzenlemelerle bir aracın frenlenmesi esnasında fren kuvvetinin ön ve arka tekerlerde ne miktarda dağılması gerektiği de saptanmıştır [14]. Daha önce bahsedildiği üzere, araç güvenliğini tehlikeye atmadan ön tekerler tarafından uygulanabilecek maksimum fren kuvveti Denklem (3.26)'da gösterildiği şekilde bulunabilir (araç üzerindeki rüzgâr vb. yükler ihmal edildiğinde).

Bu kuvvetten yola çıkılarak hesaplanacak ivme değerinin üzerinde bir frenleme gerektiğinde arka tekerleklerin de frenleme yapması gereklidir. Seri frenlemede iki farklı yöntem izlenebilir [63, 66]:

a. En iyi fren hissiyatı (ön tekerleklerin elektrikli, arka tekerleklerin ise mekanik olarak frenlendiği durum): Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, en iyi frenleme güç dağılımı ön ve arka tekerleklerin aynı anda kilitlendiği durum için çizilen I eğrisi (Şekil 3.15) ile uyumlu olarak uygulandığında gerçekleşir. Yine daha önceki bölümlerde, klasik araçlarda bir β eğrisine uygun olarak frenleme kuvvetleri dağıtılır. Seri frenlemeye uygun (ön ve arka tekerleklerin farklı oranlarda frenlenebildiği) fiziksel sistemi olan araçlarda I eğrisine uygun olarak elektrik frenleme artırılır, gerektiği durumda da mekanik fren kuvveti hem arkaya hem de öne uygulanarak en iyi fren hissiyatı ve buna karşın en yüksek verim elde edilir. Ancak bahsedilen fiziksel frenleme sistemleri hem her araçta standart olarak bulunmayan ya da kontrol edilemeyen, hem de pahalı ve karmaşık sistemlerdir.

b. En yüksek verim (ön tekerleklerin yalnızca elektrik veya elektrik+mekanik, arka tekerleklerin ise frenlenmediği veya mekanik olarak frenlendiği durum): Geri kazanımın artırılması için, seri frenlemeye uygun bir sistemde ilk fren talebi geldiğinde güvenli bölge dâhilinde yalnızca elektrikli frenlemeye uygun (Şekil 3.17'de A bölgesinin x-ekseni ile kesiştiği doğru üzerindeki) noktalarda çalıştırılabilir. Bu çalışmada ön tekerleklerin kilitlenmesi güvenlik tehditleri doğurabilir, ancak mümkün olduğunca çok elektrikli frenleme yapıldığı için geri kazanılan enerji maksimum olacaktır.

Güvenlik unsurları incelenirken belirlenen çalışma alanı içerisinde kaldıkça, istenilen talebi mümkün olduğunca elektrikli frenleme ile sağlayabilecek iyileştirmeler ile verim olarak da en iyi frenleme elde edilebilir. Ancak unutulmaması gereken, bu elektrikli ve mekanik hibrit sistemlerin kurulumu ve uygulaması zor ve pahalıdır.



Şekil 3.19 : Seri (a) ve Paralel (b) Frenleme Stratejisi.

3.5.2 Paralel frenleme

Paralel frenlemede elektriksel ve mekanik fren aynı anda devreye girer. Uygulama açısından daha basit bir altyapı gereksinimi vardır. Hatta mevcut araç fren sistemlerine olan bu sistemde pilot frene bastığında β eğrisine uygun olarak tasarlanmış fren sisteminin ön tekerleklerine bir miktar da elektrik frenleme eklenerek sistem yavaşlatılmaya çalışılır. Ancak, her durumda mekanik frenleme devrede olduğu için, her ne kadar güvenli bir sistem de olsa, geri kazanım verimi düşük bir yöntemdir.

Paralel frenleme yöntemi, elektriksel etkiyi en düşük seviyede kullanan yöntemdir. Ancak, uygulamada bu sistem en az maliyet ve en yüksek güven ile çalışır.

3.5.3 Elektrikli frenlemede pedal hissiyatı

Sadece elektrikli frenleme yapabilen sistemlerde, girişin çıkış ile mekanik sistemlerde olduğu gibi fiziksel bağlantısı yoktur. Mekanik sistemin doğası gereği pedala uygulanan giriş frenleme kuvveti oranında karşı kuvvet oluşturur ve bu geri besleme kullanıcıya istediği fren kuvvetini ayarlaması konusunda yardımcı olur. Elektrikli frenlemede ise bu pedal hissiyatının bir şekilde fren pedalında oluşturulması gerekir.

Elektriksel ve mekanik frenlemenin bir arada uygulandığı sistemlerde elektrikli fren kontrolü ile fren etkisinin pedal hissiyatında aşırı bir uygunsuzluk oluşturmadan devreye alınması ile çözülür. Paralel frenleme sistemlerinde doğru ölçümleme ile çözüme ulaşılır. Seri frenleme sistemlerinde ise her ne kadar verim daha yüksekse de, hidrolik fren miktarı valflerle kontrol edildiğinden kontrol ve konfor konusunda paralel sisteme göre daha fazla yapılması gereken çalışma vardır [65].

Pedal hissiyatındaki azalmanın ortadan kaldırılabilmesi için elektrikli araçlar için geliştirilmiş özel pedal sistemleri piyasada bulunmaktadır. Doktora çalışmalarına

paralel olarak, seri elektriksel frenlemede karşılaşılabilecek pedal sorunlarını çözmek üzere sürücünün tepkisine hidrolik frenleme olmasa da karşılık verebilen bir pedal sistemi incelenmiştir. Çeşitli çözümler bulunmasına karşın hemen hemen tüm uygulamaların araç üzerinde ciddi değişiklikler gerektirdiği görülmüştür.

Bu araştırmalar esnasında daha basit bir yapı ile hem istenilen tepkiyi verebilecek, hem de gerektiğinde tepkinin şiddetinin ayarlanabileceği bir elektrikli fren pedalı sistemi fikrine ilişkin detaylı ürün ve sonrasında da patent çalışması yapılmıştır. Bahsi geçen başvuru “A Brake System for Vehicles with Electric Drive” başlığı ile EPO’da incelemeye alınmış ve 17 Nisan 2013 tarihinde EP2463163(B1) numarası ile yayınlanmıştır [67].

4. TAM ELEKTRİKLE FRENLEME KONTROL SİSTEMİ

Önceki bölümlerde de bahsi geçtiği üzere, tezin önerdiği yeniliklerden biri, Tam Elektrikli Frenleme (TEF) diye adlandırılan, yalnız elektrikli frenleme yöntemleri kullanılarak bir aracın durdurulabilmesidir. Bunu sağlayabilmek için ise, bulanık mantık tabanlı bir kontrol geliştirileceğinden bahsedilmiştir. Bulanık mantık kontrol, kontrol edilen sistemin belirsiz olduğu ya da dış etkenlerden çok etkilendiği, doğrusal olmayan sistem uygulamalarında görülen, dil tabanlı bir kontrol yöntemidir. Frenleme tipinin seçimine etkiyen frenleme ihtiyacı, bataryanın enerji alabilme durumu ve araç hızı gibi faktörler, bulanık mantık tabanlı bir kontrol sistemi ile işlenerek hangi tip frenlemenin yapılacağı belirlenmelidir. Bu bağlamda, Matlab®-Simulink® altında, “*Fuzzy Logic Toolbox*”ı da kullanılarak bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu kontrol algoritması çevresinde de, uygulama yapılacak elektrikli motosiklete uygun, model tabanlı bir üst seviye kontrol sistemi de oluşturulmuştur. Bu bölümde bu algoritma ve sistem anlatılacaktır.

4.1 Kontrol Algoritmalarının Oluşturulması

TEF kontrol algoritmaları, aracı durdurmak için ihtiyaç duyulan fren kuvvetinin, önceki bölümlerde bahsi geçen üç farklı elektrikli frenleme yöntemleri arasında nasıl paylaşılacağını tanımlar. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, her farklı frenleme yönteminin farklı karakteristikleri ve sınır durumları vardır. Bu sınır koşullar, bulanık mantık kontrolcü oluşturulurken kullanılarak ihtiyaç olan fren kuvvetinin doğru paylaşılması sağlanacaktır.

4.1.1 Kontrol sisteminin girişleri

Frenleme tipinin kararının verilmesinde göz önüne alınması gereken girişler (i) şarj durumu, (ii) frenleme oranı ve (iii) araç hızıdır. Çizelge 4.1’de bulanık mantık kontrolcünde ilgili üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonları trapez olduğundan bu tabloda bahsi geçen sınır noktaları bir üçgen ya da yamuğun

koordinatları (x;y) şeklinde tanımlanmıştır. Bu tabloda *D* düşük, *O* orta, *Y* yüksek seviyeyi gösterir. Her girişe ilişkin detay bilgi de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Bulanık Mantık Kontrolcü Üyelik Fonksiyonları.

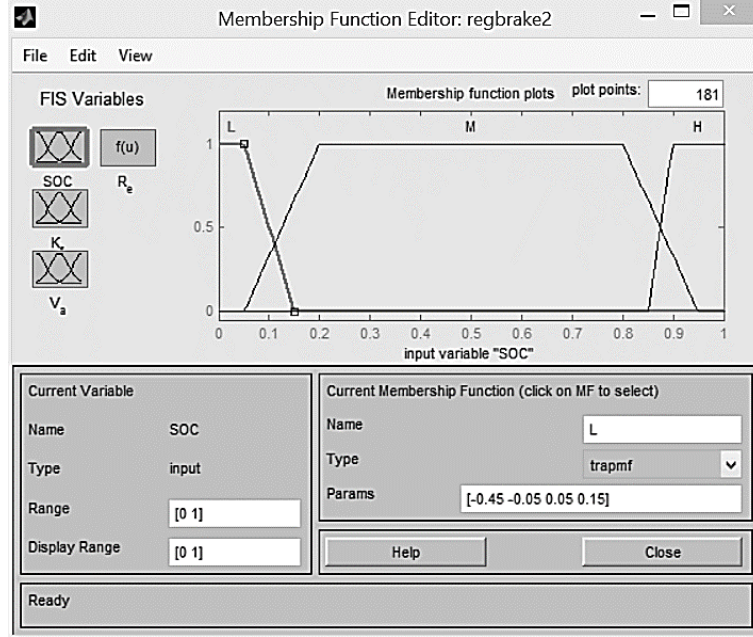
		Sınır Noktaları				Gerekçe
		A	B	C	D	
SOC	D	(0;0)	(0;1)	(0.05;1)	(0.15;0)	Batarya üreticisi SOC < %5 durumunda bataryanın derin deşarj riski bulunduğunu bildirmektedir.
	O	(0.05;0)	(0.15;1)	(0.8;1)	(0.95;0)	Bataryanın verimli çalışma aralığı %5-%85 şarj durumu olarak tanımlanmıştır.
	Y	(0.8;0)	(0.9;1)	(1;1)	(1;0)	SOC > %90 durumunda batarya üreticisi aşırı şarj riski olduğunu bildirmektedir.
K _f	D	(0;0)	(0;1)	(0.2;0)	-	En yüksek frenleme talebinin %10-15'e karşılık gelen kısmı konforlu yavaşlama için öngörülen değerdir.
	O	(0.1;0)	(0.2;1)	(0.8;1)	(0.9;0)	En yüksek frenleme talebinin %20 ile %80 arasındaki kısmı standart yavaşlama için öngörülmüştür.
	Y	(0.8;0)	(1;1)	(1;0)	-	En yüksek frenleme talebinin %80 ile %100'ü arası acil frenleme için öngörülmüştür.
V _a	D	(0;0)	(0;1)	(10;1)	(30;0)	Şehir içi düşük kullanım hızları olan 0-30km/h düşük hız kabul edilmiştir.
	O	(10;0)	(30;1)	(50;1)	(70;0)	Şehir içi standart kullanım hızları olan 30-70km/h orta hız kabul edilmiştir.
	Y	(50;0)	(70;1)	(150;1)	(150;0)	Şehir dışı olan V _a >70km/h yüksek hız kabul edilmiştir.

i. Batarya Şarj Durumu (SOC – State of Charge):

Şarj durumu (SOC) batarya yönetim devreleri tarafından hesaplanan değerlerdir ve bu ünitelerden okunacaktır. 0-1 arasında 0,01 çözünürlük ile değişmektedir. Coulomb sayımı yöntemiyle, ya da uç gerilimi, sıcaklık vb. değerleri kullanarak yapılan hesaplar neticesinde bulunur ve bataryada bulunan enerji miktarının, batarya tam dolu iken saklayabileceği enerji miktarına oranıdır. %100 SOC sonrasında aşırı şarj durumu oluşur ve batarya daha fazla enerji depolayamayacağı için bir direnç olarak çalışmaya başlar ve hızla ısınır. SOC'nin çok düşük değerlerine inildiğinde ise bataryalarda derin deşarj durumu oluşur. Bu da bataryanın tekrar şarj edilmesini olanaksız hale getirir [25]. Dolayısıyla, SOC değeri izlenerek bataryanın aşırı şarj ya da deşarj durumlarından kaçınılması gerekir. Dahası, frenlemenin bataryaların performansını, dolayısı ile de araç performansını arttıracak şekilde enerji geri kazanımlı frenlemeyi devreye alması beklenir. Bu nedenle batarya SOC değeri, kontrol süresince takip edilerek sisteme giriş olarak kullanılacaktır.

Bu çalışmada batarya firmasının verilerinden yola çıkılarak aşırı şarj durumu için SOC > %90, derin deşarj durumu için de SOC < %5 değerleri sınır kabul edilmiştir. Bulanık mantık kontrolörü tasarlanırken, batarya SOC değerine ilişkin üyelik fonksiyonu

Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. İlgili tanımlamaların “*Matlab® Fuzzy Logic Toolbox*” ile gösterimi ise Şekil 4.1’de görülebilir. Kurallar belirlenirken en önemli öncelik şarj durumunu orta ve üzeri seviyede tutabilmek olacaktır.



Şekil 4.1 : Batarya SOC Değeri ile İlgili Üyelik Fonksiyonları.

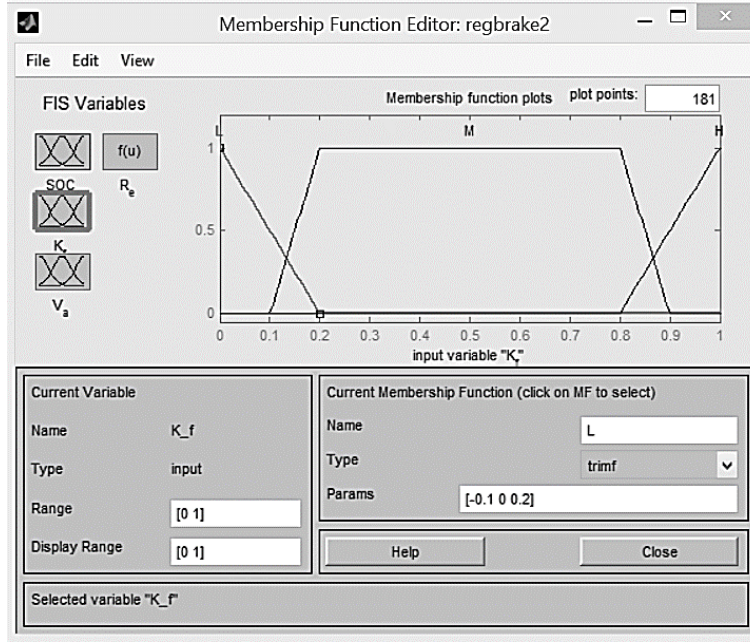
ii. Frenleme Oranı (K_f)

Frenleme oranı güvenlik unsurlarının bir ifadesidir. Fren kolu ya da pedalı üzerinde bulunan potansiyometreden okunan değere göre 0-1 arasında 0,01 çözünürlüklü normalize bir değer hesaplanıp kullanılacaktır. Araç üzerinde tesis edilmiş bulunan frenleme bileşenlerinin acil bir frenleme durumunda tam kapasite kullanılması gerekebilir. Bu durumda şarj durumu ya da bataryanın enerji alabilme kapasitesinden çok, mevcuttaki bu frenleme talebinin karşılanması gerekir. Bu üyelik fonksiyonunda tanımlanan frenleme talepleri maksimum fren talebi 1 kabul edilerek (1=çok acil frenleme) belirlenmiştir. İdeal durumda, frenin pozisyonu ve pozisyon değişimi hızı (pozisyonun 1. türevi) da izlenerek acil-ani frenleme durumları tespit edilebilir [25]. Hatta K_f , bu acil durumları da hesaba katacak şekilde normalize edilmiş bir ağırlık fonksiyonunun çıkışı olarak alınabilir.

Önceki bölümlerde ve çalışmalarda incelendiği üzere [25], en yüksek frenleme talebi 1 kabul edildiğinde, bunun %10’u nispetinde bir frenleme konforlu bir frenleme olarak kabul edilir. %20-%80 nispetinde bir frenleme ise normal frenleme olarak kabul

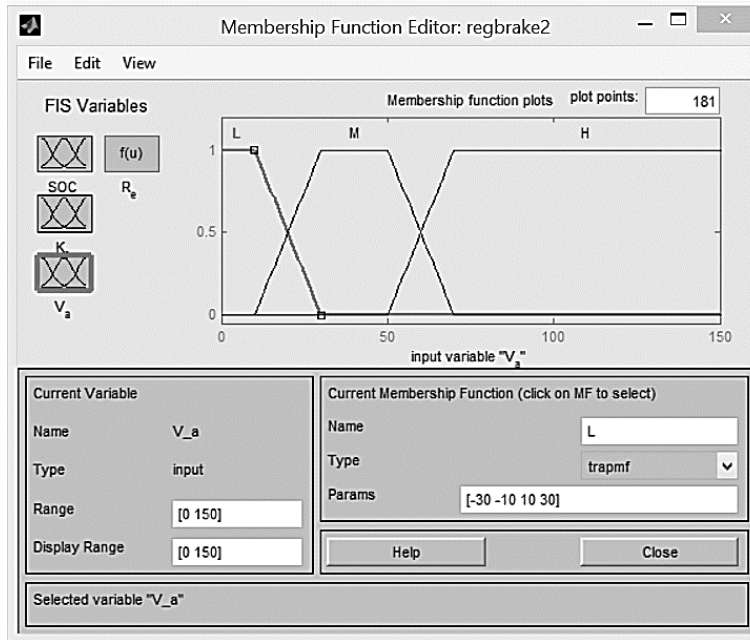
edilecektir. Frenleme oranının maksimum fren talebinin %80 nispetinden fazlası olarak talep edildiği durumlar acil frenleme olarak kabul edilecektir.

Bulanık mantık kontrolörü tasarlanırken, fren talebine ilişkin üyelik fonksiyonu Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. İlgili tanımlamaların “*Matlab® Fuzzy Logic Toolbox*” ile gösterimi ise Şekil 4.2’de görülebilir.



Şekil 4.2 : Frenleme Oranı ile İlgili Üyelik Fonksiyonları.

iii. Araç Hızı (V_a)



Şekil 4.3 : Araç hızı ile ilgili üyelik fonksiyonları.

Aracın takometre değeri, ya da araç tek dişli oranına sahipse, elektrik makinesinin devir durumu izlenerek elde edilebilir. Algoritma 0-150km/h arasında hızlar için tanımlanmıştır. Araç hızı frenleme tipinin belirlenmesinde özellikle ters anahtarlamalı frenlemenin devreye gireceği aralığın belirlenmesi için gereklidir. Bu aralık maksimum araç hızının %10'u ve aşağısı olarak belirlenmiştir. En son araç üzerinde kullanılacak elektrik makinesi, sürücü elektroniği ve batarya performansı ile bağıntılı olarak bu noktanın kalibrasyonu yapılabilir. Araç hızının bir diğer önemi de, aracın devrim enerjisi ile orantılı olmasıdır. Frenleme oranı ve şarj durumu ile birlikte bakıldığında frenleme ile ortaya çıkacak enerjinin batarya tarafından soğurulup soğurulmayacağı konusunda bir fikir verecektir.

Araç hızı üyelik fonksiyonları tanımlanırken 0-30 km/h arası ağır şehir içi durum olarak alınmıştır. 30-70 km/h, şehir içi kullanımı tanımlar. Hızın >70km/h olduğu durumlar ise şehir dışı olarak tanımlanabilir. İlgili üyelik fonksiyonunun tanımı Çizelge 4.1'de görülebilir. Ayrıca Şekil 4.3 bu üyelik fonksiyonunun “*Matlab® Fuzzy Logic Toolbox*” altında tanımlanmış halini de göstermektedir.

4.1.2 Kontrol sisteminin çıkışları

Geliştirilen bulanık kontrolcüde çıkış için kurallar, frenleme yöntemlerinin özelliklerine göre düşünülmüştür. Temel mantık;

- i. Şarj durumu düşük ise enerji geri kazanımlı;
- ii. Şarj durumu orta ise istenilen frenleme kuvveti ve aracın o anki hızına göre hem geri kazanımlı hem de dinamik;
- iii. Şarj durumu yüksek ise dinamik, çok yüksek ise sadece dinamik;
- iv. Şarj durumu yüksek ve araç hızı düşük ise ters akımla frenleme yapılacak şekilde oluşturulmuştur.

Kural tablosu Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çizelgede, *D* düşük, *O* orta, *Y* yüksek seviyeyi gösterir. Bu verilere istinaden, geliştirilecek sistem, bahsi geçen üç farklı elektrikli frenleme yöntemi arasında fren etkisini paylaştıracaktır. Buna göre, kontrol sisteminin çıkışı şu şekilde belirlenmiştir:

- i. Enerji Geri Kazanımlı Frenleme Oranı (R_e)
- ii. Dinamik Frenleme Oranı (R_d)

iii. Ters Akımla Frenleme Oranı (R_p)

Çizelge 4.2 : Bulanık Mantık Kural Tablosu.

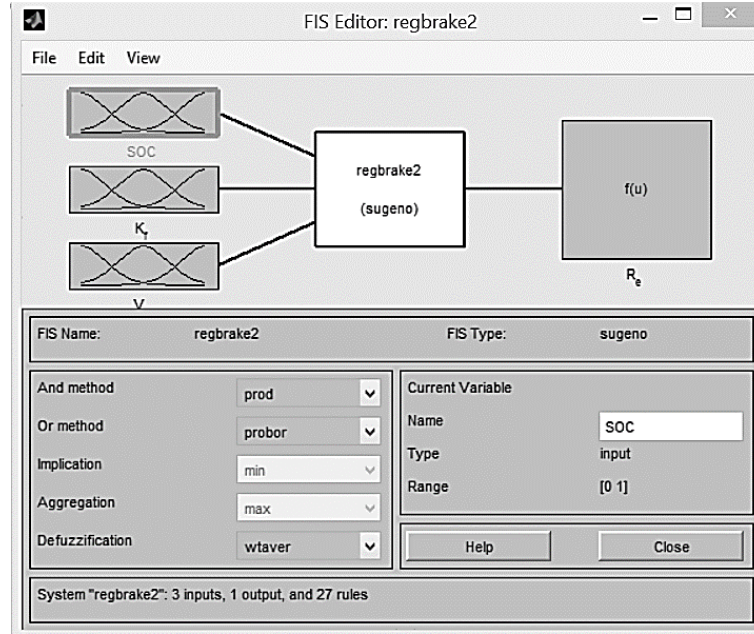
No	Enerji Geri Kazanımlı				Dinamik				Ters Akımla			
	SOC	K_f	V_a	R_e	SOC	K_f	V_a	R_d	SOC	K_f	V_a	R_p
1	D	D	D	1,00	D	D	D	0,00	D	-	-	0,00
2	D	D	O	1,00	D	D	O	0,00				
3	D	D	Y	1,00	D	D	Y	0,00				
4	D	Y	D	1,00	D	Y	D	0,00				
5	D	Y	O	1,00	D	Y	O	0,00				
6	D	Y	Y	1,00	D	Y	Y	0,00				
7	D	O	D	1,00	D	O	D	0,00				
8	D	O	O	1,00	D	O	O	0,00				
9	D	O	Y	0,90	D	O	Y	0,10				
10	O	D	D	1,00	O	D	D	0,00	O	-	-	0,00
11	O	D	O	1,00	O	D	O	0,00				
12	O	D	Y	1,00	O	D	Y	0,00				
13	O	Y	D	1,00	O	Y	D	0,00				
14	O	Y	O	1,00	O	Y	O	0,00				
15	O	Y	Y	0,90	O	Y	Y	0,10				
16	O	O	D	1,00	O	O	D	0,00				
17	O	O	O	0,90	O	O	O	0,10				
18	O	O	Y	0,80	O	O	Y	0,20				
19	Y	D	D	0,00	Y	D	D	0,00	Y	-	D	1,00
20	Y	D	O	0,00	Y	D	O	1,00			O	0,00
21	Y	D	Y	0,00	Y	D	Y	1,00			Y	
22	Y	Y	D	0,00	Y	Y	D	0,00			D	1,00
23	Y	Y	O	0,00	Y	Y	O	1,00			O	0,00
24	Y	Y	Y	0,00	Y	Y	Y	1,00			Y	
25	Y	O	D	0,00	Y	O	D	0,00			D	1,00
26	Y	O	O	0,00	Y	O	O	1,00			O	0,00
27	Y	O	Y	0,00	Y	O	Y	1,00			Y	

4.1.3 Bulanık mantık kontrol yapısı

Önerilen TEF yöntemine göre, aracın yalnız elektrikli frenleme yöntemleri ile durabilmesi için, tüm frenleme anlarında çalışma oranlarının toplamı $R_e + R_d + R_p = 1$ olmalıdır. Frenleme oranlarının daha net tanımlanabilmesi için bulanık kontrol etkileşiminin (FIS – *Fuzzy Interference System*) Sugeno olmasına karar verilmiştir. Bu tip etkileşimde, her kural için çıkışın matematiksel değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

➔ If Input 1 = x and Input 2 = y, then Output is $z = ax + by + c$

Sıfırıncı seviye (*zero order*) Sugeno'da $a=b=0$ 'dır, yani z bir sabittir. Sonuçta çıkan değer, tüm kural çıkış değerlerine göre alınan ağırlıklı ortalama oluşur [68]. Şekil 4.4 geliştirilen bulanık mantık kontrolcünün “*Matlab® Fuzzy Logic Toolbox*” altında tanımlanmış halini de göstermektedir.

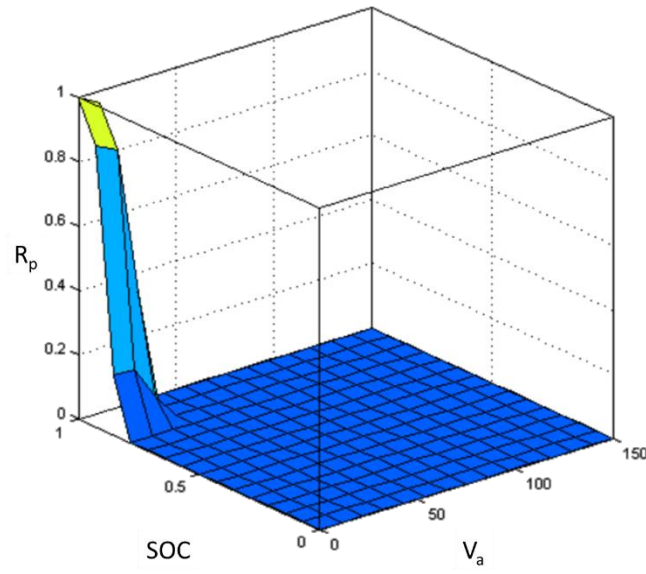
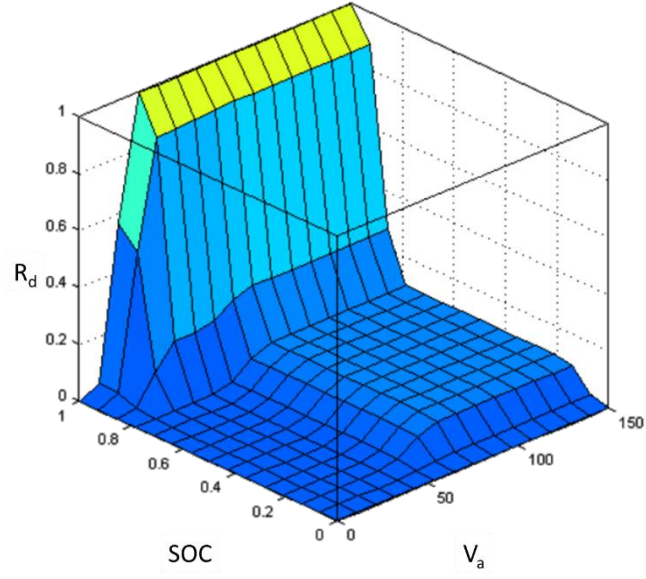
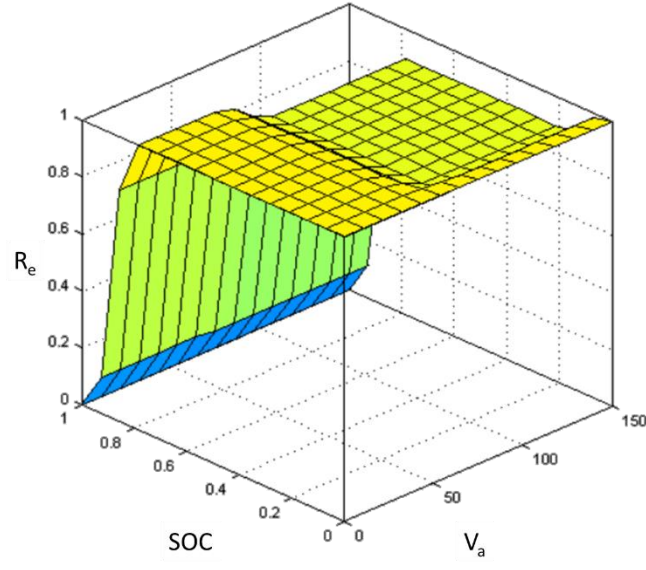


Şekil 4.4 : Bulanık Mantık Kontrol Yapısı.

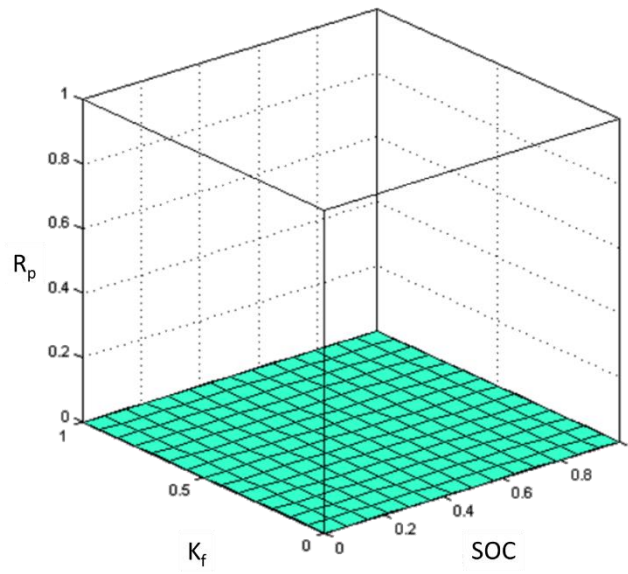
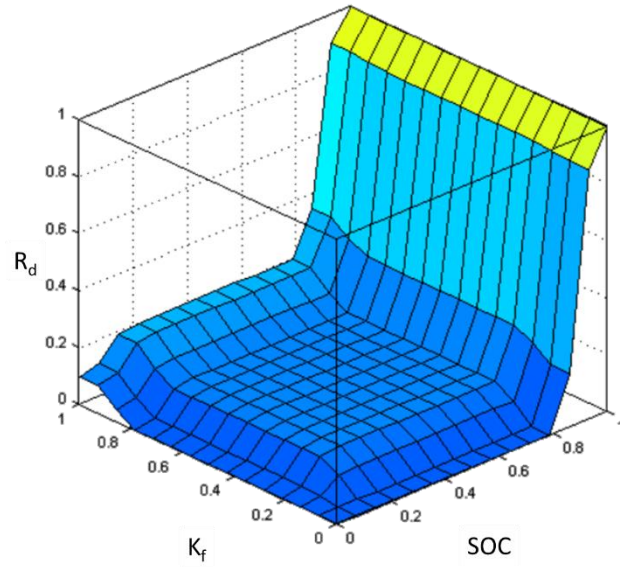
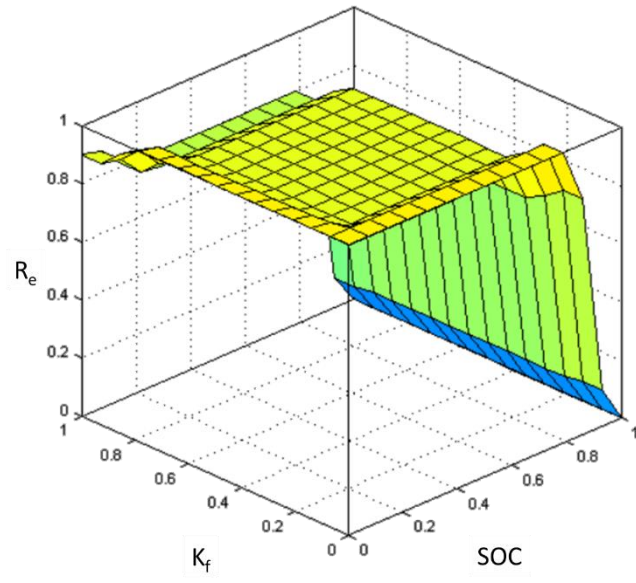
Yukarıdaki kural tablosuna uygun olarak çizilmiş ilişki tabloları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekil 4.5'te elektrikli frenleme oranlarının (R_e , R_d , R_p) araç hızı (V_a) ve şarj durumu (SOC) ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.6'da ise elektrikli frenleme oranlarının frenleme talebi (K_f) ve şarj durumu (SOC) ile değişimi görülebilir. Şekil 4.7'de de frenleme oranlarının frenleme talebi (K_f) ve araç hızı (V_a) ile değişimi verilmiştir.

4.2 Deney Düzenekinin Geliştirilmesi

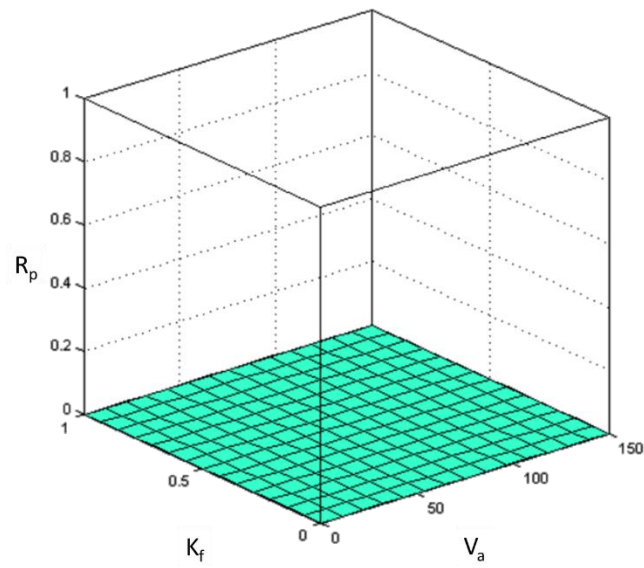
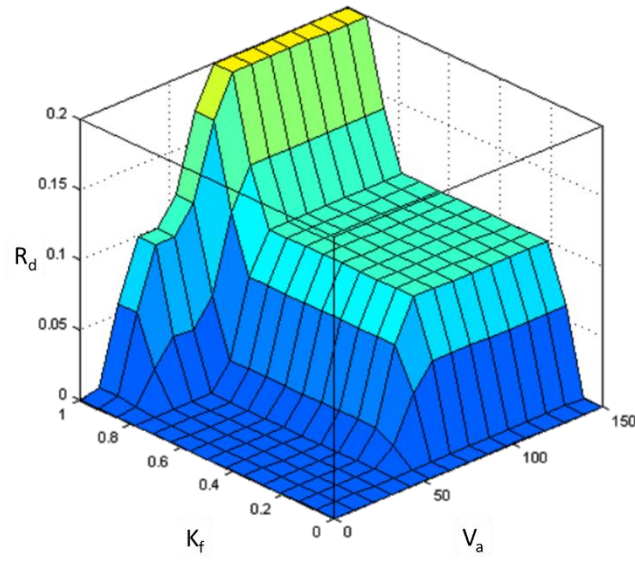
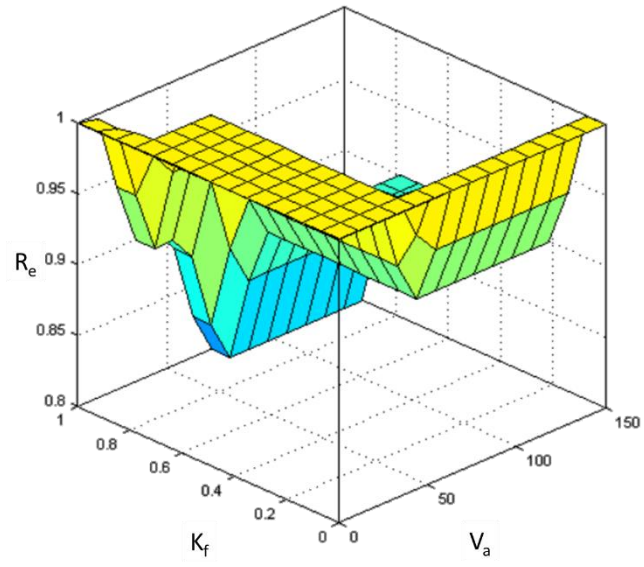
Geliştirilen kontrol algoritmasının çalışması deneysel çalışmalarla test edilecektir. Deney düzeneği olarak bir elektrikli motosiklet kullanılmasına karar verilmiştir. Elektrikli motosiklet, ön ve arka frenleri manuel olarak devreye alınabilmesi nedeniyle TEF için uygun bir platform sunmaktadır. Ayrıca, nispeten düşük güçlü ve düşük hızlı bir sistem olduğu için maliyet ve güvenlik açısından da daha uygun bir platformdur. Test çalışmaları için özel bir pist ihtiyacı da olmayacaktır.



Şekil 4.5 : Frenleme Oranları (R_e , R_d , R_p) – SOC – V_a .



Şekil 4.6 : Frenleme Oranları (R_e , R_d , R_p) – K_f – SOC .



Şekil 4.7 : Frenleme Oranları (R_e , R_d , R_p) – K_f – V_a .

Motosiklete ait, standart kontrol birimi çıkartılarak, model tabanlı geliştirilmiş kodların üzerinde uygulandığı bir elektronik kontrol ünitesi (ECU olarak kısaltılmıştır) ile değiştirilmiştir. Ayrıca, motosikletin elektronik sürücüsü, önceki çalışmalarda tasarlanmış başka bir motor sürücü ile değiştirilmiştir. Diğer bir değişiklik ise, önceki bölümlerde gerekçesi anlatılan, hem yükselten hem de düşüren özellikte, çift yönlü bir DA/DA çeviricinin sisteme eklenmesidir. Ayrıca, bir DA kıyıcı devresi, direnç üzerinde yapılacak frenlemenin kontrolü için kullanılacaktır.

4.2.1 Elektrikli motosiklet

Çizelge 4.3 : Elektrikli Motosiklet Teknik Verileri.

Model	VS3
Boyutlar	1800*530*1150 mm
Araç Kütlesi	105 kg
Menzil	50 km - 70 km (Eco Mode)
Maksimum Hız	63 km/h (45 km/h ile sınırlı)
Tırmanma Kapasitesi	15°
Motor Gücü	1500 W
Batarya Kapasitesi	60 V 20 Ah
Batarya Tipi	Jel
Şarj Süresi	6-8 Saat
Şarj Çıkış	60 V, 3 A
Lastik Boyutu	90-12 Ön / 3.5-10 Arka



Şekil 4.8 : Elektrikli Motosiklet.

Kullanılan elektrikli motosikletin verileri Çizelge 4.3'te görülebilir. Motosikletin genel görüntüsü ise Şekil 4.8'de verilmiştir. Motosiklet üzerinde sağ elcik üzerinde bulunan gaz potansiyometresinin bir eşi, yönü ters olacak şekilde, sol elciğe de eklenmiş ve sinyali ECU üzerine taşımak üzere kablolama çalışmaları yapılmıştır. Bu

kol üzerinden elektriksel frenleme yapılacaktır. Ayrıca mekanik frene ait fren müşiri üzerinden de ECU'ya kablolama yapılmıştır. Taşınan bu sinyal, mekanik fren devreye girdiğinde elektriksel freni sıfırlamak üzere kullanılacaktır. Mekanik fren aynı zamanda bir acil durum butonu olarak da görev yapacaktır. Ön düzenekte yapılan montaj ve kablolama çalışmalarına ilişkin görüntüler Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Ön Konsol Kablolama ve Montaj Çalışmaları.

Motosikletin oturağının altında bulunan bölmeye ise kontrol ECU'su, senkron DA/DA çevirici, yeni bir sürücü devresi ile sistemin kontrolü için gerekli anahtar vs. cihazlar yerleştirilmiştir. Motosikletin orijinal bataryaları ve motoru kullanılacaktır. İlgili montaj çalışmaları Şekil 4.10'da görülebilir.



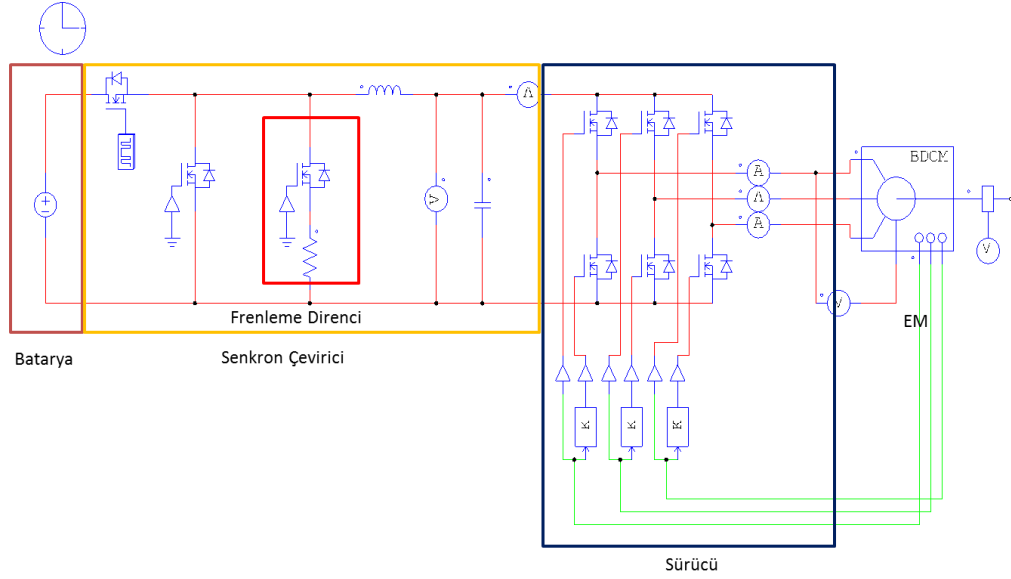
Şekil 4.10 : Arka Kısım Kablolama ve Montaj Çalışması.

4.2.2 Motor sürücü

Fırçasız doğru akım motoru (FDAM) sürmek üzere daha önceki çalışmalarda [25] tasarlanmış bir sürücü kullanılmıştır. Bu çalışmada DGM (Darbe Genlik Modülasyonu) işaretinin ayarlanması için kullanılan potansiyometre, maksimum değeri verecek şekilde ayarlanmıştır. Makinenin hız ayarı, sürücünün önüne konulacak senkron çevirici ile sağlanacaktır. Ayrıca, sürünün yön anahtarı (İleri/Geri) ile sürüş-süzülüş (Run/Coast) anahtarı iptal edilerek ECU'nun ilgili analog çıkışlarından sürülecek şekilde getirilmiştir.

4.2.3 Senkron çevirici

Senkron çevirici, çift yönlü iletim yapabilen, hem yükseltme hem de düşürme modunda çalışabilen bir çeviricidir. Tasarımda MOSFET anahtarlar ile SEMIKRON® SKYPER® sürücü katları kullanılmıştır. Sürücü katı TTL standardında işaretler ile sürülebilmektedir. ECU, üzerinde koştan bulanık mantık kontrolcünün hesapladığı değerler ile senkron çeviricinin ilgili anahtarlarını sürer. Önerilen yapı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

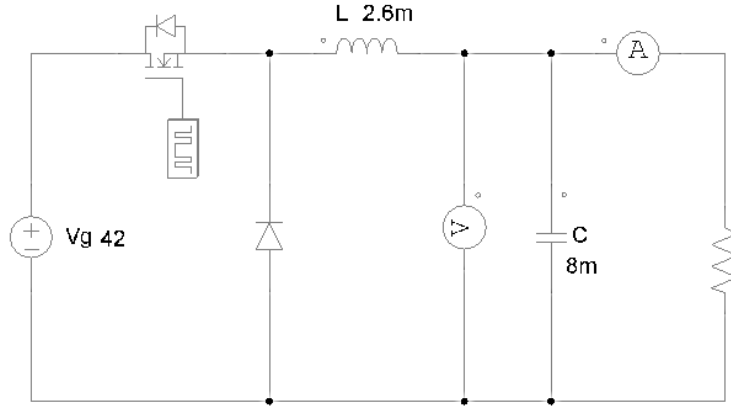


Şekil 4.11 : Senkron Çevirici İçeren Yapı.

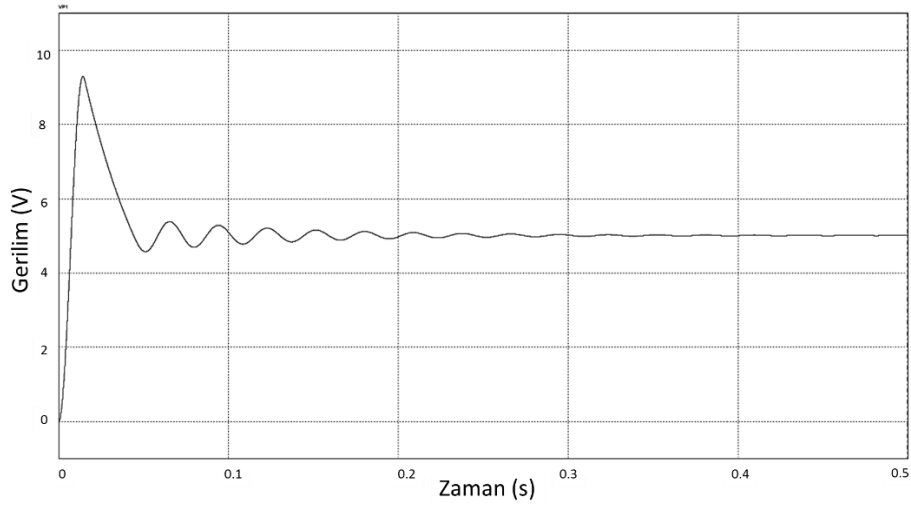
Çevirici, motor çalışma esnasında, hız ayarı yapılabilmesi için, batarya çıkışı ile motor sürücünün girişi arasında, gerilim düşürücü (Buck) modunda çalışacaktır. Frenlemede ise, motordan gelen enerjiyi bataryaya yükselterek gönderebilmek için gerilim yükseltici (Boost) modunda çalışacaktır. Devreye ayrıca, dinamik frenleme için bir direnç ve bunun üzerinden akacak akımın kontrolü için DC kıyıcı MOSFET eklenmiştir.

Motor çalışmada devre gerilim düşürücü olarak çalışacağından Şekil 4.12’te görülen şekilde modelleme yapmak mümkündür. Benzetim ile yapılan hesaplara göre deney düzeneği için 2,6 mH değerinde bir endüktans ve 8 mF değerinde bir kapasite kullanılması yeterli olacaktır. Benzetim devresi en kötü hal durumuna (42 V kaynak gerilimi) göre kurulmuştur. Bu durumda çıkış gerilim 5,02 V tepe değerine kaynak akım değeri ise 0,872 A tepe değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.13 ve 4.14’te bu

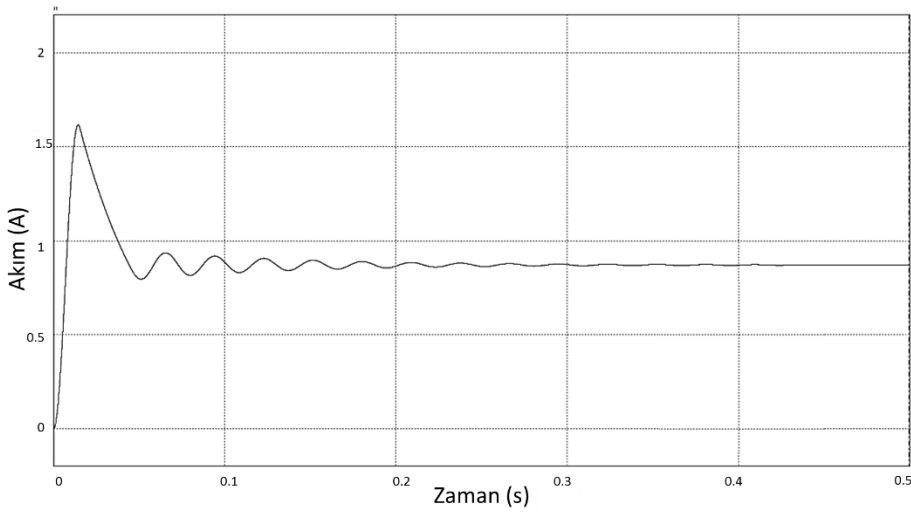
hesaplanan değerler kullanılarak PSIM[®] programında yapılan benzetimin sonuçları verilmiştir.



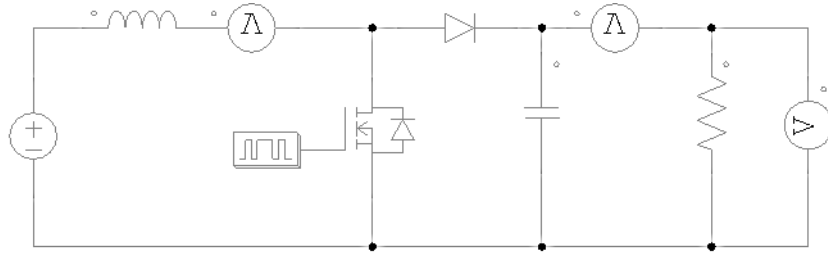
Şekil 4.12 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumunda Senkron Çevirici.



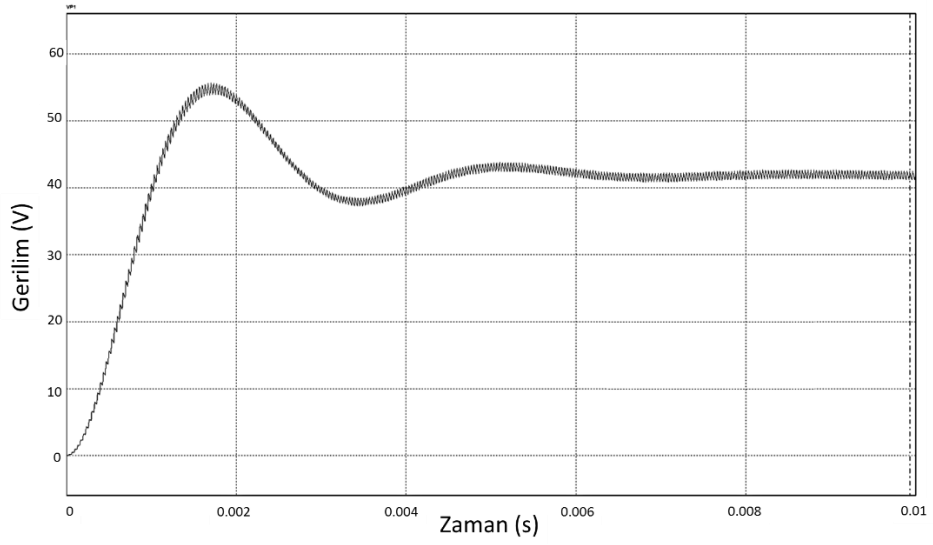
Şekil 4.13 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumu için Yük Gerilimi.



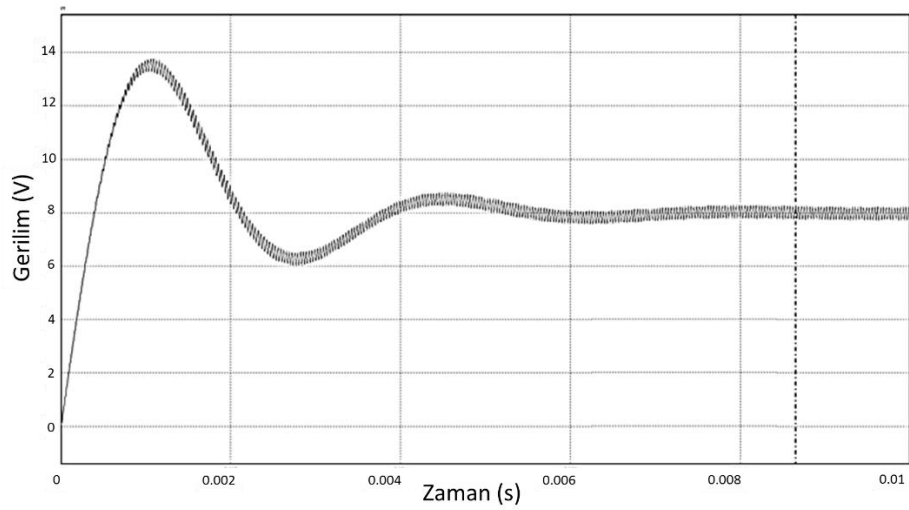
Şekil 4.14 : Gerilim Düşürücü Çalışma Durumu için Yük Akımı.



Şekil 4.15 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Senkron Çevirici.



Şekil 4.16 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Yük Gerilimi



Şekil 4.17 : Gerilim Yükseltici Çalışma Durumunda Yük Akımı.

Enerji geri kazanımlı frenleme esnasında çalışacak gerilim yükseltici devre Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Benzetim ile bulunan $540 \mu\text{H}$ değerinde bir endüktans ve $40 \mu\text{F}$ değerinde bir kapasite kullanılması yeterli olacaktır. Benzetim devresi en kötü

duruma (12 V kaynak gerilimi) göre kurulmuştur. Bu durumda çıkış gerilim 42,53 V tepe değerine kaynak akım değeri ise 8,24 A tepe değerine ulaştığı görülmüştür. Hesaplanan bu değerlerle PSIM® programı kullanılarak yapılan benzetimin sonuçları Şekil 4.16 ve 4.17’de gösterilmektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda gerilim yükseltme ve düşürme çalışma durumları için farklı endüktans ve kapasite değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan iki endüktans değerinden büyük olan 2,6 mH değeri devrede kullanılmasına karar verilmiştir. Nedeni ise devrenin gerilim düşürme çalışma durumunda sürekli akım modunda çalışabilmesi için bu değere ihtiyaç duyulmaktadır. Devrede, hesaplanan her iki kapasite değeri de kullanılmıştır. Bunlardan 40 µF olarak hesaplanan değer giriş kapasitesi olacak ve aküden hemen sonra bağlanmıştır. 8 mF olarak hesaplanan değer ise çıkış kapasitesi olarak sürücüden hemen önce bağlanmıştır.

4.2.4 Dinamik frenleme direnç bankosu



Şekil 4.18 : Dinamik Frenleme Direnç Bankosu.

Dinamik frenleme için 18 adet 1 Ω’luk dirençler kullanılmış, 3 seri – 6 paralel koldan toplam 0,5 Ω’luk direnç bloğu oluşturulmuştur. Devrenin geri kalan kısımları, (motor iç dirençleri dâhil) çalışma frekansında yaklaşık 0,2 Ω olarak ölçülmüştür. Dirençleri sürececek olan kıyıcının maksimum çalışma oranında ve maksimum hızda dirençler üzerine 36 V’luk gerilim uygulanması öngörülmüştür. Buna göre maksimum dinamik frenleme gücü ($P_{dinamik_maks}$);

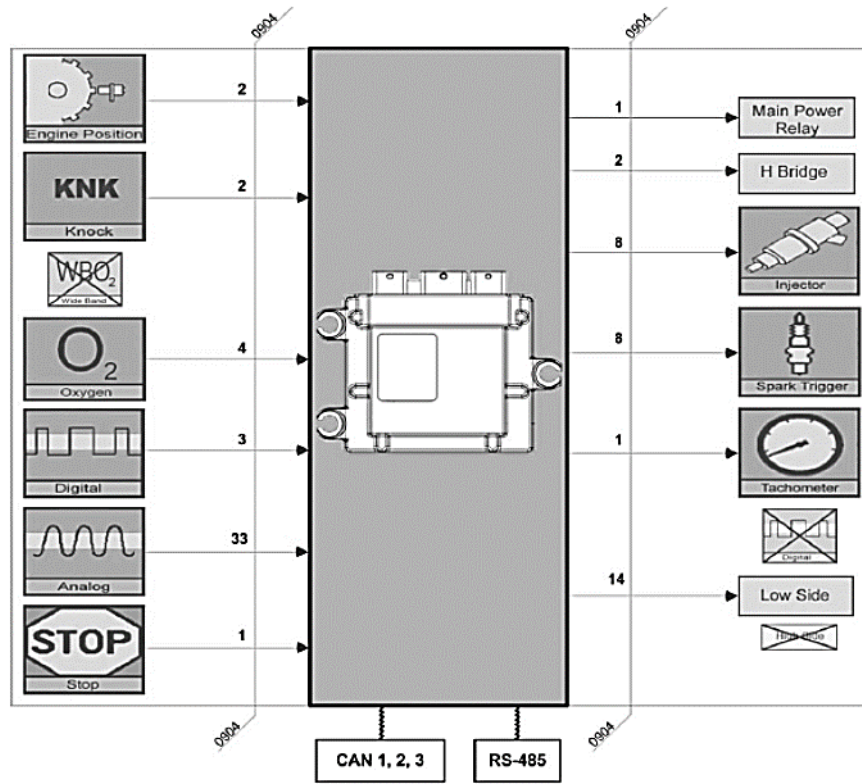
$$R_{toplamlam} = R_{iç} + R_{banko} = 0.2 \, \Omega + 0.5 \, \Omega = 0.7 \, \Omega \quad (4.1)$$

$$I_{dinamik_maks} = \frac{36 \, V}{0.7 \, \Omega} \quad (4.2)$$

$$P_{Dinamik_maks} = 36 V \times 51,4 A = 1850 W \quad (4.3)$$

olacaktır. Burada, $R_{iç}$; sistemin iç dirençler toplamını, R_{banko} ; kullanılacak banko direncinin değeri göstermektedir. Bu değer motor gücü anma değeri olan 1500 W'tan %24 fazladır. Ancak dinamik frenleme akımı motor ve dirençlere kısa süre etkiyeceğinden sorun oluşturması beklenmemektedir. Dinamik frenleme devresi, soğutmanın kolay sağlanabilmesi için motosikletin arka bölmesine monte edilmiştir. Dinamik frenleme bloğunun son konumu Şekil 4.18'de görülebilir.

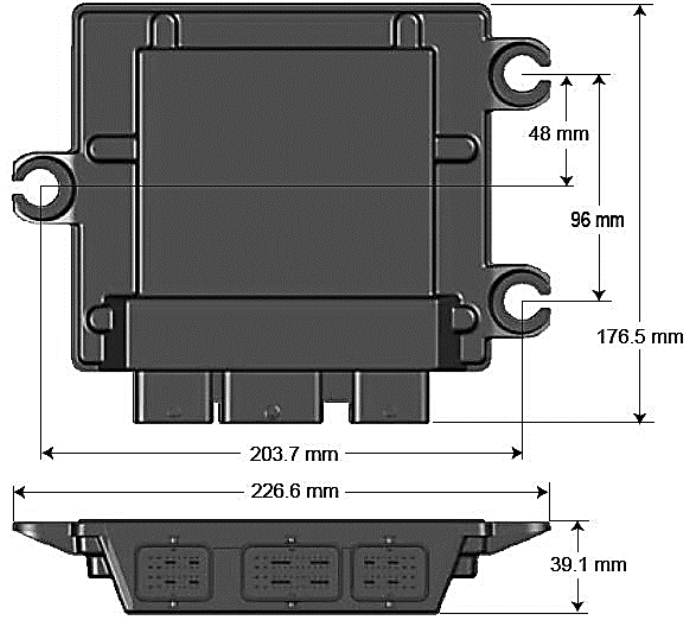
4.2.5 Elektronik kontrol birimi (ECU)



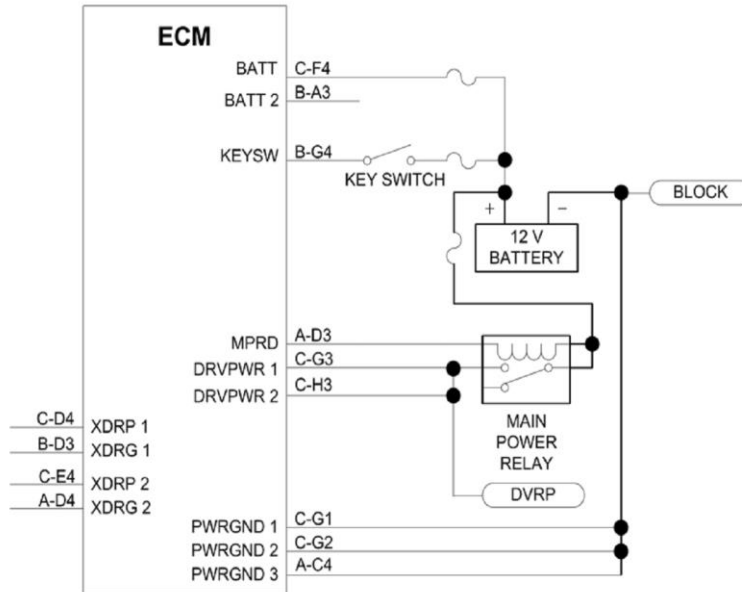
Şekil 4.19 : Kontrol ECU'su Blok Diyagramı [69].

ECU olarak, Woodward firmasının ürettiği otomotiv standardında, Freescale MPC5554 tabanlı ECM-5554-112-0904 kodlu modül seçilmiştir. Seçilen ECU, Matlab®-Simulink® üzerinden model tabanlı kontrol sistemi geliştirilebilecek bir yazılım ara yüzüne de sahiptir. ECU üzerinde 112 pin vardır. Bu pinler çeşitli analog ve sayısal giriş ve çıkışlar ile üç adet CAN (*Controller Area Network*) ara yüzü ve 1 adet te RS485 haberleşme kanallarını içerir. Geliştirilen yazılım, bu donanım kullanarak doğrudan seri üretim bir araçta da kullanılabilir olacaktır. Şekil 4.20'de ECU'nun üretici tarafından sağlanan blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 4.21'de ise

ilgili ünitenin teknik resmi vardır. ECU'nun TTL çıkış veren sayısal çıkışları MOSFET sürücüler ile motor sürücünün kontrol butonlarında kullanılır. Analog girişler gaz-fren potansiyometreleri ile araç hızı gibi verileri yazılıma iletilir. Geliştirilecek sistemin kendi başına işleyen (*stand-alone*) bir sistemdir. Programlama ve ilk test çalışmaları ise CAN üzerinden ECU ve bilgisayar bağlanarak geliştirilen ara yüzde yapılmıştır. ECU bağlantısı için ayrıca KVASER CAN-USB çevirici kullanılmıştır.

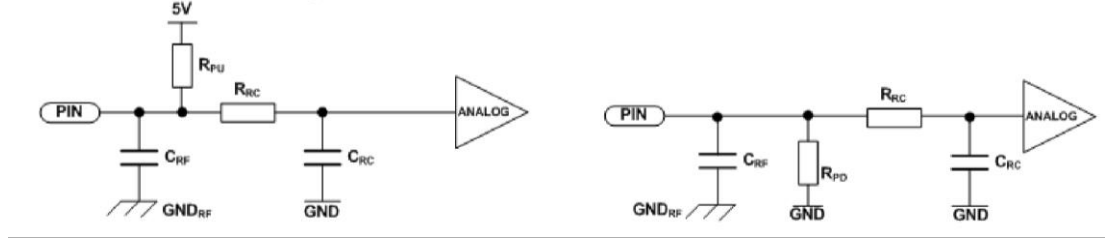


Şekil 4.20 : Kontrol ECU'su Teknik Resmi.



Şekil 4.21 : ECU Ana Güç Devresi Şeması [69].

ECU'ya enerji verilmesi için de bir güç devresine ihtiyaç vardır. Bu devre ile programlanma ve çalışma esnasında bir röle üzerinden enerji verilmektedir. Rölenin enerjisi ise ECU üzerinde bulunan MPRD (*Main Power Relay Driver*) çıkışı üzerinden verilir. KEYSW girişi, bağlı olan anahtarın kapandığını gördüğünde MPRD'yi sürerek sisteme enerjiyi verir. Bu bağlantının amacı yazılım kullanılarak da gücü ECU tarafından beslenen bazı sürücü devrelere verilen enerjinin kontrol edilebilmesidir. ECU üzerinde yapılan bağlantı şeması şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : Analog Girişler için PU/PD Bağlantı Şemaları.

Analog girişlerdeki sinyal 0-5 V aralığında değişir. Okunan sinyalin çözünürlüğü 12bit çözünürlüğe sahiptir ve periyodu 1 ms'dir. Girişin yapısına göre çıkış sinyalini yukarıya, giriş gerilimine (*pull-up*, PU) ya da aşağıya, toprağa (*pull-down*, PD) çekecek dirençlere ihtiyaç duyarlar. İlgili dirençleri içeren kablolanmanın her analog giriş için yapılması gereklidir. Şekil 4.22'de uygulanan genel bağlantı şeması gösterilmiştir. Çizelge 4.4'te sistemde kullanılan analog girişler ile (giriş noktalarıyla) kullanılan dirençler ve tiplerinin özeti (PU ya da PD) görülebilir.

Çizelge 4.4 : ECU Giriş-Çıkış Sinyal Tablosu.

#	Sinyal Adı	G/Ç	Tip	Koşullandırma
1	Güç Rölesi	G&Ç	Güç	Özel (bkz. Şekil 4.22)
2	Gaz	G	Analog	PD, 220k
3	Fren	G	Analog	PD, 220k
4	Batarya Akımı	G	Analog	PU, 1k
5	Batarya Gerilimi	G	Analog	PU, 1k
6	Mekanik Fren Müşiri	G	Analog	PD, 220k
7	Motor Hızı	G	Sayısal	Hall Sensörü üzerinden
8	Buck DGM	Ç	Sayısal (TTL)	Doğrudan MOSFET'e
9	Boost DGM	Ç	Sayısal (TTL)	Doğrudan MOSFET'e
10	Dinamik Frenleme Kısıyıcı DGM	Ç	Sayısal (TTL)	Doğrudan MOSFET'e
11	Öne / Geriye	Ç	Sayısal (Boole tipi)	Doğrudan MOSFET'e
12	Sür / Süzül	Ç	Sayısal (Boole tipi)	Doğrudan MOSFET'e
13	Programlama, Test, Kalibrasyon	G&Ç	Sayısal (CAN)	Özel Kablo ile

Analog girişler şunlardır;

- Gaz İşareti (AN24, 220k PD): Motosikletin üzerinde bulunan gaz işareti ECU'ya girdikten sonra işlenerek verilecektir. Bunun için motosikletin gaz potansiyometresi üzerindeki gerilim okunacaktır.
- Fren İşareti (AN25, 220k PD): Elektrikli frenleme için, sol elcik üzerine gaz işareti için kullanılan potansiyometre takılacaktır. Kullanıcı frenlemek istediğinde bu konu öne doğru çevirecektir. El ile sıkılan mekanik fren, deneyler esnasında elektrikli frenleme algoritmaları ile ilgili bir sorun olduğu durumda kullanılabilecektir.
- Batarya Akımı (AN5, 1k PU): Batarya akımının ölçüleceği akım sensöründen alınan veriyi okur.
- Batarya Gerilimi (AN6, 1k PU): Batarya akımının ölçüleceği gerilim sensörünün verisini okur.
- Mekanik Fren İşareti (AN23M, 220k PD): Mekanik frenin sıkılı olduğunu işaretini taşır. Stop lambası müşirinden veri alır.

Kullanılan tek sayısal giriş ise motorun Hall Sensörü'ne bağlanan SPEED1 kodlu ECU girişidir ve ilgili işareti sayarak hızı belirleyen bir algoritma çalıştırır. İlgili işaretin frekansı yazılıma iletilmiş olur, bu şekilde motor hızı okunur.

Sayısal çıkışları ise iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Bunlardan ilki senkron çevirici sürücü işaretleri ile ilgili sayısal çıkışlardır. ECU üzerinde bulunan ve TTL seviyesinde çıkış üreten sayısal çıkışlar kullanılarak senkron çeviricinin MOSFET'lerini süren DGM işaretleri üretilir. Bu uygulamada anahtarlama frekansı 8kHz olarak ayarlanmıştır. Bulanık mantık kontrol algoritmalarını içeren ilgili yazılım blokları şu işaretleri üretirler:

- Gerilim Düşürme Çalışma Durumu İşareti (EST1): Senkron çeviricinin motor çalışma durumu için giriş gerilimini düşürerek sürücüye aktardığı çalışma durumu ile ilgili DGM işaretini iletir.
- Gerilim Yükseltme Çalışma Durumu İşareti (EST3): Senkron çeviricinin enerji geri kazanımlı frenleme durumunda sürücü girişindeki gerilimi yükselterek bataryalara ilettiği çalışma durumu için DGM işaretini iletir.

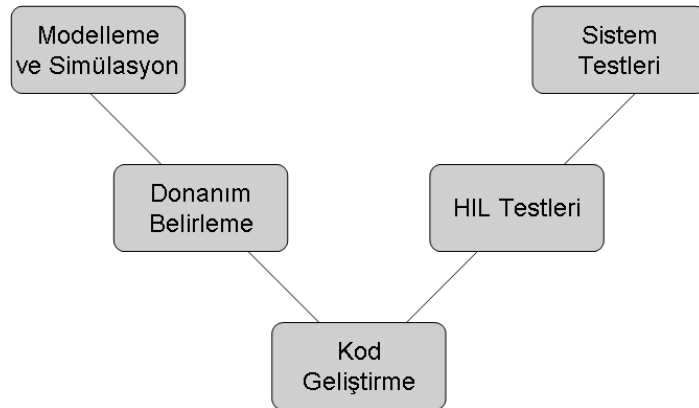
- Dinamik Frenleme Çalışma Durum İşareti (EST4): Direnç üzerinden frenleme için DC kıyıcı çalışma durumundaki DGM işaretini iletir.

Diğer sayısal çıkışlar ise sürücü kontrol işaretleri ile ilgili olanlardır. Sonraki bölümde anlatılacak ECU yazılımı gerekli durumlarda sürücünün ileri-geri (EST5) ya da sürüş-süzülüş (EST2) şeklinde çalışmasını bu Boole tipi (0, 1) işaret ile yönetir. Ayrıca ECU, CAN protokolü üzerinden bilgisayar ile haberleşir. Programlama, kalibrasyon, kontrol ve izleme için CAN kanallarından biri alınarak bir CAN-USB kablosu vasıtası ile bilgisayara bağlanmıştır. Tüm bu sayısal çıkışlar Çizelge 4.4'te özet halde görülebilir.

4.3 Kontrol Yazılımının Geliştirilmesi

Önceki bölümde anlatılan kontrol algoritmalarının yine bir önceki bölümde anlatılan deney düzeneği üzerinde uygulanabilmesi için ECU üzerinde koşacak yazılımların geliştirilmesi gerekir. Bu başlıkta ilgili gömülü kontrol yazılımının geliştirilmesi aşamaları anlatılacaktır.

Tasarlanan kontrol algoritmalarının bir ECU üzerinde hayata geçirilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Klasik yöntem, ilgili algoritmaların bir programlama dilinde (örn. C++, C#, vb.) kodlanarak derlenmesi ve ilgili ara yüzlerin de geliştirilerek ECU üzerine aktarılması şeklindedir. Bu yöntem uzun süre aldığı gibi, hatalara açıktır ve zaman alan hata ayıklama süreçlerine ihtiyaç duyar.



Şekil 4.23 : Model Tabanlı Geliştirme Adımları.

Daha güncel kontrol yazılımı geliştirme yöntemlerinden biri ise model tabanlı yazılım geliştirmedir. Bu yöntemde kontrol algoritmaları genellikle çeşitli parçalar arası ilişkilerin rahatlıkla görülebileceği bloklar ve bağlantıları şeklinde görsel öğelerle destekleyen bir sistem modelleme programında, geliştirilirler. Sistemin ve

algoritmanın beraber tasarlanabildiği bu modellerde Şekil 4.23'te görülen V çevrimi uygulanarak geliştirme ve test aşamaları beraber yürütülebilir.

İlk adım olan modelleme ve benzetimdir. Kontrol edilecek sisteme (*plant*) ait matematiksel model bu adımda geliştirilir. Bu çalışma için de, ilgili adım 2. Bölüm'de (Elektrikli Aracın Güç Akışını Modellenmesi ve Benzetimi) anlatılmıştır. Kontrol algoritmalarının geliştirilmesi de yine modelleme ve benzetim adımının bir parçasıdır. Buradan sonra döngüde model (MIL – *Model in the Loop*) yöntemi ile geliştirilen kontrol algoritması modellenen sistem üzerinde denenebilir. Yine bu çalışma için benzetim çalışmaları bu bölümün başında verilmiştir.

İkinci adım kontrol ECU'sunun tespiti ve yapılan modelleme çalışmalarının donanımına ait bloklara aktarılması şeklinde olacaktır. Bu adımda, kontrol algoritmalarına ilişkin ara yüzler de modellenerek model tabanlı kontrol sistemi oluşturulur.

Üçüncü adımda artık otomatik kod üretmek için gerekli altyapı, hem kontrolcü hem de sistem tarafında hazırlanmış olmalıdır. Kontrol ECU'su ve sistem arasında ayrıca fiziksel tüm ara yüzleri içeren kontrol mimarisinin de hazırlanması gereklidir. Bu ara yüzler; girişler ve çıkışlara ilişkin çeşitli sinyal koşullandırma devreleri, optik, manyetik okuma devreleri, çıkışlar için çeşitli güçlendiriciler vs. şeklindedir ve bu bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

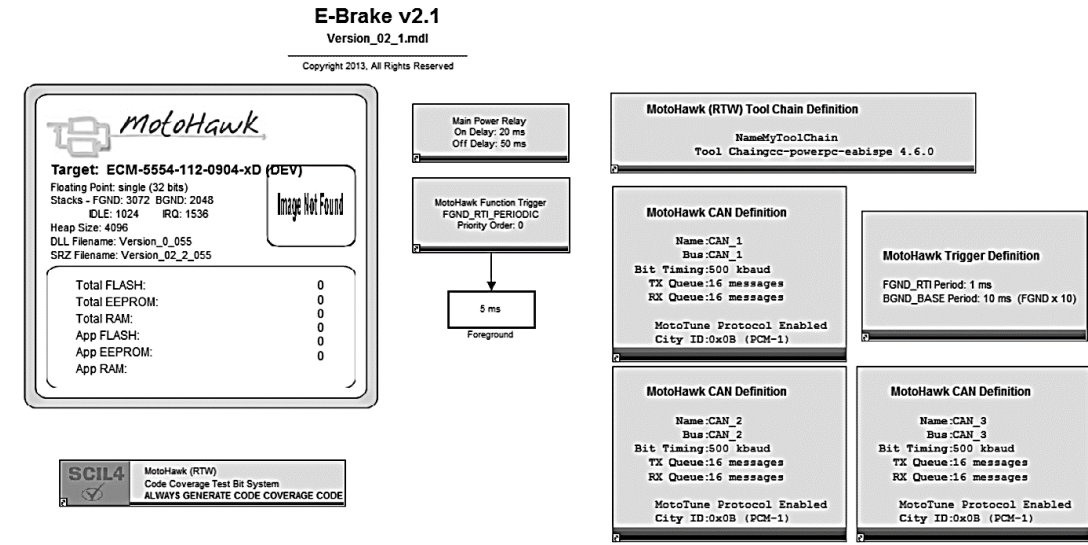
Model tabanlı yazılım geliştirmenin en büyük avantajı kodun otomatik olarak yazılım tarafından üretilmesi ve derlenmesidir. Üretilen kod yazılımda gerekli güncellemelerin yapılması için döngüde donanım (HIL – *Hardware in the Loop*) yöntemi ile üretildiği anda sistem üzerinde test edilebilir. Sistem üzerinde testin pahalı ya da tehlikeli olduğu durumda başka özel benzetici sistemleri kullanılarak sistemin tüm tepkileri geliştirilen modeller tarafından benzetilebilir. Bu yöntem ile kontrol ECU'sunun test edilmesine ise döngüde yazılım (SIL – *Software in the Loop*) denir. Bu çalışma kapsamında HIL yöntemi ile yazılım iyileştirmeleri yapılmıştır ve denenmiştir.

Model tabanlı geliştirme yöntemine ilişkin paket programlar sunan çeşitli firmalar, üretilen kodların otomatik olması sayesinde insan hatalarının azaltıldığını ve en uygun kodun üretildiğini savunmaktadır. Yöntem, V çevriminin her adımında yazılımın test edilebilmesi ve hızlı sonuç alınabilmesi nedeniyle otomotivde, havacılıkta ve hatta bazı uzay uygulamalarında kabul görmektedir [70, 71]. Otomatik kod üretme için geliştirilmiş algoritmalarındaki ilerlemeler, yöntemle olan güvenin artmasına ve

uygulama alanlarının artmasına destek olmaktadır. Önceki bölümde bulanık mantık kontrol algoritmalarının oluşturulduğu Matlab®-Simulink® programı, model tabanlı kontrol yazılımı geliştirmek için bir platform sunmaktadır. Ayrıca, ilgili ECU'ya ait Motohawk® yazılım blokları ile Mototune® kalibrasyon programı kullanılmıştır. Yazılım, temel üst seviye kontrol blokları ile doktora çalışması kapsamında önerilen ve geliştirilen bulanık mantık kontrolcü yazılımını içerir. Hazırlanan yazılım MPC555 tabanlı mikroişlemcinin kaynak kodunu ve ECU'nun çevre birimlere ait kütüphanelerini ve adreslemelerini otomatik olarak yapar.

4.3.1 Ana kontrol ekranı

“Ana Kontrol” ekranı tetikleme aralıklarını, CAN kapılarını ve ana güç rölesi ayarlarını tanımlamak için kullanılır. İlgili ekran Şekil 4.24'te görülebilir. Bu ekranın bir seviye altında “Giriş/Çıkış Yöneticisi” (*I/O Manager*) ve “Sürüş/Frenleme Yöneticisi” (*Run/Brake Manager*) adında iki adet “Kontrol Yönetici” bloğu tanımlanmıştır. İlgili ekran Şekil 4.25'te görülebilir.

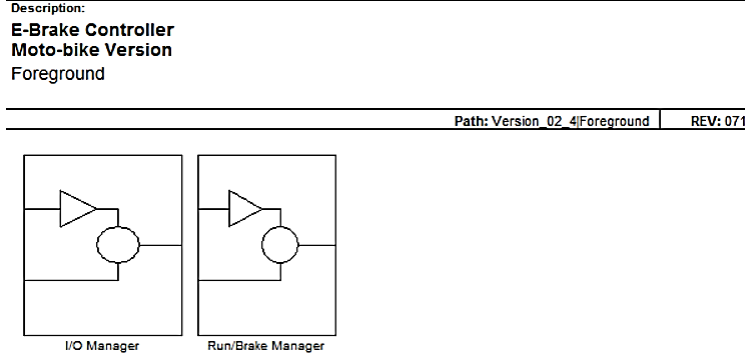


Şekil 4.24 : Ana Kontrol Ekranı.

4.3.2 Giriş – çıkış yöneticisi

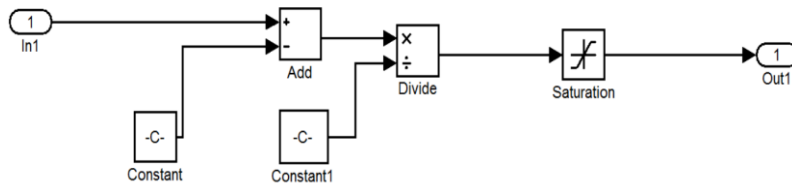
Önceki bölümde tanımlanan ve Çizelge 4.4'te özetlenen giriş-çıkışlar bu blok altındadır. Analog işaretlerin, potansiyometre ile sensörlerden alınan, ECU'nun ilgili pini tarafından okunan ham veriler üzerinden en yüksek ve düşük değerlerine göre kalibre ve normalize edilmesi gerekir. Bunun için genel formül şu şekildedir:

$$In_{nor} = \frac{(In - Offset)}{(In_{max} - Offset)} \quad (4.4)$$



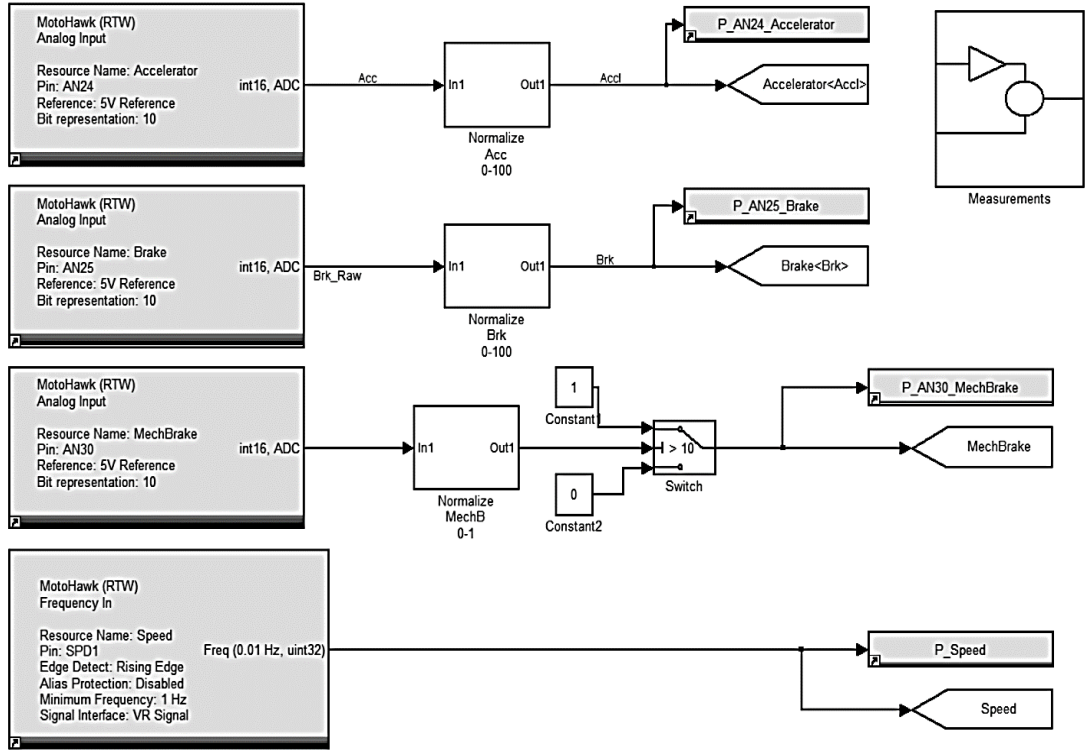
Şekil 4.25 : Kontrol Yöneticileri Ekranı.

Burada, In_{nor} [0, 1] aralığında tanımlı normalize edilmiş girişi, In ham giriş değerini, $Offset$ doğal durumda okunan değeri (örn. gaza ya da frene hiç basılmadığındaki durum), In_{max} ise girişin alabildiği maksimum değeri (örn. tam fren ya da gaz durumu) tanımlar. Bu değerler sistem tasarlanırken okunarak kalibrasyon parametresi (sabit) olarak girilir. Normalizasyonun yapıldığı blok Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Bu bloktaki doyma işlemcisi herhangi bir bozucu etki ya da yanlış hesaplama olduğunda işareti normalizasyon sınırları içinde tutmak üzere eklenmiştir.

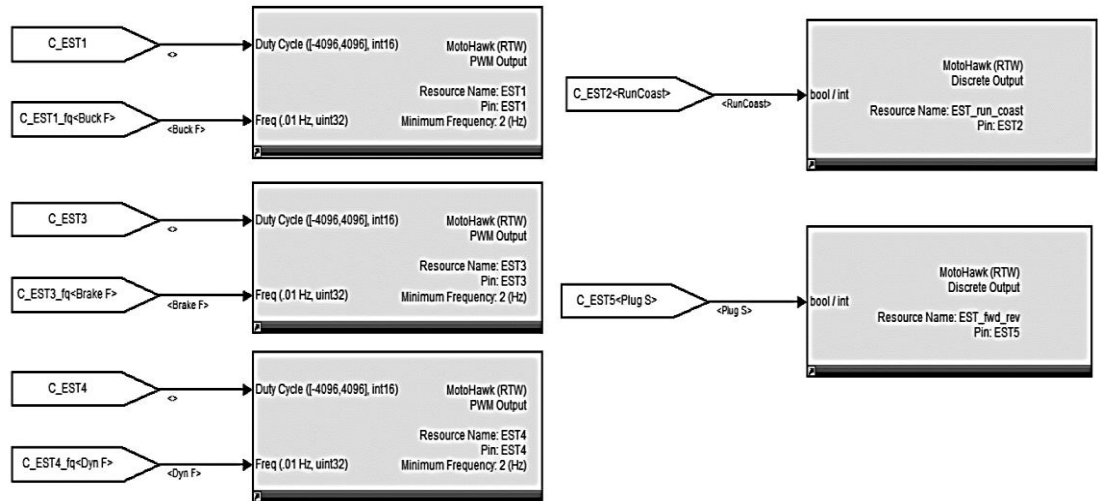


Şekil 4.26 : Normalizasyon Bloğu.

Giriş/Çıkış Yöneticisi’nin girişlere ait içeriği Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Normalizasyon bloklarının konumlandırılmasını burada görmek mümkündür. Burada kullanılan özel bloklar Motohawk® programına ait bloklardır ve ECU ile yazılımın ara yüzü görevini görürler ve ilgili pinden aldıkları veriyi yazılıma iletirler.



Şekil 4.27 : Giriş Blokları.



Şekil 4.28 : Çıkış Blokları.

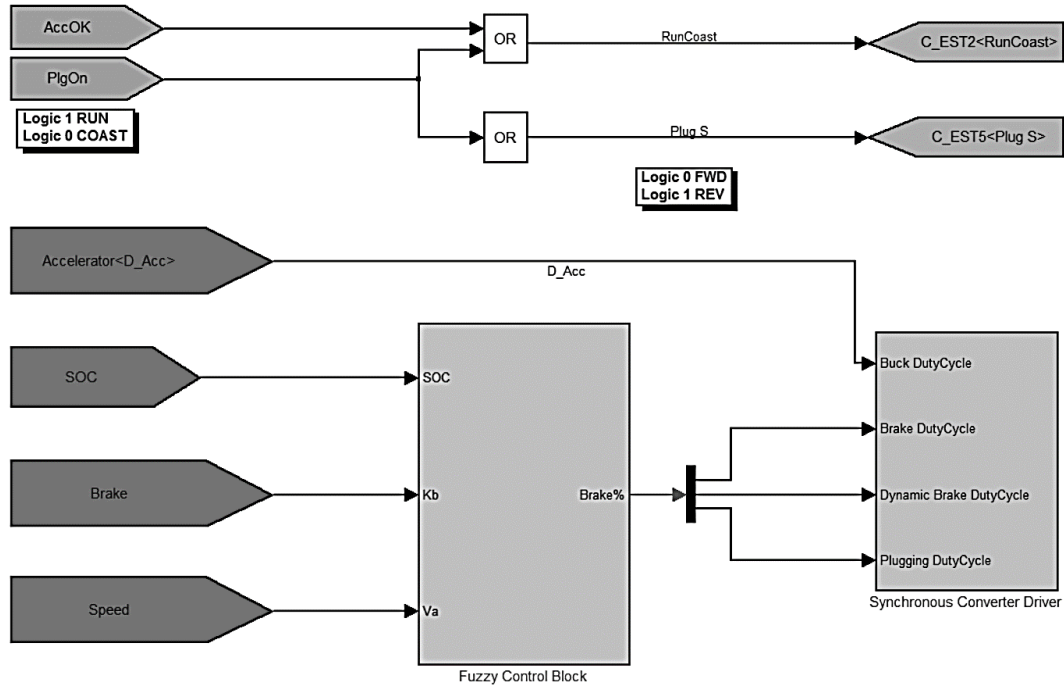
Giriş/Çıkış Yöneticisi'nin çıkışlara ait içeriği Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Girişlerdekine benzer şekilde, çıkışlar için de Motohawk® yazılımına ait özel bloklar vardır. Bunlar da programın hesapladığı değerleri ECU'nın ilgili pinlerine ileterek sistem ile ara yüzü oluşturacaklardır. Çizelge 4.5, ilgili pinlerin kodlarını (EST1, EST2...) ve program içerisinde kullanılacak sinyal adlarını görmek üzere incelenebilir.

Çizelge 4.5 : Giriş/Çıkış Blokları İşaretleri.

#	İşaret Adı	Port	G/Ç	Veri Tipi	Mesaj Adı
1	Gaz	AN24	G	32 bit (UInt32)	<i>Accelerator</i>
2	Fren	AN25	G	32 bit (UInt32)	<i>Brake</i>
3	Batarya Akımı	AN5	G	32 bit (UInt32)	<i>Ibatt</i>
4	Batarya Gerilimi	AN6	G	32 bit (UInt32)	<i>Vbatt</i>
5	Mekanik Fren Müşiri	AN30	G	32 bit (UInt32)	<i>MechBrake</i>
6	Motor Hızı	SPD1	G	32 bit (UInt32)	<i>Speed</i>
7	Buck DGM	EST1	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST1</i>
8	Boost DGM	EST3	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST3</i>
9	Dinamik Frenleme Kısıyıcı DGM	EST4	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST4</i>
10	Öne / Geriye	EST5	Ç	Boolean	<i>C_EST5</i>
11	Sür / Süzül	EST2	Ç	Boolean	<i>C_EST2</i>

4.3.3 Sürüş ve frenleme yöneticisi

Sürüş ve frenleme yöneticisi üç ana parçadan oluşur. İlk parça aracın çalışma durumlarının tanımlanmasından sorumludur. Bu durumlar hızlanma (*acceleration*) ve frenleme (*braking*) olarak tanımlanmıştır. Bu parçanın diğer sorumlulukları da aracın ters akımla frenleme durumunu ve öne/geriye gitmesini tanımlamaktır. İkinci parça senkron çeviriciyi yönetir. Üçüncü parça ise tez kapsamında tanımlanmış bulanık mantık kontrolcüyü içerir. Sürüş ve frenleme yöneticisi için genel görüntü Şekil 4.29’da verilmiştir.

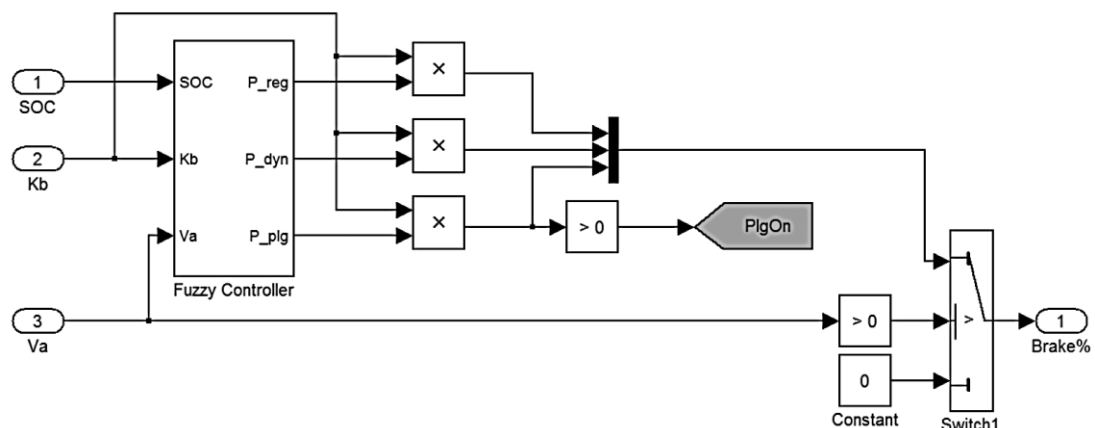


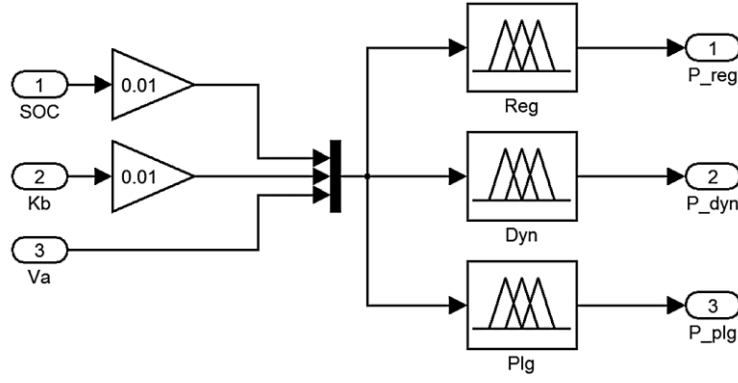
Şekil 4.29 Sürüş ve Frenleme Yöneticisi.

Çizelge 4.6’da Sürüş/Frenleme yöneticisi bloğunun ilk seviyesi altında bulunan global işaretler ve tipleri gösterilmiştir. Bu işaretlerin geldikleri ve iletiildiği bloklar da yine aynı çizelgede görülebilir.

Çizelge 4.6 : Sürüş/Frenleme Yöneticisi İşaretleri.

4.3.3.1 Bulanık mantık kontrol bloğu





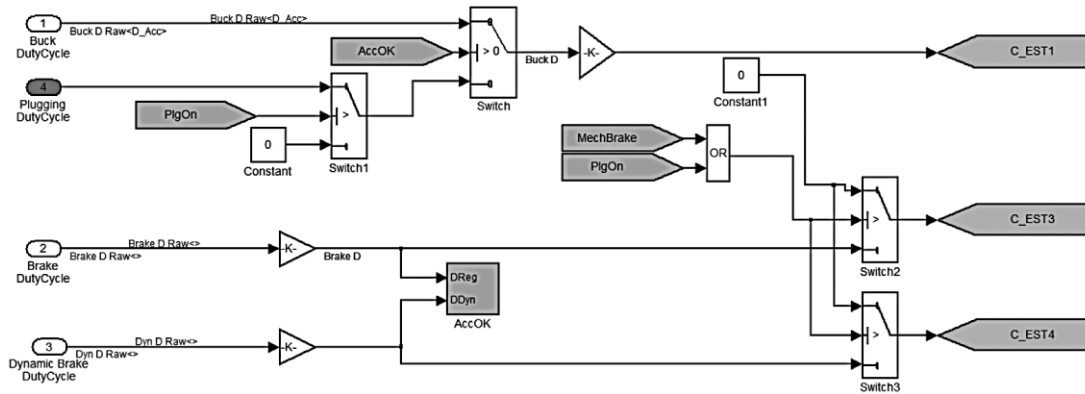
Şekil 4.31 : Bulanık Mantık Kontrolcüsü.

Çizelge 4.7 : Bulanık Mantık Kontrol Bloğu İşaretleri.

#	İşaret Adı	Geldiği/Gittiği Blok	G/Ç	Veri Tipi	Mesaj Adı
1	Batarya Şarj Durumu	Giriş/Çıkış	G	32 bit (UInt32)	<i>SOC</i>
2	Frenleme	Giriş/Çıkış	G	32 bit (UInt32)	<i>Kb</i>
3	Araç Hızı	Giriş/Çıkış	G	32 bit (UInt32)	<i>Va</i>
4	Rejeneratif Fren Oranı	Senkron Çevirici Sürüş	Ç	32 bit (UInt32)	<i>P_reg</i>
5	Dinamik Fren Oranı	Senkron Çevirici Sürüş	Ç	32 bit (UInt32)	<i>P_dyn</i>
6	Ters Akımla Fren Oranı	Senkron Çevirici Sürüş	Ç	32 bit (UInt32)	<i>P_plg</i>
7	Ters Akımla Frenleme Durumu	Sürüş Frenleme Yöneticisi	Ç	Boolean	<i>PlgOn</i>

4.3.3.2 Senkron çevirici sürücüsü

Senkron Çevirici Sürücüsü, bulanık kontrol bloğundan çıkan işaretlere göre senkron çeviricinin anahtarlarını süren DGM işaretlerini oluşturur. Bu blok altında çeşitli çalışma durumlarının tanımlanması ve güvenlik fonksiyonlarının sağlanabilmesi için algoritmalar eklenmiştir, detayları “4.3.3.3 Araç Çalışma Durumları” başlığı altında anlatılacaktır. Sürücünün anahtarlama frekansları da burada tanımlanır. Şekil 4.32’de blok içeriği gösterilmiştir. Çizelge 4.8, bu blok altındaki sinyalleri özetlemektedir.



Şekil 4.32 : Senkron Çevirici Sürücüsü Bloğu.

Çizelge 4.8 : Senkron Çevirici Sürücüsü Bloğu İşaretleri.

#	İşaret Adı	Geldiği/Gittiği Blok	G/Ç	Veri Tipi	Mesaj Adı
1	Hızlanma Oranı	Sürüş Frenleme Yön.	G	32 bit (UInt32)	<i>BuckD_Raw</i>
2	Rejeneratif Fren Oranı	Bulanık Mantık Kontrol	G	32 bit (UInt32)	<i>P_reg</i>
3	Dinamik Fren Oranı	Bulanık Mantık Kontrol	G	32 bit (UInt32)	<i>P_dyn</i>
4	Ters Akımla Fren Oranı	Bulanık Mantık Kontrol	G	32 bit (UInt32)	<i>P_plg</i>
5	Ters Akımla Frenleme Durumu	Bulanık Mantık Kontrol	G	Boolean	<i>PlgOn</i>
6	Mekanik Frenleme Durumu	Giriş/Çıkış	G	32 bit (UInt32)	<i>SOC</i>
7	Buck DGM	Giriş/Çıkış	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST1</i>
8	Boost DGM	Giriş/Çıkış	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST3</i>
9	Dinamik Frenleme Kısıyıcı DGM	Giriş/Çıkış	Ç	32 bit (UInt32)	<i>C_EST4</i>

4.3.3.3 Araç çalışma durumları

Araç, pilotun sürüş komutlarına göre uygun ve güvenli bir şekilde çalışmalıdır. Araç çalışma durumları da yazılımda bu operasyonun gerçekleşmesini sağlamak üzere tanımlanmıştır. Çalışma durumlarıyla ilişkili kritik çakışma durumları şu şekildedir:

Hızlanma/Yavaşlama Çakışması: Güvenlik nedeniyle, gaz işareti doğal pozisyonunda değilken ($AccOK=1$) araç frenlenmeye çalışılıyorsa ($Brake\neq 0$), fren işareti dikkate alınacaktır.

Elektrik/Mekanik Frenleme Çakışması: Yine güvenlik nedeniyle, mekanik frenleme yapılıyor ise ($MechBrake\neq 0$), hızlanma ya da elektriksel frenleme devreden çıkarak kontrol mekanik frene bırakılacaktır.

Araç durumlarını tanımlayan bloklar, tüm Sürüş ve Frenleme Yöneticisi içerisinde Senkron Çevirici Bloğu altında *AccOK* bloğu ve Bulanık Mantık Kontrol Bloğu altındadır, Şekil 4.30'da ve 4.32'de gösterilmişlerdir. Burada sözü edilmesi gereken bir unsur, ters akımla frenleme kontrol yazılımı içerisinde, fiziksel anlamına paralel olarak, frenleme olarak değil ters yönde hızlanma şeklinde görülmektedir.

4.4 Kontrol Yazılımın Üretilmesi ve Deney Düzeneği Üzerine Uygulanması

Kontrol yazılımı modeli oluşturulduktan sonra, Matlab® üzerinde kod üretimi işlemine geçilir. Yazılım, model içerisinde tanımlanan çevre birimleri ve ara yüzleri kullanarak kaynak kodu ve kütüphanelerin ilgili parçalarını oluşturur. Üretilen kod .srz

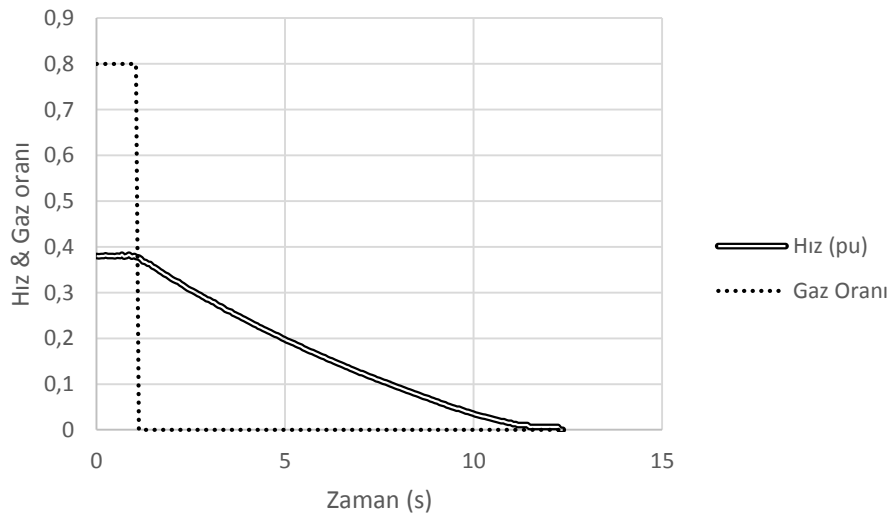
formatındadır. Mototune® programı kullanılarak CAN hattı üzerinden ECU kodlanarak sistem çalışır hale gelir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Önceki bölümlerde geliştirilmiş algoritma üzerine oluşturulan ve deney düzeneğine yüklenen kontrol yazılımı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar bu bölümde anlatılacaktır. Yazılımdan beklenti, algoritmada tanımlanan koşulların bu aracı durdurmak için istenilen şekilde farklı elektriksel frenleme yöntemlerini devreye almasıdır. Çalışma esnasında, yine algoritmaların kurulması esnasında anlatıldığı üzere, verimli ve güvenli bir çalışmanın olması da beklenmektedir. Deneyler, farklı durumlarda tekrarlanarak tüm kritik koşullarda tasarım çalıştığı görülmelidir.

Hazırlanan deneysel elektrikli motosiklet üzerinde TEF yönteminde tanımlanan geri kazanımlı-dinamik-ters akımlı frenleme yöntemleri arasındaki geçişler incelenmiştir. Deneyler esnasında ölçülen motor hızı ile sayısal devrenin ölçebileceği en yüksek hızın (16 bit) birim başına (*per unit* – pu) oranı olarak verilmiştir. Ölçümlerde batarya giriş-çıkış akımı izlenmiştir. Ayrıca, ECU üzerinden okunan hız-frenleme oranı vb. veriler ile osiloskop çıkışları karşılaştırılmıştır.

5.1 Deney 1: Doğal Yavaşlama



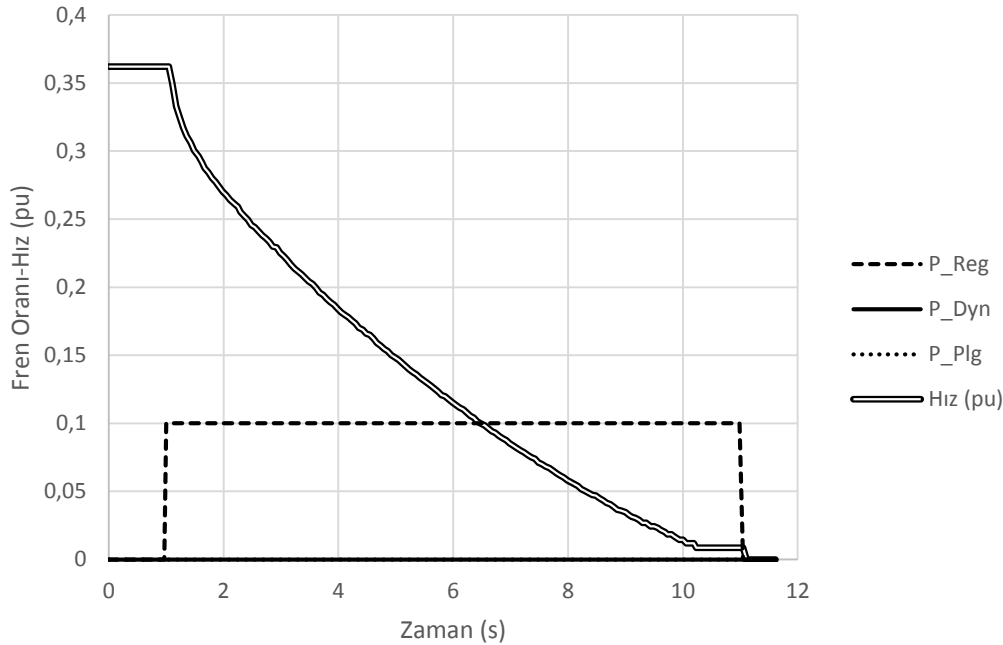
Şekil 5.1 : Doğal Yavaşlama Deney Sonucu.

Sistemin doğal tepkisinin anlaşılabilmesi için gaz oranı %80 olarak ayarlanmış ve hiçbir frenleme yöntemi kullanılmadan duruşu gözlemlenmiştir. Bu gaz oranında sistem 0,38 pu hıza ulaşmış ve yaklaşık 11,4 s’de durmuştur. Sistemin ölçüm verileri Şekil 5.1’de görülebilir.

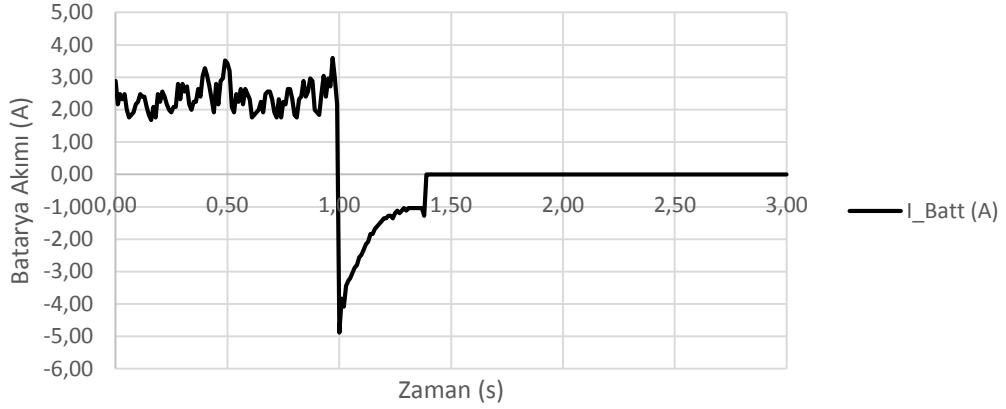
5.2 Deney 2: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren Oranı %10

Bu deneyde SOC %70 olduğu durumda yavaşlama incelenecektir. Bu halde %80 gaz oranı ile elde edilen hız 0,36 pu’dur (önceki deneyler nedeniyle batarya uç gerilimi bir miktar düşmüştür). Sistemin bu şarj oranında yalnız geri kazanımlı frenleme yapması beklenmektedir. Deney esnasında yapılan ölçümlerde sadece geri kazanımlı frenleme isteği görülmüştür. Bu bağlamda bulanık mantık kontrolcüsü doğru çalışmıştır.

%10 fren oranı ile sistemin yaklaşık 9,9 s’de durduğu gözlemlenmiştir. Osiloskop ölçümleri incelendiğinde bu fren oranında bataryaya yalnızca 0,42 s süresince akım basıldığı, maksimum 5 A’e ulaşıldığı görülmüştür. Bu da, hızın 0,18 pu’nun aşağısına düştüğü durumda, endüklenen ters EMK’nin bataryaya akım basabilecek (şarj edebilecek) kadar yükseltilmediğini gösterir. İlgili ölçüm verileri ve osiloskop çıktıları Şekil 5.2 ve 5.3’te görülebilir.



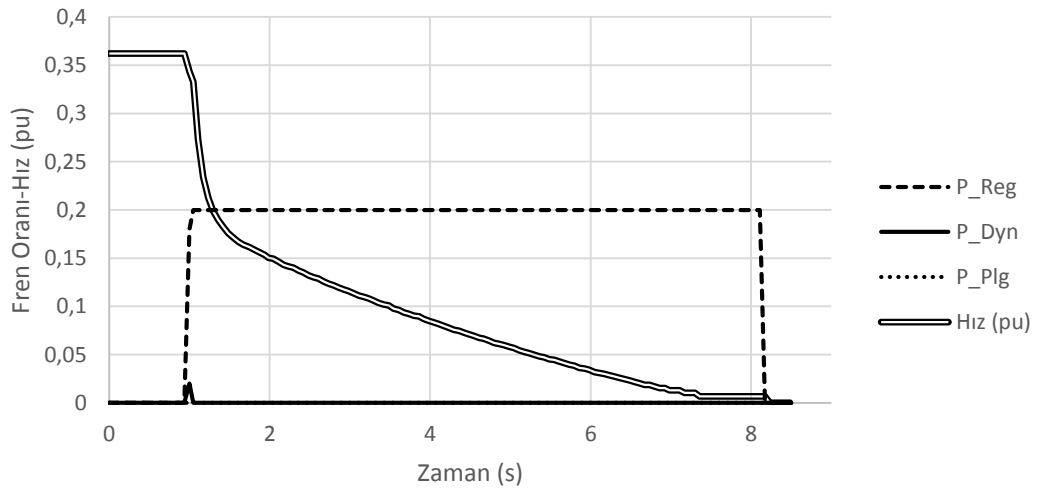
Şekil 5.2 : SOC %70, Kb %10 (Hız ve Fren oranı).



Şekil 5.3 : SOC %70, Kb %10 (Batarya Akımı).

5.3 Deney 3: Hız 0,36pu, SOC %70, Fren Oranı %20

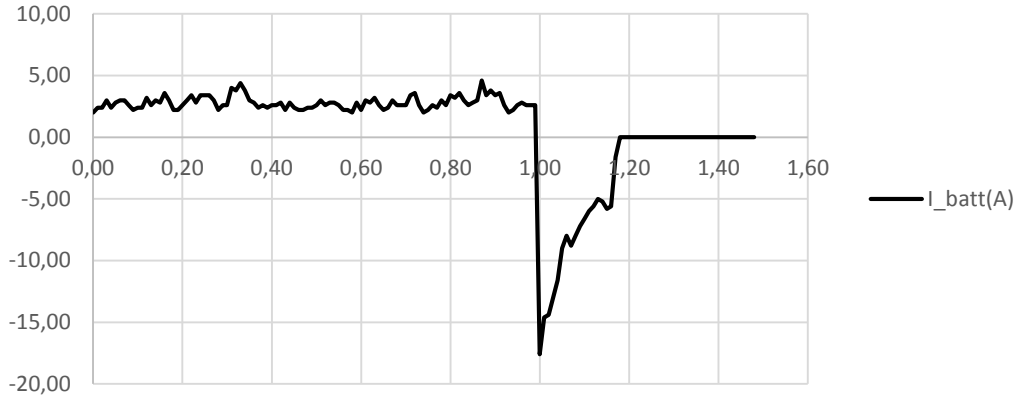
Bu deneyde bir öncekine göre frenleme oranı %20'ye çıkarılmıştır. Frenlemenin başında çok kısa bir süre dinamik frenleme görülmüştür. Bu da yine TEF bulanık mantık kontrolcüsünde ani frenleme isteği durumunun tetiklendiği anlamına gelir ki kontrolcünün doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 5.4 : SOC %70, Kb %20 (Hız ve Fren oranı).

%20 frenleme ile yavaşlandığında sistemin yaklaşık 7,1 s'de durduğu gözlemlenmiştir. Bu, %10 frenleme oranında elde edilen 9,9 s'lik durma süresinden yaklaşık %30 daha iyi bir süredir. Ancak, osiloskop ölçümleri incelendiğinde bu fren oranında bataryaya yalnızca 0,18 s süresince akım basıldığı, maksimum 17 A'e ulaşıldığı görülmüştür. Bu da, yine hızın yaklaşık 0,18 pu'nun aşağısına düştüğü durumda, endüklenen ters

EMK'nin bataryaya akım basabilecek kadar yükselteemediğini gösterir. İlgili ölçüm verileri ve osiloskop çıktıları Şekil 5.4 ve 5.5'te görülebilir.

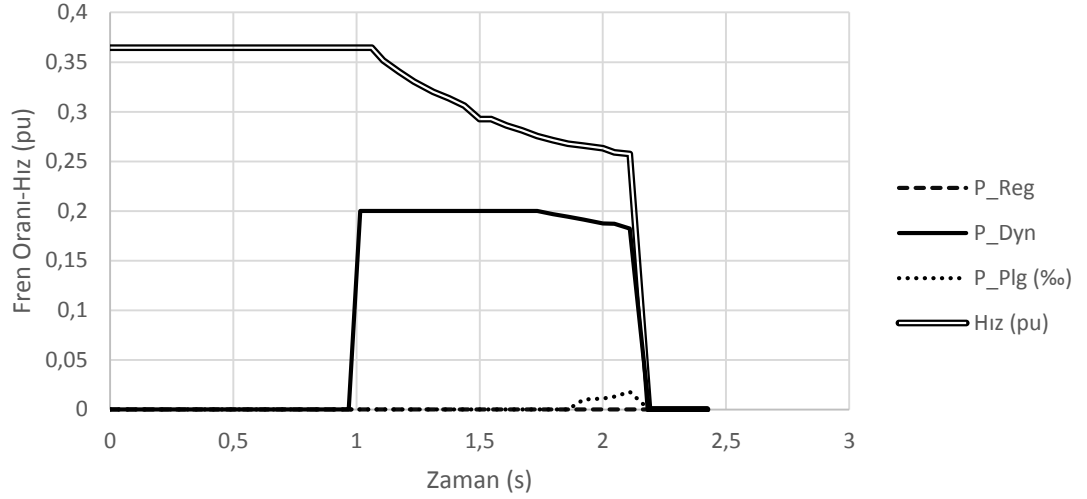


Şekil 5.5 : SOC %70, Kb %20 (Batarya Akımı).

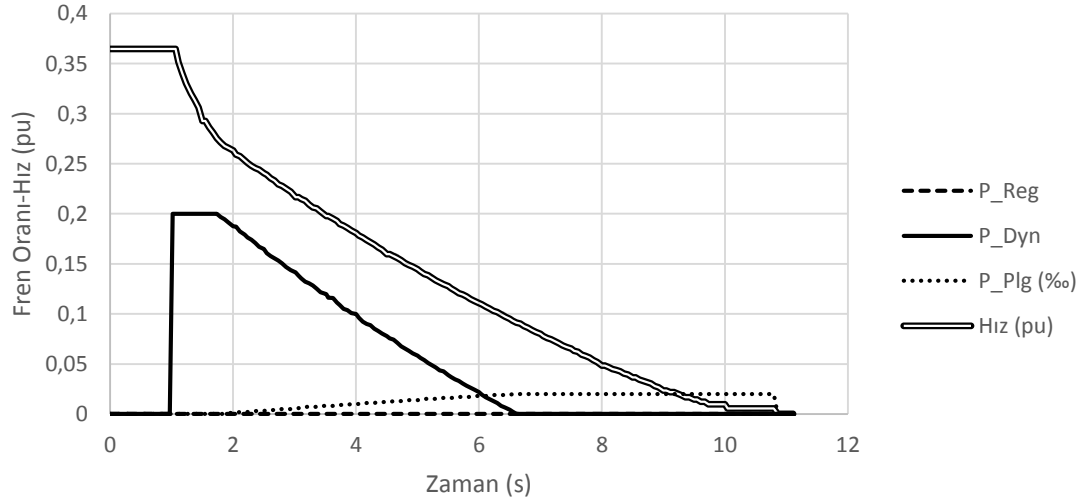
5.4 Deney 4: Hız 0,36pu, SOC %95, Fren Oranı %20

Bu deneyde yüksek şarj durumunda ters akımla frenleme yönteminin de çalışması incelenmiştir. Ters akımla frenleme düşük hızlarda devreye girdiği ve boştaki sistemi çok hızlı durdurduğu için bu hız ve fren oranında iki deney yapılmıştır. İlkinde ters akımla frenleme yöntemi için bulanık mantık kontrolcünün ürettiği çıkış aynen alınmıştır. Bu deneyde ters akımla frenleme devreye girdikten çok kısa bir süre sonra sistem durduğundan dinamik ve ters akım arasındaki geçiş, mevcut ölçüm cihazları ile düzgün ölçülememiştir. İkinci deneyde ise ters akım referansı %10 oranında ölçeklenerek sisteme verilerek hem dinamik kontrolcünün devreden çıkışı, paralelinde de ters akım kontrolcünün devreye girişi incelenebilmiştir.

Ters akımla yavaşlama için üretilen referans tam olarak sisteme verildiğinde sistemin yaklaşık 1,1 s'de durduğu gözlemlenmiştir. Burada ters akım 0,9 s'de devreye girmiş sonrasında sistemi 0,2 s içinde durdurmuştur. Ölçüm sistemi ters akım frenleme oranının tepe değerini (teorik olarak %20'ye ulaşması gerekir) yakalayamamıştır. Ters akımla frenleme ile dinamik arasındaki geçişin iyi izlenebilmesi için sisteme %10 ölçekleme oranında verildiği deneyde ise, dinamik frenleme oranındaki azalma ile ters akımla frenlemedeki artış, aracın hızının azalması ile uyumlu olarak gözlemlenmiştir. Belirli bir hız (yaklaşık 0,1 pu) sonrasında ters akımla frenleme oranı maksimum değerine (%20 frenleme oranı ile %10 ölçekleme oranı çarpımından; 0,02) ulaştığı görülmüştür ki bu da bulanık mantık kontrolcünden beklenildiği şekildedir. İlgili ölçüm verileri Şekil 5.6 ve 5.7'de görülebilir.



Şekil 5.6 : SOC %95, Kb %20, Kp sabit (Hız ve Fren oranı).



Şekil 5.7 : SOC %95, Kb %20, Kp %10 ölçekli (Hız ve Fren oranı).

5.5 Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Yukarıda bahsi geçen deneyler motosikletin boşta çalışma sonuçlarını içerir. Burada belirli hızlarda geri kazanımlı frenlemeden etkin olarak yararlanılabildiği görülmüştür. Bu frenleme tipinin etkinliği şarj durumu düştükçe ve hız arttıkça artacaktır. Bulanık mantık kontrolcü bu frenleme tipini etkin olarak TEF yöntemi içerisinde katabilmektedir. Şarj durumunun yüksek olduğu durumlarda beklenildiği üzere dinamik frenleme devreye girmektedir. Bulanık mantık kontrolcünün buradaki çalışması da TEF yöntemine uygun olarak gerçekleşmektedir. Sistem, bataryaya atılamayan enerjisi dirençlere yönlendirebilmektedir. Ters akımla frenleme için

kontrolcünün oluşturduğu frenleme oranı sistemi çok çabuk durdurma yeteneğine sahiptir. Bu yöntemin daha düşük oranlarda kullanılması ya da daha düşük hızlarda devreye girmesi faydalı olabilir. Yüklü durumda çalışmada bu yöntemi iyi incelemek gerekecektir. Ancak bulanık mantık kontrolcüsü yine deneysel olarak doğru çalışarak ters akımla frenlemeyi de uygulayabilmiştir.

Çizelge 5.1’de deney sonuçlarına ilişkin kullanılan ve kazanılan enerji miktarları ile durma süreleri arasındaki ilişki özetlenmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere, elektrikli frenlemenin tüm farklı tipleri kullanıldığında aracın duruş sürelerinde iyileşme olmakta, ancak enerji kazanımında azalma ya da enerji kullanımı da görülmektedir.

Çizelge 5.1 : Deney Sonuçları.

#	pu	%	%	s	Enerji (Ws)		
	Maks. Hız	SOC	Fren Oranı	Durma Süresi	Kazanılan	Yayılan	Harcanan
1	0,38	70	0	11,4	0	0	0
2	0,36	70	10	9,9	0,7490	0	0
3	0,36	70	20	7,1	1,5360	0,00352	0
4	0,36	95	20	1,1	0	0,32	0,27

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yalnız elektrikli frenleme yöntemleri kullanarak bir elektrikli aracı tamamen durdurabilen yeni bir yöntem anlatılmıştır. Tam elektrikli frenleme olarak adlandırılan yöntemde; enerji geri kazanımlı, dinamik ve ters akımla frenleme yöntemleri beraber kullanılmıştır. İlgili fren tekniklerinin karakteristikleri ortaya konmuş ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Elektrikli frenlemenin hem performans, hem güvenlik hem de konfor ile ilgili sınırlarını da içeren bu koşullar göz önüne alınarak geliştirilen algoritma, bir bulanık mantık kontrolcü ile uygulanmıştır. Model tabanlı kontrol sistemi geliştirme yöntemi kullanılarak ilgili algoritma bir kontrol programına dönüştürülmüş ve bir elektrikli motosiklet üzerinde denenmiştir.

Bu bölümde, tez çalışmasının bilimsel, teknik ve ticari katkıları incelenecektir. Tez temel alınarak yapılabilecek takip çalışmaları da yine bu bölümde ele alınacaktır.

6.1 Teknik ve Ticari Katkıların İrdelenmesi

Bu tez kapsamında geliştirilen algoritma ve yazılım, aynı zamanda İTÜ ve TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.'nin ortak olarak başvurduğu, 1591.STZ.2012-2 kodlu SANTEZ projesi ile T.C. Bilim Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje Mayıs 2014'te ilgili hakemlerin de uygun bulmasıyla başarılı olarak kapatılmıştır [59].

SANTEZ projelerinde ana amaç ürüne dönüşme potansiyeli olan projelerin desteklenmesidir. Bu projede geliştirilen algoritma ve kontrol yazılımı, TOFAŞ'ın üzerine çalıştığı elektrikli araçlarda da kullanılacaktır. TOFAŞ, elektrikli araç çalışmalarında model tabanlı kontrol yöntemlerini uygulamaktadır [72]. Bu çalışmada geliştirilen kontrol yazılımının model tabanlı olması sayesinde ilgili algoritma ve bloklar, TOFAŞ aracında kullanılan yazılımla bütünleştirilebilir.

Araç üzeri frenleme testlerinin yapılması, güvenlik konusunda birçok önlem alınmasını gerektireceğinden, desteklenen proje kapsamındaki çalışmalar öncelikle

benzetim ortamında denenmiştir. Bu bağlamda, kontrolcünün getirilerinin anlaşılabilmesi için bulanık mantık kontrolcü, TOFAŞ'ın elektrikli araç kontrol algoritması üzerindeki mevcut frenleme kontrol yazılımı yerine uygulanmıştır. Sistem, döngüde yazılım (*SIL – Software in-the-loop*) yöntemi ile benzetilerek, gerçek kontrol yazılımının, yine tez kapsamında geliştirilen araç benzetimini sürmesi sağlanmıştır.

Bu benzetimlerde, araç modeli standart ECE 101 karma çevriminde çalışmıştır. Araç şarj durumunun %95 ile %5 arasındaki performans incelenmiştir. Bu aralık, TEF yöntemindeki her üç frenleme şeklinin de kullanılmasına olanak verecektir. TOFAŞ elektrikli aracındaki mevcut fren kontrol sistemi ile tez kapsamında geliştirilen TEF yöntemi arasında oluşan enerji tüketimi farkları verileri Çizelge 6.1'de görülebilir.

Çizelge 6.1 : ECE 101 Çevriminde Tüketim Değerleri.

		SOC %95-%5	İyileşme	
Geri Kazanımlı Frenlemesiz Tüketim	Menzil	124 km	Ref.	-4,8%
	Tüketim	160 Wh/km		
Geri Kazanımlı Frenlemeli Tüketim	Menzil	130 km	%4,8	Ref.
	Tüketim	152 Wh/km		
Bulanık Mantık Kontrolcü ile Geri Kazanımlı Frenleme	Menzil	140 km	%12,9	%7,7
	Tüketim	142 Wh/km		
Bulanık Mantık Kontrolcü ile Tam Elektrikli Frenleme	Menzil	136 km	%9,7	%4,6
	Tüketim	146 Wh/km		

Bu tabloda da görüldüğü üzere, geri kazanımlı frenlemenin geliştirilen bulanık mantık kontrolcü ile yapıldığı durumda hiç geri kazanımlı fren olmadığı duruma göre %12,9, elektrikli frenlemenin mekanik frenin üzerine eklendiği önceki geri kazanımlı sisteme göre de %7,7 iyileşme olur. Tam elektrikli frenleme yöntemi uygulandığında ise, dinamik frenleme ve ters akımla frenleme ile elde edilecek elektrikli frenleme kuvvetleri (buna paralel olarak, dinamik frenlemede geri kazanılamayan, ters akımla frenlemede harcanan enerji nedeniyle) geri kazanım azalmakta, bununla beraber iyileşme değerleri de düşmektedir. Ancak tabi ki bu durumda aracın büyük oranda elektrikli frenleme ile durabildiği, mekanik frene olan ihtiyacın azaldığı unutulmamalıdır.

TOFAŞ, proje çıktısı olan yöntemin enerji geri kazanımlı frenleme ile ilgili kısmını araç üzerinde uygulama kararı almıştır. Dinamik frenlemedeki direnç bileşenlerine duyulan ihtiyaç ve ters akımla frenlemenin batarya üzerine getireceği ekstra yük nedeniyle, TEF yöntemi henüz elektrikli araçlarda uygulanmaya uygun değildir.

TOFAŞ'ın proje sonrasında kazanımları ve beklentileri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

Kısa vadede, mevcut elektrikli araçlar üzerinde yapılacak enerji geri kazanımlı frenleme ile menzile artışı (%7,7) sağlanmıştır. Bu yöntemin uygulanması ile orta-uzun vadede, TOFAŞ'ın geliştirilmeyi planlayacağı bir batarya paketinin km başına ihtiyaç duyduğu Wh miktarını azaltması mümkün olacaktır. Elektrikli araç projelerinde önemli bir sınır kabul edilen 200 km menzile sahip olan bir elektrikli aracın mevcut durum verilerinden görülebilen 27 kWh'lik batarya ihtiyacı, bu yöntemin uygulanmasıyla ~25 kWh'e inecektir. TOFAŞ'ın güncel projelerindeki fiyatlara göre, batarya paketi seviyesinde kWh başına maliyetin ~700\$ olduğu bilinmektedir. 200km menzilli aynı araç için 2 kWh paket başına azalma, ~1400\$ civarında maliyet indirimi anlamına gelir. Türkiye'de lityum batarya, ithal edilen bir ürün olduğu için, doğrudan yerlilik oranını ve katma değerini arttırması sebebiyle proje çıktıları önem kazanmaktadır. TOFAŞ'ın orta vadede elektrikli araçlar kestirimi yıllık yaklaşık 500 araç seviyesindedir. Bu seviyedeki üretim adetleri üzerinden hesaplama yapıldığında, aynı menzile için paket başına 2 kWh'lik indirim, yalnızca bu uygulama için ~700.000\$'lık yıllık ithalat azalması olabileceği görülür. Ancak uygulamada, stratejik olarak, rakiplerin menzile yaklaşan bir araç elde etmenin TOFAŞ için daha önemli olacağı söylenebilir.

Hem teknik, hem de ticari olarak düşünülebilecek diğer bir özgün katkı da, çalışmanın edinimlerinden doğan patent çıktılarıdır. Bu çalışma kapsamında karşılaşılan yeniliklerin korunması için biri Avrupa Birliği Patent Ofisi (EPO) [67], biri Almanya Patent Ofisi [73], biri de Türkiye Patent Enstitüsü'nden (TPE) [74], toplam 3 adet patent başvurusu yapılmıştır. Tez yayına hazırlandığı sırada bunlardan biri yayınlanmış (*patent granted*), diğer ikisi ise inceleme aşamasındadır (*patent pending*).

“A Brake System for Vehicles with Electric Drive” başlığı ve EP2463163(B1) numarası ile EPO'dan yayınlanan AB korumalı patent, doğrudan olmasa da dolaylı olarak çalışma esnasında karşılaşılan sorunlardan birine yönelik çözümü içerir. Çalışmanın temel çıktılarından olan frenleme algoritması ve çalıştığı sistemi içeren “Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi” başlıklı ve TR20120009307 numaralı TPE başvurusu ile “Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren” başlığı ve DE102013215763 numaralı Almanya Patent Ofisi başvurusunun inceleme sürelerinin tamamlanmasından sonra patent olarak yayınlanması beklenmektedir.

Bilindiği üzere, patent araştırmaları, ilgili patent ofisleri tarafından, korunması istenen fikrin daha önce dünya üzerinde, herhangi bir bilimsel ya da teknik uygulamasının olmadığının teyidi için yapılmaktadır ve çok kapsamlı araştırma raporları ile bu durumu gösterirler. İlgili patent araştırma raporlarında da belgelendiği üzere teknik açıdan bu tezde anlatılan yöntemin yeni bir uygulama olduğu görölmektedir.

6.2 Tez Çalışması Sonrası için Öneriler

Tezin önerisi olan TEF (Tam Elektrikli Frenleme) yöntemi için ek özellikler ve iyileştirme olanakları araştırılmıştır. Bu kapsamda, öne çıkan başlıklar řu şekilde özetlenebilir:

- i. Araç dinamiğinin iyileştirilmesi
 - a. Elektrikli ve mekanik frenin beraber çalışması için en iyileştirme algoritmaları
 - b. Ön ve arka tekerleklerde en iyi frenleme kuvveti dağılımı
 - c. Yol kayması ve aracın farklı yükleri için kestirimci yöntemlerin geliştirilmesi
 - d. Tekerlek içi motor uygulamaları ile hem fren hem sürüş momenti kullanarak yanal dinamiklerin iyileştirilmesi
- ii. Sistem veriminin artırılması
 - a. Yeni topolojiler ile (örn. DA/DA çevirici elenerek) daha az anahtarlı ve daha yüksek verimli sistemler ile TEF yönteminin iyileştirilmesi
 - b. Farklı mekanik topolojiler ile (örn. iki oranlı vites vb.) frenleme aralığının artırılması
 - c. Ultrakapasitör vb. kombinasyonlar ile verimin artırılması
 - d. Özellikle direnç üzerinde ısıya dönüşen enerjinin araç üzerinde alternatif verim arttıran yöntemlerinin incelenmesi
- iii. Alternatif kontrol yöntemlerinin incelenmesi
 - a. Tanımsal (*definitive*) kontrol sistemleri
 - b. Öğrenen kontrol sistemleri
 - c. Yapay zekâ vb. uygulamalar
- iv. Deneysel & uygulamalı çalışmalar

- a. Farklı araç topolojilerinde TEF yönteminin incelenmesi (örn. Arkadan itişli, dört teker çekişli vb.)
- b. TEF yönteminin gerçek hayat örnekleri ile uygulamalı deneyleri

KAYNAKLAR

- [1] **IEA - International Energy Agency** (2009). Electric and Plug in Hybrid Electric Vehicle (EV/PHEV), (araştırma raporu).
- [2] **ERTRAC European Road Transport Research Advisory Council** (2008). ERTRAC European Road Transport Research Advisory Council, (AB çalışma grubu raporu).
- [3] **FUORE Future Road Vehicle Research** (2007). R&D Technology Roadmap, (AB çalışma grubu yol haritası).
- [4] **NREL National Renewable Energy Laboratory** (2008). A Renewable Energy Community: Key Elements, (ABD Enerji Bakanlığı çalışma raporu).
- [5] **Global Insight** (2008), World: Electric Dreams: Will Lithium-Ion Battery Technology Represent the Tipping Point for Hybrids and Electric Cars?, (araştırma raporu).
- [6] **R. Burgelman ve A. Grove** (2008). An Electric Plan for Energy Resilliance, *The McKinsley Quarterly*, v.4.
- [7] **C. Lang** (2008). Plugging into Tomorrow's Vehicles, (Price Waterhouse Coopers Automotive Institute araştırma raporu).
- [8] **Tesla Model S Specs** < <http://www.teslamotors.com/models/specs>>, alındığı tarih: Aralık 2014.
- [9] **Yeni Nesil Prius** < <http://www.toyota.com.tr/new-cars/prius/index.json>>, alındığı tarih: Aralık 2014.
- [10] **Y. Gao, L. Chu ve M. Ehsani** (2007). Design and Control Principles of Hybrid Braking System for EV, HEV and FCV, *VPPC 2007 - IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Teksas, ABD.
- [11] **H. Jene, E. Scheid ve H. Kemper** (2004). HEV Concepts – Fuel Savings and Costs, *ICAT'04 - International Conference on Automotive Technologies*, İstanbul, Türkiye.
- [12] **C. Gökçe** (2005). Modeling and Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **M. Ji-Yank ve diğ.**, (2009). A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.56(6).
- [14] **J. Guo, J. Wang ve B. Cao** (2009). Application of Genetic Algorithm for Braking Force Distribution of Electric Vehicles, *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xian, Çin, 25-27 Mayıs.

- [15] **H. Yeo ve H. Kim** (2002), Hardware-in-the-loop Simulation of Regenerative Braking for a Hybrid Electric Vehicle, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, v.216.
- [16] **N. Tuncay, Ö. Üstün, M. Yılmaz, C. Gökçe ve diğ.** (2006). Güneş Enerjili Yarış Aracının Elektrik Tasarım Ölçütlerinin, Yol Performans Simülasyonunun ve Enerji Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi, *ELECO'06 – Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye.
- [17] **Ö. Üstün, M. Yılmaz, C. Gökçe, U. Karakaya ve R. Tuncay** (2009), Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, ABD.
- [18] **FIAT Technical Norms** (2010). VSS (Vehicle Subsystem Specifications) - Fren ve Yan Sistemleri, (firma teknik normu).
- [19] **Mekatro Araştırma Geliştirme A.Ş.** (2004). ELİT-2: Paralel Karma Elektrikli Aracın Enerji Yönetim Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu, (proje raporu).
- [20] **S. Cikanek ve K. Bailey** (2002). Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Vehicle, *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, Anchorage, ABD.
- [21] **N. Mutoh, Y. Hayano, H. Yahagi ve K. Takita** (2007). Electric Braking Control Methods for Electric Vehicles With Independently Driven Front and Rear Wheels, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.54(2).
- [22] **M. Ye, Z. Bai ve B. Cao** (2008). Robust Control for Regenerative Braking of Battery Electric Vehicle, *IET Control Theory Applications*, v.2(12), p. 1105–1114.
- [23] **Y. Min, B. Zhifeng ve C. Binggang** (2007). Robust H₂-H_∞ Control for Regenerative Braking of Electric Vehicles, *IEEE International Conference on Control and Automation*, Guangzhou, Çin .
- [24] **X. Wang, K. Cheng, X. Liao, N. C. Cheung ve L. Dong** (2007). Fuzzy Logic Controller for Electric Vehicle Braking Strategy, *IEEE 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Tayland.
- [25] **C. Gökçe, Ö. Üstün ve A. Y. Yeksan** (2013). Dynamics and Limits of Electrical Braking, *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'13)*, Bursa, Türkiye.
- [26] **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2015). Elektrikli Araçlarda Tam Elektrikli Frenleme için Bulanık Mantık Tabanlı Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulaması, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (yayın kabul aldı).
- [27] **Z. Zhang, G. Xu, W. Li ve L. Zheng** (2010). Regenerative Braking for Electric Vehicle based on Fuzzy Logic Control Strategy, *2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering*, Kyoto, Japonya.

- [28] **H. Zhang, G. Xu, W. Li ve M. Zhou** (2012). Fuzzy Logic Control in Regenerative Braking System for Electric Vehicle, *International Conference on Information and Automation*, Shenyang, Çin.
- [29] **J. Ko, J. Kim, G. Lee, S. Byun, D. Hyun ve H. Kim** (2011). Development of a Co-operative Control Algorithm during Regenerative Braking for a Fuel Cell Electric Vehicle, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Şikago, ABD.
- [30] **L. Chu, L. Yao, J. Chen, L. Chao ve J. Guo** (2011). Integrative Braking Control System for Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Şikago, ABD.
- [31] **G. Jinfang, W. Lifangl, L. Chenglin, Z. Junzh ve Y. Xiaowd** (2012). The Coordinated Control of Motor Regenerative Braking Torques Defied by Accelerator Pedal and Brake Pedal of Electric Vehicle, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Güney Kore.
- [32] **M. Schmitz, C. Maag, M. Jagiellowicz ve M. Hanig** (2012). Impact of a combined accelerator-brake pedal solution on efficient driving, *IET Intelligent Transportation Systems*, 7(2), pp. 203-209.
- [33] **C. Satzger, R. d. Castro ve T. Bünte** (2014). A Model Predictive Control Allocation Approach to Hybrid Braking of Electric Vehicles, *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Dearborn, ABD.
- [34] **J. Guo, J. Wang ve B. Cao** (2009). Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles, *Intelligent Vehicles Symposium*, Xi'an, Çin.
- [35] **J. Guo, J. Wang ve B. Cao** (2009), Study on Braking Force Distribution of Electric Vehicles,» *Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, Wuhan, Çin.
- [36] **L. d. P. Martín, M. I. G. Hernández, J. S. M. Sánchez, B. A. Pérez ve E. C. Álvarez** (2013). Regenerative-Friction Braking Distribution Tool for the Comparison of Strategies and Vehicles Configurations, *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Barselona, İspanya.
- [37] **V. Ivanov, D. Savitski ve B. Shyrokau** (2014). A Survey of Traction Control and Anti-lock Braking Systems of Full Electric Vehicles with Individually-Controlled Electric Motors, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, (henüz yayınlanmamış).
- [38] **C. Mi, H. Lin ve Y. Zhang** (2005). Iterative Learning Control of Antilock Braking of Electric and Hybrid Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2(54), pp. 486-494.
- [39] **A. Dadashnialehi, A. Bab-Hadiashar, Z. Cao ve A. Kapoor** (2014). Intelligent Sensorless Antilock Braking System for Brushless In-Wheel Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (henüz yayınlanmamış).
- [40] **N. Mutoh** (2012). Driving and Braking Torque Distribution Methods for Front-and Rear-Wheel-Independent Drive-Type Electric Vehicles on Roads With Low Friction Coefficient, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(10), pp. 3919-3933.

- [41] **A. Athari, S. Fallah, B. Li, A. Khajepour, S.-K. Chen ve B. Litkouhi** (2013). Optimal Torque Control for an Electric-Drive Vehicle with InWheel Motors: Implementation and Experiments, *SAE Int. J. Commercial Vehicles*, 6(1), pp. 82-92.
- [42] **L. D. Novellis, A. Sorniotti ve P. Gruber** (2013). Optimal Wheel Torque Distribution for a Four-Wheel-Drive Fully Electric Vehicle, *AE Int. J. Passenger Cars*, 6(1), pp. 128-136.
- [43] **A. Caratti, G. Catacchio, C. Gambino ve N. C. Kar** (2013). Development of a Predictive Model for Regenerative Braking System, *Transportation Electrification Conference and Expo*, Detroit, ABD.
- [44] **C.-H. Chen, W.-C. Chi ve M.-Y. Cheng** (2011). Regenerative Braking Control for Light Electric Vehicles, *IEEE Power Electronics and Drive Systems Conference PEDS'11*, Singapore.
- [45] **M. Yoong, Y. Gan, G. Gan, C. Leong, Z. Phuan, B. Cheah ve K. Chew** (2011). Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicle, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, Kuala Lumpur.
- [46] **K. Zang, J. Li, M. Ouyang, J. Gu ve Y. Ma** (2011). Electric Braking Performance Analysis of PMSM for Electric Vehicle Applications, *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, Çin.
- [47] **Y. Xiao, M. Nemec, L. Borle, V. Sreeram ve H. Lu** (2011). Regenerative Braking of Series Wound Brushed DC Electric Motors for Electric Vehicles, *7th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Singapore, 2011.
- [48] **S. Ding, M. Cheng, C. Hul, G. Zhao ve W. Wang** (2013). An Energy Recovery System of Regenerative Braking Based Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Güney Kore.
- [49] **W. Mounngam, R. Songprakorp., K. Chomsuwan ve T. Phatrapornnant** (2014). Applied Supercapacitor to Energy Storage During Regenerative Brake State in Electric Vehicle, *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-COM)*, Nakhon Ratchasima, Tayland.
- [50] **X. Nian, F. Peng ve H. Zhang** (2014). Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), pp. 5798-5808.
- [51] **J. Lieb, E. Sawazki, M. Brüll ve B. Bäker** (2013). Potential of an Electric Brake Resistor to Increase the Efficiency of Electric Vehicles, *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Barselona, İspanya.
- [52] **J. Thomas** (2014). Drive Cycle Powertrain Effiencies and Trends Derived from EPA Vehicle Dynamometer Results, *SAE Int. J. Passenger Cars - Mechanical Systems*, 7(4), pp. 1374-1384.

- [53] **S. V. Sterkenburg, E. Rietveld, F. Rieck, B. Veenhuizen ve H. Bosma** (2011). Analysis of regenerative braking efficiency: A case study of two electric vehicles operating in the Rotterdam Area, *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'11)*, Şikago, ABD.
- [54] **P. Spichartz ve C. Sourkounis** (2013). Measurement of Braking Energy Recuperation in Electric Vehicles, *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, Fransa.
- [55] **J. Ko, S. Ko, H. Son, B. Yoo, J. Cheon ve H. Kim** (2013). Development of Brake System and Regenerative Braking Co-operative Control Algorithm for Automatic Transmission-based Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, (henüz yayınlanmamıştır).
- [56] **J. Ruan, P. Walker ve B. Zhu** (2014). Experimental Verification of regenerative braking energy recovery system based on electric vehicle equipped with 2-speed DCT, *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Manchester, İngiltere.
- [57] **C. Sankavaram, B. Pattipati, K. R. Pattipati, Y. Zhang ve M. Howell** (2014). Fault Diagnosis in Hybrid Electric Vehicle Regenerative Braking System, *IEEE Access*, v.2, pp. 1225-1239.
- [58] **R. Tuncay, Ö. Üstün, C. Gökçe ve M. Yılmaz** (2007). Energy Flow Modeling Method for Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electrical Vehicle, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, İstanbul, Türkiye.
- [59] **C. Gökçe, Ö. Üstün, A.Y. Yeksan, R.N. Tuncay** (2012), Elektrikli Yol Taşıtlarında En İyi Elektriksel Frenleme için Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulanması, (Bilim, Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı SANTEZ Programı Projesi), 1591.STZ.2012-2.
- [60] **R.N.Tuncay, Ö.Üstün ve M.Yılmaz** (2004). Fırçasız Doğru Akım Makinesinin MATLAB-Simulink Ortamında Modellenmesi ve Algılayıcısız Kontrolü, *Conference for Computer Aided Engineering and System Modeling*, İstanbul, Türkiye.
- [61] **J. L. K. Zhang, O. Minggao, G. Jing ve et. al.** (2011). Electric Braking Performance Analysis of PMSM for Electric Vehicle Applications, *Int. Conf. on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, Çin.
- [62] **United Nations** (2006). ECE R13. Regulation; Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles of Categories M, N and O with Regard to Braking, (uluslararası yönetmelik).
- [63] **M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay ve A. Emadi** (2005). Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, *CRC Press LLC*, ISBN: 0-8493-3154-4.
- [64] **J. Halderman ve T. Martin** (2009). Hybrid and Alternative Fuel Vehicles, *Pearson Education Inc.*, ISBN: 0-13-504414-6.
- [65] **J. Zhang, X. Lu, J. Zue ve B. Li** (2008). Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus, *The World Electric Journal*, v.2(3).

- [66] **S. DeMers** (2008). Mechanical and Regenerative Braking Integration for a Hybrid Electric Vehicle. *Yüksek Lisans Tezi*, Waterloo Üniversitesi, Kanada.
- [67] **C. Gökçe** (2013). A Brake System for Vehicles with Electric Drive, *Avrupa Birliği (EPO) Patent*, No:EP2463163(B1), tarih: 17 Nisan 2013.
- [68] **What Is Sugeno-Type Fuzzy Inference? The MathWorks Inc.** <<http://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>>, alındığı tarih: 05 Aralık 2014.
- [69] **Woodward, Inc., Module Datasheets - ECM-5554-112-0904 Datasheet (36350)** <<http://mcs.woodward.com/support/wiki/>>, alındığı tarih: 7 Haziran 2015.
- [70] **Model Based Control Design, dSPACE GmbH** <<https://www.dspace.com/en/pub/home/products/systems/controldesign.cfm>>, alındığı tarih: 07 Haziran 2015.
- [71] **L. Michaels, S. Pagerit, A. Rousseau ve e. al.** (2010). Model Based Systems Engineering and Control System Development via Virtual Hardware in the Loop Simulation, *SAE Convergence Conference*, Detroit, ABD..
- [72] **C. Gökçe** (2013). Research and Development of Electric Vehicles, *ELECO - 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, panel sunumu, Bursa, Türkiye.
- [73] **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2013). Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren, *Almanya Patent*, No: DE102013215763 (araştırmada), tarih: 09 Ağustos 2013.
- [74] **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2012). Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi, *Türkiye Patent*, No: TR20120009307 (araştırmada), tarih 09 Ağustos 2012.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Can Gökçe

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir, 18 Eylül 1980

E-Posta: cangokce@gmail.com

Lisans: İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, 2002

Yüksek Lisans: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, 2005

Mesleki Deneyim:

- Ekim 2002 – Nisan 2004, Teka Teknik Cihazlar, Satış ve İş Geliştirme Müh.
- Nisan 2004 – Şubat 2009, Mekatro Araştırma-Geliştirme A.Ş., Araştırmacı/Uzman Araştırmacı
- Şubat 2009 – Mart 2014 TOFAŞ Türk Otomobil Fab. A.Ş., Araştırmacı
- Mart 2014 – Halen TOFAŞ Türk Otomobil Fab. A.Ş., Ar-Ge Elektrik Enerji ve Kablo Sistemleri Yöneticisi ve E&E Sistemler Araştırma Projeleri Koordinatörü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR ve PATENTLER

- **C. Gökçe, Ö. Üstün, A.Y. Yeksan, R.N. Tuncay** (2012), Elektrikli Yol Taşıtlarında En İyi Elektriksel Frenleme için Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulanması, *Bilim, Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı SANTEZ Programı Projesi*, 1591.STZ.2012-2.
- **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2012). Bir Fren Kontrol Sistemi ve Yöntemi, *Türkiye Patent*, No: TR20120009307 (pending), tarih 09 Ağustos 2012.
- **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2013). Bremssteuersystem und Bremssteuerverfahren, *Almanya Patent*, No: DE102013215763 (pending), tarih: 09 Ağustos 2013.
- **C. Gökçe, Ö. Üstün ve A. Y. Yeksan** (2013). Dynamics and Limits of Electrical Braking, *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'13)*, Bursa, Türkiye.
- **C. Gökçe ve Ö. Üstün** (2015). Elektrikli Araçlarda Tam Elektrikli Frenleme için Bulanık Mantık Tabanlı Yeni Bir Yöntemin Geliştirilmesi ve Uygulanması, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (yayın kabul aldı).

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR ve PATENTLER

- Ö.Üstün, R.N.Tuncay, M.Çakan, **C.Gökçe**, G.Tosun, M.S.Mökükçü (2014). Elektrikli Araçlar için Tahrik Sistemi Geliştirme Metodolojisi, TOFAS Ar-Ge Monograflar No.1, Nisan 2014.
- **C. Gökçe** (2013). A Brake System for Vehicles with Electric Drive, *Avrupa Birliği (EPO) Patent*, No:EP2463163(B1), tarih: 17 Nisan 2013.
- N.Tuncay, Ö.Üstün, M.Yılmaz, **C.Gökçe**, U.Karakaya (2012). Study on Design of Brushless Motor for Direct-Drive Electric Vehicle Applications, *EEVC – European Electric Vehicles Conference*, Brüksel, Belçika, 21 Kasım 2012.
- N.Tuncay, Ö.Üstün, M.Yılmaz, **C.Gökçe**, U.Karakaya (2011). Design and Implementation of an Electric Drive System for In-Wheel Motor Electric Vehicle Applications, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2011*, Şikago, ABD, Eylül 2011
- **C.Gökçe**, U.Karakaya, M.Yılmaz, A. Şengür, M. Çiftçioğlu, Ö. Üstün, N. Tuncay (2010). Development of an Integrated Electric Powertrain System for a Start&Stop Mild Hybrid Electric Vehicle Operating in Heavy Urban Traffic Conditions, *OTEKON'10 – 5th Automotive Technologies Congress*, Bursa, TR.
- Ö.Üstün, M.Yılmaz, **C.Gökçe**, U.Karakaya, R.N. Tuncay (2009). Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference – IEMDC'09*, Miami, USA, Mayıs 2009.
- Ö.Üstün, M.Yılmaz, **C.Gökçe**, U.Karakaya, R.N. Tuncay (2008). Design Optimization of a Solar Race Car with Energy Management Approach, *ICAT – International Conference on Automotive Technologies*, İstanbul, TR, Kasım 2008.
- **C.Gökçe**, R.N. Tuncay, Ö.Üstün (2007). Energy Flow Modeling Method for Simulation of a Series Parallel Hybrid Electrical Vehicle, *Workshop on Hybrid Vehicle Modeling and Control, IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, İstanbul, TR, Haziran 2007.
- R.N.Tuncay, Ö.Üstün, **C.Gökçe**, et. al. (2006). Development of Electrical Design Methodology, Road Performance Simulations and Energy Management System of a Solar Powered Race Car, *ELECO'06 – 4th National Symposium on Electrical Electronics and Computer Engineering*, Bursa, Türkiye, Aralık 2006, çağrılı bildiri.
- **C. Gökçe** (2005). Modeling and Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- **C.Gökçe**, M.Yılmaz, Ö.Üstün, R.N.Tuncay (2005). Modeling and Simulation of a Series-Parallel Hybrid Electrical Vehicle, *ELECO'05 – 4th International Conference on Electrical Electronics and Computer Engineering*, Bursa, TR, Aralık 2005.
- R.N.Tuncay, Ö.Üstün, M.Yılmaz, **C.Gökçe**, O.Berberoğlu (2004). ELIT-2: Paralel Hibrit Araç Tasarım Raporu, Proje Çalışma Raporu, Kasım 2004.