ELEKTRİKLİ BİR ARACIN PID VE MODEL REFERANS ADAPTİF KONTROL YÖNTEMLERİ İLE HIZ KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

Hüseyin Murat AKSAY

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrikli Bir Aracın PID ve Model Referans Adaptif Kontrol Yöntemleri ile Hız Kontrolünün İncelenmesi

Hüseyin Murat AKSAY
0009-0003-4093-1483

Prof. Dr. Elif ERZAN TOPÇU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi
ELEKTRİKLİ BİR ARACIN PID ve MODEL REFERANS ADAPTİF KONTROL YÖNTEMLERİ İLE HIZ KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

Hüseyin Murat AKSAY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Elif Erzan TOPÇU

Bu çalışmada, bir elektrikli aracın hız kontrolü farklı sürüş çevrimleri ve çevresel koşullar altında incelenmiştir. Taşıtın doğrusal hareketi için dinamik denklemler oluşturulmuş ve Nissan Leaf modelinin yapısal özellikleri ile motorun devir-moment karakteristik eğrisi dikkate alınmıştır. Batarya modeli olarak yaygın kullanılan Rint modeli tercih edilmiştir WLTP, NEDC ve FTP-75 sürüş çevrimleri hız-zaman girdisi olarak sisteme uygulanmış, her bir çevrimle aracın tepkileri değerlendirilmiştir. Hız kontrolü için ilk önce klasik PID (Oransal–Türev–İntegral) kontrol algoritması kullanılmış, parametreler çevrim takibini en iyi şekilde sağlayacak biçimde optimize edilmiştir. Gerçek yol eğimi ve rüzgâr koşulları gibi çevresel etkiler modele dahil edilerek sistemin gerçekçi sürüş senaryolarında da değerlendirilmesi sağlanmıştır. Çevre şartlarının değişimine göre hız, güç tüketimi, batarya kapasitesi ve şarj durumu üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan PID denetleyicinin farklı çevre şartlarında sürüş çevrimlerini yüksek doğrulukla takip edebildiğini göstermektedir. İkinci olarak model referans adaptif kontrol (MRAC) algoritması kullanılarak sistem aynı şartlar altında çalıştırılmış ve özellikle hız takibi ve batarya şarj durumu açısından PID 'ye göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu sayede, elektrikli araçlarda denetleyici seçimlerinin enerji verimliliği üzerindeki etkisi de ortaya konmuştur Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denetleyici, PID, Elektrikli Araç, Matematiksel Modelleme, MRAC
2025, xxi+83 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis
INVESTIGATION OF SPEED CONTROL OF AN ELECTRIC VEHICLE USING PID AND MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL METHODS

Hüseyin Murat AKSAY

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Elif Erzan TOPÇU

In this study, the speed control of an electric vehicle was examined under different driving cycles and environmental conditions. Dynamic equations for the vehicle's linear motion were derived, considering the structural characteristics of the Nissan Leaf model and the motor's speed-torque characteristic curve. The widely used Rint model was chosen for the battery. WLTP, NEDC, and FTP-75 standard driving cycles were applied as speed-time inputs to the system, allowing the vehicle's responses to each cycle to be evaluated. A PID (Proportional–Integral–Derivative) control algorithm was used for speed control, and its parameters were optimized to ensure accurate tracking of the driving cycles. Additionally, environmental factors such as road gradient and wind conditions were included in the model to assess the vehicle's behavior under realistic driving scenarios. The vehicle was simulated on roads with varying slopes and wind influences, and the effects on speed, power consumption, battery capacity, and state of charge (SOC) were analyzed. The results demonstrated that the PID controller could accurately follow the desired driving cycles under different environmental conditions. Furthermore, a Model Reference Adaptive Control (MRAC) algorithm was also implemented and showed better performance than the PID controller, particularly in terms of speed tracking and battery SOC. Thus, the study highlighted the impact of controller selection on energy efficiency in electric vehicles. **S**imulations were conducted in the MATLAB/Simulink environment.

Keywords: Controller, PID, Electric Vehicle, Mathematical Modeling, MRAC
2025, xxi+83 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve kıymetli yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, sabrını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Elif ERZAN TOPÇU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez sürecim boyunca bana her konuda destek olan, bilgi ve deneyimleriyle katkı sağlayan YAZAKI Sistem Teknolojileri firmasındaki kıymetli yöneticilerim Sayın Selver ÇİFTÇİ ve Sayın Rıdvan ŞEN'e teşekkür ederim. Bu süreçte manevi destekleriyle daima yanımda olan sevgili aileme; annem Nazan AKSAY, babam Halil Hakan AKSAY, kardeşim Emre Atakan AKSAY ve her zaman yanımda olan, sabrı ve sevgisiyle bana güç veren eşim Elif AKSAY'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….....viii
ABSTRACT…….....ix
TEŞEKKÜR…….....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ…….....xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ……...xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ…….....xxi
1.GİRİŞ.....1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....4
2.1 Elektrikli Araçların Tarihi ve Gelişimi.....4
2.2 Elektrikli Araçlarda Kontrol Sistemleri.....8
2.3 Kontrol Yöntemleri.....9
2.3.1 Denetim Sistemi.....9
2.3.2 Açık döngü kontrol sistemleri.....10
2.3.3 Kapalı döngü kontrol sistemleri.....10
2.3.4 Denetim Organı.....11
2.3.5 Oransal-İntegral-Türev (PID) Kontrol.....13
2.3.6 Adaptif Kontrol.....19
2.3.7 Sistem Parametre Tanımlama Yöntemleri.....25
2.4 Elektrikli Aracın Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi.....27
2.4.1 Elektrikli Araç Elektrik Motoru Modeli.....29
2.4.2 Elektrikli Araç Batarya Sistemleri ve Şarj Durumu.....32
2.5 Elektrikli Araçlarda Sürüş Çevrimleri.....36
2.6 Elektrikli Araçlar Hakkında Gerçekleştirilen Çalışmalar.....38
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....42
3.1 Elektrikli Araç ve Elektrik Motoru Modeli.....42
3.2 Batarya ve Şarj Durumu Modeli.....46
3.4 PID Kontrolcü Uygulaması.....48
3.5 MRAC Kontrolcü Uygulaması.....48
3.5.1 Direkt MRAC Denetim Organı Uygulaması.....49
3.5.2 İndirekt MRAC Kontrolcü Uygulaması.....50
4.BULGULAR.....51
4.1 PID Kontrolcü Denetimi.....51
4.1.1 NEDC Sürüş Çevrimi için PID tipi denetleyici.....51
4.1.2 WLTP Sürüş Çevrimi için PID Kontrolcü Denetimi 55
4.1.3 FTP75 Sürüş Çevrimi için PID Kontrolcü Denetimi.....59
4.2 MRAC Kontrolcü Denetimi.....64
4.2.1 NEDC Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi.....64
4.2.2 WLTP Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi.....65
4.2.3 FTP75 Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi.....67
4.3. PID ve MRAC Kontrolcü Denetimleri ile Araç Şarj Durumu.....70
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....72

KAYNAKÇA.....73
ÖZGEÇMİŞ.....83

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
U_{ocv}	Açık Devre Voltajı
V_{ocv}	Açık Devre Voltajı
ω	Açısal Hız
α	Açısal İvme
u_{ad}	Adaptif Kontrol Sinyali
w^T	Adaptif Parametre Vektörünün Transpozu
F_{hava}	Aerodinamik Kuvvet
I	Akım
$P_{aksesuar}$	Aksesuar Gücü
A_{alan}	Alan
V	Araç Hızı
M	Araç Kütlesi
J	Atalet Momenti
m(t)	Basamak Girişin Şiddeti
U_0	Başlangıç Voltajı
$I_{batarya}$	Batarya Akımı
$P_{batarya}$	Batarya Gücü
$\eta_{batarya}$	Batarya Verimi
$V_{batarya}$	Batarya Voltajı
$C_{batarya}$	Batarya Kapasitansı
C_P1	Birinci Kapasitans
R_p1	Birinci Paralel Direnç
Â	Bozulma Modellemesi Matrisi
x	Cezalandırma, Filtreleme Katsayısı
$F_{çekiş}$	Çekiş Kuvveti
c_0	Çıkışın Başlangıçtaki Değeri
C	Çıkışın Sonsuzda Ulaşacağı Kararlı Değeri
t_1	Çıkışta Tepkinin Başladığı Zaman
Δ	Değişim Operatörü
R	Direnç
λ	Dişli Çevrim Oranı
B	Dişli Çevrim Oranı
f(x)	Durum Değişkenlerine Bağlı Sistemdeki Bozulma
k_x	Durum Geri Besleme Kazancı
ϕ (x)	Durum x'e bağlı Regresyon Fonksiyonları Vektörü
f	Duruma Bağlı Bozukluk Fonksiyonu
θ	Eğim Açısı
$-\eta_{motor}$	Elektrik Motor Verimliliği
$m_{eşdeğer}$	Eşdeğer Kütle
γ	Etkili Araç Kütle Katsayısı

m_{et}	Etkin Kütle
$e^{-Tö.s}$	Gecikme Terimi
$P_{batarya\ gereken\ (+)}$	Gereken Batarya Gücü
$E_{gereken\ elektrik}$	Gereken Elektrik Enerjisi
B	Giriş Sinyalinin Sistem Üzerindeki Etkisini Belirleyen Giriş Matrisi
Ah	Hata Matrisi
C_d	Hava Direnç Katsayısı
R_{int}	İç Direnç
C_P2	İkinci Kapasitans
R_p2	İkinci Paralel Direnç
K_i	İntegral Kazanç Katsayısı
T_i	İntegral Zaman Sabiti
$I_{inverter}$	İnverter Akımı
$_{inverter}$	İnverter Verimliliği
r_1	İşaretlerden Nesneye Olan Birinci Mesafe
r_2	İşaretlerden Nesneye Olan İkinci Mesafe
a	İvme
C_0	Kalıcı Durum Hali
C_P	Kapasitans
c	Kapasitans Farkı
$P_{kayıp}$	Kaybedilen Güç
m_0	Kontrol Edilen Değişkenin Başlangıçtaki Değeri
m	Kontrol Edilen Değişkenin Zamanla Ulaşacağı Kararlı Değeri
u	Kontrol Sinyali
K_{cr}	Kritik Kazanç
K_u	Kritik Kazanç Değeri
P_{cr}	Kritik Periyot ile İlişkili Salınım Periyodu
F	Kuvvet
m	Kütle Farkı
s	Laplace Değişkeni
V^T	Lyapunov Fonksiyonun Transpozu
Q	Lyapunov Fonksiyonunda Tanımlanan Pozitif Tanımlı Matris
$I_{batarya_maksimum}$	Maksimum Batarya Akımı
$I_{inverter_maksimum}$	Maksimum İnverter Akımı
w_{motor}	Motor Açısal Hızı
P_{motor}	Motor Gücü
T_{motor}	Motor Torku
V_{motor}	Motor Voltajı
Â	Nominal Sistem Matrisi
K_P	Oransal Kazanç Katsayısı
ρ	Özdirenç
V	Projeksiyon Matrisi
γ_r	Referans Girişine İlişkin Ağırlık veya Filtreleme Katsayısı
k_r	Referans Kazancı

y_m	Referans Model Çıktısı
$x_m(t)$	Referans Modelin Durum Vektörü
B_m	Referans Modelin Giriş Matrisi
r(t)	Referans Sinyali
$P_{batarya\ rejeneratif}$	Rejeneratif Batarya Gücü
$E_{rejeneratif\ elektrik}$	Rejeneratif Elektrik Enerjisi
P_u	Salınım Periyodu
c(t)	Sistemin Çıkış Yanıtı
A	Sistemin Doğal Dinamiğini Tanımlayan Sistem Matrisi
x(t)	Sistem Durumu
$T_ö$	Sistem Gecikme Süresi
K_0	Sistem Kazancı
Ax(t)	Sistemin Hata Matrisi ve Durum Vektörü Çarpımı
A_m	Sistemin İstenilen Davranışını Tanımlayan Matris
G_s	Sistemin Transfer Fonksiyonu
K_x	Tahminci Model Kazancı
w_{teker}	Teker Açısal Hızı
T_{teker}	Teker Torku
r_{teker}	Teker Yarıçapı
γ	Transmisyon Oranı
ς	Transmisyon Verimliliği
$E_{tüketilen\ elektrik}$	Tüketilen Elektrik Enerjisi
K_d	Türev Kazanç Katsayısı
T_d	Türev Zaman Sabiti
γ_w	Uyarlamalı Ağırlıkların Sönümleme Katsayısı
γ_b	Uyarlamalı Kontrol Ceza Katsayısı
γ_a	Uyarlamalı Kontrol Filtreleme Katsayısı
L	Uzunluk
V_d	Voltaj Düşümü
U	Voltaj Seviyesi
g	Yerçekimi İvmesi
$F_{yokuş}$	Yokuş Eğimi Kuvveti
$F_{yuvarlama}$	Yuvarlanma Kuvveti
$P_{yük}$	Yük Gücü
t	Zaman
T	Zaman Sabiti
e(t)	Hata
$P(t)_{elektrik}$	Elektrik Gücü
$P(t)_{gerekli\ elektrik}$	Gerekli Elektrik Gücü
u(t)	Kontrol Sinyali
$P(t)_{mekanik}$	Mekanik Güç
$P(t)_{rejeneratif}$	Rejeneratif Güç
$P(t)_{tüketilen\ elektrik}$	Tüketilen Elektrik Gücü

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif Akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
EPA	Amerika Çevre Koruma Ajansı
USD	Amerikan doları (United States Dollars)
BEV	Battery Electric Vehicles
BMS	Batarya Yönetim Sistemleri
FLC	Bulanık Mantık Kontrol
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistem
RC	Direnç Kapasitör
DC	Doğru Akım
LQR	Doğrusal Kuadratik Regülatör
WLTP	Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Taşıtlar Test Prosedürü (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure)
EM	Elektrik Motoru
EA	Elektrikli Araç
EV	Electric Vehicles
BLDC	Fırçasız Doğru Akım Motoru
FTP-75	Federal Test Prosedürü 75 (Federal Test Procedure 75)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles
HEV	Hybrid Electric Vehicles
IPM	İçten Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor
I	İntegral
SMC	Kayan Mod Kontrolü
MRAC	Model Referans Uyarlamalı (Adaptif) Kontrol
MPC	Model Tahminsel Kontrol
P	Oransal
PI	Oransal-İntegral
PD	Oransal-Türevsel
PID	Oransal-Türevsel-İntegral
RL	Pekiştirmeli Öğrenme
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
NNC	Sinir Ağı Kontrolü
SOC	Şarj Durumu (State Of Charge)
D	Türevsel (Derivative)
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü (New European Driving Cycle)
PNGV	Yeni Nesil Araçlar İçin Ortaklık (Partnership for a New Generation of Vehicles)
SPM	Yüzeye Monte Edilmiş Mıknatıslı Rotor (Surface Permanent Magnet)
yy.	Yüzyıl
ZN	Ziegler ve Nichols

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	19.yy'da yapılan ilk elektrikli araç	4
Şekil 2.2.	Elektrikli araç temel diyagramı	5
Şekil 2.3.	Hibrit araç blok diyagramı	6
Şekil 2.4.	Şarj edilebilir hibrit elektrikli araç	7
Şekil 2.5.	Yakıt hücreli elektrikli araç	7
Şekil 2.6.	Kapalı döngü denetim sistemi	9
Şekil 2.7.	Açık döngü denetim sistemi	10
Şekil 2.8.	Geribeslemeli denetim sistemi genelleştirilmiş blok şeması	10
Şekil 2.9.	Cevap eğrisi yöntemi	16
Şekil 2.10.	Belirsiz kütle özelliklerine sahip bir yük taşıyan robot	19
Şekil 2.11	Kendi kendini ayarlayan denetleyici	20
Şekil 2.12.	Model referans uyarlamalı kontrol sistemi	21
Şekil 2.13.	Doğrudan bir MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı	21
Şekil 2.14.	Dolaylı bir MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı	22
Şekil 2.15.	Belirsizlikleri ele alan bir tahmin problemi	25
Şekil 2.16.	Dinamik taşıt tepki kuvvetler	27
Şekil 2.17.	Nissan-EM elektrik motoru	31
Şekil 2.18.	Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi	32 32
Şekil 2.19.	Eşdeğer devre modelinin şematik gösterimi	33
Şekil 2.20.	SOC yörüngesi	34
Şekil 2.21.	NEDC-WLTP hız zaman karşılaştırması	36
Şekil 2.22.	FTP75 sürüş çevrimi	37
Şekil 3.1.	Elektrikli araç MATLAB/Simulink modeli	43
Şekil 3.2.	Sürüş çevrimleri	43
Şekil 3.3.	Yol eğimi-zaman grafiği	44
Şekil 3.4.	Rüzgâr hızı-zaman grafiği	45
Şekil 3.5.	Elektrik motoru enerji verimliliği tablosu	46
Şekil 3.6.	Simulink elektrik motoru modeli	46
Şekil 3.7.	Batarya R_{int} modeli	47
Şekil 3.8.	Simulink batarya modeli	47
Şekil 3.9.	Simulink SOC modeli	48
Şekil 3.10.	Dinamik modele eklenen MRAC bloğu	49
Şekil 4.1.	NEDC tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları	52
Şekil 4.2.	NEDC tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları	53
Şekil 4.3.	NEDC tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları	54
Şekil 4.4.	NEDC tipi sürüş çevriminde PID denetim organı ile hız denetimi sonuçları	55 55
Şekil 4.5.	WLTP tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları	56
Şekil 4.6.	WLTP tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları	57
Şekil 4.7.	WLTP tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları	58
Şekil 4.8.	WLTP tipi sürüş çevriminde PID etki ile hız denetimi sonuçları	59 59
Şekil 4.9.	FTP75 tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları	60
Şekil 4.10.	FTP75 tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları	61
Şekil 4.11.	FTP75 tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları	62

Şekil 4.12.	FTP75 tipi sürüş çevriminde PID etki ile hız denetimi sonuçları	63
		63
Şekil 4.13.	NEDC tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları	64
		64
Şekil 4.14.	NEDC tipi sürüş çevriminde indirekt MPAC ile hız denetimi sonuçları	65
		65
Şekil 4.15.	WLTP tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları	66
		66
Şekil 4.16.	WLTP tipi sürüş çevriminde indirekt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları	67
		67
Şekil 4.17.	FTP75 tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları	68
		68
Şekil 4.18.	FTP75 tipi sürüş çevriminde indirekt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları	69
		69

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Yaygın modele dayalı kontrol yöntemleri	12
Çizelge 2.2.	Yaygın modele dayalı olmayan kontrol yöntemleri	13
Çizelge 2.3.	Titreşim yöntemine göre denetim organı ayar değerleri	15
Çizelge 2.4.	Sistem cevabı yönteminde Ziegler ve Nichols ayarları	17
Çizelge 2.5.	Cohen ve Coon Ayarları Tablosu	17
Çizelge 2.6.	P, I, D, PD, PI ve PID kontrolör avantaj ve dezavantajları hakkında	18 18
Çizelge 2.7.	PID ve MRAC kontrol sistemlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması	24 24
Çizelge 3.1.	Araca ve bataryaya ait parametreler	45
Çizelge 3.2.	Direkt MRAC uygulaması için başlangıç parametreleri	50
Çizelge 3.3.	İndirekt MRAC uygulaması başlangıç parametreleri	50
Çizelge 4.1.	NEDC'de PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları	70 70
Çizelge 4.2.	WLTP'de PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları	70 70
Çizelge 4.3.	FTP75'te PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları	71 71

1.GİRİŞ

Son yıllarda, küresel çevre sorunları, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması gibi faktörler, otomotiv sektöründe büyük bir dönüşümü zorunlu hale getirmiştir. İklim değişikliğiyle mücadele ve karbon salınımını azaltma hedefleri doğrultusunda, geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerini, daha çevreci ve verimli olan elektrikli araçlar (EA) almaya başlamıştır. Elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışabilme potansiyeline sahip olmaları, düşük emisyon seviyeleri ve gelişen batarya teknolojileri sayesinde geleceğin ulaşım çözümleri arasında önemli bir yer edinmiştir. Ancak bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenmesi için performans, enerji verimliliği, şarj altyapısı ve batarya ömrü gibi konuların daha etkin bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Elektrikli otomobiller, kısmen veya tamamen elektrik gücüyle çalışan otomobillerdir. Elektrikli otomobil, bir veya birden daha fazla motoru veya çekiş motorunu kullanan, otomobil dışı kaynaklardan gelen elektrikle güç verilebileceği gibi, yakıtı elektriğe dönüştürmek için bir pil, güneş panelleri, yakıt hücreleri ve elektrik jeneratörü gibi kaynaklar da kullanılabilmekte olan otomobildir (Faiz ve diğerleri, 1996). Elektrikli otomobil terimi genellikle elektrikli bir arabayı ifade etmek için kullanılmaktadır. Elektrikli otomobiller, yakıt ve gaz karışımını yakarak güç üreten içten yanmalı bir motor yerine bir elektrik motoru üzerinde çalışan otomobillerdir. Bu nedenle, dünya genelinde artan kirlilik, küresel ısınma, tükenen doğal kaynaklar vb. konuların son dönemde endişe verici boyutlara gelmiş olması, elektrikli otomobillerin mevcut nesil otomobillerinin olası bir alternatifi olarak görülmesine neden olmuştur. 21. yüzyılda elektrikli otomobiller, teknolojik gelişmeler ve yenilenebilir enerjiye artan odaklanma, iklim değişikliği ve diğer çevresel konular üzerindeki etkisinin potansiyel olarak azalması nedeniyle tüketiciler tarafından da tercih edilir olmuştur (Eberle ve Von Helmolt, 2010).

Elektrikli araçlar sadece çevreye olan katkılarıyla değil, aynı zamanda kullanıcılar için sundukları uzun vadeli ekonomik faydalarla da dikkat çekmektedir. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla elektrikli araçların daha düşük işletme maliyetlerine sahip olması, yakıt tüketiminde tasarruf sağlarken, bakım maliyetlerinin de düşmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, elektrikli araçları özellikle yoğun trafik ve uzun yolculukların yapıldığı şehirlerde cazip bir alternatif haline getirmektedir. Ancak, elektrikli araçların yaygınlaşması ve verimli çalışması için, özellikle batarya yönetimi, motor kontrolü, enerji dönüşüm mekanizmaları ve şarj altyapılarının geliştirilmesi gerektiği bir gerçektir.

Elektrikli araçlarda verimliliği artırmak için güç aktarım mekanizmalarının ve kontrol sistemlerinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Araçların sürüş dinamikleri, enerji tüketimi ve motor performansı üzerinde belirleyici olan kontrol teknikleri hem enerji tasarrufunu maksimize etmek hem de sürüş deneyimini iyileştirmek adına kritik bir rol oynamaktadır. PID kontrolü, basitliği ve pratik uygulanabilirliği sayesinde endüstride uzun yıllardır tercih edilen bir yöntemdir. Değişken sistem parametreleri ve çevresel bozucular karşısında yetersiz de kalabilmektedir. Öte yandan, bulanık mantık, adaptif kontrol teknikleri vb. modern kontrol teknikleri değişen sistem koşullarına uyum sağlayarak performans kayıplarının azaltılmasını sağlayabilmekte ve daha verimli bir kontrol mekanizması sunabilmektedir.

Elektrikli araç sistemlerinde kullanılan yüksek voltajlı kabloların ve güç aktarımı bileşenlerinin enerji kayıplarını minimize edecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Elektrikli araçların enerji yönetiminde kritik olan batarya performansı, kontrol stratejilerinin etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Bataryaların şarj ve deşarj döngüleri, araçların enerji verimliliği açısından önemli bir faktördür. Bataryaların verimli bir şekilde şarj edilmesi ve enerji kayıplarının azaltılması, araçların menzilini artırma noktasında kritik bir rol oynar. Ayrıca batarya ömrünün uzatılması uzun vadeli ekonomik fayda sağlayarak kullanıcıların toplam sahip olma maliyetlerini düşürür.

Elektrikli araçlar, yalnızca çevre dostu ulaşım araçları olmanın ötesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre çalışabilme potansiyeline sahiptir. Araçtan ağ (V2G) teknolojileri, elektrikli araçların şebekeye enerji geri vererek, şebeke dengesini sağlayabilecek kapasiteye sahip olmalarını mümkün kılmaktadır. Bu teknoloji, elektrikli araçların sadece bir taşıma aracı olmanın ötesinde, enerji depolama ve şebeke dengelemesi sağlama işlevi görmesini sağlar. Bu alandaki araştırmalar, elektrikli araçların daha entegre bir enerji ekosisteminin parçası haline gelmesini sağlayacak çözümler geliştirmektedir. V2G teknolojisi, şebeke seviyesinde esneklik sağlayarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve böylece enerji arzı ve talebi arasındaki dengeyi sağlamaktadır.

Elektrikli araçların daha verimli hale getirilmesi, yalnızca mühendislik açısından değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik boyutlarıyla da geniş kapsamlı bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Elektrikli araçların verimli çalışabilmesi için gerekli olan güç aktarma sistemleri, batarya yönetimi, şarj altyapıları ve ağ entegrasyonu gibi konuların geliştirilmesi, gelecekte daha sürdürülebilir ulaşım çözümleri sunacaktır. Elektrikli araçlar, fosil yakıtlar ile

çalışan araçlara göre daha düşük karbon salınımına sahip olup, çevre dostu bir ulaşım çözümü sunarken aynı zamanda düşük işletme maliyetleri ile de ekonomik açıdan avantajlıdır. Bu bağlamda, elektrikli araçların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, sadece çevresel sürdürülebilirliği sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda ulaşım sistemlerinin geleceğini şekillendirecek ve toplumsal fayda sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, elektrikli bir aracın hız denetimi PID ve model referans adaptif (MRAC) kontrol yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak elektrikli araçların hareket denklemleri elde edilmiştir, ardından bu araçların kontrol edilmesinde kullanılan farklı yaklaşımlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Farklı standart yol çevrimleri kullanılarak yapılan hız kontrolündeki performansları ile enerji tüketimi, SOC, menzil gibi sürüş performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Yapılan çalışmalar incelenen şartlar dahilinde MRAC kontrol algoritmasının PID kontrol yöntemine kıyasla değişken sürüş koşullarında daha başarılı olduğunu ve enerji tüketimini de azalttığını ortaya koymaktadır. MRAC'in sunduğu avantajlardan biri de sistem dinamiklerindeki değişikliklere gerçek zamanlı olarak uyum sağlayabilmesi ve bu sayede daha stabil bir sürüş deneyimi sunabilmesidir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kuramsal temeller başlığı içerisinde tez çalışmasında yer alan elektrikli araç ve elektrikli araç adına yapılan modelleme çalışması tanıtılmış kaynak araştırmasında ise konu ile alakalı makale ve tez çalışmaları incelenmiştir.

Kuramsal Temeller

Bu kısımda elektrikli araçların tarihi ve gelişimi, elektrikli araçlarda kontrol sistemleri ve kontrol yöntemleri, elektrikli araçlarda matematiksel model ele alınmıştır. Ayrıca elektrikli araçlarda kablo enerji dağıtımı adına bilgilendirmeler yapılmıştır.

2.1 Elektrikli Araçların Tarihi ve Gelişimi

Elektrikli araçlar (EA), otomotiv teknolojilerinin evriminde önemli bir yere sahiptir. İlk elektrikli araçlar, 19. yüzyılın sonlarında geliştirilmiş ve zamanla gelişen teknolojiyle modern özellikler kazanmıştır.

Elektrikli araçların tarihi, 19. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. 1835 yılında Thomas Davenport, elektrik motoruyla çalışan ilk taşıtı geliştirmiştir (Kirsch, 2000). Aynı dönemde İskoç mucit Robert Anderson, şarj edilemeyen bir batarya kullanarak elektrikle çalışan bir taşıt üretmiştir (Mom, 2004). Şekil 2.1'de Robert Anderson tarafından geliştirilen elektrikli araç paylaşılmıştır.



Şekil 2.1. 19.yy'da yapılan ilk elektrikli araç (Loránd ve Iulia, 2022)

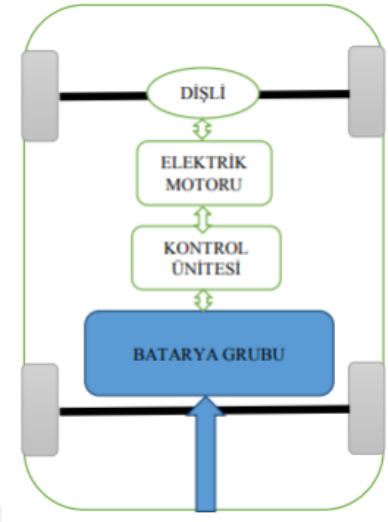
20. yüzyılın başlarında, elektrikli araçlar sessiz ve kolay kullanımları sayesinde şehir içi ulaşımda büyük ilgi görmüştür. Örneğin, 1900'lü yıllarda ABD'de üretilen araçların yaklaşık %28'i elektrikle çalışıyordu (Anderson ve Anderson, 2010). Ancak, içten yanmalı motorların geliştirilmesi ve petrol bazlı yakıtların ucuzluğu nedeniyle elektrikli araçlar popülerliğini yitirmiştir.

Elektrikli araç teknolojisi 1970'lerdeki petrol krizleri ve çevresel kaygılar nedeniyle tekrar gündeme gelmiştir (Ehsani ve diğerleri, 2018). Özellikle lityum-iyon batarya teknolojisinin geliştirilmesi, elektrikli araçların performansını ve menzilini önemli ölçüde arttırmıştır. 2000'li yılların başından itibaren Tesla gibi yenilikçi şirketlerin sektöre girmesiyle, elektrikli araçlar yeniden popülerlik kazanmıştır (Bakker ve diğerleri, 2014).

Elektrikli araçlar enerji kaynaklarına ve güç aktarma sistemlerine göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Bu çeşitler, teknolojik özelliklerine bağlı olarak farklı kullanım senaryolarına hitap etmektedir.

a) Tam Elektrikli Araçlar (Battery Electric Vehicles - BEV)

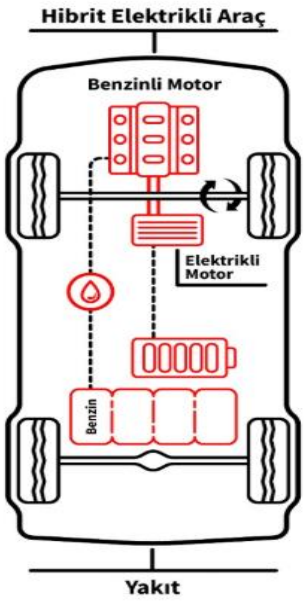
Tam elektrikli araçlar yalnızca elektrik enerjisiyle çalışır ve enerji kaynağı olarak şarj edilebilir bataryaları kullanır. BEV'lerde içten yanmalı motor bulunmaz ve tamamen sıfır emisyonlu bir sürüş sunar (Chan, 2007). Örnek olarak Tesla Model 3 ve Nissan Leaf gibi araçlar verilebilir. BEV'ler enerji verimliliği ve çevre dostu yapısıyla dikkat çeker; ancak menzil sınırlamaları, şarj altyapısına bağımlılık yaratabilir (Ehsani ve diğerleri, 2018). Şekil 2.2'de elektrikli araca ait temel diyagram gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Elektrikli araç temel diyagramı (Altun, 2012)

b) Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicles - HEV)

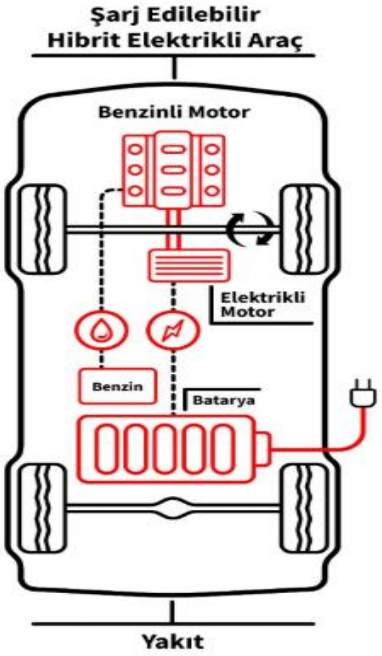
Hibrit elektrikli araçlar hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru içerir. Bu araçlar, enerji verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için iki farklı güç kaynağını bir arada kullanır. HEV'lerde genellikle fren enerjisi geri kazanım sistemi bulunur (Barkenbus, 2010). Şekil 2.3'te hibrit elektrikli araç blok diyagramı paylaşılmıştır.



Şekil 2.3. Hibrit araç blok diyagramı ("BYD", t.y.)

c) Şarj Edilebilir Hibrit Araçlar (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PHEV)

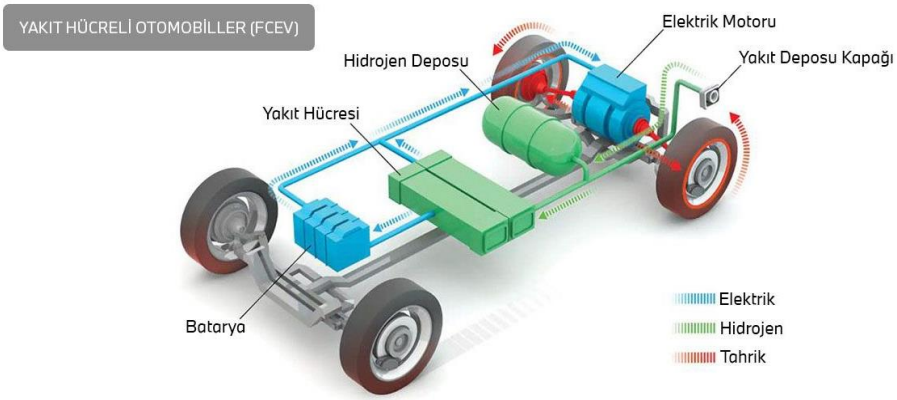
PHEV'ler hibrit elektrikli araçlardan farklı olarak harici bir güç kaynağı aracılığıyla bataryalarını şarj edebilir. PHEV'ler genellikle kısa mesafelerde elektrik motoruyla, uzun mesafelerde ise içten yanmalı motorla çalışır. Bu tür araçlar hem elektrikli hem de fosil yakıtlı taşıtların avantajlarını bir araya getirir (Chan, 2007). Örnek olarak Mitsubishi Outlander PHEV verilebilir ve Şekil 2.4'te araçlar şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar için diyagram paylaşılmıştır.



Şekil 2.4. Şarj edilebilir hibrit elektrikli araç (“BYD”, t.y.)

d) Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (Fuel Cell Electric Vehicles - FCEV)

Yakıt hücreli elektrikli araçlar enerji kaynağı olarak hidrojen kullanır. Hidrojen yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyona girerek elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu enerji elektrik motorunu çalıştırır. FCEV’ler yalnızca su buharı emisyonu üretir ve uzun menzilleri ile dikkat çeker (Ehsani ve diğerleri, 2018). Şekil 2.5’te yakıt hücreli elektrikli araç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Yakıt hücreli elektrikli araç (“BMW”, t.y.)

Bugün elektrikli araçlar hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir ulaşım çözümü olarak kabul edilmektedir. Elektrikli araçların enerji verimliliği, düşük karbon emisyonları ve gelişmiş sürüş teknolojileri, dünya çapında artan bir kabul görmesini sağlamıştır (Chan, 2007). Örneğin, fren enerjisi geri kazanımı gibi teknolojiler, enerji tasarrufunu artırarak araç menzilini genişletmektedir (Ehsani ve diğerleri, 2018). Bahsi geçen bu frenleme vasıtası ile rejeneratif frenleme enerjisi bataryaya kazandırılabilmektedir.

Elektrikli araçlarda hız düzenleme, enerji yönetimi ve sürüş güvenliği gibi unsurlar, gelişmiş kontrol sistemleriyle optimize edilmektedir. Model Tabanlı Kontrol (Model Predictive Control-MPC) ve uyarlanabilir kontrol sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımlar bu teknolojilerin verimliliğini artırmaktadır (Liang ve diğerleri, 2016). Bu tezde ele alınan hız düzenleme sistemi, elektrikli araçların kontrol alanındaki bu gelişmelerin bir yansımasıdır.

2.2 Elektrikli Araçlarda Kontrol Sistemleri

Elektrikli araçlar fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve çevresel sürdürülebilirliği artırma hedefleri doğrultusunda son yıllarda giderek daha fazla önem kazanmıştır (Singh ve diğerleri, 2021). Elektrikli araç sistemlerinde kullanılan motorların yüksek verimlilikte çalışmasını sağlamak ve enerji tüketimini minimize etmek, kontrol stratejilerinin etkinliğine bağlıdır. Kontrol sistemleri, motor hızını ve torkunu yöneterek aracın dinamik performansını optimize etmeyi hedefler (Haddoun ve diğerleri, 2007). Bu bağlamda, elektrikli araçların performansını optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmak için uygun kontrol stratejilerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Özellikle farklı sürüş koşulları ve yük değişimlerine uyum sağlayabilen kontrol yöntemleri hem sürüş dinamiklerinin iyileştirilmesine hem de enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, kontrol sistemlerinin yalnızca bir teknoloji aracı değil, aynı zamanda elektrikli araçların sürdürülebilirliğini artıran bir tasarım unsuru olduğunu göstermektedir.

Araçlarda kontrol sistemleri genellikle kapalı çevrim kontrol yöntemlerine dayanır. Bu yöntemler, referans sinyali ile sistem çıktısı arasındaki farkı minimize etmeye yönelik geri besleme döngüleri içerir. Kapalı çevrim kontrol stratejileri arasında PID (Oransal-İntegral-Türev) ve MRAC (Model Referans Uyarlamalı Kontrol) gibi yöntemler de elbette amaç parametre ve amaç değişikliklerine uyumsuzluk sorunlarını çözmektir (Peng ve Chen, 2022). PID kontrolü basit yapısı ve geniş uygulama alanı nedeniyle endüstriyel standart haline gelmiş bir yöntemdir ancak değişken sistem dinamikleri ve çevresel değişken faktörler karşısında

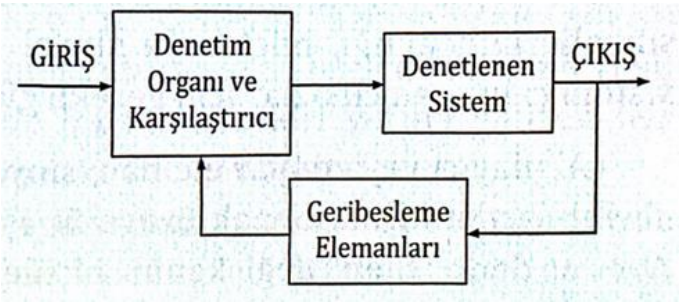
yetersiz kalabilmektedir (Franklin ve diğerleri, 2002). Bu nedenle elektrikli araçlarda yalnızca sabit sistem dinamikleri için değil, aynı zamanda değişken koşullar ve beklenmedik bozucu etkiler için de etkili olabilecek kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi gerekli olabilmektedir. Özellikle, adaptif kontrol yöntemleri sistemin gerçek zamanlı olarak değişen parametrelere uyum sağlama yeteneği ile öne çıkmaktadır.

2.3 Kontrol Yöntemleri

Kontrol yöntemleri dinamik sistemlerin istenen bir referans davranışını gerçekleştirmesi amacıyla tasarlanmış matematiksel algoritmalardır. Otomotiv sektöründe, özellikle elektrikli araçlarda, bu yöntemler güç aktarım sistemlerinden enerji yönetimine kadar birçok alanda uygulanmaktadır. Kontrol sistemleri genel olarak açık döngü kontrol sistemleri, kapalı döngü kontrol sistemleri ve denetim sistemleri başlıkları altında ele alınmaktadır.

2.3.1 Denetim Sistemi

Denetim sistemi, bir sistemin ya da süreç parametrelerinin belirli bir referans değere göre kontrol edilmesini sağlayan bir mekanizma veya algoritmadır. Bir denetim sisteminin temel amacı sistemin kararlı, hızlı ve minimum hata ile çalışmasını sağlamaktır. Geribeslemeli denetim sistemine sahip bir sistemin temel blok şeması görseli şekil 2.6 içerisinde paylaşılmıştır.

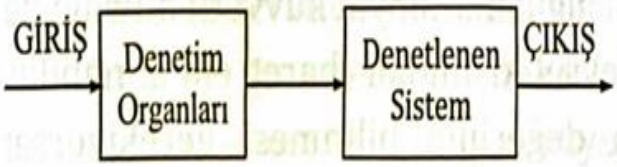


Şekil 2.6. Kapalı döngü denetim sistemi (Yüksel, 2021)

Denetim organı (kontrolcü) bir denetim sistemi içinde önemli bir rol oynar. Hata sinyalini değerlendirerek gerekli düzeltici eylemleri üretir. Özellikle PID kontrolcüler bu tür sistemlerde en yaygın kullanılan denetim yöntemlerinden biridir. Ayrıca, modern kontrol sistemlerinde adaptif kontrolcüler, özellikle karmaşık dinamik sistemlerin kontrolünde daha hassas ve etkin bir çözüm sunar (Nise, 2020).

2.3.2 Açık döngü kontrol sistemleri

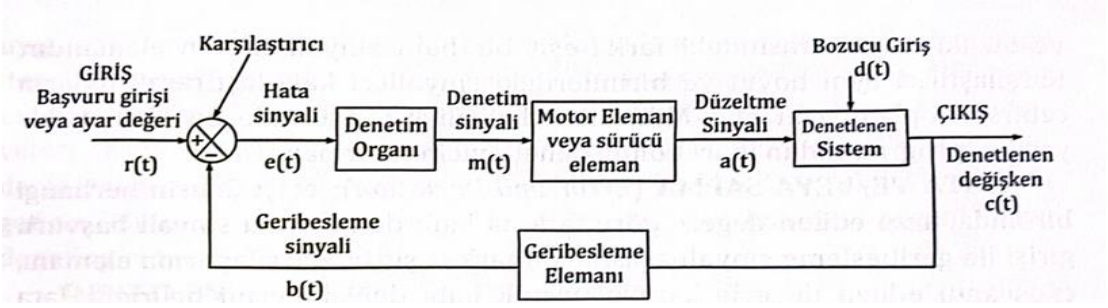
Şekil 2.7'de de gösterilmiş olan açık döngü kontrol sistemleri sistem girişine bağlı olarak çalışan ve geri besleme mekanizması olmayan kontrol yapılarıdır. Bu sistemlerde, kontrol edilen değişken sürekli izlenmez ve dışsal bozucu etkiler sistemi etkilediğinde herhangi bir düzeltme sağlanamaz. Örneğin, bir çamaşır makinesinin önceden belirlenen bir programa göre çalışması açık döngü kontrolüne örnek gösterilebilir (Ogata, 2010). Denetim faaliyetinin denetim sistemi çıkışından bağımsız olduğu sistemlere açık döngü denetim sistemi denir. Bu denetim tipinde arzu edilen girişin denetlenen çıkış değişkeni ile hiçbir karşılaştırması yoktur Şekil 2.7' de açık döngü sistemin temel blok şeması gösterilmiştir (Yüksel, 2021).



Şekil 2.7. Açık döngü denetim sistemi (Yüksel, 2021)

2.3.3 Kapalı döngü kontrol sistemleri

Şekil 2.8'de de gösterilmiş olan kapalı döngü kontrol sistemleri, kontrol edilen değişkenin sürekli ölçülerek geri besleme ile değerlendirildiği sistemlerdir. Bu sistemler, bozucu etkiler nedeniyle meydana gelen sapmaları telafi ederek sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlar. Örneğin, bir termostat, ortam sıcaklığını sürekli ölçerek hedef sıcaklığa ulaşmak için bir ısıtıcıyı açar veya kapatır (Dorf ve Bishop, 2011). Sistem çıkışının sistem girişine yansıtılması işlemine geri besleme denir ve geri besleme, kontrolcü ve kontrol edilen değişken bloklarını barındıran kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı şekil 2.8 içerisinde paylaşılmıştır.



Şekil 2.8. Geribeslemeli denetim sistemi genelleştirilmiş blok şeması (Yüksel, 2021)

2.3.4 Denetim Organı

Kontrol sistemleri tasarımı mühendislik sistemlerinde denetlenen sistemden istenen performansın sağlanması için yaygın olarak kullanılır. Mühendislikte dinamik sistemlerin istenen performans seviyelerini sağlamaları için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu bağlamda, Denetim organı bir sistemin belirli bir referans değere ulaşmasını sağlamak için kullanılan algoritma, cihaz veya mekanizmadır. Kontrolcü, sistemi izler ve istenen davranışı gerçekleştirmek üzere sistemi yönlendirir.

Klasik kontrol yöntemleri, kontrol mühendisliğinde uzun yıllardır kullanılan temel yaklaşımlardır. Bu yöntemler, genellikle sistemin transfer fonksiyonuna dayanır ve lineer, zamana bağlı olmayan sistemler için etkili çözümler sunar (Ogata, 2010). Klasik kontrol yöntemlerinden biri olarak sık kullanılmakta olduğu bilinen PID kontrolü örnek verilebilmektedir.

Gelişkin kontrol yöntemleri, klasik yöntemlerin sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle daha karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde kullanılır ve sistemin durum değişkenleri üzerinde çalışır (Ogata, 2010). Durum uzayı, dinamik sistemlerin matematiksel gösterim yöntemlerinden biridir ve sistemin durum değişkenleri kullanılarak modellenir. Bu gösterim temelinde geliştirilen durum uzayı gösterimli kontrol yöntemleri, özellikle çok girişli-çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılır. Gelişmiş kontrol yöntemlerinden biri olan Model Referanslı Uyarlamalı Kontrol (MRAC), sistem parametrelerinin belirsiz veya zamanla değişken olduğu durumlarda etkili bir çözüm sunar. MRAC yöntemi, önceden tanımlanmış bir referans modelin davranışını takip etmeyi amaçlar ve kontrol parametrelerini gerçek zamanlı olarak uyarlayarak optimal performans sağlar (Kökçam ve Tan, 2022; Aström ve Wittenmark, 2008). Yine denetleyici tasarımı ile ilgili olarak yapılan çalışmaları modele dayalı ve modele dayalı olmayan yöntemler olarak değerlendirmek mümkündür. Her iki yaklaşımın da avantajları, dezavantajları ve uygulanabilirlik alanları bulunmaktadır (Ogata, 2010; Slotine ve Li, (1991); Nise, 2020).

Modele dayalı kontrol yöntemleri, sistemin dinamiklerini matematiksel bir model üzerinden temsil eden ve bu modele göre kontrol stratejileri geliştiren yöntemlerdir. Matematiksel model anlamında, sistemin fiziksel davranışını temsil eden diferansiyel denklemler veya durum uzayı modelleri kullanılır (Skogestad ve Postlethwaite, 2005). Optimizasyon ve tahmin anlamında, sistemin gelecekteki davranışını tahmin eder ve optimizasyon teknikleri kullanır (Camacho ve

Bordons, 2007). Hassasiyet olarak, sistem parametrelerindeki değişimlere karşı duyarlıdır ve modelleme hataları durumunda performans kaybı yaşanabilir (Slotine ve Li, 1991). Yaygın modele dayalı kontrol yöntemleri ile ilgili paylaşım Çizelge 2.1 içerisinde yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Yaygın modele dayalı kontrol yöntemleri

Kontrol Yöntemi	Açıklama
PID (Oransal-İntegral-Türev)	En yaygın kullanılan kontrol yöntemidir. Hata sinyalini orantısal, integral ve türevsel olarak değerlendirir (Nise, 2020).
Durum Geri Bildirim (State Feedback)	Sistem dinamiklerini modelleyerek, durum değişkenlerinin geri beslemesi yoluyla kontrol sağlar (Ogata, 2010).
Optimal Kontrol	Performans ölçütlerini optimize etmek için matematiksel modeller ve ağırlık fonksiyonları kullanır (Bryson ve Ho, 1975).
Doğrusal Kuadratik Regülatör (LQR)	Optimal kontrol yönteminin özel bir türüdür. Minimum maliyet fonksiyonuna dayalı doğrusal sistemler için kullanılır (Anderson ve Moore, 2007).
Model Tahminsel Kontrol (MPC)	Sistem dinamiklerine dayalı tahmin yaparak, gelecekteki kontrol sinyallerini optimize eder (Camacho ve Bordons, 2007).
H∞ Kontrol	Belirsizlikler altında sistem kararlılığını ve performansını sağlamaya odaklanan bir kontrol yöntemidir (Apkarian ve Noll, 2017).
Uyarlamalı Kontrol (Adaptif kontrol)	Zamanla değişen sistem parametrelerine uyum sağlamak için kontrol kazançlarını ayarlayan bir yöntemdir (Åström ve Wittenmark, 2013).
Robust Kontrol	Parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı dayanıklılık sağlamayı hedefler (Zhou ve diğerleri, 1996).

Modele dayalı olmayan kontrol yöntemleri, sistem dinamiklerinin matematiksel olarak modellenmesini gerektirmeyen, veri odaklı veya deneyime dayalı yöntemlerdir. Bu yöntemlerde sistem dinamikleri açık bir şekilde bilinmeden kontrol yapılabilmektedir ve genellikle makine öğrenimi optimizasyon teknikleri bu kontrol yöntemlerinden önemli bir rol oynamaktadır (Keshmiri ve diğerleri, 2012). Yaygın modele dayalı olmayan kontrol yöntemleri için paylaşım Çizelge 2.2 içerisinde yapılmıştır.

Çizelge 2.2. Yaygın modele dayalı olmayan kontrol yöntemleri

Kontrol Yöntemi	Açıklama
Bulanık Mantık Kontrol (FLC)	Matematiksel bir model gerektirmeden, insan mantığı ve deneyime dayalı bulanık kurallar kullanır (Zadeh, 1965).
Sinir Ağı Kontrolü (NNC)	Yapay sinir ağlarını kullanarak sistemin giriş-çıkış ilişkilerini öğrenir ve model oluşturma ihtiyacını ortadan kaldırır (Narendra ve Parthasarathy, 1990).
Pekiştirmeli Öğrenme (RL)	Ödül ve ceza mekanizmasına dayalı olarak kontrol politikalarını optimize eder (Sutton ve Barto, 2018).
Kayan Mod Kontrolü (SMC)	Sistemin durumlarını kayma yüzeyine yönlendirerek dinamik sistemleri kontrol eder (Shtessel ve diğerleri, 2014).
Sezgisel Tabanlı Kontrol	Sistem davranışını yönlendirmek için deneyim veya sezgisel kurallardan faydalanır (Wolf ve diğerleri, 2020).
Q-Öğrenme	Model gerektirmeyen, tabanlı takviyeli öğrenme yöntemi ile optimal kontrol stratejisi öğrenilir (Watkins ve Dayan, 1992).

Modele dayalı ve modele dayalı olmayan kontrol yöntemleri mühendislik uygulamalarında farklı avantajlar sunar. Modele dayalı yöntemler hassas kontrol ve uzun vadeli optimizasyon gerektiren sistemler için uygunken, modele dayalı olmayan yöntemler esnekliği ve adaptasyonu ile öne çıkar. Örneğin, elektrikli araç modellemelerinde enerji tüketimi, batarya yönetimi ve tork kontrolü gibi uygulamalarda sistem dinamiklerinin iyi bilindiği durumlarda modele dayalı yöntemler tercih edilirken; sistem dinamiklerinin belirsiz olduğu veya çevresel değişimlerin yüksek olduğu senaryolarda modele dayalı olmayan yöntemler daha etkili olabilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda çevresel değişikliklere uyum sağlamak amacıyla her iki yöntem ayrı ayrı veya hibrit şekilde de kullanılabilmektedir (Chehade ve diğerleri, 2024; Liu ve diğerleri, 2022; Bascetta ve diğerleri, 2008).

2.3.5 Oransal-İntegral-Türev (PID) Kontrol

PID kontrol oransal, integral ve türev tipi denetim etkilerini bir araya gelmesiyle oluşan bir denetim organıdır. Elektrikli araçlarda, özellikle motor hız kontrolünde ve batarya şarj yönetiminde sıklıkla tercih edilir. PID kontrolün avantajları arasında kolay tasarım ve geniş bir uygulama alanı da bulunmaktadır (Bhat ve diğerleri, 2020). Ancak doğrusal olmayan ve değişken koşullarda performansı sınırlıdır. Bu sınırlamaları aşmak için PID kontrolörlerin gelişmiş varyasyonları veya adaptif kontrol yöntemleri ile entegre edilmesi önemli bir çözüm olabilir. Örneğin, adaptif kazanç ayarlamaları veya türevsel PID yöntemleri değişken koşullarda performans iyileştirmesi sağlayabilir. Bununla birlikte doğrusal olmayan sistemlerde

PID denetim organının etkinliğini artırmak için denetleyici tasarımında sistem dinamiklerini daha iyi modelleyen matematiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Böylece PID denetim organının geleneksel avantajları korunurken, dinamik koşullara uyum sağlama kapasitesi genişletilebilir.

PID kontrolün içerisinde oransal, integral ve türev kontrol kazançları ile toplam bir kontrol sinyali üretilmektedir. Bahsi geçen bu kazançlar parçalı olarak oransal kontrol, integral kontrol ve türev kontrol olarak da açıklanabilmektedir.

Oransal kontrol, sistemin hatasını temel alır ve bu hatayı kazanç (Kp) ile çarparak kontrol sinyalini oluşturur. Bahsedilen işlem denklem 2.1'de gösterilmiştir.

$$u(t) = K_{\mathrm{p}}.e(t) \tag{2.1}$$

Oransal kazanç (Kp) arttıkça, sistemin tepkisi hızlanır ancak çok büyük Kp değerlerinde sistem kararsız hale gelebilir (örneğin, osilasyon veya dalgalanma görülebilir) (Ogata,2010).

İntegral kontrol, hatanın zamana bağlı integralini kullanır. Bu bileşen, hata uzun bir süre boyunca devam ediyorsa, bu hatayı azaltmaya çalışır. Bahsedilen işlem denklem 2.2'de gösterilmiştir.

$$u(t) = K_{\mathrm{i}}.\int_0^t e(t)dt \tag{2.2}$$

Kalıcı hata problemini çözmede oldukça etkilidir ancak aşırı yükselme ve dalgalanmalara yol açabilir (Yüksel, 2021).

Türev kontrol, hatanın değişim hızını hesaba katar ve bu hızla orantılı bir kontrol sinyali oluşturur. Bahsedilen işlem denklem 2.3'te gösterilmiştir.

$$u(t) = K_{\mathrm{d}}.de(t)/dt \tag{2.3}$$

Sistem dinamiklerini iyileştirir ve ani değişikliklere tepki vermede etkilidir ancak ölçüm gürültüsüne karşı hassas olabilir ve filtreleme gerektirebilir (Franklin ve diğerleri, 2002).

PID denetim organına ait ideal formdaki genel matematiksel ifadesinin s domenindeki yazılımı denklem 2.4 ile ifade edilebilir (Mathworks, 2024).

$$M(s) = (Kp\,.\,(1 + (Ki\,/s) + \ Kd.s\,/((s/N) + 1))\,)\,E(s) \tag{2.4}$$

Denetleyicilerin kazanç parametrelerinin doğru ayarlanması sistem performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Ogata, 2010). Bu parametreler, oransal (Kp), integral (Ki) ve türev (Kd) kazançlarıdır. PID denetleyici parametre ayarları genellikle deneysel ve analitik yöntemler kullanılarak belirlenir.

PID tipi denetim organının deneysel ayarında kapalı döngü çalışan sisteme basamak giriş uygulanır ve sistemin cevabı incelenir. Burada sistemin kalıcı-durum haline en kısa zamanda, kararlı bir şekilde, en az hata ile ulaşması istenir. Bunu sağlayan ayar da en uygun denetim organı ayarı olarak ifade edilir. Ziegler ve Nichols (1942) tarafından bu konu ile ilgili bir ölçüt geliştirilmiştir ve bu ölçüte göre denetlenen sistemin cevap eğrisinde ikinci aşma genliğinin, birinci aşma genliğine oranının 0.25 olması istenmiştir. Bu ayar ile elde edilen cevap eğrisinde salınım fazla olduğu için günümüzde bu ölçüt kaba ayar olarak görülür ve daha iyi bir cevap için ince ayarların yapılması gerekir. PID denetleyicilerin deneysel ayarında Ziegler ve Nichols tarafından geliştirilen salınım (titreşim) yöntemi ve sistem cevabı yöntemi yaygın olarak bilinen yöntemlerdir (Yüksel, 2021).

Salınım veya titreşim yöntemi; sistemin kritik kazancını (sistemin sınırlı kararlı hale geldiği kazanç değeri) ve kritik periyodunu kullanarak PID parametrelerini hesaplamaya dayanır. Bu yöntem için sistemde sadece oransal kontrol kullanılarak (denklem 2.4'te verilen diğer bileşenler sıfırlanarak) sistem kapalı döngü olarak çalıştırılır. Sonrasında oransal kazanç (Kp) arttırılır ve sistemde sürekli salınımlar (osilasyon) gözlemlenir. Bu kritik kazanç değeri (K_{cr}) ve kritik salınım periyodu (P_u) belirlenir. Son olarak Çizelge 2.3'te verilen Ziegler-Nichols tablosundan uygun PID parametreleri elde edilir.

Çizelge 2.3. Titreşim yöntemine göre denetim organı ayar değerleri (Ogata, 2010)

Kontrolör Tipi	K_p	T_i	T_d
P	$0{,}5.K_{cr}$	—	0
PI	$0{,}45.K_{cr}$	$(1/1{,}2).P_{cr}$	0
PID	$0{,}6.\ K_{cr}$	$0{,}5.P_{cr}$	$0{,}125.P_{cr}$

$$K\mathrm{i} = K_\mathrm{p}\ /\ T_\mathrm{i} \tag{2.5}$$

$$K\mathrm{d} = K_\mathrm{p}\ .\ T_\mathrm{d} \tag{2.6}$$

PID Denetiminin deneysel ayarında Ziegler ve Nichols tarafından bulunan ve uygulanan diğer bir yöntem de sistem cevabı yöntemidir. Bu yöntemde transfer fonksiyonu 2.7 numaralı denklemde tanımlanmış olan sistemlere uygulanmıştır.

$$G_s(s)=(K_0.e^{-T_{ö}.s})/(Ts+1) \quad (2.7)$$

Sistem cevabı yönteminin uygulanmasında aşağıdaki yol izlenir ;

1-) Kapalı döngülü sistem, açık döngülü, normal çalışma durumuna getirilir. Bu durumdaki sistemin kalıcı durum hali $c(t) = c_0$ ve uygulanan basamak girişin şiddeti $m(t) = m_0$ olarak kaydedilir.

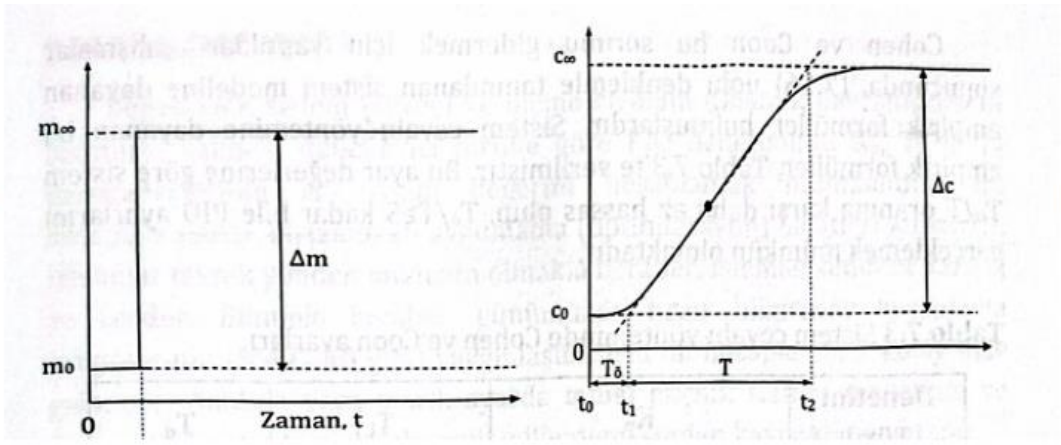
2-) t_0 başlangıç anında sisteme uygulanan m(t) kumanda basamak girişinin şiddeti m_0'dan $m\infty$ değişecek biçimde ayarlanır.

3-) Bu işlemler sonunda şekil 2.9'dakine benzer sistem cevabı eğrisinden sistemin kalıcı duruma ulaştığı yerdeki nihai değeri $c\infty$ olarak belirlenir.

4-) Şekil üzerinden, matematik modeli 2.7 numaralı denklemde tanımlanan sisteme ait parametreler denklem 2.8'deki gibi hesaplanır.

$$K_0=(c\infty - c_0)/(m\infty - m_0)\,,\, T_{ö}=t_1-t_0\,,\, T=t_2-t_1 \quad (2.8)$$

Elde edilen bu katsayılar çeşitli yöntemler vasıtasıyla PID denetleyici parametrelerini (K_p, T_i, T_d) ayar değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemlerden birisi de Ziegler-Nichols tarafından geliştirilmiştir ve bu yönteme göre teklif edilen ayar değerleri çizelge 2.4'te paylaşılmıştır.



Şekil 2.9. Cevap eğrisi yöntemi A) Giriş sinyalindeki değişim B) Çıkış sinyalindeki değişim (Yüksel, 2021)

Ziegler ve Nichols uyguladıkları 1/4 genlik oranı şartı orantı denetimde tek çözüm vermekle beraber, diğer denetim türlerinde (PI,PD,PID) için tek çözüm vermeye yeterli değildir. Diğer bir deyişle çok sayıda denetim organı ayar değeri takımları 1/4 genlik oranı ölçütünü sağlayamaz. Bu durumda ilave bir şarta gerek vardır. Ayrıca Ziegler-Nichols yöntemlerine göre ayarlanan PID denetleyicili sistem $T_Ö/T$ oranına çok duyarlıdır. Buna göre $T_Ö/T$ oranı arttıkça Ziegler-Nichols yöntemlerine göre PID ayarlarını tutturmak zorlaşır. $T_Ö/T \geq 2$ olduğunda Ziegler-Nichols ayar değerleri yetersiz kalmaktadır.

Çizelge 2.4. Sistem cevabı yönteminde Ziegler ve Nichols ayarları (Yüksel, 2021)

Denetim Türü	K_p	T_i	T_d
P	$T/(K_0.T_Ö)$	-	-
PI	$(0,9).T/(K_0.T_Ö)$	$(3,34).T_Ö$	-
PID	$(1,2).T/(K_0.T_Ö)$	$2.T_Ö$	$(0,5).T_Ö$

Ziegler ve Nichols yöntemlerine göre ayarlanan PID denetleyicili sistemin Tö/T oranına oldukça duyarlıdır. Buna göre bu oran arttıkça bu yöntemlere göre PID ayarlarını yapmak zorlaşır. Bu oranın 2 ve üzeri olduğu durumlarda ZN yöntemleri yetersiz kaldığı için Cohen ve Coon tarafından geliştirilen Çizelge 2.5'te sunulan ampirik formüller de PID parametre ayarında kullanılmaktadır.

Çizelge 2.5. Cohen ve Coon ayarları Tablosu (Yüksel, 2021)

Denetim Türü	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K_0 T_ö}\left[1+\frac{T_ö}{T}\right]$	-	-
PI	$0.9\frac{T}{K_0 T_ö}\left[0.9+\frac{T_ö}{12T}\right]$	$\frac{T_ö[30T+3T_ö]}{9T+20T_ö}$	-
PID	$\frac{T}{K_0 T_ö}\left[\frac{4}{3}+\frac{T_ö}{4T}\right]$	$\frac{T_ö[32T+6T_ö]}{13T+8T_ö}$	$\frac{4T_ö T}{11T+2T_ö}$

Burada ayarlanan değerlerle en uygun denetim organı ayarlarına yakın değerler elde edilebilir. Öngörülen değerler başlangıç değeri olarak alınarak daha uygun şartların bulunması için deneylere devam edilebilir.

Denetlenen sistem ve bileşenlerinin dinamik davranışları, transfer fonksiyonları, durum-uzayı gösterimleri vb. biliniyorsa denetim organı ayarında analitik yöntemler kullanılabilir. Bu hesaplamalarda bilgisayar programlama yöntemleri, optimizasyon teknikleri kullanılabilir.

Burada temel güçlük sistem modelinin veya parametrelerinin tam olarak bilinmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu yöntemde başarım göstergesi (performance index) çoğunlukla kapalı döngü sistemin hata fonksiyonuna göre seçilir. Literatürde bu konuyla ilgili olarak pek çok farklı başarım göstergesi tanımlandığı görülmektedir (Yüksel, 2021; Antony ve diğerleri, 2016;Yılmaz, 2023).

PID kontrolcü uygulamalarında bazı avantaj ve dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlar parçalı olarak belirtilmiş olmak ile Çizelge 2.6 içerisinde paylaşılmıştır.

Çizelge 2.6. P, I, D, PD, PI ve PID kontrolör avantaj ve dezavantajları hakkında (Ogata, 2010; Nise, 2020;Yüksel, 2021)

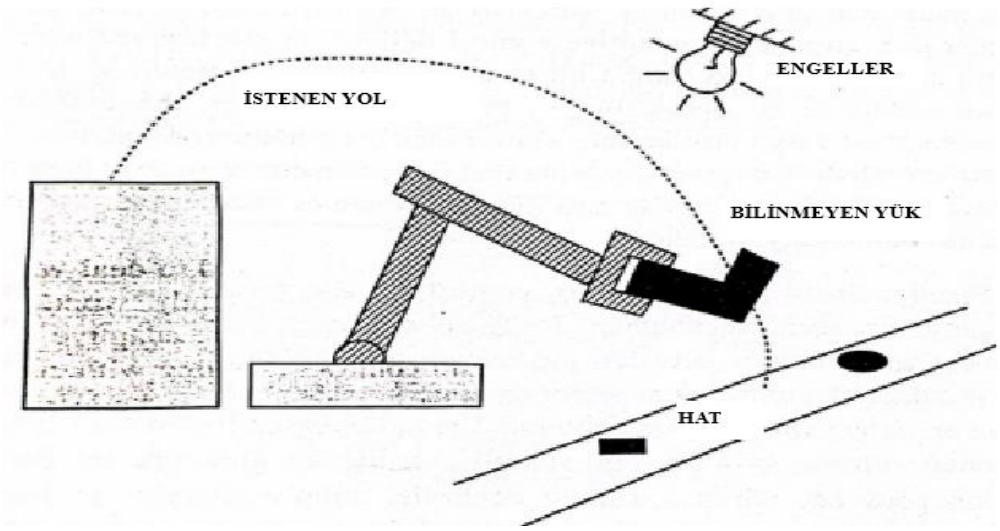
Kontrolör Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
P (Oransal)	- Basit yapı - Hızlı tepki süresi	- Sabit hata bırakır - Kararlılıkta zorluklar olabilir
I (Integral)	- Sabit hatayı giderir	- Yavaş yanıt süresi - Kararsızlığa neden olabilir
D (Türevsel)	- Hızlı değişimlere duyarlıdır - Kararlılığı artırır	- Gürültüye duyarlıdır - Sabit hatayı gideremez
PD	- Hızlı tepki süresi - Gürültüye karşı dayanıklılık	- Sabit hatayı gideremez
PI	- Sabit hatayı giderir - Parametre ayarı kolay - Yeterli kararlılık sağlar	- Çok hızlı tepki gerektiren sistemlerde yetersiz olabilir
PID	- Sabit hatayı giderir - Hızlı tepki süresi - Kararlılığı artırır - Çok yönlü performans sağlar	- Parametre ayarı karmaşıktır - Fazla karmaşıklık maliyet ve işlem yükü yaratabilir

Sonuç olarak, PID kontrol teorisi, basitliği ve etkinliği sayesinde mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaya devam etmektedir. Gelişen teknolojilerle birlikte, bu klasik kontrol yönteminin adaptif ve akıllı sistemlerle entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalar da literatürde dikkat çekmektedir. PID tipi denetleyici tasarımı sadece burada belirtilen yöntemlerle sınırlı değildir. Konuyla ilgili pek çok farklı tasarım yöntemlerinin de kullanıldığı görülmektedir. Burada tarihsel gelişime göre en yaygın olarak kullanılanlar hakkında bilgi verilmiştir (Bennett, 1993; Visioli, 2006).

2.3.6 Adaptif Kontrol

Kontrol edilecek birçok dinamik sistemin sabit veya yavaşça değişen belirsiz parametreleri vardır. Örneğin, robot manipülatörler bilinmeyen atalet parametrelerine sahip büyük nesneler taşıyabilir. Güç sistemleri yükleme koşullarında büyük değişikliklere maruz kalabilir. Yangınla mücadele uçakları büyük miktarda su yükleyip boşaltırken önemli kütle değişimleri yaşayabilir. Adaptif kontrol, bu tür sistemlerin kontrolüne yönelik bir yaklaşımdır. Adaptif kontroldeki temel fikir ölçülen sistem sinyallerine dayanarak belirsiz tesis parametrelerini çevrimiçi olarak tahmin etmek ve tahmin edilen parametreleri kontrol giriş hesaplamasında kullanmaktır. Bu nedenle uyarlamalı bir kontrol sistemi çevrimiçi parametre tahmini olan bir kontrol sistemi olarak kabul edilebilir.

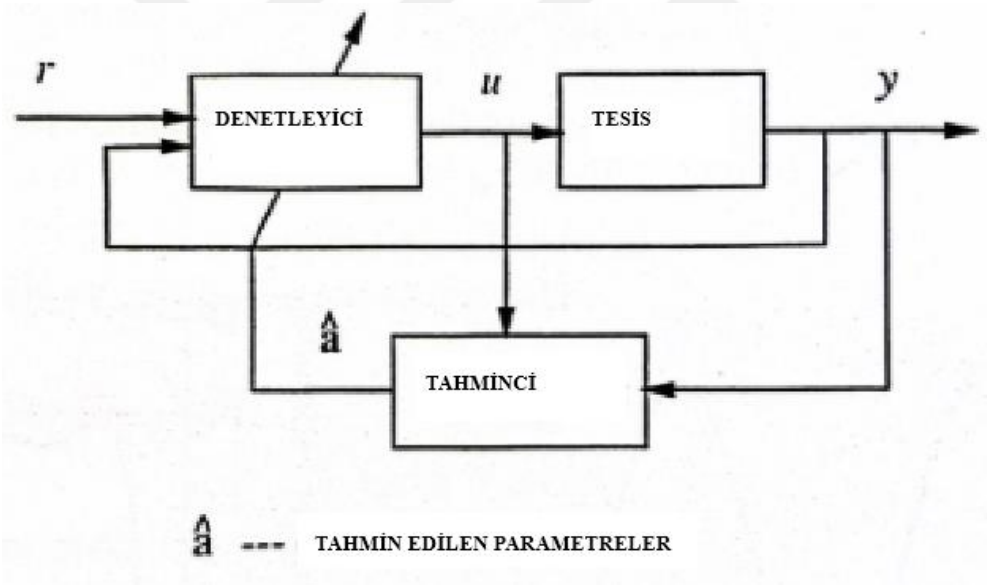
Uyarlamalı kontrol üzerine araştırmalar geniş bir hız ve irtifa aralığında çalışan ve bu nedenle büyük parametre değişimleri yaşayan yüksek performanslı uçaklar için otopilotların tasarımıyla bağlantılı olarak 1950'lerin başlarında başlamıştır. Uyarlamalı kontrol değişen uçak dinamikleri karşısında denetim organı parametrelerini otomatik olarak ayarlamanın bir yolu olarak önerilmiştir. Ancak konuya olan ilgi, içgörü eksikliği ve bir test uçuşunun çökmesi nedeniyle kısa sürede azalmıştır. Doğrusal olmayan kontrol teorisinden çeşitli araçlar kullanılarak, uyarlanabilir kontrolün geçerli bir teorisinin geliştirilmesi ancak son on yılda gerçekleşmiştir. Bu teorik gelişmeler, ucuz hesaplamanın kullanılabilirliği ile robotik manipülatör, uçak ve roket kontrolü, kimyasal prosesler, güç sistemleri, gemi dümeni ve biyomühendislik gibi alanlarda birçok pratik uygulamaya yol açtı (Slotine ve Li, 1991). Belirsiz kütle özelliklerine sahip bir yük taşıyan robot adına uyarlamalı kontrol gösterimi şekil 2.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 2.10. Belirsiz kütle özelliklerine sahip bir yük taşıyan bir robot (Slotine ve Li, 1991)

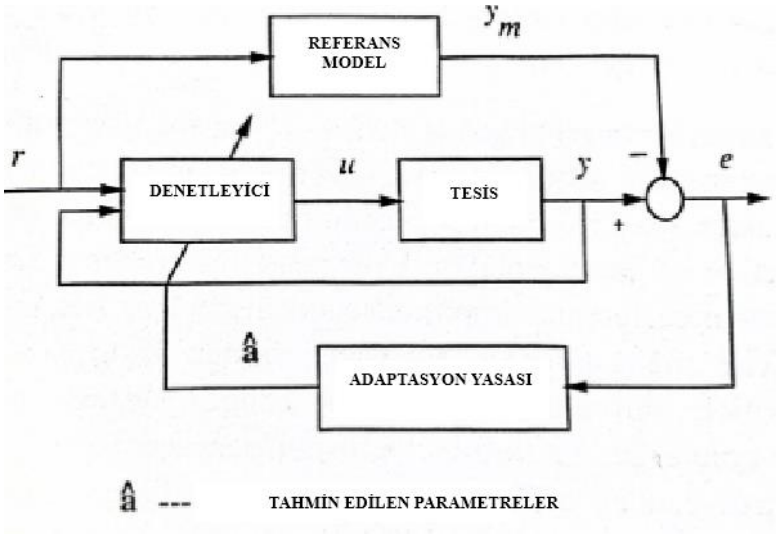
Adaptif bir denetleyici, denetleyici parametrelerinin değişken olması ve sistemdeki sinyallere göre bu parametreleri çevrimiçi olarak ayarlamak için bir mekanizma olması bakımından sıradan bir denetleyiciden farklıdır. Uyarlamalı denetleyiciler oluşturmak için iki ana yaklaşım vardır. Biri sözde model referanslı uyarlamalı kontrol yöntemidir ve diğeri kendini ayarlama yöntemidir.

Uyarlanabilir olmayan kontrol tasarımında, denetim organının parametreleri tesisin parametrelerinden hesaplanır. Tesis parametreleri bilinmiyorsa parametre tahmincisi tarafından sağlanan tahmini değerleriyle değiştirmek sezgisel olarak mantıklıdır. Bir denetleyici çevrimiçi parametre tahmincisi ile birleştirerek elde edilen bir denetleyiciye kendi kendini ayarlayan denetleyici denir. Şekil 2.11 böyle bir uyarlanabilir kontrolörün şematik yapısını göstermektedir. Böylece bilinmeyen tesisin eş zamanlı olarak tanımlanmasını gerçekleştiren bir kendi kendini ayarlayan denetleyici sağlanır (Slotine ve Li, 1991).



Şekil 2.11. Kendi kendini ayarlayan denetleyici (Slotine ve Li, 1991)

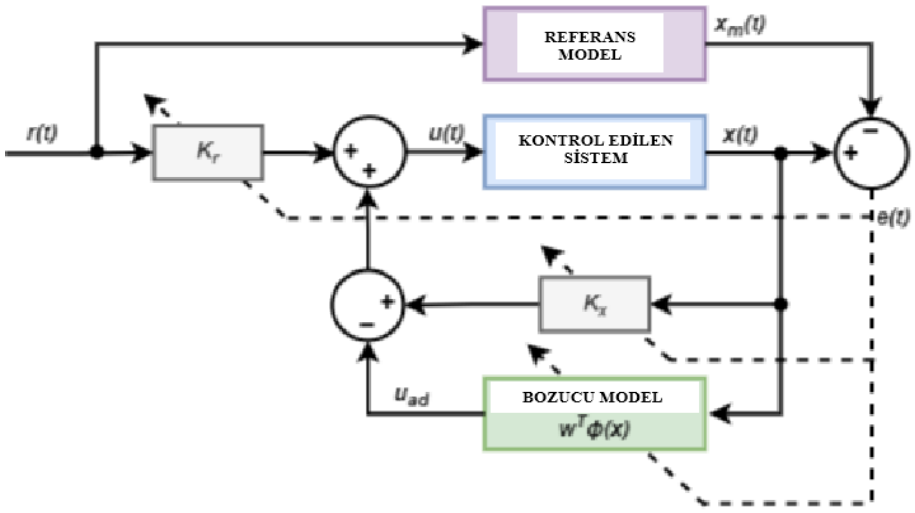
Adaptif kontrol yaklaşımlarından bir diğeri de model referans adaptif kontroldür Genel olarak bir model referanslı adaptif kontrol sistemi şematik olarak Şekil 2.12 ile gösterilebilir. Bilinmeyen parametreleri içeren bir tesis, kontrol sisteminin istenen çıktısını kompakt bir şekilde belirtmek için bir referans modeli, ayarlanabilir parametreleri içeren bir geri besleme kontrol yasası ve ayarlanabilir parametreleri güncellemek için bir adaptasyon mekanizması olmak üzere dört bölümden oluşur.



Şekil 2.12. Model referans uyarlamalı kontrol sistemi (Slotine ve Li, 1991)

Model Referans Adaptif Kontrolcü (MRAC) doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) olmak üzere iki farklı yaklaşımla tasarlanabilir (“Mathworks”, 2024). Bu iki yöntem sistemin parametrelerinin bilinip bilinmemesi durumuna bağlı olarak uygulanır ve her biri farklı avantajlar ve uygulama alanları sunar (Bierling ve diğerleri, 2010).

Doğrudan MRAC, referans tesis modelinin durumları ile kontrol edilen sistem arasındaki gerçek zamanlı izleme hatasına dayanarak geri besleme ve ileri beslemeli kontrol cihazı kazanımlarının tahmin edilmesini sağlamaktadır. Doğrudan MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı şekil 2.13’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.13. Doğrudan bir MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı (“Mathworks”, 2024)

Denetleyici, kontrol girişi u (t)'yi denklem 2.9'daki gibi hesaplar.

$$u(t) = k_x.x(t) + k_r.r(t) - u_{ad} \tag{2.9}$$

$$u_{ad}=w^T.\phi(x) \tag{2.10}$$

Tek katmanlı bir sinir ağı için ise adaptif kontrolcü u_{ad} denklem 2.11'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

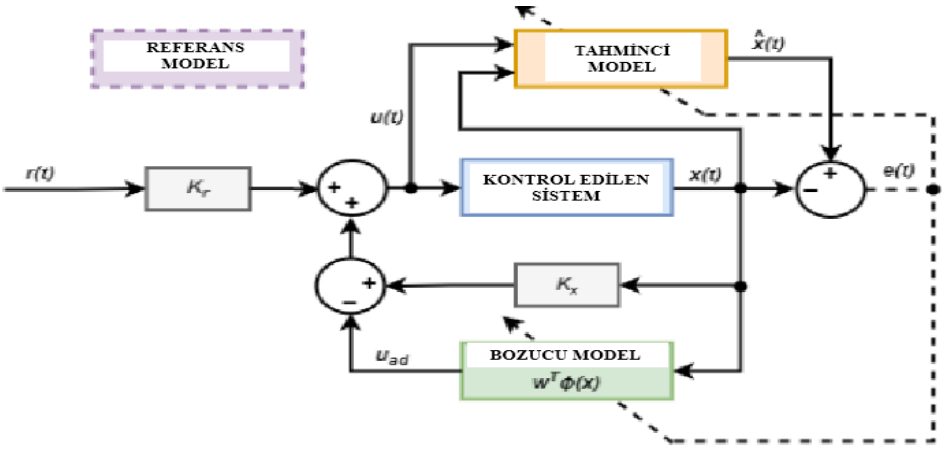
$$u_{ad}=w^T.\sigma(V^T x) \tag{2.11}$$

Denetleyici, kontrol edilen sistemin durumları ile referans modelin durumları arasındaki e(t) hatasını hesaplar. Daha sonra bu hatayı k_x, k_r ve w değerlerini gerçek zamanlı olarak uyarlamak için kullanır.

Tipik olarak modelleme belirsizliği ve dış bozulmalar sergileyen kontrollü sistem, denklem 2.12'deki nominal durum denklemine sahiptir. Denetleyici parametrelerini güncellerken bu beklenen nominal tesis davranışını kullanır.

$$x^{\cdot}(t) = Ax(t) + B(u(t) + f(x)) \tag{2.12}$$

Dolaylı MRAC, kontrol edilen sistemin parametrelerini, referans tesis modelinin durumları ile tahmini sistem arasındaki izleme hatasına göre tahmin eder. Ardından, tahmini sistem ve referans modelin parametrelerine göre geri besleme ve ileri besleme kontrol cihazı kazanımlarını türetir. Dolaylı (indirekt) MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı şekil 2.14'te paylaşılmıştır.



Şekil 2.14. Dolaylı bir MRAC denetleyicisinin kontrol yapısı ("Mathworks", 2024)

Denetleyici, kontrol girişi $u(t)$'yi denklem 2.9'daki gibi hesaplar ve u_{ad} hesabı denklem 2.10 ve denklem 2.11'deki gibi yapılmaktadır.

Denetleyici, gerçek ve tahmini sistem durumları arasındaki e(t) hatasını hesaplar. Daha sonra bu hatayı kullanarak w değerlerini gerçek zamanlı olarak uyarlar. Denetleyici ayrıca e(t)'yi kullanarak tahminci modelin parametrelerini gerçek zamanlı olarak günceller. Kazanç k_x ve k_r değerleri, tahminci modelin ve referans modelin parametrelerinden türetilir ("Mathworks", 2024; Yucelen, 1999).

MRAC kontrol yöntemi, kontrol dinamikleri değiştiğinde kazanç parametrelerinin ayarlanması gereken aktif kontrol sistemleri için çok etkili olmakla beraber bu kontrol yönteminin kazanç parametrelerinin güncellenmesi sırasında model yaklaşım hatasının gradyanının inişini sağlayan MIT kuralı uygulanmaktadır. Esasen, bu gerçek zamanlı kendi kendini ayarlama süreci kontrol sisteminin çözüm adaptasyonunu sağlamaktadır (Kavuran ve diğerleri, 2016).

Model Referans Adaptif Kontrol (MRAC) sistemleri, bilinmeyen veya zamanla değişen sistem parametrelerini tahmin etmek için bir adaptasyon mekanizması kullanır. Parametre tahmin yöntemleri, hem kontrol edilen sistemin kararlılığını sağlamak hem de referans modele uyumlu bir davranış göstermek amacıyla geliştirilmiştir (Narendra ve Annaswamy, 1989; Ioannou ve Sun, 2012; Sastry ve diğerleri, 1989; Yucelen, 1999). Bu yöntemler arasında yaygın olanlar;

1. Gradient tabanlı yöntemler: Gradient tabanlı yöntemler, Lyapunov fonksiyonunun gradyanını hesaplayarak parametreleri günceller (Wilson ve diğerleri, 2016).

2. Lyapunov tabanlı yöntemler: Bu yöntem, Lyapunov kararlılık teorisine dayanır ve adaptasyon yasası şu şekilde belirlenir. Lyapunov tabanlı yöntem, adaptasyon mekanizmasının hem kararlılık hem de yakınsama performansını garanti eder (Narendra ve Annaswamy, 1989).
3. Yinelemeli en küçük kareler yöntemi: Yinelemeli en küçük kareler algoritması, parametre tahmini için sürekli en küçük kareler yöntemini kullanır. Özellikle zamanla değişen sistemlerde dinamik parametre tahmini için uygundur. Yinelemeli en küçük kareler algoritması, dolaylı MRAC yöntemlerinde sıkça kullanılır ve belirsizliklerin hızlı bir şekilde tahmin edilmesini sağlar (Masuda, 2014).

4. Projeksiyon yöntemleri: Projeksiyon yöntemleri tahmin edilen parametrelerin fiziksel veya tasarım sınırlamaları içinde kalmasını sağlar. Tahmin edilen parametreler,

belirlenen sınırların dışına çıkarsa yansıtma fonksiyonu devreye girer. Projeksiyon yöntemleri, adaptasyon yasasının kararlılığını ve fiziksel uygunluğunu arttırır (Ioannou ve Sun, 2012).

5. Genişletilmiş Kalman Filtresi: Bu yöntem doğrusal olmayan sistemlerde hem durum hem de parametre tahmini yapmak için kullanılır. Sistem modeli ve ölçümler yardımıyla sürekli olarak parametre tahmini yapılır. Genişletilmiş kalman filtresi, belirsizliklerin modellenmesi ve tahmin edilmesi için güçlü bir araçtır (Bruce, 2021).

6. En küçük kareler yöntemi: Hata sinyalini minimize etmek için basit bir adaptasyon mekanizması kullanır. En küçük kareler yöntemi, hesaplama açısından düşük maliyetlidir ancak yakınsama hızı daha düşüktür (Nguyen, 2018).

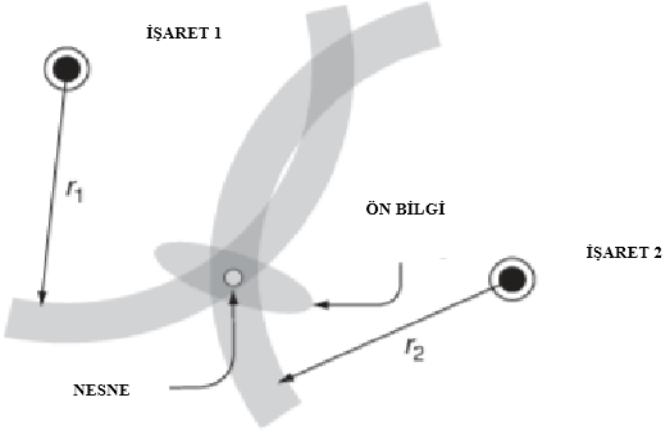
PID ve MRAC kontrol sistemlerinin performansları, uygulama alanına ve sistemin dinamik özelliklerine bağlı olarak değişir. PID ve MRAC kontrol sistemlerinin performans farkı, uygulamanın gereksinimlerine ve sistemin çalışma koşullarına göre belirginleşir. Sabit koşullar altında, PID kontrolünün basit yapısı avantaj sağlasa da değişken koşullarda MRAC'in uyarlanabilirliği ve esnekliği daha önemli hale gelir. MRAC'in dinamik değişimlere uyum sağlama yeteneği büyük bir avantaj sunabilmektedir (Zhang ve Wei, 2016). Bu durum, MRAC'in gelecekteki elektrikli araç tasarımlarında daha fazla tercih edilmesini ve geliştirilmesini sağlayabilir görünmektedir. Çizelge 2.7 içerisinde PID ve MRAC denetleyiciler için karşılaştırma paylaşılmıştır.

Çizelge 2.7. PID ve MRAC kontrol sistemlerinin temel özelliklerinin karşılaştırılması (Ioannou ve Sun, 1996; Narendra ve Annaswamy, 2012; Franklin ve diğerleri, 2002; Zhang ve Wei, 2016)

Özellik	**PID Kontrol**	**MRAC**
Hesaplama Maliyeti	Düşük	Yüksek
Dinamik Koşullara Uyum	Sınırlı	Yüksek
Sistem Stabilitesi	Sabit koşullarda iyi	Değişken koşullarda iyi
Kullanım Alanı	Sabit parametreli sistemler	Değişken parametreli ve doğrusal olmayan sistemler

2.3.7 Sistem Parametre Tanımlama Yöntemleri

Parametre tahmininde bir nesne, fiziksel bir süreç veya bir olay için parametrik bir tanım türetmeye çalışılır. Şekil 2.15'te gösterilmekte olan işarete dayalı bir konum ölçüm sisteminde amaç bir nesnenin mesela bir geminin veya mobil bir robotun konumunu bulmaktır. İki boyutlu durumda bilinen referans konumlarına sahip iki işaret yeterlidir. Duyusal sistem iki ölçüm sağlar: işaretlerden nesneye olan mesafeler, r1 ve r2 nesnenin konumu iki parametre içerdiğinden, tahmin iki bilinmeyenli iki denklemi çözmeye indirgenmiş gibi görünür ancak durum daha karmaşıktır çünkü ölçümler her zaman belirsizliklerle birlikte gelmektedir. Genellikle, uygulama yalnızca parametrelerin bir tahminini değil, aynı zamanda bu tahminin belirsizliğinin bir değerlendirmesini de gerektirir. Çözümün belirsizliğini çözmek için konum hakkında önceden edinilmiş bir bilginin kullanılması gerektiğinden durum daha da karmaşıktır. Önceki bilgi, nihai tahminin belirsizliğini azaltmak için de kullanılabilir. Tahminin doğruluğunu artırmak için mühendis, ölçüm sayısını artırarak aşırı belirlenmiş bir denklem sistemi elde edebilir. Duyusal sistemin maliyetini azaltmak için mühendis, ölçüm sayısını da azaltarak parametrelerden daha az ölçüm elde edebilir. Denklem sistemi o zaman belirsizdir, ancak yeterli önceki bilgi varsa veya parametreler birbirleriyle ilişkiliyse tahmin hala mümkündür. Her iki durumda da mühendis, tahminin belirsizliğiyle ilgilenir Heijden ve diğerleri, 2005).



Şekil 2.15. Belirsizlikleri ele alan bir tahmin problemi (Heijden ve diğerleri, 2005)

MATLAB parametre tahmincisi (MATLAB Parameter Estimation), özellikle sistem modelleme ve parametre tahmini amacıyla kullanılan bir araçtır. Bu araç belirli bir modelin

parametrelerini optimize etmek veya tahmin etmek için deneysel verilerle karşılaştırmalı bir yaklaşım kullanır. MATLAB parametre tahmincisi genellikle dinamik sistemlerin, kontrol sistemlerinin ve mühendislik uygulamalarının parametrelerini tahmin etmek için kullanılır. Bu araç, parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesine yardımcı olmanın yanı sıra, sistemlerin davranışlarını daha doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır ("Mathworks", 2024).

MATLAB parametre tahmincisi, aşağıdaki aşamalarda çalışarak, kontrol sistemlerine ait parametrelerin doğru şekilde belirlenmesini sağlar:

A. Model Tanımlaması ve Verilerin Toplanması

   İlk olarak, sistemin matematiksel modeli oluşturulur ve parametreler ile ilgili başlangıç tahminleri yapılır. Bu model, elektrikli aracın motoru, batarya durumu veya hızlanma gibi parametreleri içerebilir. Ardından sistemden gerçek veriler (örneğin, hız, tork, batarya seviyesi) toplanır ("Mathworks", 2024).

B. Parametre Tahmini

   Parameter Estimator bu verileri kullanarak modelin parametrelerini optimize eder. Parametre tahmin süreci, genellikle hata fonksiyonu minimizasyonu yoluyla gerçekleştirilir. Bu süreç, doğrusal olmayan sistemlerde bile parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır. Bu süreç, özellikle karmaşık ve değişken sistemlerde kontrol sisteminin gerçek dünya koşullarına uyumunu sağlamada kritik bir rol oynamaktadır ("Mathworks", 2024).

C. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Güncellenmesi

   Elde edilen parametreler, modelin gerçek sistemle uyumlu olup olmadığına göre değerlendirilir. Eğer tahmin edilen parametreler sistemle uyumsuzsa bu parametreler yeniden optimize edilir ve parametre tahmin süreci iteratif olarak devam eder ("Mathworks", 2024).

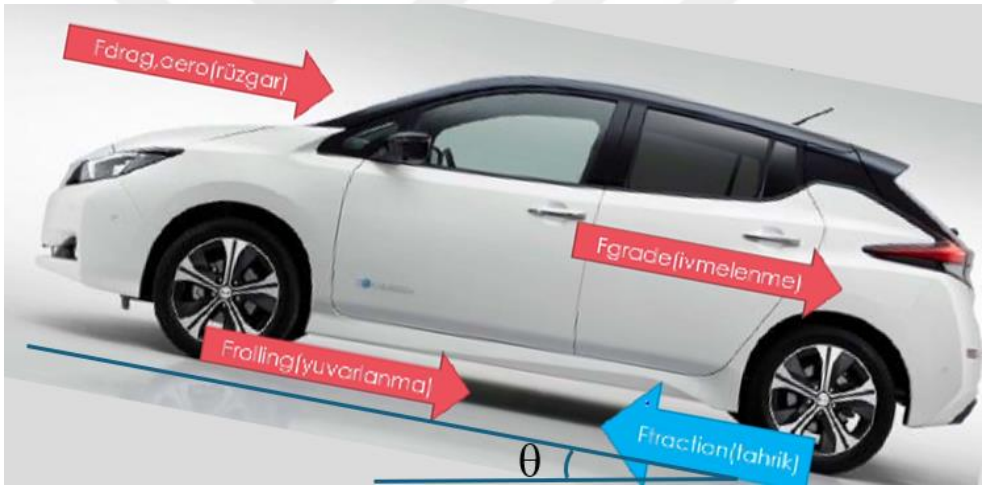
Bu uygulama, sistem dinamiklerini temsil eden denklemlerle belirlenen bir modelin parametrelerini optimize etmek amacıyla deneysel verilerle karşılaştırma yapar.

MATLAB parametre tahmini için güçlü bir platform sunmakta olup, parametre tahminci uygulaması MRAC ve PID tipi denetleyicilerin parametre tahminlerini yapmak için kullanılabilmektedir. Bu araç kontrol sistemlerinin parametrelerini optimize etmek için kullanılır ve doğru parametrelerle daha verimli kontrol stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır. ("Mathworks", 2024).

2.4 Elektrikli Aracın Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi

Elektrikli araçların matematiksel modellemesi sistemin dinamik davranışlarını anlamak, performansını optimize etmek ve kontrol stratejilerini geliştirmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu modelleme, batarya, motor, invertör ve diğer elektrikli bileşenlerin etkileşimini dikkate alarak aracın enerji verimliliği, hızlanma, frenleme ve enerji tüketimi gibi parametreleri tahmin etmeye olanak tanır. Matematiksel modellerin doğruluğu sistem parametrelerinin doğru kullanılmasına ve sistem özelliklerinin ayrıntılı analizine dayanır. Örneğin yol eğimleri, aracın referans hız değişimi, aerodinamik etkiler ve batarya durumu gibi faktörler modelin doğru çalışabilmesi için sürekli parametre güncellemelerini gerektirebilir.

Elektrikli bir aracın hareket denklemleri temel olarak çekiş kuvveti ile karşı kuvvetlerin etkisini dikkate alarak aracın hareketini tanımlamaya dayanır. Bu denklemler aracın hızlanma, frenleme ve genel sürüş performansını simüle etmek için kullanılmaktadır (Kıyaklı ve Solmaz, 2018).



Şekil 2.16. Dinamik taşıt tepki kuvvetleri (Topçu ve Aksay, 2025)

Bu çalışmada taşıtın boylamsal hareketi incelenmiştir. Θ yol eğimine, m kütlesine, f yuvarlanma direncine ve C_d hava direncine sahip bir taşıtın fiziksel modeli Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Newton'un II. Hareket Yasası kullanılarak taşıtın dinamik davranışı incelenmiştir.

Buna göre taşıta etkiyen net kuvvet ve ivme arasındaki ilişki taşıtın kütlesine bağlı olarak denklem 2.13 ile ifade edilebilir.

$$F_{net} = m \cdot a = d(m.v)/dt \tag{2.13}$$

Taşıtlarla ilgili çalışmalarda dönen tüm kütlelerin yerine tekerlek çevresinde bulunduğu varsayılan bir eşdeğer kütle yerleştirilir ve eşdeğer kütle ile araç kütlesi toplamından etkili kütle araç için elde edilir, bu işlem denklem 2.14 ile gösterilmiştir.

$$m_{\text{et}} = m + m_{\text{eşdeğer}} \tag{2.14}$$

Denklem 2.14 içerisinde gösterilen eşdeğer ve araç kütlelerinin toplamı, etkili araç kütlesi katsayısının araç kütlesi ile çarpılması ile elde edilebilmektedir. Transmisyon oranına bağlı olarak elde edilen etkili araç kütlesi katsayısı ve etkili araç kütlesi için denklemle sırası ile denklem 2.15 ve 2.16 içerisinde gösterilmiştir.

$$\gamma = 1.04 + 0.0025.\Upsilon^2 \tag{2.15}$$

$$m_{\text{et}} = \gamma.m \tag{2.16}$$

Bu durumda denklem 2.13' ün etkili araç kütlesi ile güncellenen hali denklem 2.17 içerisinde gösterilmiştir.

$$F_{net} = m_{\text{et}} \,.\, a = d(m_{\text{et}}.v/dt) \tag{2.17}$$

Sürüş çevriminde taşıta etkiyen yuvarlanma, hava ve yokuş direnci kuvvetleri de sırasıyla denklem 2.18, denklem 2.19 ve denklem 2.20 ile tanımlanabilir.

Yuvarlanma kuvveti;

$$F_{\text{yuvarlanma}} = f.m.g.\cos(\theta) \tag{2.18}$$

Aerodinamik kuvvet;

$$F_{\text{hava}} = (1/2).\rho.C_{\text{d}} \,.\, A \,.\, (v + v_{hava})^2 \tag{2.19}$$

Yokuş direnci kuvveti;

$$F_{\text{yokuş}} = m \,.\, g \,.\, sin(\theta) \tag{2.20}$$

Taşıtın istenilen hareketi yapabilmesi için bu kuvvetleri de yenmesi gerekmektedir. Taşıtın çekiş kuvveti denklem 2.17' de yuvarlanma, aerodinamik ve yokuş direnci kuvvetlerinin de dahil edilmesiyle denklem 2.21 ile tanımlandığı gibi elde edilebilir. Tekerlek momenti ile çekiş kuvveti arasındaki ilişki tekerlek yarıçapına bağlı olarak denklem 2.22 ile tanımlanabilir.

$$F_{\text{çekiş}} = d(m_{\text{et}}.\, v)/dt + F_{\text{yuvarlanma}} + F_{\text{hava}} + F_{\text{yokuş}} \quad (2.21)$$

$$T_{\text{teker}} = F_{\text{çekiş}} \,.\, r_{\text{teker}} \quad (2.22)$$

Gerekli motor momenti de transmisyon oranı ile ilişkili olarak denklem 2.23 ile hesaplanabilir.

$$T_{\text{motor}} = T_{\text{teker}} / \Upsilon \quad (2.23)$$

Transmisyon oranı, transmisyon verimliliği, dişli çevrim oranı ve diferansiyel oranına bağlı olarak denklem 2.24 yardımıyla hesaplanır.

$$\Upsilon = \varsigma.\lambda.\beta \quad (2.24)$$

Tekerleğin açısal hızı ise taşıt hızı ve tekerlek yarıçapına bağlı olarak denklem 2.25'te paylaşılan eşitlik yardımı ile hesaplanır.

$$\omega_{\text{teker}} = V / r_{\text{teker}} \quad (2.25)$$

Motor ve tekerleğin açısal hızı arasındaki ilişki transmisyon oranına göre denklem 2.26 ile elde edilir.

$$\omega_{\text{motor}} = \omega_{\text{teker}}.\Upsilon \quad (2.26)$$

Son olarak, motor gücü, motor torku ve motor açısal hızının bir fonksiyonu denklem 2.27 ifadesi ile hesaplanabilir.

$$P_{\text{motor}} = T_{\text{motor}}.\, \omega_{\text{motor}} \quad (2.27)$$

Bu matematiksel model elektrikli araçların sürüş çevrimine bağlı dinamiklerini simüle ederken, parametrelerin doğruluğu ve güncellenmesi, gerçek dünya koşullarına daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu modelleme elektrikli araçların tork, hız, ivme ve enerji tüketimi gibi parametrelerini hesaplayarak, verimli ve gerçekçi bir simülasyon sunar (Çetinkaya, 2004; Jazar, 2008).

2.4.1 Elektrikli Araç Elektrik Motoru Modeli

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorları incelendiğinde azınlıkta kalacak şekilde bazı modellerin asenkron motor ile tahrik edildiği görülür. Buna örnek Tesla markalı araçlar ve general motorun Chevy Spark modeli gösterilebilir. Bunlar haricindeki hemen hemen tüm diğer

ticari modellerde tahrik motoru olarak sabit mıknatıslı senkron motor türü kullanılmıştır. Bunlardan da sadece Hyundai Sonata modelinde yüzeyi mıknatıslı rotor (SPM) kullanılmış olup bunun haricindeki tüm modellerde büyük üretici şirketlerin tümü rotoru içten mıknatıslı senkron motoru (IPM) tercih etmiştir. Diğer tür motorlar da çalışılmıştır ancak seri üretime alınmamıştır. Binek türü olmayan elektrikli bisiklet ve henüz trafik lisansı çıkmamış bazı araçlarda anahtarlamalı relüktans motoru (ARM) da başarılı olarak denenmiştir. (Emadi ve diğerleri, 2008; Parsa ve Toliyat, 2007; Kuzu, 2017).

Elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorlarının elektriksel güç tüketimi, araç performansını ve batarya ömrünü doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Güç tüketimi ile ilgili hesaplamalar elektrik motorunun verimliliği, mekanik güç çıktısı ve rejeneratif frenleme gibi faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır. Bu kısımda elektrikli motorların güç tüketimi ve rejeneratif frenlemeden elde edilen geri kazanımlar ile ilgili olarak elektrik motorunun güç hesabı ile ilgili temel denklemler sunulmuştur.

Elektrikli motorlarının verimliliği denklem 2.28'de gösterildiği gibi motor çıkışında elde edilen mekanik gücün motor girişinde verilmesi gereken elektriksel güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_{\text{motor}} = P(t)_{\text{mekanik}} / P(t)_{\text{elektrik}} \tag{2.28}$$

Bu denklem, motorun fiziksel iş yapabilmesi için gerekli olan elektriksel gücü belirler (Beaty ve Kirtley, 1998).

$$P(t)_{\text{rejeneratif}} = P(\text{t})_{\text{ mekanik}} . \eta_{\text{motor}} \tag{2.29}$$

Denklem 2.29 ile tanımlanan rejeneratif frenleme gücü aracın hızı kesildiğinde geri kazanılan enerjiyi ifade eder. Bu enerji motorun jeneratör olarak çalışarak bataryaya geri iletilmesini sağlar (Ehsani ve diğerleri, 2018).

Motorun hem gereken elektrik gücünü hem de rejeneratif frenleme ile elde edilen geri kazanımları dikkate alarak motorun toplam elektriksel güç tüketimini hesaplar (Ehsani ve diğerleri,2018). Bunun için eşitlik denklem 2.30 içerisinde paylaşılmıştır.

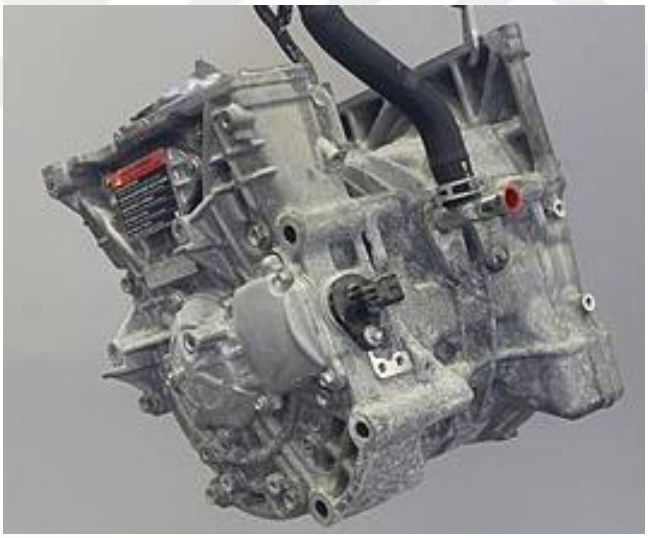
$$P(\text{t})_{\text{tüketilen elektrik}} = P(t)_{\text{gerekli elektrik}} + P(t)_{\text{rejeneratif}} \tag{2.30}$$

Elektrikli motorların verimliliği ve güç tüketimi, batarya ömrü ve aracın genel enerji verimliliği için kritik öneme sahiptir. Çeşitli çalışmalar, elektrikli motor verimliliğinin, motorun tipine

(örneğin asenkron ya da senkron motor) ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymuştur (Keleşoğlu ve diğerleri, 2023; Rüşen, 2019). Bu bağlamda motor verimliliği, genellikle verimliliğin yüksek olduğu belirli bir hız ve tork aralığında optimize edilir.

Rejeneratif frenleme motorun enerji geri kazanımını sağlayarak bataryaya enerji iletilmesini mümkün kılar. Bu süreç, araç hız kesildiğinde motorun bir jeneratör gibi çalışmasını sağlar. Rejeneratif frenlemenin etkisi, motorun verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek verimliliğe sahip bir motor daha fazla enerji geri kazanımı sağlar. Bu da araç bataryasının daha verimli bir şekilde şarj edilmesine olanak tanır (Burkucu ve diğerleri, 2020).

Elektrikli araçlarda güç tüketimi hesaplamaları, batarya kapasitesinin ve motor verimliliğinin doğru şekilde modellenmesini gerektirir. Elektrik motorlarının verimliliği, batarya şarj-deşarj döngüleri, güç yönetimi ve rejeneratif frenleme gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Elektrik motorunun tüketeceği elektrik enerjisinin doğru şekilde hesaplanması hem enerji yönetimini hem de motor verimliliğini arttırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesinde kritik rol oynar.



Şekil 2.17. Nissan-EM elektrik motoru (“Wikipedia”, 2024)

Bu çalışmada elektrikli aracın motorunun modellenmesinde Nissan Leaf marka taşıtın şekil 2.17’da fotoğrafı gösterilen Nissan-EM elektrik motoru kullanılmıştır. Bu motorun güç, devir sayısı ve verimlilik haritası kullanılarak elektrik motoru modellenmiştir. Detaylı anlatım “Materyal ve Yöntem” bölümünde Kısım 3.1’de verilmiştir.

2.4.2 Elektrikli Araç Batarya Sistemleri ve Şarj Durumu

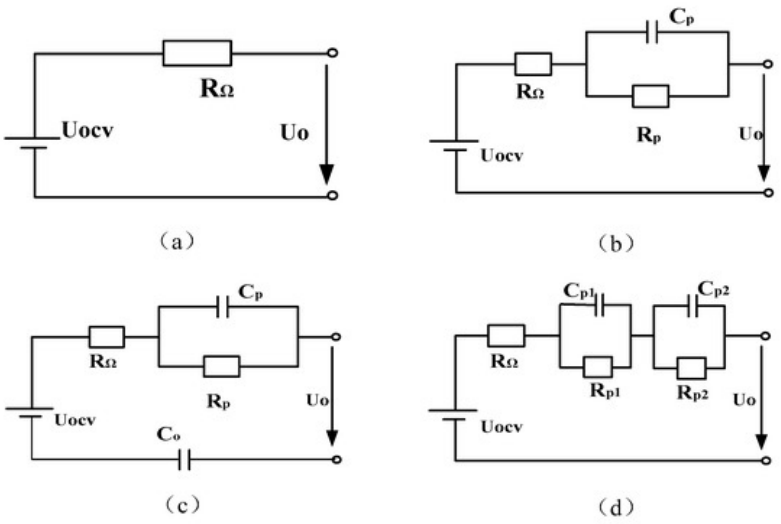
Elektrikli ve hibrit araç tasarımında batarya seçimi, aracın performansını ve menzilini doğrudan belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar temel olarak kurşun asitli, nikel bazlı ve lityum bazlı olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Bu bataryalar arasında lityum iyon (Li-ion) teknolojisi, sağladığı avantajlar nedeniyle en yaygın tercih edilen türdür. Li-ion bataryalar, diğer batarya türlerine kıyasla birçok üstün özelliğe sahiptir ve Li-ion bataryaların özgül enerji, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve geniş çalışma sıcaklığı aralığı gibi avantajları bulunmaktadır. Li-ion bataryalar genellikle silindirik, prizmatik veya pouch (esnek kılıf) şeklinde üretilir (Kaba ve diğerleri, 2021).

Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri, genellikle prizmatik hücrelerin seri ve paralel bağlantılarından oluşan modüllerden meydana gelir. Bu hücreler, batarya paketini oluşturacak şekilde bir araya gelir. Batarya modüllerinin ve hücrelerinin doğru şekilde bağlantılandırılması, bataryanın toplam kapasitesi ve iç direnci üzerinde doğrudan etki eder. Bahsedilmiş olan batarya paketi oluşumuna dair şematik gösterim şekil 2.18'de gösterilmiştir.

	Gerilim	Akım
Hücre (Tek Batarya)	3,75 V ⇩	3,1 Ah ⇩
Grup (74 adet bataryanın birbirleri ile paralel bağlanması)	3,75 V ⇩	229,4 Ah ⇩
Modül (6 adet grubun birbirleri ile seri bağlanması)	22,5 V ⇩	229,4 Ah ⇩
Paket (16 adet modülün birbirleri ile seri bağlanması)	360 V	229,4 Ah

Şekil 2.18. Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi (Kaba ve diğerleri, 2021)

Günümüzde elektrikli araçlardaki gelişmelerle beraber batarya sistemlerinin tasarımı, yönetimi, verimlilik optimizasyonu ve bataryanın dinamik performansının modellenmesi ile ilgili çalışmaların da yoğun bir şekilde sürdüğü görülmektedir. Batarya modellemelerinde yaygın olarak kullanılan devre şemaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Eşdeğer devre modelinin şematik gösterimi A)R_{int} modeli B)Thevenin Modeli C)PNGV modeli D)RC modeli (Lin ve diğerleri, 2019)

Bataryanın iç direnci bataryanın içindeki elektrokimyasal süreçlerin sonucu olarak meydana gelen enerji kayıplarını temsil eder. Bu kayıplar, bataryanın şarj deşarj verimliliğini etkileyerek bataryada gerilim düşüşüne ve güç tüketimine neden olur. İç direnç genellikle sıcaklık, akıma ve bataryanın kullanım süresine bağlı olarak değişir (Tezde ve Okumuş, 2018).

Şekil 2.19 (a)'daki R_{int} devresi esas alındığında, motor gücü ve aksesuar gücü birleşerek bataryanın yük altında tüketeceği toplam elektrik gücünü verir. İlgili eşitlik denklem 2.31 içerisinde paylaşılmıştır.

$$P_{\text{yük}} = P_{\text{motor}} + P_{\text{aksesuar}} \tag{2.31}$$

Bataryadaki kayıplar, iç direnç (R_{int}) ve akım ($I_{batarya}$) etkisiyle ortaya çıkar. İlgili eşitlik denklem 2.32 içerisinde paylaşılmıştır.

$$P_{\text{batarya}} = P_{\text{yük}} + P_{\text{kayıp}} \tag{2.32}$$

Bu denklem bataryanın yük altında sağladığı güç ile iç direnç ve voltaj arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. İç direnç bataryanın enerji verimliliğini etkileyen önemli bir parametre olup, güç kayıplarını artırabilir. İlgili eşitlik denklem 2.33 içerisinde paylaşılmıştır.

$$P_{\text{batarya}} = P_{\text{yük}} + (I_{\text{batarya}})^2 . R_{\text{int}} \tag{2.33}$$

Batarya akımının hesaplanması, iç direnç ve batarya voltajı arasındaki ilişkiyi içerir. Bu denklemler, bataryadaki şarj-deşarj döngülerinin doğruluğunu artırmak için kullanılır. Bunun için eşitlik denklem 2.34 içerisinde paylaşılmıştır.

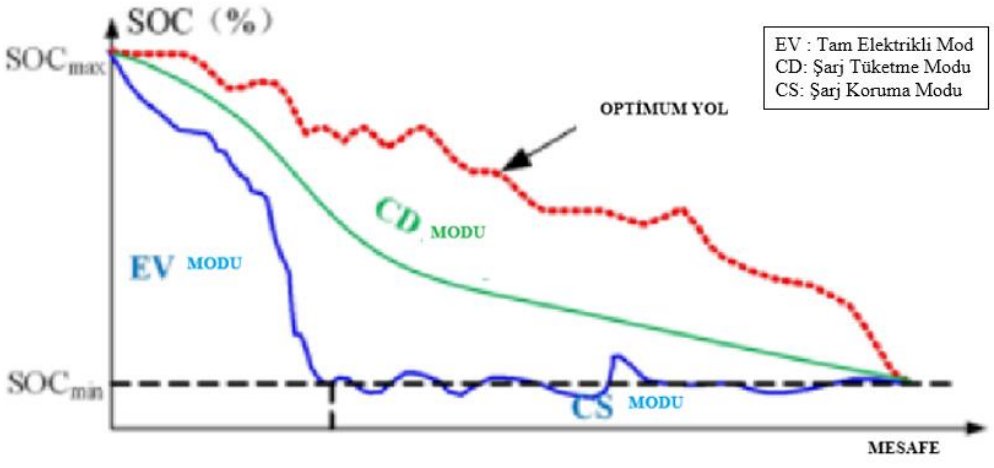
$$I_{batarya} = (V_{ocv} - ((V_{ocv})^2 - 4.R_{int}.P_{batarya})^{1/2}/(2.R_{int}) \quad (2.34)$$

Bataryanın sağladığı güç ile batarya akımı ve voltajı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bataryanın çıkış gücünün doğru bir şekilde hesaplanması, bataryanın enerji verimliliği ve performansının izlenmesini sağlar. İlgili eşitlik denklem 2.35 içerisinde paylaşılmıştır.

$$P_{batarya} = I_{batarya} . V_{ocv} \quad (2.35)$$

Batarya iç direnci, bataryanın güç tüketimi ve şarj/deşarj verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir (Okumuş ve Tezde, 2018). Batarya iç direncinin zamanla değişebileceğini ve bunun bataryanın dinamik performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bataryanın iç direncinin arttığı durumlarda, batarya verimliliği düşer ve daha fazla enerji kaybı meydana gelir.

Elektrikli araçların enerji verimliliği ve batarya yönetimi, şarj durumu (SOC - State of Charge) modellemesi ile doğrudan ilişkilidir. Şarj durumu, bataryanın mevcut şarj seviyesini ifade eder ve batarya yönetim sisteminin bir parçası olarak aracın performansını optimize eder. Batarya şarj durumu hesaplamaları, bataryanın şarj tüketimi ve rejeneratif enerji kazanımını izleyerek, enerji dengesini sağlamada önemli bir rol oynar. Mesafe bandında SOC değişim yörüngesine dair bir grafik gösterimi şekil 2.20 içerisinde paylaşılmıştır.



Şekil 2.20. SOC yörüngesi (Lin ve diğerleri, 2019)

Şarj durumu (SOC) değeri bataryanın kapasitesine göre ne kadar enerji tüketildiğini veya kazanıldığını belirtir. Bu değer özellikle sürüş modları ve rejeneratif frenleme gibi işlemlerle doğrudan etkilenen bir parametredir.

Bataryadan sağlanması gereken güç bataryanın çıkış akımı ($I_{batarya}$) ve açık devre gerilimi (V_{ocv}) dikkate alınarak hesaplanır. Bu güç değeri batarya içindeki kayıpları ve enerji dönüşüm verimliliğini yansıtacak şekilde batarya verimliliği ($\eta_{batarya}$) ile de ifade edilebilir. Bu hesaplama Denklem 2.36'da sunulmuştur.

$$P_{\text{batarya gereken(+)}} = (I_{\text{batarya}} . V_{\text{ocv}})/\eta_{\text{batarya}} \quad (2.36)$$

Rejeneratif frenleme sırasında batarya tarafından kazanılan enerji hesaplanır. Burada bataryanın akımı ve voltajı, batarya verimliliği ile çarpılarak rejeneratif enerji kazanımı hesaplanır. Gerekli eşitlik denklem 2.37 içerisinde paylaşılmıştır.

$$P_{\text{batarya rejeneratif (+)}} = I_{\text{batarya}} . V_{\text{ocv}} . \eta_{\text{batarya}} \quad (2.37)$$

Bataryanın tüketilmesi gereken toplam enerji miktarı bataryanın zaman içindeki güç gereksinimi ile hesaplanır. Bu enerji, bataryanın şarj seviyesini düşürür. Bunun için eşitlik denklem 2.38 içerisinde paylaşılmıştır.

$$E_{\text{gereken elektrik}} = \int_0^t P_{\text{batarya gereken}} . dt \quad (2.38)$$

Rejeneratif frenleme sırasında kazanılan enerji, bataryanın şarj seviyesini artırır ve hesaplama için eşitlik denklem 2.39 içinde paylaşılmıştır.

$$E_{\text{rejeneratif elektrik}} = \int_0^t P_{\text{batarya rejeneratif}} . dt \quad (2.39)$$

Denklem 2.40 ile bataryanın mevcut şarj seviyesini (% cinsinden) hesaplanır. Bataryanın kapasitesi, tüketilen enerji ile karşılaştırılarak şarj durumu belirlenir.

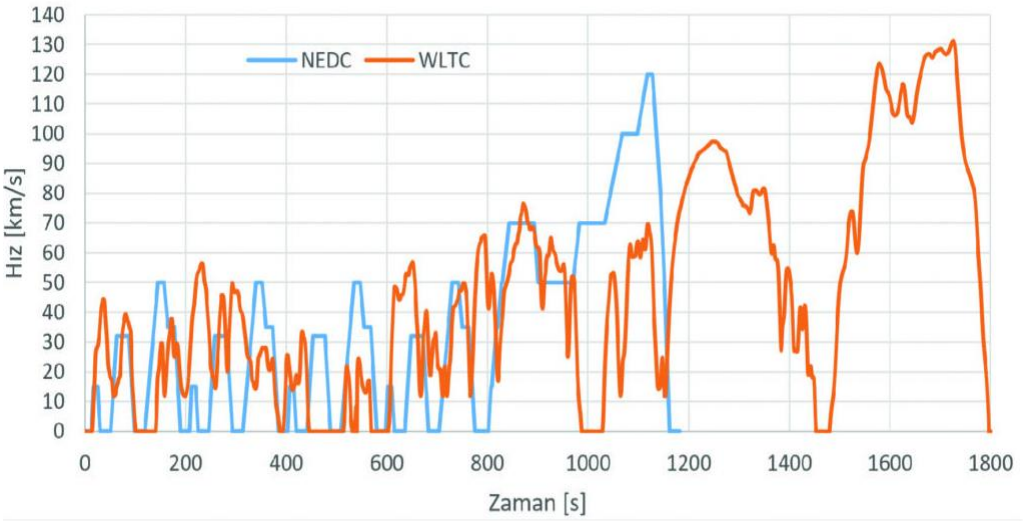
$$SOC = ((C_{\text{batarya}} - E_{\text{tüketilen elektrik}})/C_{\text{batarya}}).100 \quad (2.40)$$

Batarya şarj durumunun elektrikli araçların menzil tahminlerinin ve enerji yönetim sistemlerinin temel parametresi olduğu söylenebilir. (Kocakulak ve Solmaz, 2020; Wang ve diğerleri, 2015; Okumuş ve Tezde, 2018; Turğut, 2018)

Rejeneratif frenleme elektrikli araçlarda enerjinin geri kazanılmasını sağlayan bir mekanizmadır. Sürüş sırasında araç fren yaparken kinetik enerji elektriksel enerjiye dönüştürülür ve bataryaya geri aktarılır. Bu işlem, bataryanın şarj seviyesini artırarak verimliliği artırır ve menzil optimizasyonu sağlar. Rejeneratif frenleme, batarya şarj durumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bataryanın şarj seviyesinin dinamik bir şekilde değişmesine neden olur (Erdem ve Taci, 2018; Wang ve diğerleri, 2015).

2.5 Elektrikli Araçlarda Sürüş Çevrimleri

Sürüş çevrimleri, araçların enerji tüketimi, menzil ve emisyon değerlerini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş hız-zaman profilleri olarak tanımlanabilir. Elektrikli araçlar için bu çevrimler, içten yanmalı motorlara sahip araçlardaki yakıt tüketimi ve emisyon testlerinin yerine, enerji tüketimini, batarya kapasitesini ve menzil tahminlerini belirlemek için kullanılmaktadır (Meyer ve diğerleri, 2012). NEDC ve WLTP tipi sürüş çevrimleri araçların performans değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu çevrimlere ait hız-zaman grafiği şekil 2.21'de gösterilmiştir.

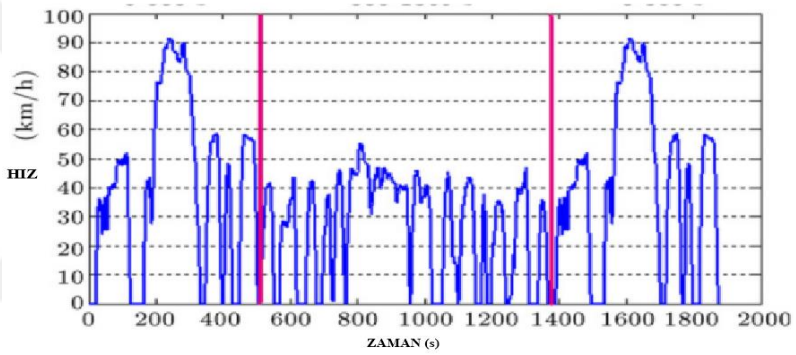


Şekil 2.21. NEDC-WLTP hız zaman karşılaştırması ("Figes",2024)

NEDC tipi sürüş çevrimi Avrupa'da 1997'den itibaren CO_2 emisyonlarını ve yakıt tüketimini ölçmek için kullanılan bir test prosedürü olmuştur. Elektrikli araçlar için NEDC batarya kapasitesine bağlı olarak menzil hesaplamalarında kullanılmıştır ancak düşük hızlar ve yetersiz ivmelenme seviyeleri nedeniyle elektrikli araçların gerçek kullanım koşullarındaki menzili ile NEDC değerleri arasında büyük farklar oluşmuştur (Mock ve diğerleri, 2019).

NEDC'nin eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilen WLTP, 2017'den itibaren Avrupa'da uygulanmaya başlanmıştır. Elektrikli araçlar için WLTP, menzil tahminlerini daha gerçekçi hale getiren daha dinamik hız ve ivmelenme profillerine sahiptir. Araç ağırlığı, lastik direnci ve hava sıcaklığı gibi faktörler de değerlendirmeye alınarak batarya tüketimi ve menzil tahmini daha doğru hesaplanmaktadır (Tsiakmakis ve diğerleri, 2020).

ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen FTP-75 sürüş çevrimi şehir içi sürüş koşullarını modelleyen bir çevrimdir. Elektrikli araçlar için batarya tüketimi ve enerji geri kazanımı açısından test edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle şehir içi dur-kalk trafikte elektrikli araçların rejeneratif frenleme sistemiyle enerji geri kazanım potansiyelini ölçmek için FTP-75 çevrimi kullanılır ("Dieselnet", t.y.). FTP-75 sürüş çevrimine dair görsel şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. FTP75 sürüş çevrimi (Fotouhi ve Montazeri-Gh,2013)

NEDC, WLTP ve FTP-75 gibi sürüş çevrimleri, elektrikli araçların menzil ve enerji tüketimi değerlerini belirlemek için kullanılır. WLTP, elektrikli araçlar için en doğru menzil tahminlerini sunarken, FTP-75 rejeneratif frenleme sistemlerinin etkinliğini değerlendirmede avantajlıdır. Bu testler, tüketicilerin araç menzil ve verimlilik tahminlerini daha iyi anlamalarına ve üreticilerin enerji yönetim sistemlerini optimize etmelerine yardımcı olur.

Kaynak Araştırması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırmasında, elektrikli araçlar ve elektrikli araçlar için kontrol tasarımı adına gerçekleştirilen çalışmalara yönelik konulara değinilmiştir.

2.6 Elektrikli Araçlar Hakkında Gerçekleştirilen Çalışmalar

Elektrikli araçlara yönelik artan ilgiyle birlikte bu alanda gerçekleştirilen akademik ve teknik araştırmalar da önemli ölçüde çeşitlenmiştir. Söz konusu çalışmalar genellikle elektrikli araç sistemlerinin modüler yaklaşımla alt bileşenlere ayrıştırılması temelinde yürütülmektedir. Bu kapsamda, başlıca araştırma alanları şu şekilde özetlenebilir: dijital simülasyon ortamlarında sistem modellemelerinin gerçekleştirilmesi, elektronik diferansiyel ve tahrik sistemlerinin çeşitli kontrol algoritmaları ile optimize edilmesi, elektrikli araç teknolojilerinin çevresel ve ekonomik etki analizlerinin yapılması ile farklı motor ve enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi olarak sıralanabilmektedir.

Mahmoudi ve diğerleri (2015) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmada, elektrikli araç tahrik sistemlerinin tarihsel gelişimi ve güncel uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar çeşitli elektrikli araç konseptlerinde kullanılan tahrik teknolojilerini sınıflandırarak her bir sistemin en son teknolojik gelişmelerini karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada özellikle tahrik sistemlerinde karşılaşılan temel sorunlar ve bu sorunlara yönelik geliştirilen çözüm stratejileri üzerinde durulmuştur. Araştırmacılar güç yönetimi yaklaşımları ve şarj teknolojilerini detaylı bir şekilde inceleyerek elektrikli araç kontrol yöntemlerini sistematik bir şekilde değerlendirmişlerdir. Elde edilen bulgular, kural tabanlı kontrolörlerin uygulama kolaylığı sunmasına rağmen, optimal enerji tüketimi performansının ancak optimizasyon temelli kontrol yöntemleriyle sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

Mutoh (2009), gerçekleştirdiği araştırmada elektrikli araçların başlangıç anından maksimum hıza ulaşana kadar etkin tork üretimi sağlayan, araç menzilini arttıran ve genel performansı iyileştiren yeni bir tahrik sistemi geliştirmeyi hedeflemiştir. Çalışmada farklı özelliklere sahip elektrik motorları kullanılarak araç tahriki sağlanmış ve bu sistemin avantajları incelenmiştir. Çalışmanın önemli sonuçlarından biri, farklı kullanım alanlarına göre motor tiplerinin seçilmesi enerji tüketiminde önemli iyileşmeler sağlamış olmasıdır.

Hartani ve diğerleri (2015), her tekerlekte sabit mıknatıslı senkron motor kullanan 4 tekerlekten çekişli bir sistem geliştirmiştir. Tüm motorlar tek invertörle master-slave DTC stratejisiyle kontrol edilmiş, sistem MATLAB/SIMULINK'te modellenerek elektrikli araçlarda kullanım adına yeni bir kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Kıyaklı ve Solmaz (2018), MATLAB/Simulink ortamında bir elektrikli aracın dinamik modelini geliştirmiş ve farklı sürüş çevrimleri (NEDC ve WLTP) altında enerji tüketim değerlerini incelemiştir. Çalışmada, araç direnç kuvvetleri (aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci, eğim direnci ve atalet direnci) detaylı bir şekilde modellenmiş ve rejeneratif frenleme ile %8 enerji tasarrufu sağlandığı gösterilmiştir. Ayrıca, araç kütlesi ve aerodinamik direnç katsayısının enerji tüketimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir

Park ve diğerleri (2015), ise yine HUB motor teknolojisinin önemini vurgulamış ve MATLAB/SIMULINK ve CARSIM gibi programlarda yol şartları ve taşıt parametrelerine uygun olarak kontrol algoritması geliştirmeye çalışmışlardır. Belirlediği parametrelere göre bulanık mantık teoremini kullanarak optimizasyonu sağlamaya çalışmışlardır.

Xu ve diğerleri (2011), elektrikli bir araca seri hibrit rejeneratif fren sistemi üzerinde kullanılmak üzere bulanık mantık metodu ile kontrol stratejisi geliştirmişler ve araç dengesinin uygun seviyede tutulup, mekanik ve rejeneratif fren kuvvetinin en uygun şekilde dağıtılması için çalışma gerçekleştirmiştir.

Paredes ve diğerleri (2019), hibrit ve elektrikli araçlarda menzil değerinin artması için farklı çalışmalardan bahsetmiş ve rejeneratif frenleme kontrolünün menzil artımına olan etkisini çalışmışlardır.

Manoharan ve diğerleri (2021), faydalı frenleme yapısını inceleyerek frenleme enerjisinin belirli hızlar ile sınırlı olduğunu belirterek bu hızların ters elektromotor kuvveti oluşturarak bataryayı şarj etmesinin zor olduğunu çalışmalarında incelemişlerdir.

Lupberger ve diğerleri (2022), elektrikli araçların faydalı frenlemede ne kadar enerji tasarrufu sağlayabileceğini çalışmalarında incelemiştir.

Liu ve diğerleri (2020), bu sayede elektriksel frenleme ile hidrolik frenleme sisteminde kullanılan disk ve balata gibi belirli sürelerde değiştirilmesi gereken parçaların maliyetlerinden tasarruf sağlanabileceğini ve daha uzun sürelerde değişmesi gereken parçaların güvenirliliğinin artacağını bu yüzden elektrikli araçlarda mekanik frenleme sistemi olabildiğince az veya hiç

kullanılmamalıdır diye çalışmalarında belirtmişlerdir. Kumar ve diğerleri (2022), elektriksel frenlemenin kontrol sisteminde MATLAB/Simulink Fuzzy Logic Toolbox'ı kulanmış ve bulanık mantıkta en iyi frenleme yöntemini elde edebilmek için girdi olasılıklarının seviyeleri üzerinde çalışmıştır.

Topçu ve Aksay (2025), günümüzde literatürde elektrikli araçların kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda, farklı kontrol yöntemlerinin karşılaştırıldığı, gelişmiş adaptif ve tahmine dayalı algoritmaların kullanıldığı çeşitli yaklaşımlar yer almaktadır ancak, bu yöntemlerin çoğu uygulama karmaşıklığı, yüksek hesaplama maliyeti veya sistem parametrelerine duyarlılık gibi nedenlerle gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlamalarla karşılaşabilmektedir ayrıca PID kontrol algoritması; basit yapısı, kolay uygulanabilirliği ve güvenilir performansı sayesinde öne çıkmaktadır diye çalışmalarında belirtmiş PID kontrolcü ile hız takibini sağlamaya çalışarak, SOC, menzil değişimini çalışmalarında incelemişlerdir. Ayrıca rüzgâr hızı, yol eğimi gibi çevresel faktörlerin değişimini de incelemişlerdir. Elektrikli araç için yaptıkları modelleme çalışmasında da aracın matematiksel modellemesi, sistemin dinamik davranışlarını anlamak, performansını optimize etmek ve kontrol stratejilerini geliştirmek için kritik bir öneme sahip diye belirtmişler ve modellemede araç içi bileşenlerin etkileşimini dikkate alarak aracın enerji verimliliği, hızlanma, frenleme ve enerji tüketimi gibi parametreleri tahmin etmeye dayanır diyerek MATLAB/Simulink içerisinde PID parametrelerinin optimizasyonunun hız takibi, enerji kazanımı etkilerini incelemişlerdir. Kebbati ve diğerleri (2021), çalışmasında değişken eğim ve algoritma, hızı etkisinde hız kontrolü adaptif PID kontrolü uygulayarak ele almış ve genetik algoritma, sinir ağı optimizasyonlarını da çalışmaya dahil etmiştir.

Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri olan bataryalar, aracın menzilini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Doyle ve diğerleri (1993), batarya teknolojisinin seçimi, elektrikli araçların tasarımında ve performansında önemli olduğunu belirtmiş ve elektrikli araçlarda kullanılan en yaygın batarya türleri, yüksek enerji yoğunlukları, uzun çevrim ömürleri ve nispeten düşük kendi kendine deşarj oranları nedeniyle lityum iyon (Li-ion) bataryalardır diye belirtmişlerdir.

Dikmen (2022), tipik bir BYS batarya paketinin çalışmasını izlemek ve kontrol etmek için birlikte çalışan çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır ve akü izleme ünitesi, merkezi işlem birimi, güç yönetim birimi, iletişim arayüzü ve güvenlik koruma mekanizmaları olduğunu belirterek çalışmasında batarya yönetim sistemleri üzerine incelemesini gerçekleştirmiştir.

Öztürk (2013), yaptığı çalışmada, taşıta etkiyen kuvvetler ve araç kütlesi göz önünde bulundurularak, motorun eylemsizlik momenti, moment bileşenleri arasındaki ilişkileri modellemiş ve batarya üzerindeki enerji değişim grafiğinden rejeneratif frenleme ile belirli bir oranda daha fazla enerji kazanıldığını tespit etmiştir.

Dan ve diğerleri (2023), elektrikli araçlardaki kablo sistemlerinde ısıl kayıpları azaltmak için kullanılan malzeme teknolojileri üzerine çalışmalar yapmış ve ısı dağılımını iyileştiren yenilikçi çözümler sunmuştur.

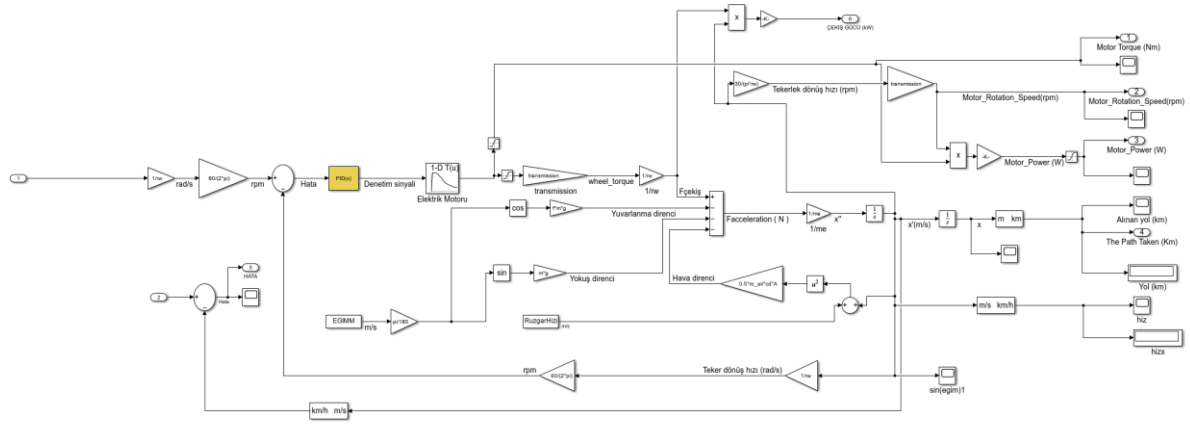
Kocakulak ve Solmaz (2020), hibrit araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların karakteristik özelliklerini belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, eşdeğer devre yöntemi (R_{int} metodu) kullanılarak bataryanın iç direnci ve verimliliği hesaplanmıştır. Sonuçlar, batarya şarj seviyesinin %15-%95 aralığında ortalama iç direncin deşarj sürecinde 51.452 mOhm, şarj sürecinde ise 57.48 mOhm olduğunu göstermiştir ve elektrikli araçlardaki güç tüketim modellerinin doğruluğunu artırmak için motor verimliliği ve rejeneratif frenleme gibi parametrelerin doğru bir şekilde modellemeye dahil edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Yang ve diğerleri (2021), elektrikli araçlarda enerji dağıtımı sırasında kablo bağlantılarındaki direnç kaynaklı kayıpları azaltmak için kablo yerleşim optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında, kablo uzunluğu ve malzeme seçiminin sistem verimliliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında bir elektrikli aracın hız denetimi farklı sürüş çevrimleri ve çevre şartlarına göre incelenmiştir. Aracın doğrusal hareketi için yapılan incelemede öncelikle taşıtın hareket denklemleri "Kuramsal Temeller" bölümünde KISIM 2.4' de sunulan yöntemlerle elde edilmiştir. Çalışmada Nissan Leaf model elektrikli aracın yapısal özellikleri ve elektrik motoru devir sayısı-moment karakteristik eğrisi ele alınarak inceleme yapılmıştır. Batarya modeli olarak literatürde yaygın olarak kullanılan Rint modeli kullanılmıştır. Benzetim çalışması MATLAB/Simulink programı ile yapılmıştır. WLTP, NEDC ve FTP-75 tipi üç farklı standart sürüş çevrimi başvuru girişi olarak uygulanmıştır. Her bir çevrim, aracın farklı hız-zaman profillerinde tepkisini değerlendirmeye imkân sağlamış, böylece aracın farklı sürüş koşulları altındaki performansı da değerlendirilmiştir. Denetleyici olarak P, PI, PD, PID ve MRAC tipi denetim organları kullanılmış, kullanım esnasında parametrelerin gerekli hız çevrimi takibine uyumluluğu incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Çevre şartlarının değişiminin aracın performansına etkisini incelemek için aracın farklı eğim ve aerodinamik şartlara maruz kalma hali modele dahil edilmiştir. Şehir içi rüzgâr durumu ve yol verileri için gerçek veriler temin edilerek aracın farklı eğimlere sahip bir yol üzerinde seyir halindeyken davranışının daha gerçekçi bir yaklaşımla incelenmesi sağlanmıştır. Aracın hız hatası, aracın güç tüketimi, batarya şarj doluluk oranı (SOC) değeri de incelenmiştir. Bundan sonraki bölümlerde bahsedilen çalışmalar için gerekli detaylar sunulmuştur.

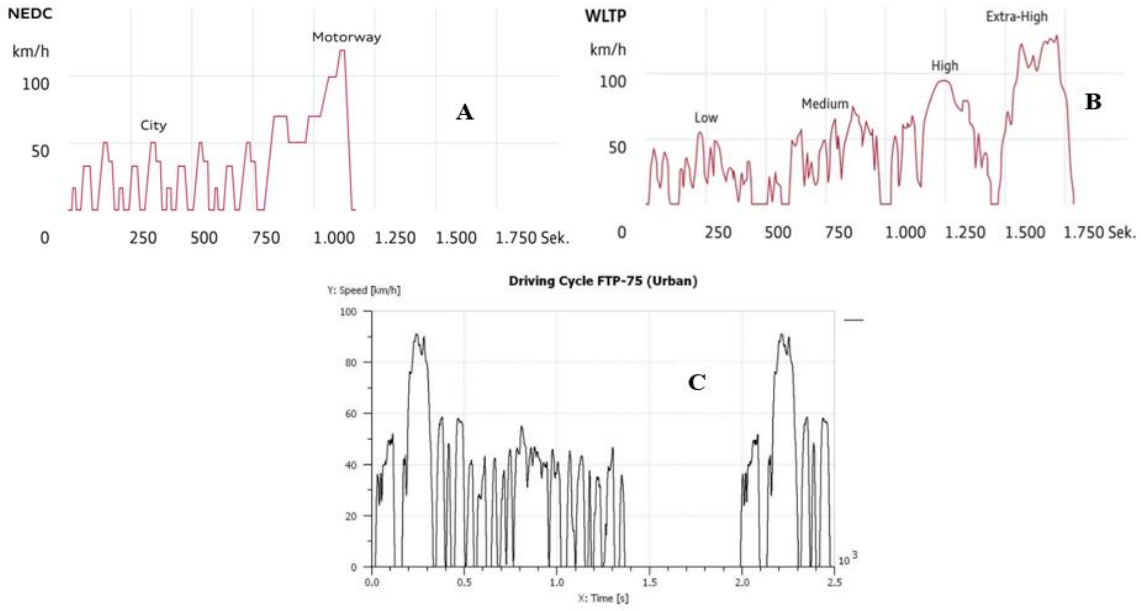
3.1 Elektrikli Araç ve Elektrik Motoru Modeli

Elektrikli bir araç için MATLAB/Simulink ortamında modelleme gerçekleştirilmiştir. Aracın modellenmesinde yuvarlanma direnci (denklem 2.18), aerodinamik kuvvetler (denklem 2.19) ve yol eğimi (denklem 2.20) gibi çevresel bozucu etkenler göz önünde bulundurularak Newton' un II. Hareket yasası kullanılarak hareket denklemi (denklem 2.17) elde edilmiştir. İncelenen araca ait temel parametreler çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Bu denklemdeki etkin kütle denklem 2.15 ve denklem 2.16 yardımıyla hesaplanarak işleme dahil edilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrikli araç MATLAB/Simulink modeli

Şekil 3.1'de görülebileceği üzere araç hız kontrolü için WLTP, NEDC, FTP-75 tipi sürüş çevrimindeki hız değerleri başvuru girişi olarak verilmiştir. Modellemede kullanılan WLTP, NEDC ve FTP-75 tipi üç farklı standart sürüş çevrimi başvuru girişi olarak uygulanmıştır. Çalışma içinde kullanılmış olan sürüş çevrimlerine dair görsel Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



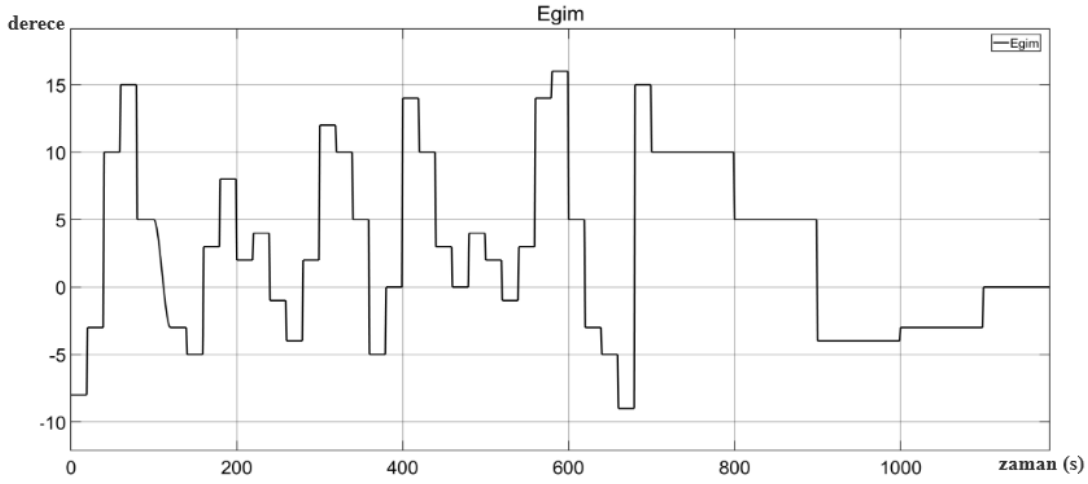
Şekil 3.2. Sürüş çevrimleri **A)** NEDC sürüş çevrimi **B)** WLTP sürüş çevrimi **C)** FTP75 sürüş çevrimi

Çalışmada araca ve bataryaya ait olan parametreler de çizelge 3.1 içerisinde gösterilmiştir.

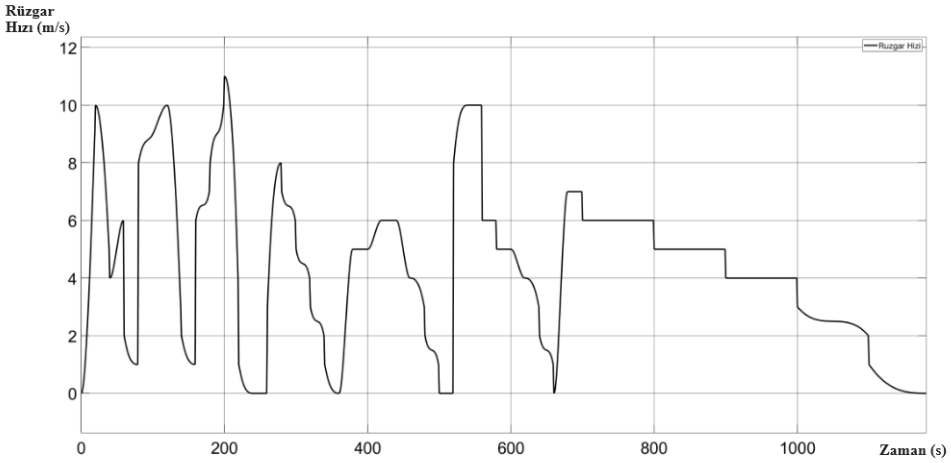
Çizelge 3.1. Araca ve bataryaya ait parametreler

Aracın kütlesi (m)	1500 kg	Transmisyon oranı (γ)	7.524
Yuvarlanma direnci katsayısı (f)	0.01	V_{ocv}	350 V
Araç ön yüzey alanı (A)	2.27 m^2	C	12.96e+6 Ws
Yoğunluk (ρ)	1.2 kg/m^3	$\eta_{batarya}$	92%
Aerodinamik direnç katsayısı (C_d)	0.28	R_{int}	0.1 Ω
Tekerlek yarıçapı (r_{teker})	0.32 m	$P_{aksesuar}$	4 kW

Modelde yokuş kuvvetinin etkisini ekleyebilmek için Güzelyalı-Bursa arasındaki yol bilgileri "GoogleEarth" üzerinden alınarak rakım ve ilerleme verilerine göre yolun eğim bilgileri kullanılarak modele uyarlanmıştır. Ayrıca bu yolu takip ederken değişken olarak tanımlanan rüzgâr hızı değerleri Bursa- Mudanya bölgesindeki rüzgâr hızı bilgileri "Visualcrossing" üzerinden değerlendirilerek modele dahil edilmiştir (Google Earth, t.y.; Visualcrossing t.y.) Modelde kullanılan değişken eğim ve rüzgâr hızının zamana bağlı değişim eğrileri şekil 3.3 ve şekil 3.4'te gösterilmiştir.



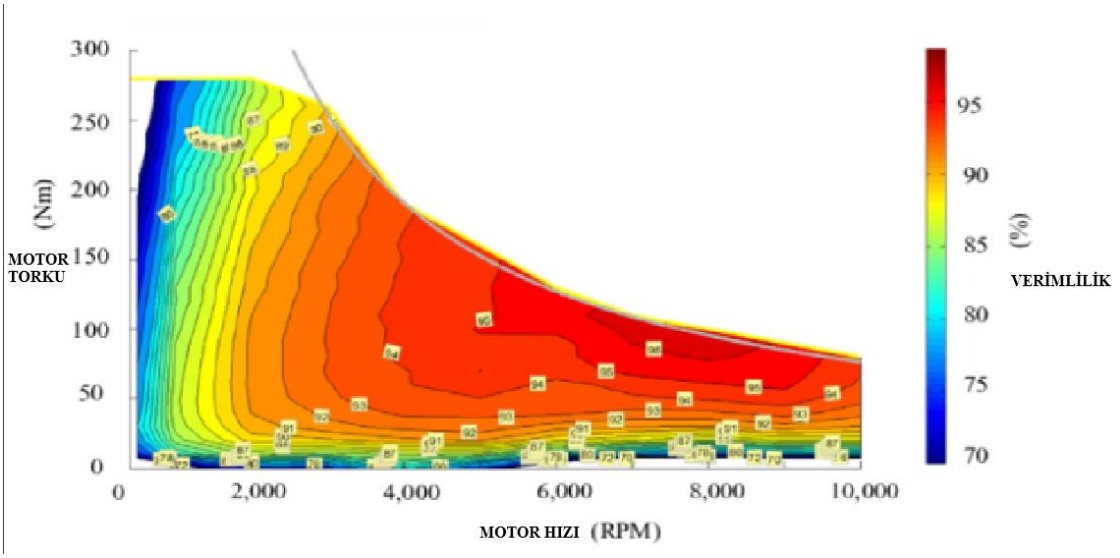
Şekil 3.3. Yol eğimi- zaman grafiği



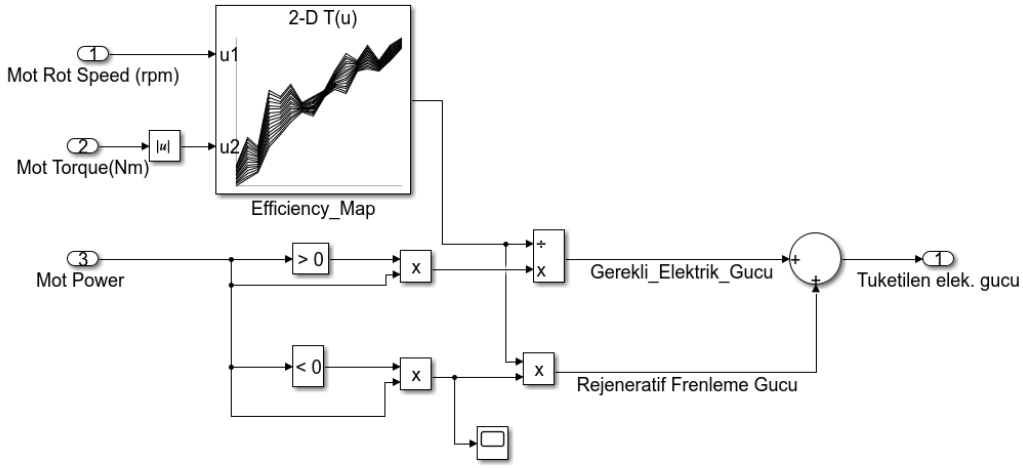
Şekil 3.4. Rüzgâr hızı- zaman grafiği

Çekiş kuvvetini üretecek elektrik motoru momentini ve çekiş kuvveti arasındaki ilişkinin temsili için Kısım 2.4'te sunulan denklem 2.22, denklem 2.23, araç hızı ve elektrik motoru açısal hızı arasındaki ilişkiyi temsil etmek için de denklem 2.25 ve denklem 2.26, motor gücü için denklem 2.27 kullanılmıştır. Burada motor ile tekerlek arasındaki dişli çevrim oranı, dişli verimi değerlerinin dikkate alınması sağlanmıştır. Elektrik motorunun üreteceği elektrik gücü ise verime bağlı olarak denklem 6 ile ifade edilmektedir. (Kocabıçak, 2020; Çetinkaya, 2004).

Şekil 3.1' e göre motor sürüş çevriminde talep edilen hız ve çıktı olarak edilen taşıt hızı değerleri arasındaki fark hata olarak hesaplanmakta ve bu hata sinyali de denetleyici bloğuna giriş olarak verilmektedir. Denetim organı çıkışından elde edilen denetim sinyali araç elektrik motorunun verilerinin kullanılmasıyla oluşturulan "Look-up Table (LUT)" bloğuna bağlanmıştır. Bu blok vasıtası ile aracın gerekli motor momenti (T_{motor}) elde edilmektedir. Bu tabloda kullanılan veriler tam elektrikli Nissan-Leaf marka elektrikli araçta kullanılan elektrik motorunun moment, devir sayısı ve verimine verilerinden faydalanılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.4). Şekil 3.1' de verilen araç modeli tork ve açısal hız gibi sinyallerden çıkış alınarak genişletilmiş ve bu şekilde motor hızı ve momentine bağlı olarak elde edilen verim değeri dinamik model çıktısı ile elde edilen motor gücünün sürüş modları göz önünde bulundurularak işleme alınması ile yani motor gücünün 0'dan büyük veya küçük olması (>0 hali ileri çekiş tahriki, <0 olması rejeneratif güç eldesi) durumu da modele dahil edilmiştir. Belirtilen kısımları da içine alan elektrik motoru davranışının temsil edildiği MATLAB/Simulink modeli şekil 3.6 içerisinde gösterilmiştir.



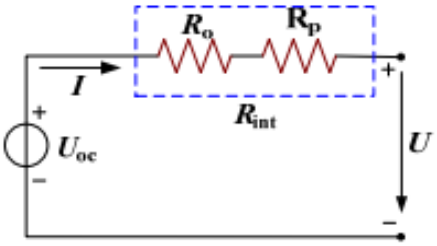
Şekil 3.5. Elektrik motoru enerji verimliliği tablosu (Faghihian ve Sargolzaei, 2023)



Şekil 3.6. Simulink elektrik motoru modeli

3.2 Batarya ve Şarj Durumu Modeli

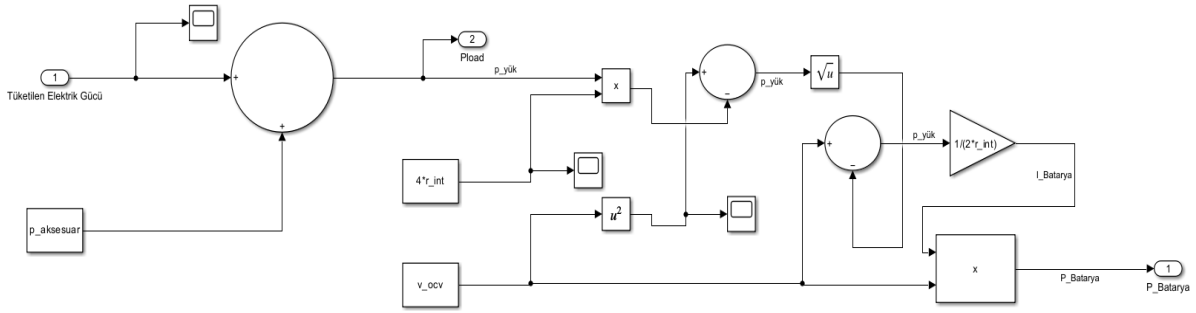
İncelenen elektrikli araca ait batarya modeli için prizmatik hücrelerinin seri ve paralel bağlantılarının bir araya gelmesi ile batarya modüllerinin bu modüllerin de bir araya gelmesi ile batarya paketlerinin oluştuğu bilgisi edinilmiştir. Sistemdeki bataryayı modellemek için literatürde yaygın olarak kullanılan ve Şekil 3.7'de gösterilen R_{int} modeli yaklaşımı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Batarya R_{int} modeli (Wang ve diğerleri, 2015)

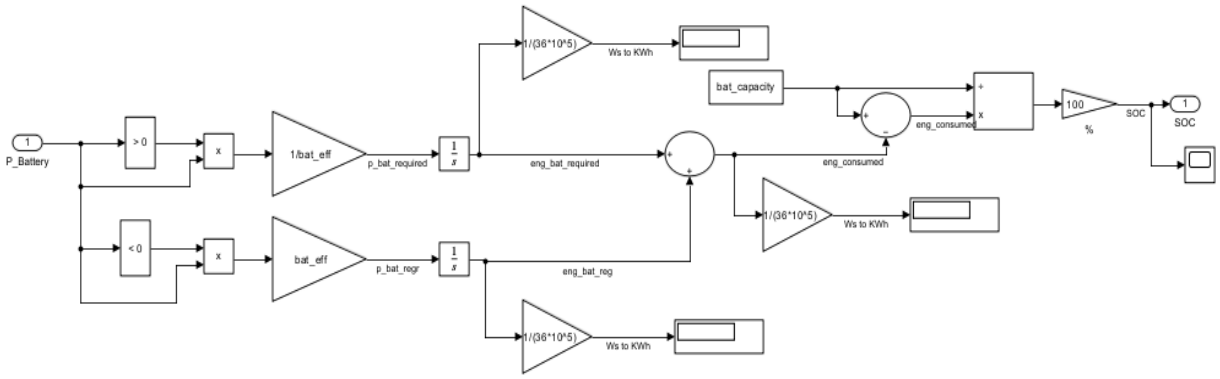
Elektrik Motorunun tükettiği elektrik, elektrik motoru modeli çıktısı olarak edinilmiş ve batarya modeli denklem 2.31 ve denklem 2.35 denklemleri ile kurulmuştur. Batarya ile ilgili parametre değerleri çizelge 3.1'de sunulmuştur..

Batarya için oluşturulan Simulink modeli şekil 3.8 içerisinde paylaşılmıştır.



Şekil 3.8. Simulink batarya modeli

Elektrik araç modeli içerisinde bağıl hesaplamaların son aşamasında elektrikli araç şarj durumu (SOC) modeli oluşturulmuştur. Bu modellemede sürüş modları içerisinde de bahsedilmiş olan araç çekiş durumu için batarya şarjı tüketilirken rejeneratif kazanımda batarya şarjı kazanım durumunda olarak değerlendirilmiştir. Bahsedilen şarj durumu hesaplamaları için denklem 2.36 ve denklem 2.40 arasındaki işlemler devreye alınmıştır ve MATLAB/Simulink programında oluşturulan model şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Simulink SOC modeli

Bu modelleme adımları vasıtası ile aracın gerekli hız takibine bağlı sağlayacağı motor torku ve elektrik motoru güç gereksinimleri ile tüketilecek şarj takibi sağlanmıştır.

3.4 PID Kontrolcü Uygulaması

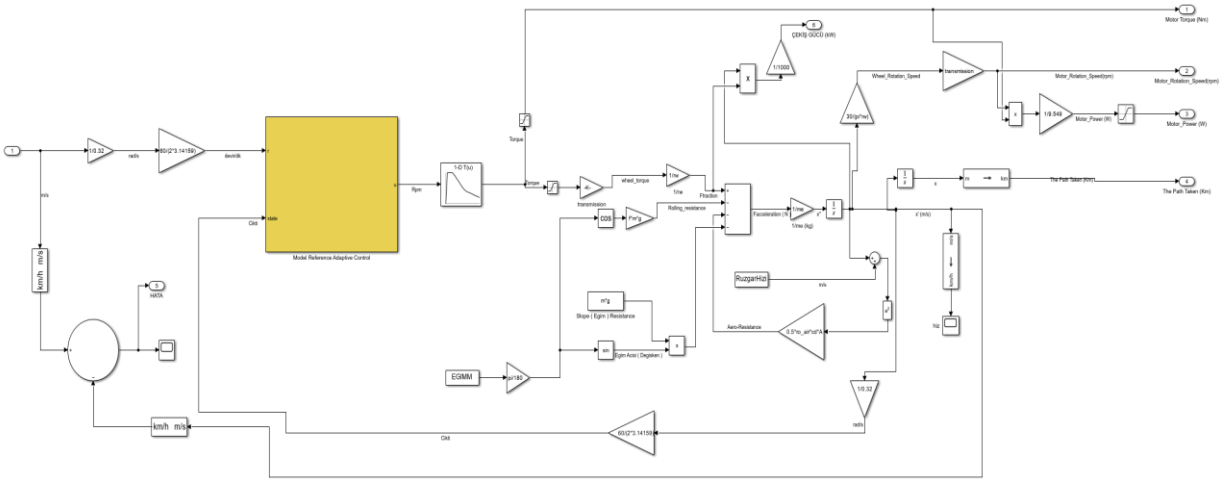
Bu çalışmada araç hızının denetlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada NEDC, WLTP ve FTP-75 tipi sürüş çevrimleri ile sisteme hız girdi olarak verilmiştir. Denetleyici olarak endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan klasik PID (Oransal-İntegral-Türev) tipi denetim algoritması öncelikli olarak kullanılmıştır. Bu karşılaştırma işlemleri için denetleyici algoritmasındaki K_p, K_i ve K_d kazanç parametreleri Simulink PID bloğu içinde yer alan "PID Tune" kısmı ile otomatik olarak ayarlanarak denklem 2.4 ile gösterildiği şekilde denetim organında kazanç katsayısı olarak kullanılmışlardır. MATLAB/Simulink programındaki PID bloğu kullanılarak denetim algoritmasında orantı (P), orantı+integral (PI), orantı+türev (PD) ve orantı+integral+türev (PID) tipi denetim algoritmaları için simülasyonlar tekrarlanmış ve bu denetim organlarının sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.5 MRAC Kontrolcü Uygulaması

PID Kontrolör uygulamasının gerçekleştirilmesinin ardından bu bloğun yerine MATLAB/Simulink programının kütüphanesinde yer alan "Model Referans Adaptif Control " bloğu kullanılarak Şekil 3.10'da gösterildiği şekilde araç modeline dahil edilmiştir. sistemin hız denetimi bu denetim sistemi ile incelenmiştir. Bu denetleyicide direkt ve indirekt MRAC yöntemleri kullanılmış olup gerekli parametre ayarları MATLAB "Parameter Estimator" toolboxı kullanılarak yapılmıştır. "Parameter Estimator" toolboxının kullanımında deneysel

veri olarak sürüş çevrimine dahil edilmiş olan WLTP girdisi ile ilk deneme başlatılmış olmak ile Deneysel veri girdisi sonrasında tahmin edilmesi istenen MRAC Kontrolcü parametreleri tahmin girdisi olarak uygulamaya dahil edilmiştir ve bu parametrelerin tahmini için iterasyon adım sayısı 100 olarak uygulanmıştır. Bu uygulama Kısım 2.3'te bahsedilmiş olduğu gibi MRAC tipi denetleyici ile kontrol edilen sistemin dinamiklerini referans modelin davranışına uyacak şekilde ayarlaması sağlanabilmektedir.



Şekil 3.10. Dinamik modele eklenen MRAC bloğu

3.5.1 Direkt MRAC Denetim Organı Uygulaması

Direkt MRAC Kontrolör uygulamasında "Kuramsal Temeller" bölümü "Kısım 2.3.6- Adaptif Kontrol" de MRAC Kontrolör uygulaması için paylaşılan işlem adımları sırasıyla takip edilmiş olmak ile Simulink içerisine eklenen MRAC bloğu tarafından işlemler otomatik olarak uygulanmıştır.

MRAC bloğu içerisinde k_x ve k_r parametreleri başlangıç değeri açısından belirlenmiş ve bu aşamada dinamik modele çıktı olarak elde edileceği bilinen maksimum hız çıktısı değerinin elde edileceği zaman da göz önünde bulundurularak step girdi uygulamasına nazaran optimizasyonun sağlanabileceği uygulamadan elde edilen optimum değer, başlangıç değeri olarak kullanılmıştır.

Bahsi geçen adaptasyon yasası adına parametrelerin tanımlanması için blok tarafından denklem 2.11 ve denklem 2.12 işleme alınmaktadır. Step Girdinin sonrasında parametreler için uygulanmış olan başlangıç değerleri çizelge 3.2 içerisinde paylaşılmıştır. Bu denetleyicide gerekli parametre ayarları MATLAB "Parameter Estimator" toolboxı kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Direkt MRAC uygulaması için başlangıç parametreleri

A	B	A_m	B_m	k_x
0.5	1.669	- 0.2	0.15	4.5
γ_x	k_r	γ_r	γ_w	Q
5.25	0.5	3.5	0.5	0.0005

3.5.2 İndirekt MRAC Kontrolcü Uygulaması

Direkt MRAC işlemlerinde bahsedilmiş olduğu gibi MRAC Kontrolör uygulaması için paylaşılan işlem adımları sırasıyla takip edilmiş ve direkt MRAC işlemleri esnasında kullanılmakta olan çoğu parametre indirekt işlemleri içerisinde de uygulamaya alınmıştır. İndirekt MRAC uygulamasında da kontrol sinyali tahmini sistem parametreleri ile uygulamaya alınmaktadır.

İndirekt MRAC uygulamasının temel farkı, kazançların doğrudan güncellenmemesidir ve bunun yerine sistem parametre tahminleri indirekt MRAC için uygulamaya alınmıştır. Tahmini sistem parametreleri ile uygulamaya alınan kontrol sinyali denklem 2.9'da gösterildiği gibi uygulanmaktadır.

İndirekt MRAC uygulaması için başlangıç parametrelerinin belirlenebilmesi adına step girdi direkt MRAC Uygulamasında da işlendiği gibi uygulanmıştır. Bu uygulamanın ardından indirekt MRAC uygulaması için başlangıç parametreleri çizelge 3.3 içerisinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. İndirekt MRAC uygulaması başlangıç parametreleri

$\widehat{\boldsymbol{A}}$	γ_a	$\widehat{\boldsymbol{B}}$	γ_b	A_m	B_m
1.84	28	0.12	24	-246	300
k_x	γ_x	k_r	γ_r	γ_w	Q
40	5.25	40	3.51	0.5	0.00005

4.BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, elektrikli bir aracın farklı hız sürüş çevrimlerine göre PID ve MRAC yapısına sahip denetleyiciler kullanılarak hız denetimi yapılmıştır. Denetim sırasında araçta meydana gelen güç değişimi ve şarj durumu da gözlemlenmiştir. Aşağıda her bir sürüş çevrimi için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

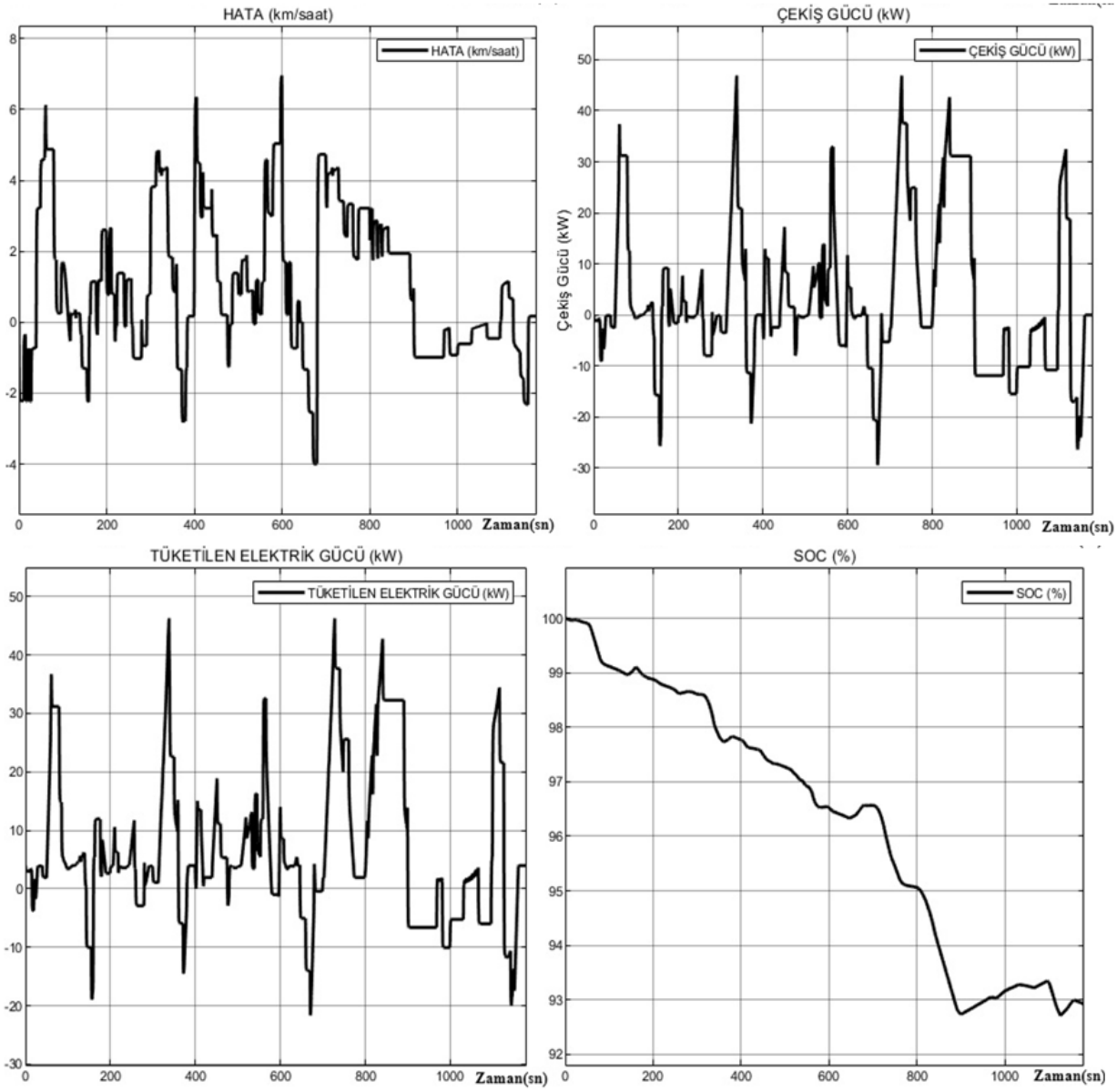
4.1 PID Kontrolcü Denetimi

Çalışmada P, PI, PD ve PID tipi denetim organlarının kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

4.1.1 NEDC Sürüş Çevrimi için PID tipi denetleyici

İlk değerlendirme oransal (P) denetim organı için NEDC sürüş çevrimi ile yapılmış ve PID tune ile optimize edilen orantı kazancı (K_p) değeri 6.2255 olarak elde edilmiş ve uygulanmıştır.

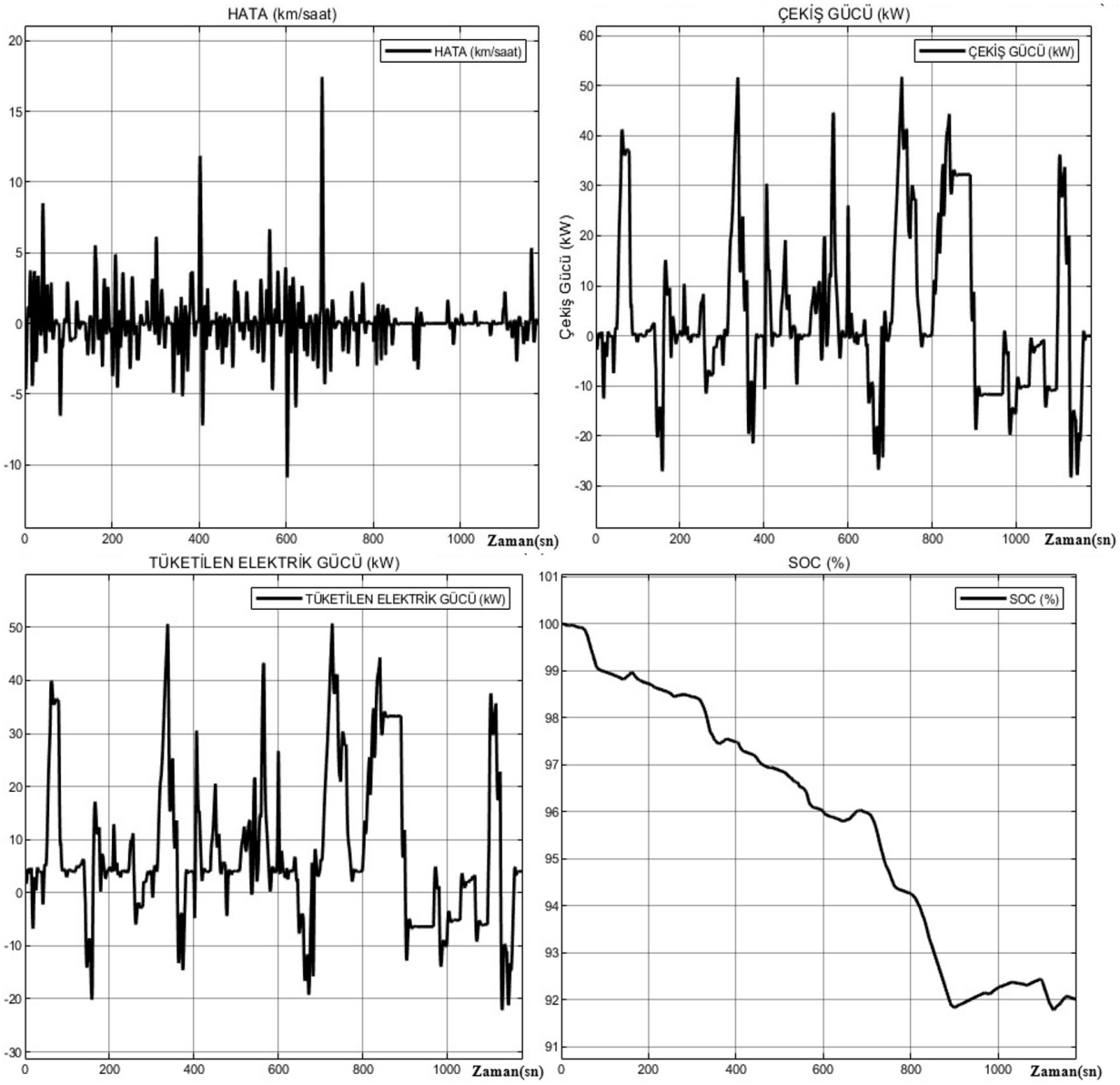
Bu şekilde çalıştırılan kapalı döngü sistemin simülasyon sonuçları şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. NEDC tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları

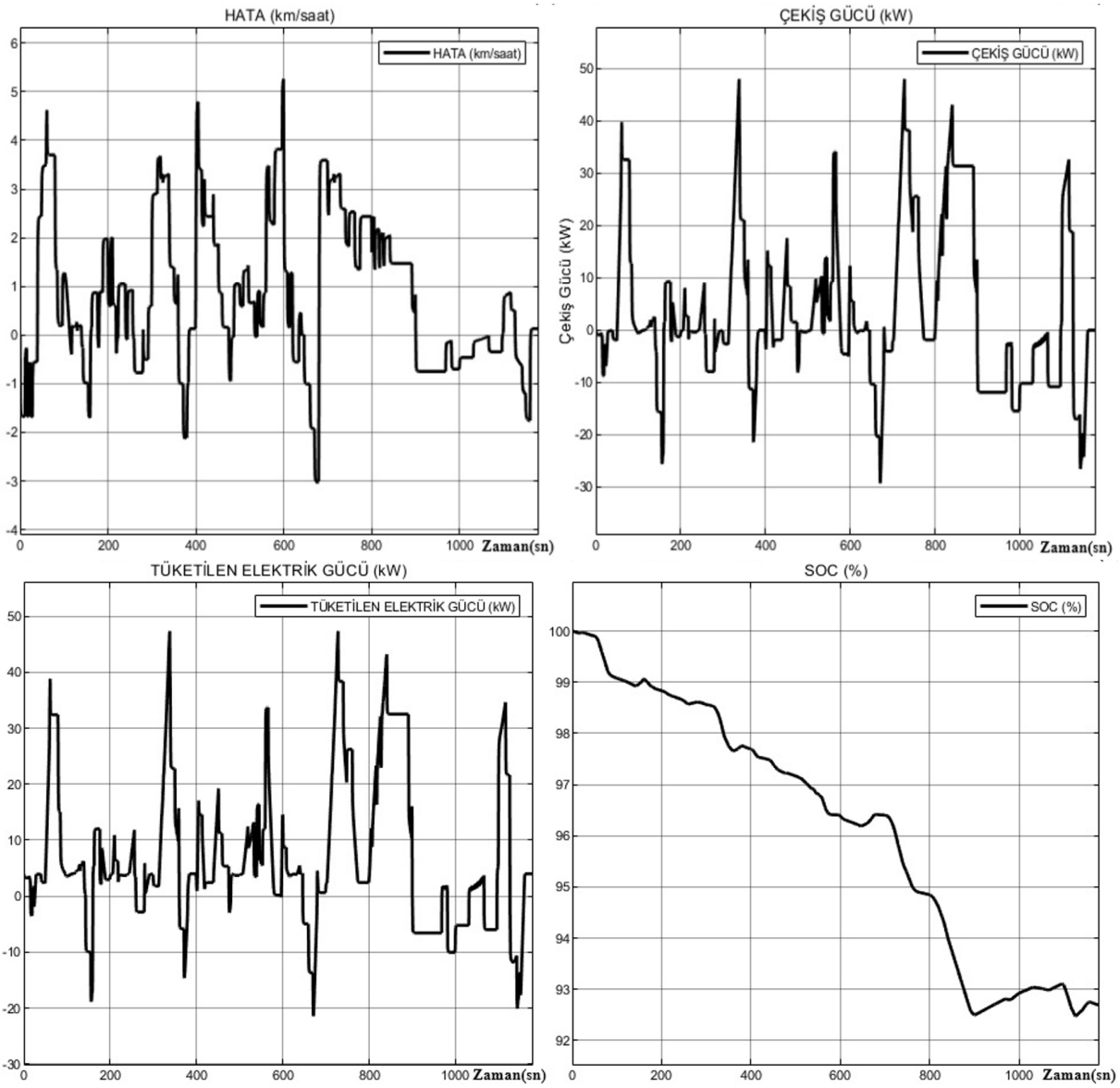
İkinci simülasyonda aracın PI tipi denetim organı ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Burada da PID bloğu PI denetim için düzenlenerek "PID Tune" ile parametre ayarı yapılmıştır. PID bloğu içindeki otomatik ayar seçeneği ile optimize edilen K_p ve K_i parametreleri için değerler sırası ile 1.40888 ve 0.99124 elde edilerek uygulanmıştır.

Bu şekilde çalıştırılan kapalı döngü sistemin simülasyon sonuçları şekil 4.2'de sunulmuştur.



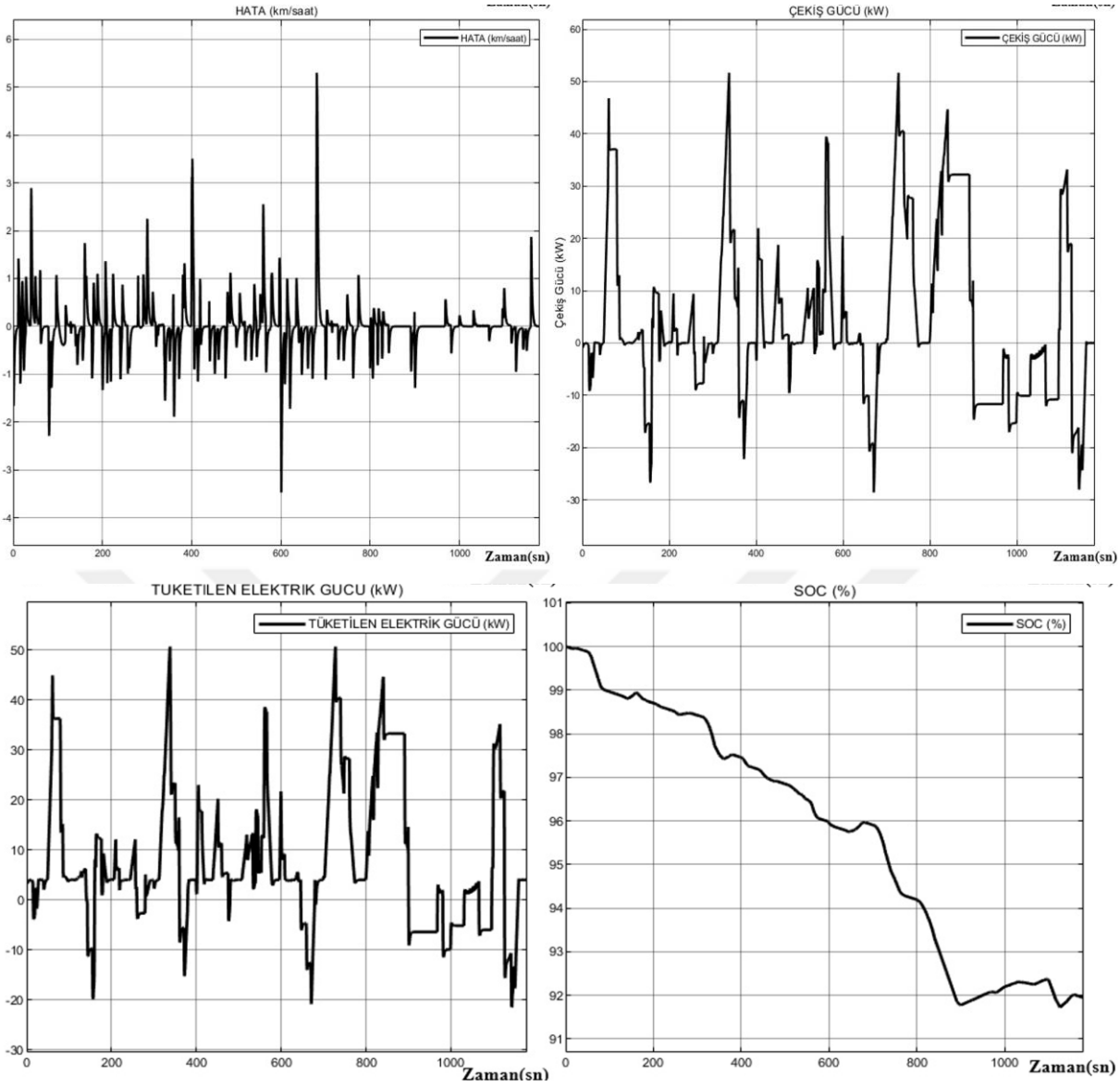
Şekil 4.2. NEDC tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları

Üçüncü aşamada aracın hız denetimi PD denetim organı ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Burada da PID bloğu PI denetim için düzenlenerek "PID Tune" ile parametre ayarı yapılmıştır. PID bloğu içindeki otomatik ayar seçeneği ile optimize edilen K_p ve K_d parametreleri için değerler sırası ile 8,22 ve 1,01 olarak elde edilerek uygulanmıştır.



Şekil 4.3. NEDC tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları

Son olarak simülasyonda aracın PID tipi denetim organı ile hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Burada da PID bloğu paralel PID denetim için düzenlenerek "PID Tune" ile parametre ayarı yapılmıştır. PID bloğu içindeki otomatik ayar seçeneği ile optimize edilen K_p, Ki ve K_d parametrelerinin değerler sırasıyla 5,342, 1,674, -0,428 elde edilerek uygulanmıştır. PID denetim organı ile çalıştırılan kapalı döngü sistemin simülasyon sonuçları şekil 4.4'te sunulmuştur.

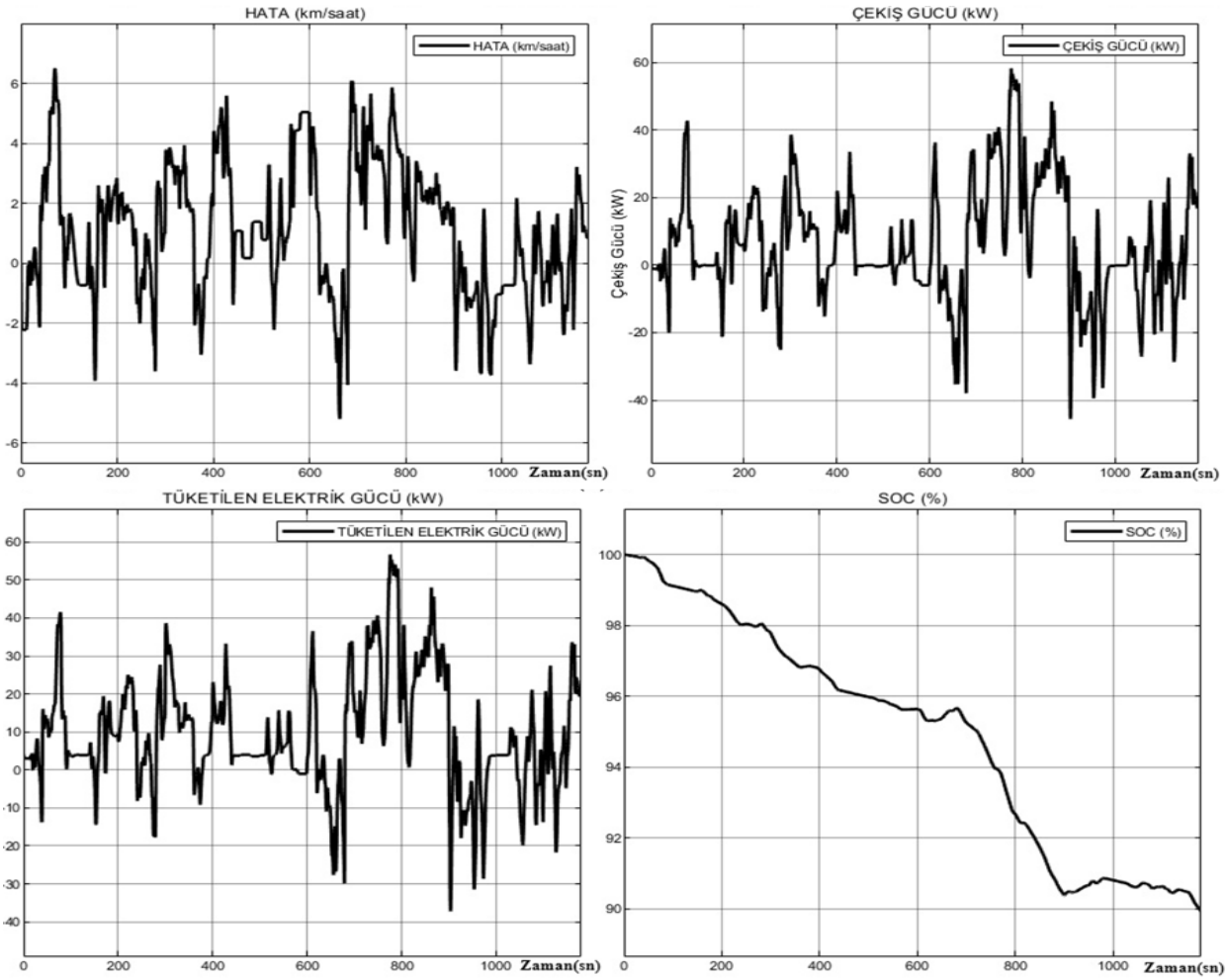


Şekil 4.4. NEDC tipi sürüş çevriminde PID denetim organı ile hız denetimi sonuçları

4.1.2 WLTP Sürüş Çevrimi için PID Kontrolcü Denetimi

4.1.1'de parçalı olarak denenmiş olan PID kontrolcü kombinasyonları içerisinde en verimli sonuç PID kontrolcü adına elde edilmiştir ancak elde edilen parametre değerlerinin WLTP sürüş çevrimi ile nasıl çalıştığını görebilmek için uygulama bahsi geçen sürüş çevrimi için de tekrarlanmıştır.

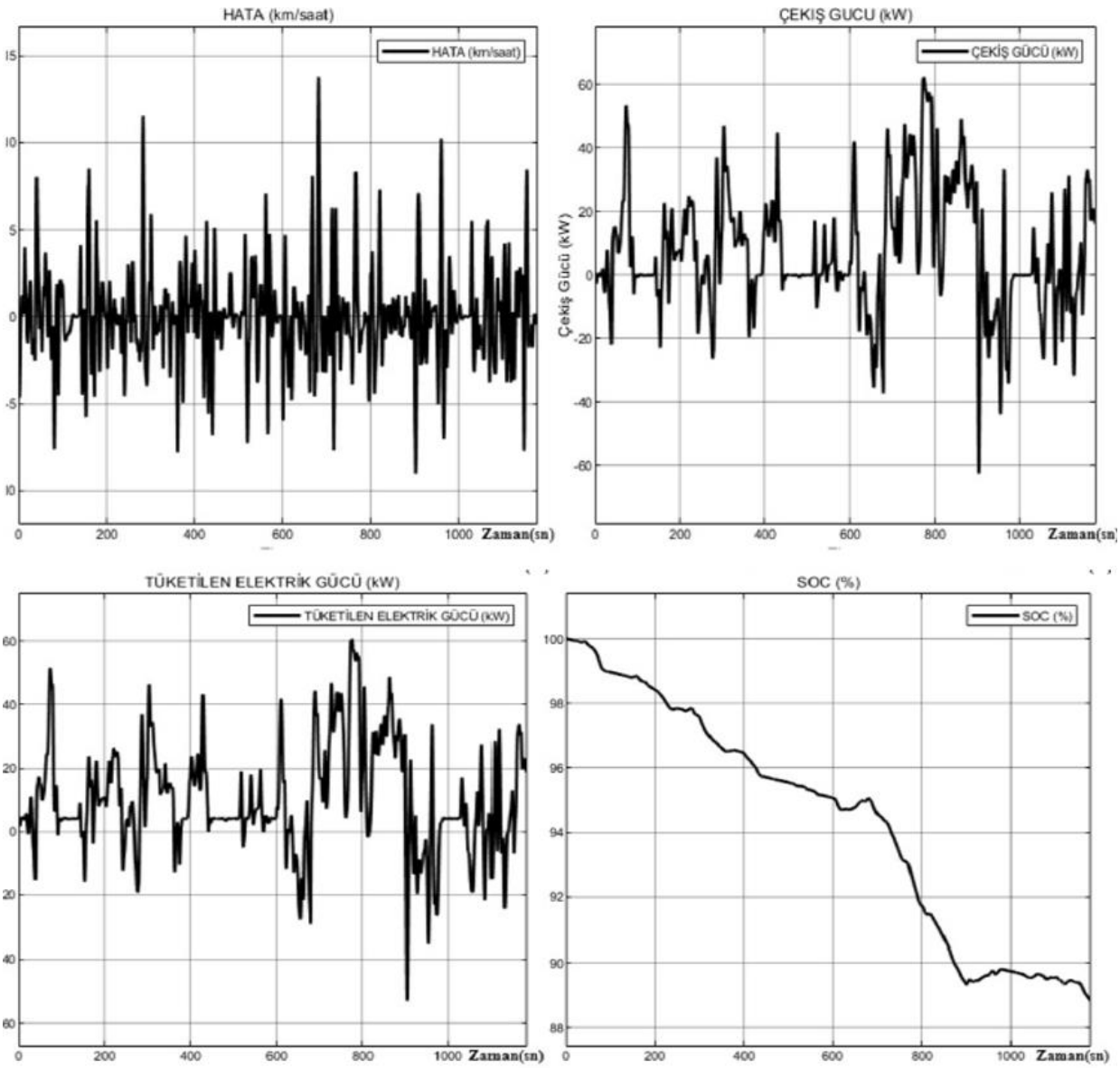
Oransal (P) kontrolcü için başlangıç değeri 6.2155 olarak alınmıştır. Bu değer NEDC sürüş çevriminin oransal kontrolcü uygulamasındaki optimize edilmiş olan değerdir. Bu değerin optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. WLTP tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları

Ardından parametre optimizasyonu için PID bloğunda bulunan otomatik ayar uygulanmış ve optimize edilen K_p parametresi için 6,21543 elde edilmiştir ve değerler arasında büyük bir farklılık olmadığı gözlenmiştir.

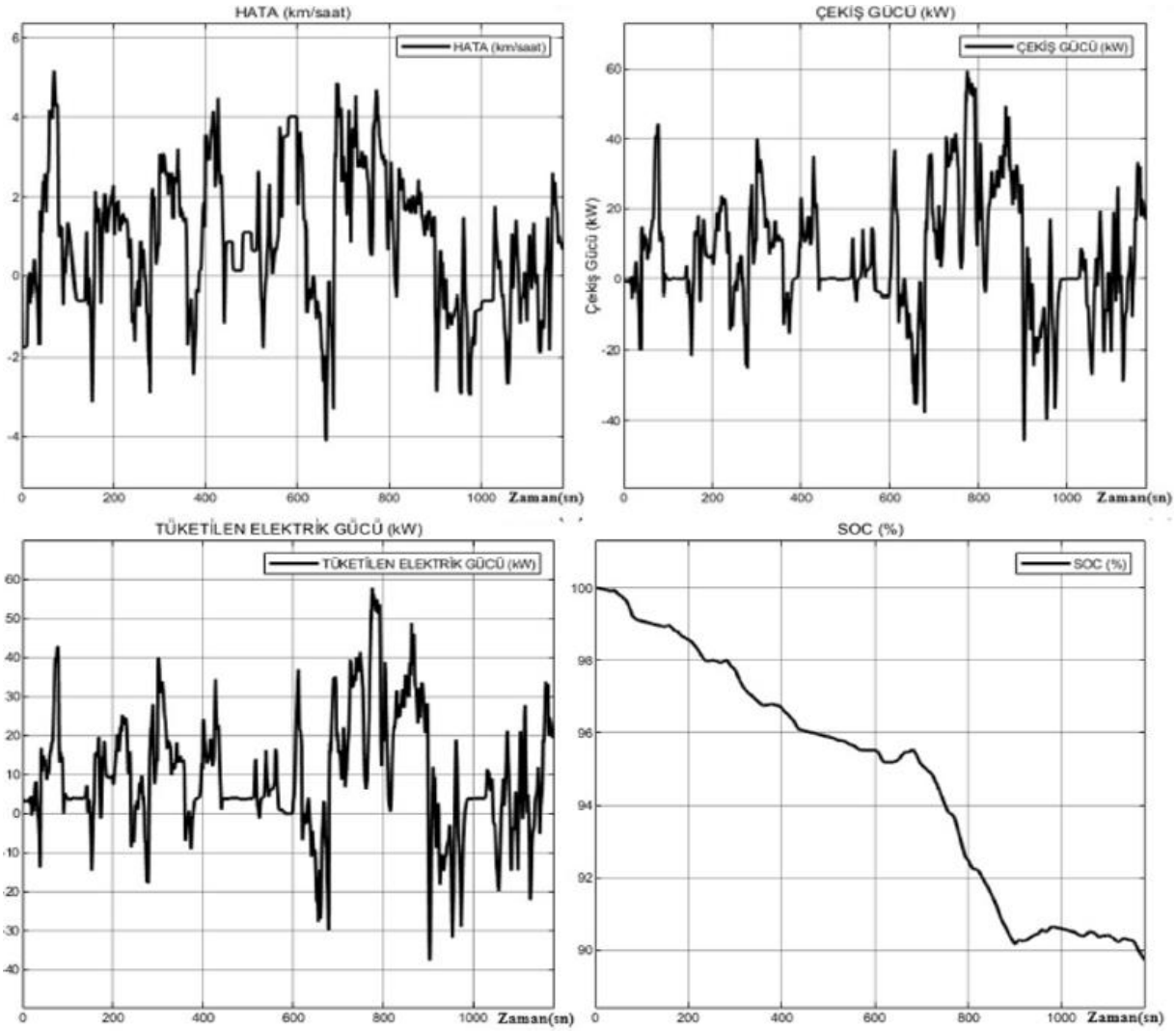
Sonrasında WLTP sürüş çevrimi için PI kontrolcü denetimi uygulanmış ve NEDC sürüş çevrimi için parametre optimizasyonu sonucunda elde edilmiş olan değerler K_p ve K_i değerleri 1,40888, 0,99124 işleme alınmıştır. Bu değerlerin optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. WLTP tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları

K_p ve K_i parametre değerlerinin PID tune optimizasyonu ile elde edilen değerler sırası ile 1,4112 ve 1,02588 olmuştur ve değerler arasında büyük bir fark olmadığı gözlenmiştir.

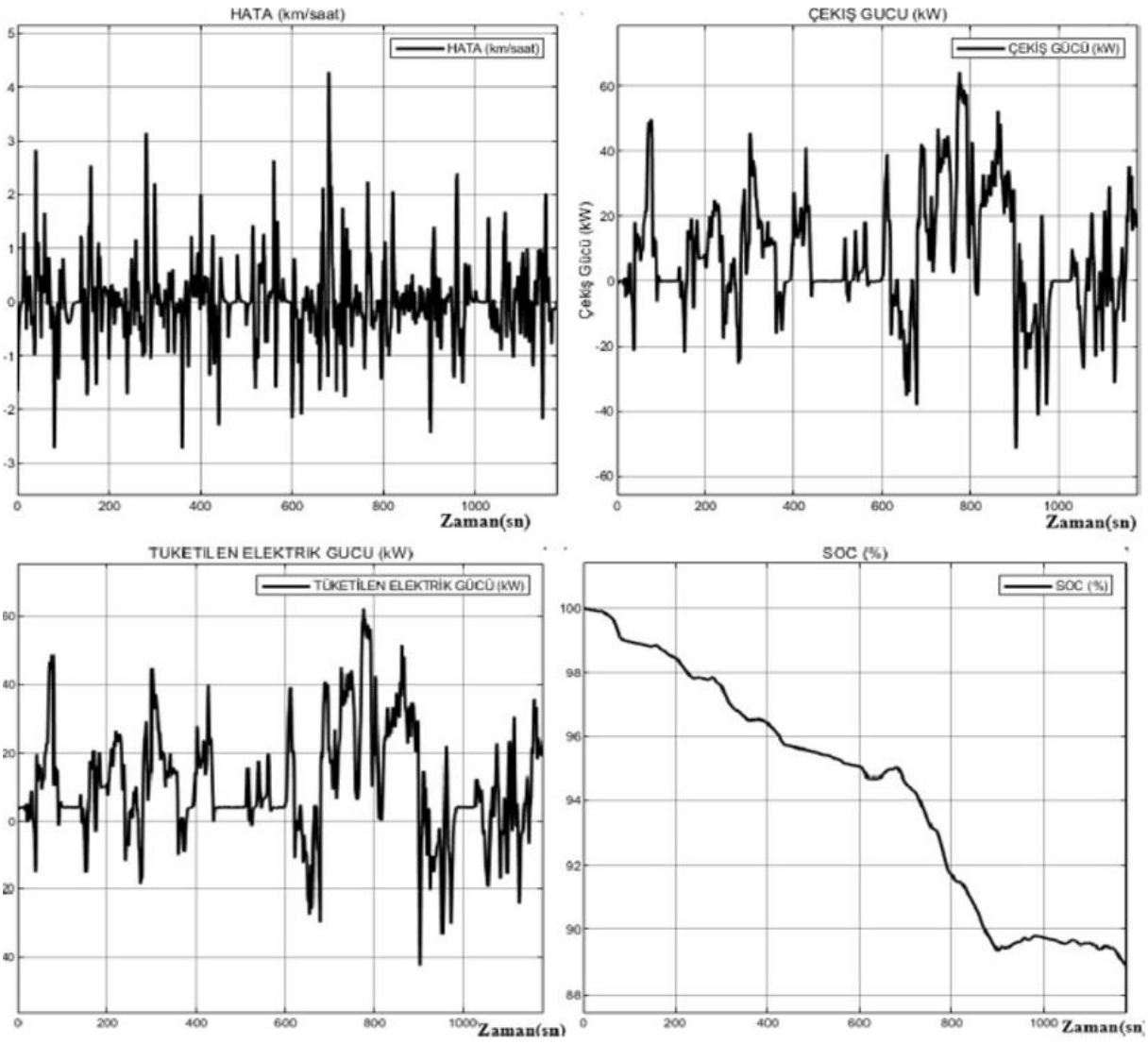
WLTP sürüş çevrimi için PD kontrolcü denetimi uygulanmış ve NEDC sürüş çevrimi için parametre optimizasyonu sonucunda elde edilmiş olan değerler K_p ve K_d değerleri 8,22, 1,01 işleme alınmıştır. Parametrelerin optimizasyonu sonrasında elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. WLTP tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları

K_p ve K_d parametrelerinin PID tune optimizasyonu ile elde edilen değerler sırası ile 7,8248 ve 0.01 olmuştur ve türev kazancının daha fazla değiştiği gözlenmiştir.

Son olarak da deneme PID bloğu için yapılmış ve kontrolcü parametrelerinin başlangıç değerleri için NEDC sürüş çevrimi için optimize edilen parametre değerleri kullanılmıştır, bunlar sırası ile 5,342, 1,674 ve -0,428'dir. Bu değerlerin optimizasyonu sonrasında elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.8'de gösterilmiştir.



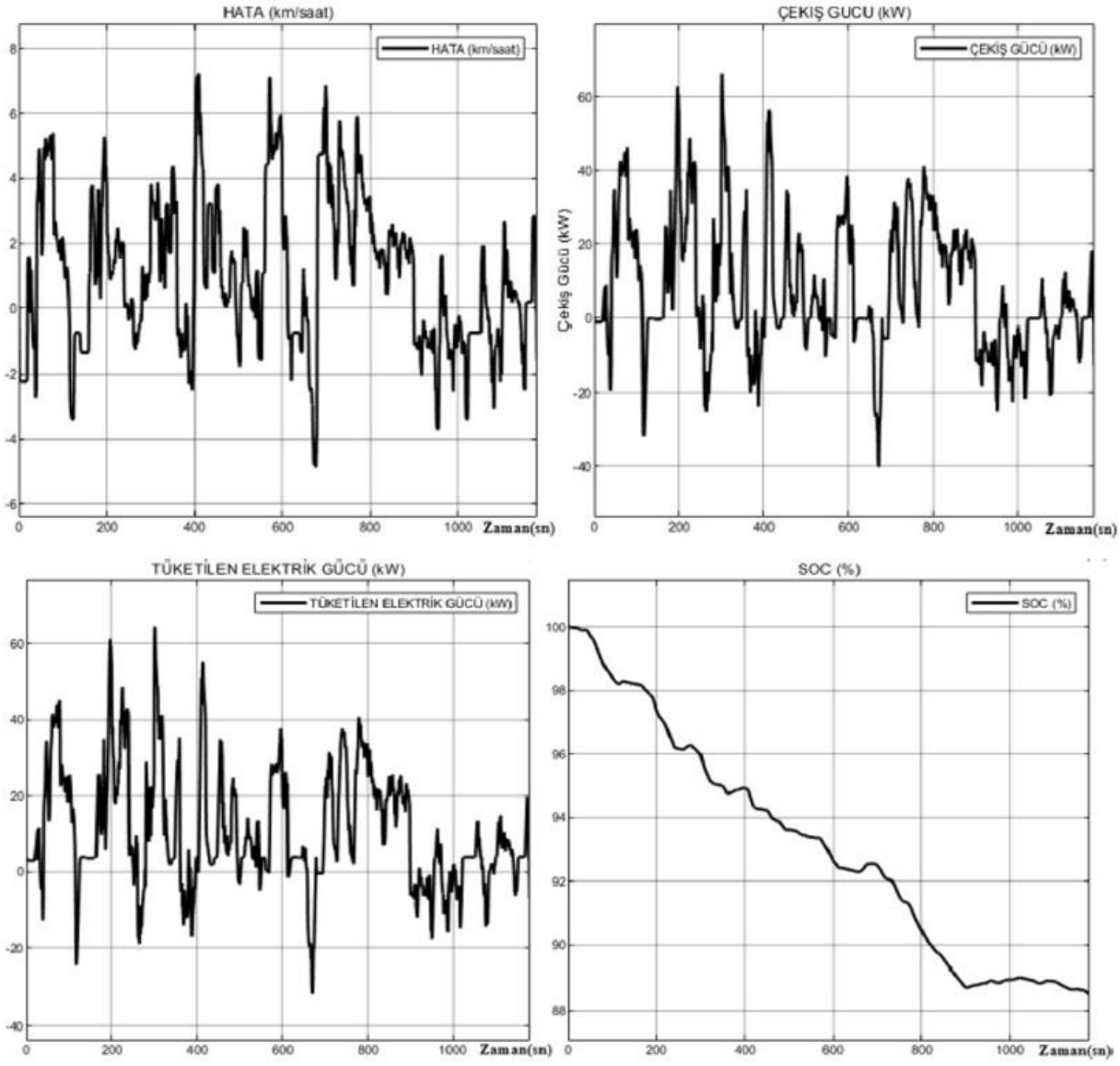
Şekil 4.8. WLTP tipi sürüş çevriminde PID etki ile hız denetimi sonuçları

PID bloğu içindeki otomatik ayar seçeneği ile optimize edilen K_p, K_i ve K_d parametreleri için değerler sırası ile 6,790, 2,721 ve -0,714 elde edilmiştir.

4.1.3 FTP75 Sürüş Çevrimi için PID Kontrolcü Denetimi

4.1.1 ve 4.1.2'de parçalı olarak denenmiş olan PID kontrolcü kombinasyonları içerisinde en verimli sonuç PID kontrolcü adına elde edilmiştir ancak elde edilen parametre değerlerinin FTP75 sürüş çevrimi ile nasıl çalıştığını görebilmek için uygulama bahsi geçen sürüş çevrimi için de tekrarlanmıştır.

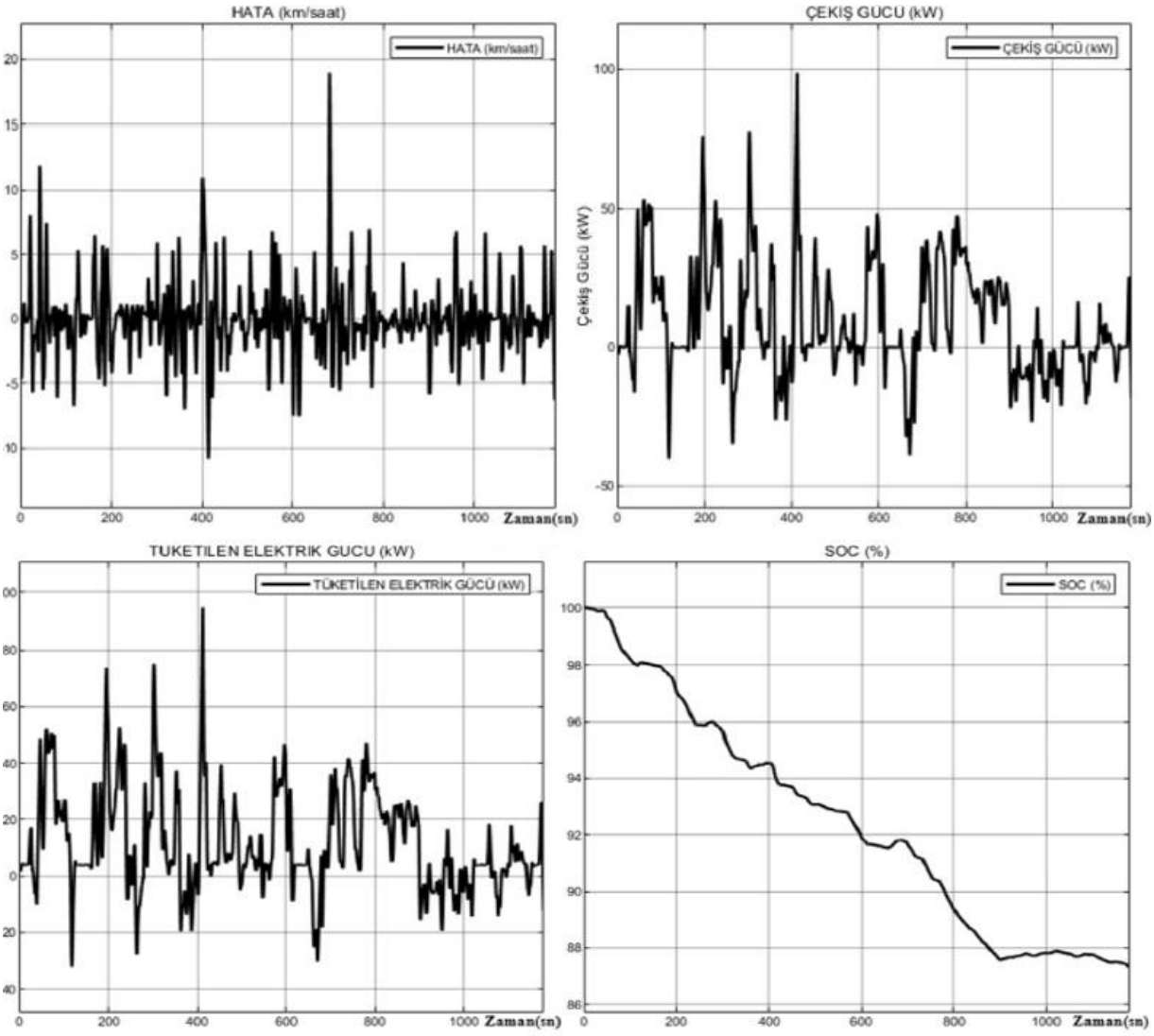
Oransal (P) kontrolcü için başlangıç değeri 6,21543 olarak alınmıştır. Bu değer WLTP sürüş çevriminin oransal kontrolcü uygulamasındaki optimize edilmiş olan değerdir. Bu değerin optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. FTP75 tipi sürüş çevriminde P etki ile hız denetimi sonuçları

Parametre optimizasyonu ile K_p parametresi için 6,21545 elde edilmiştir ve değerler arasında büyük bir farklılık olmadığı gözlenmiştir.

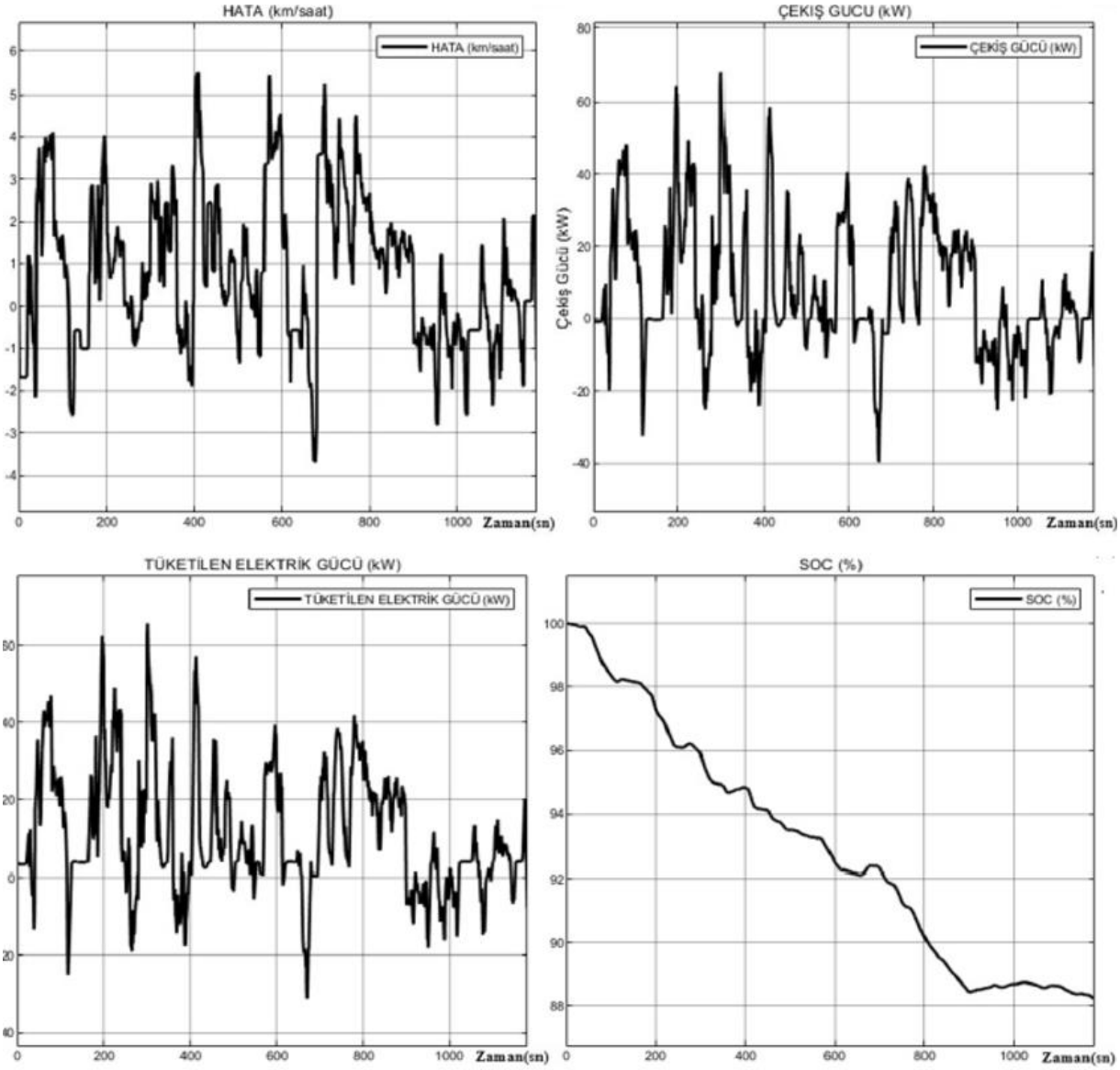
Sonrasında FTP75 sürüş çevrimi için PI kontrolcü denetimi uygulanmış ve WLTP sürüş çevrimi için parametre optimizasyonu sonucunda elde edilmiş olan değerler K_p ve K_i değerleri 1,4112, 1,02588 işleme alınmıştır. Bunların optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. FTP75 tipi sürüş çevriminde PI etki ile hız denetimi sonuçları

K_p ve K_i parametre optimizasyonu ile elde edilen değerler sırası ile 1,3877 ve 1,0406 olmuştur ve değerler arasında büyük farklılık olmadığı gözlenmiştir.

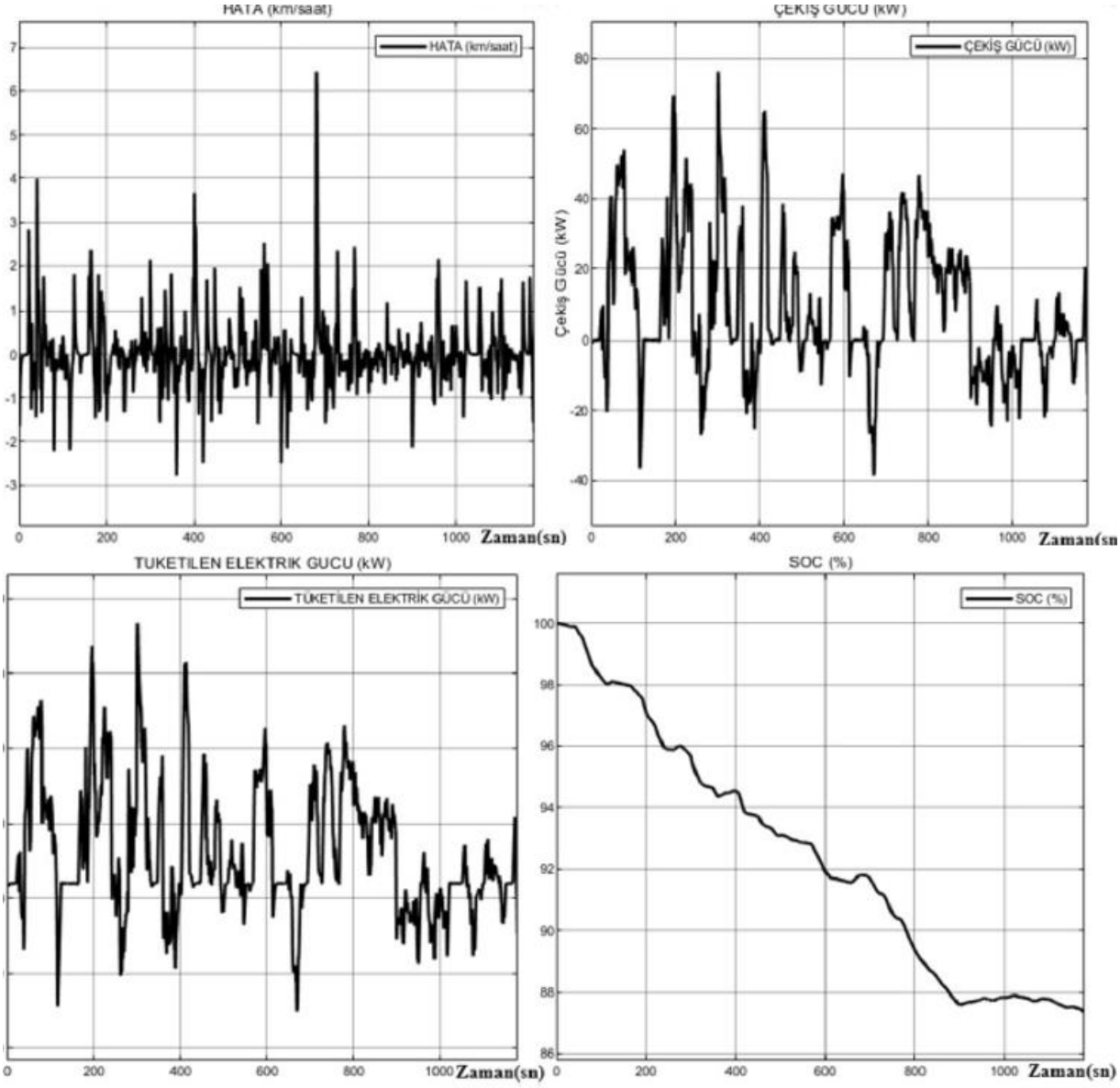
FTP75 sürüş çevrimi için PD kontrolcü denetimi uygulanmış ve WLTP sürüş çevrimi için parametre optimizasyonu sonucunda elde edilmiş olan değerler K_p ve K_d değerleri 7,8248, 0,01 işleme alınmıştır. Bunun sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. FTP75 tipi sürüş çevriminde PD etki ile hız denetimi sonuçları

K_p ve K_d parametre optimizasyonu ile elde edilen değerler sırası ile 8,19356 ve 0,01 olmuştur ve değerler arasında büyük farklılık gözlenmemiştir.

Son olarak da deneme PID bloğu için yapılmış ve kontrolcü parametrelerinin başlangıç değerlerinde WLTP sürüş çevrimi için optimize edilen parametre değerleri kullanılmıştır, bunlar sırası ile 5,5940, 1,8357 ve -0,42874'tür. Bu parametrelerin optimizasyonu sonrasında elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. FTP75 tipi sürüş çevriminde PID etki ile hız denetimi sonuçları

PID bloğu içindeki otomatik ayar seçeneği ile optimize edilen K_p, K_i ve K_d parametreleri için değerler sırası ile 5,24363, 1,75923 ve -0,82740 elde edilmiştir ve yine büyük farklılık gözlenmemiştir.

PID için denklem 2.4 içerisinde de görülen N parametresi için yapılan parametre ayarları esnasında gözlenmiş olan değer 3 sürüş çevrimi için 1,6596 olmuştur.

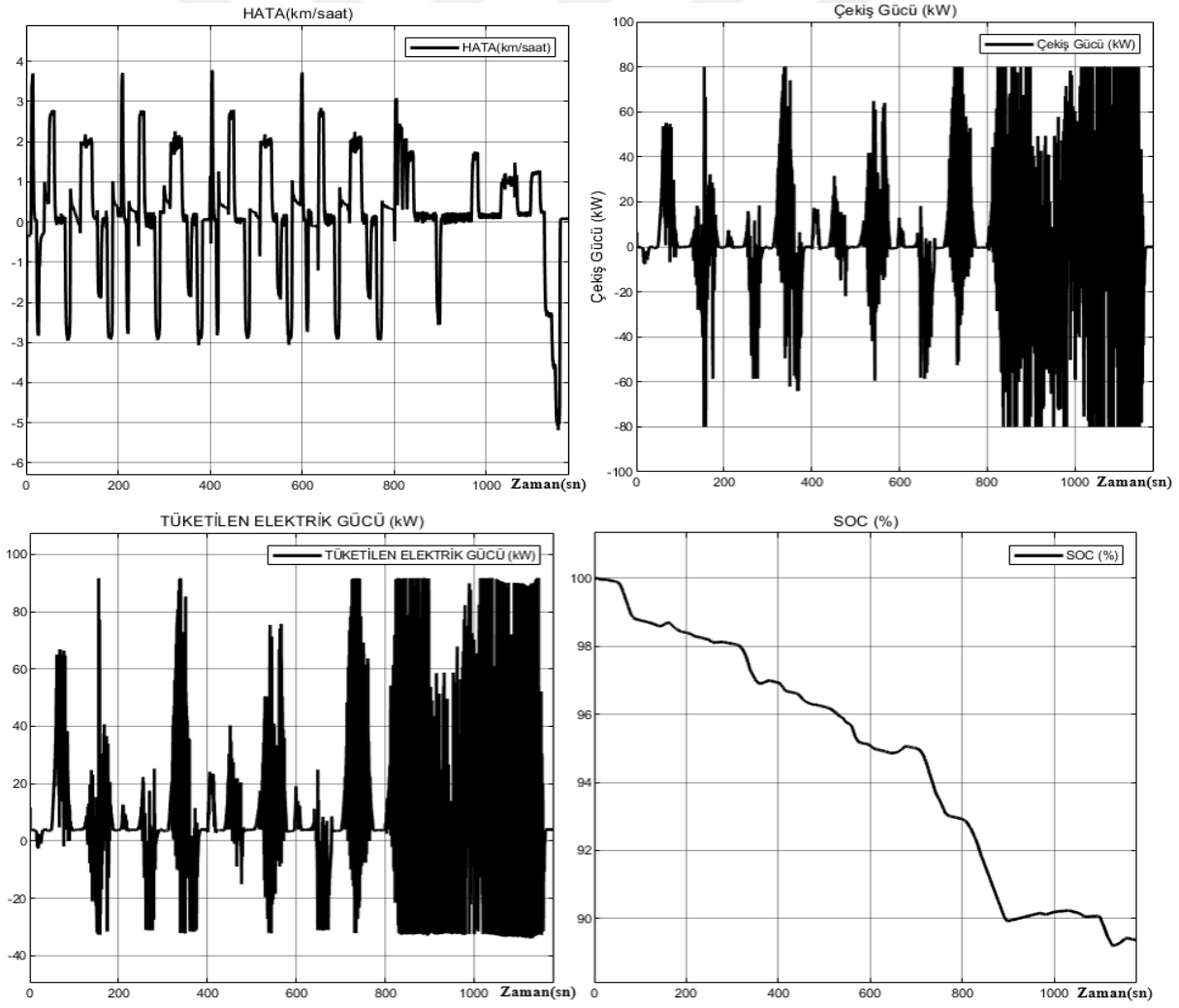
4.2 MRAC Kontrolcü Denetimi

Çalışmada hız denetiminde denetim organı olarak "Model Referans Uyarlanabilir Kontrolü" de kullanılmıştır. Bu denetim organının direkt ve indirekt olan iki türü de denetleyici olarak her bir sürüş tipi için kullanılmıştır.

4.2.1 NEDC Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi

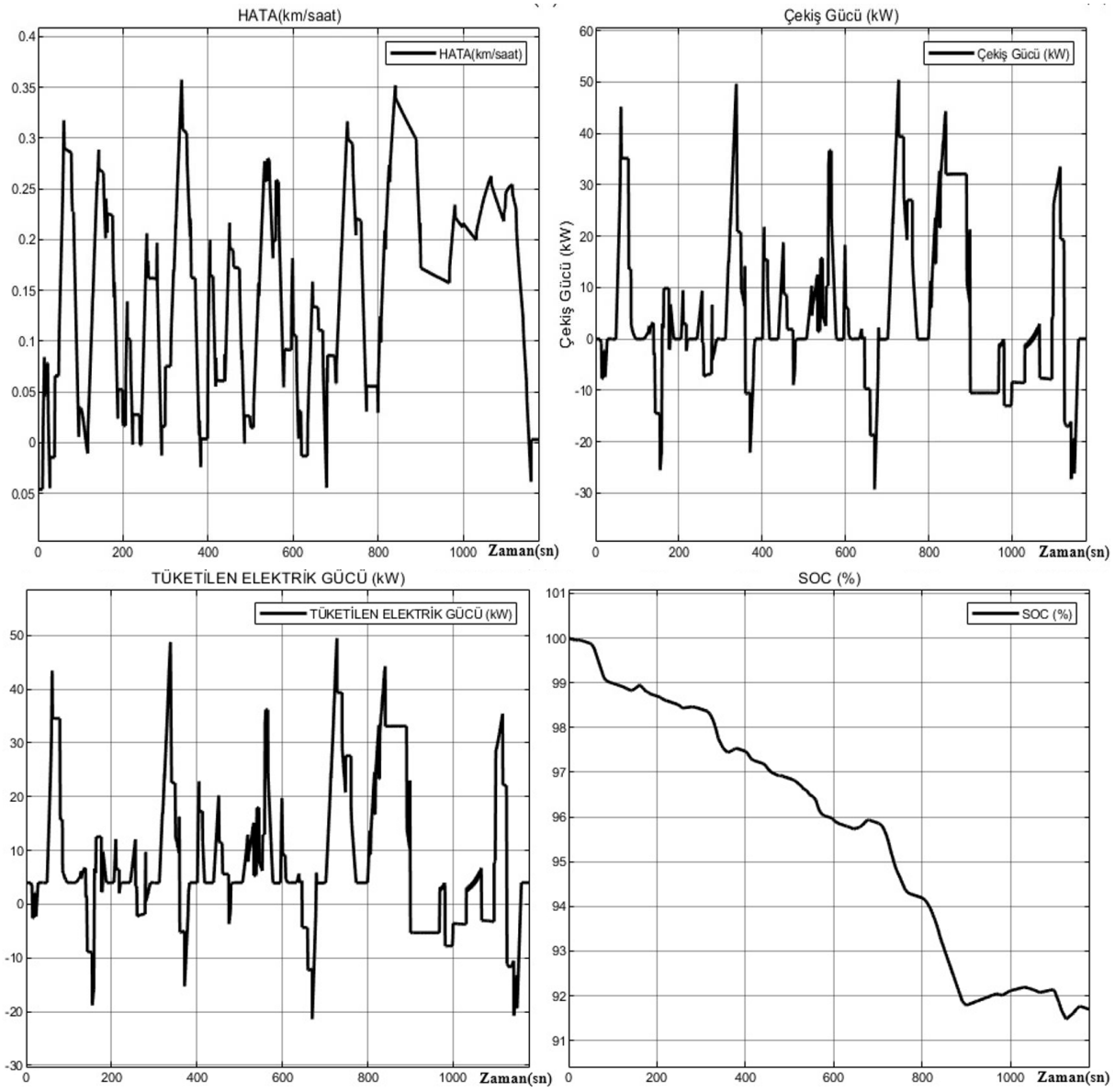
Aracın hız denetiminde direkt ve indirekt MRAC denetimin uygulanmasında sistem parametreleri MATLAB/Simulink "Paramater Estimator" toolbox kullanılarak parametre kestirimi yapılmış ve sistem bu verilerle çalıştırılmıştır.

NEDC sürüş çevrimi için direkt MRAC denetimiyle elde edilen sonuçlar şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. NEDC tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları

NEDC sürüş çevrimi için indirekt MRAC denetimiyle elde edilen sonuçlar şekil 4.14'te gösterilmiştir.

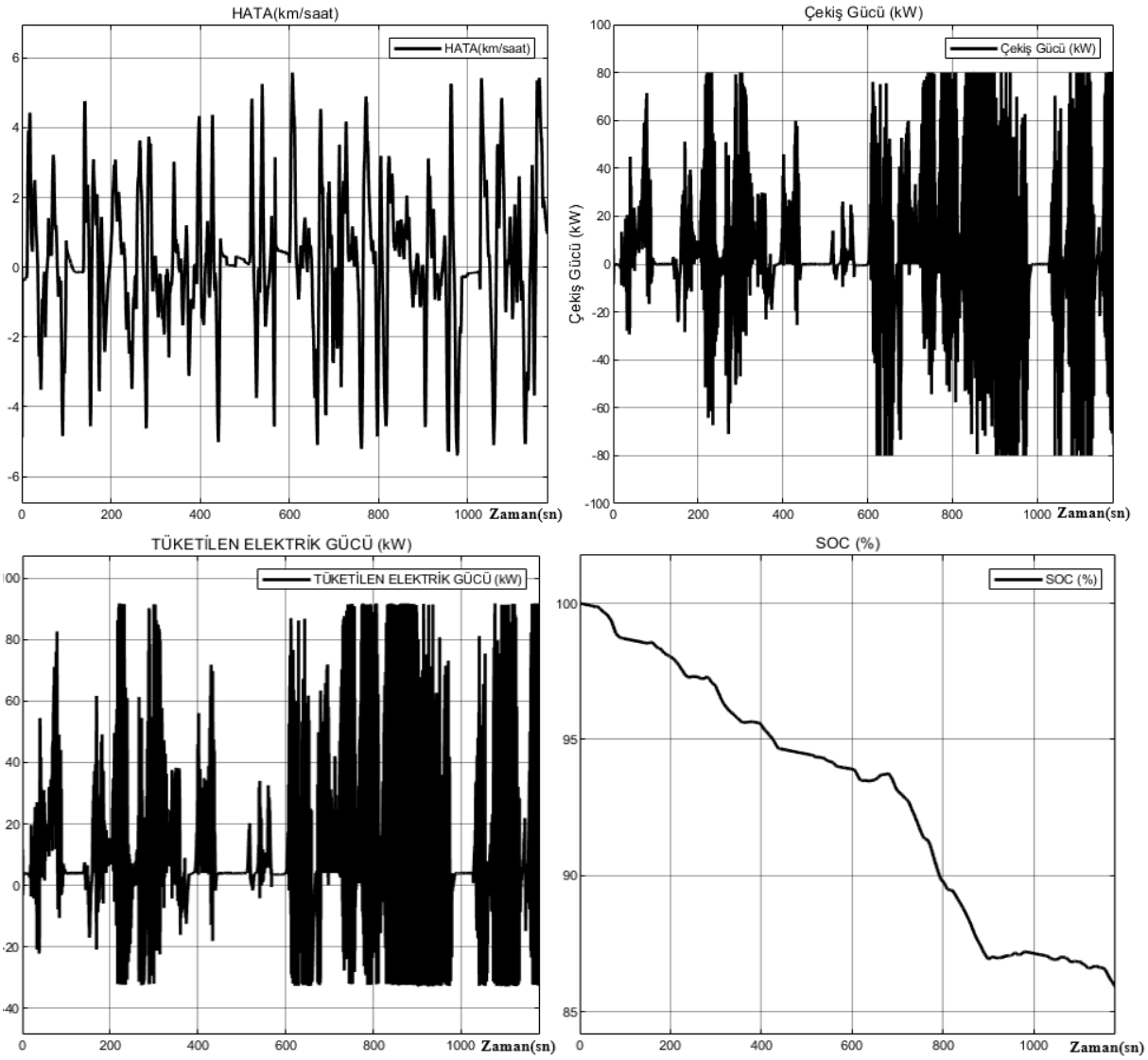


Şekil 4.14. NEDC tipi sürüş çevriminde indirekt MPAC ile hız denetimi sonuçları

Optimize edilen parametrelere göre alınan çıktılar içerisinde görüldüğü gibi şarj durumu ve hız takibi başarımı için en verimli sonuç indirekt MRAC kontrolcü uygulaması ile elde edilmiştir.

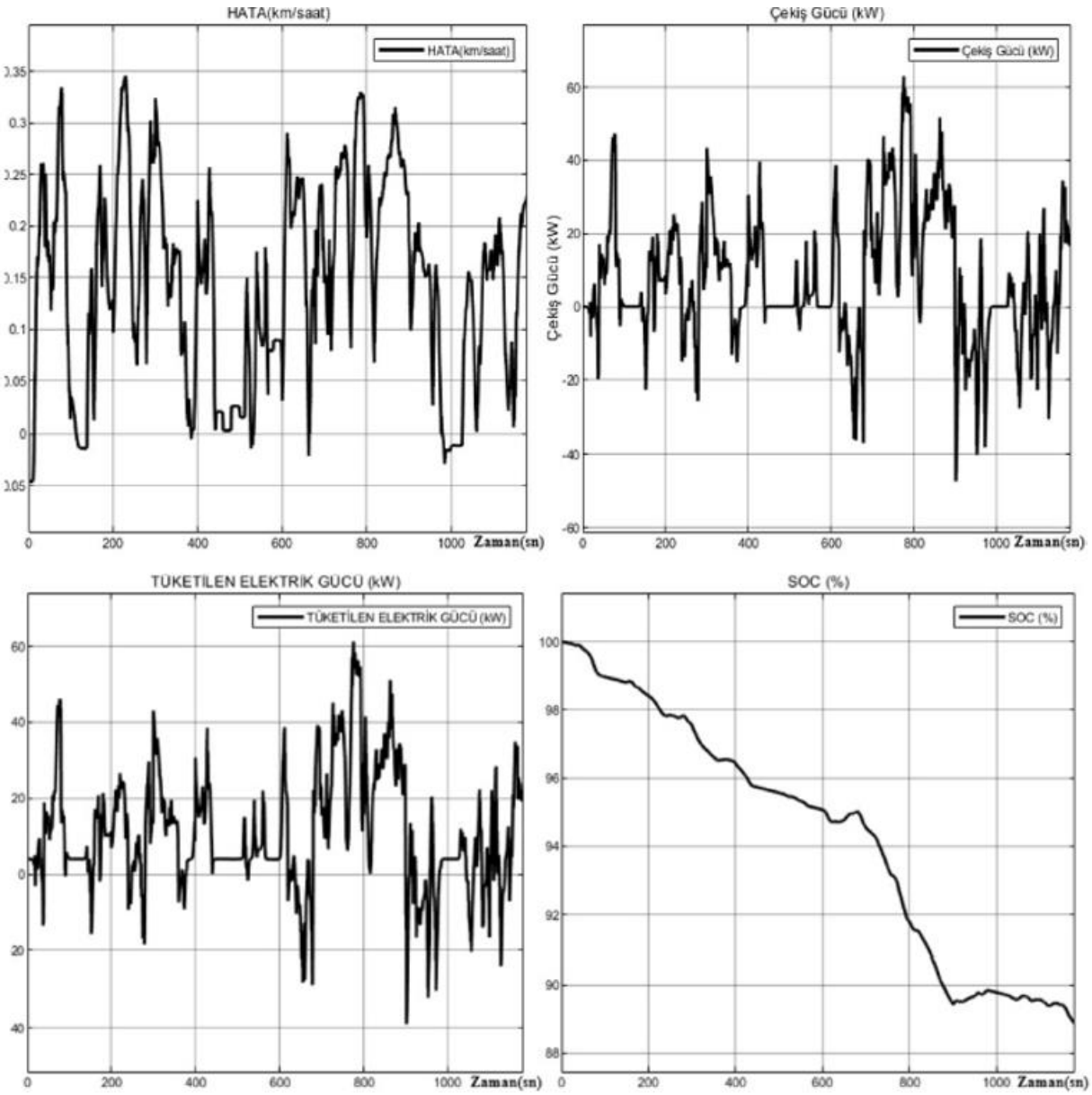
4.2.2 WLTP Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi

İkinci değerlendirme, direkt MRAC için WLTP sürüş çevrimi ile yapılmış ve parametrelerin NEDC sürüş çevrimi için optimize edilen değerleri ile uygulama yapılmıştır ve bu değerlerin optimizasyonu sonrasında elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. WLTP tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları

Sonrasındaki değerlendirme, indirekt MRAC uygulaması için WLTP sürüş çevrimi ile yapılmış ve parametrelerin NEDC sürüş çevriminde indirekt MRAC adına optimize edilen parametreleri ile uygulama yapılmıştır ve bu değerlerin de WLTP sürüş çevrimi için optimize edilmesi sonrasında elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.16'da gösterilmiştir.

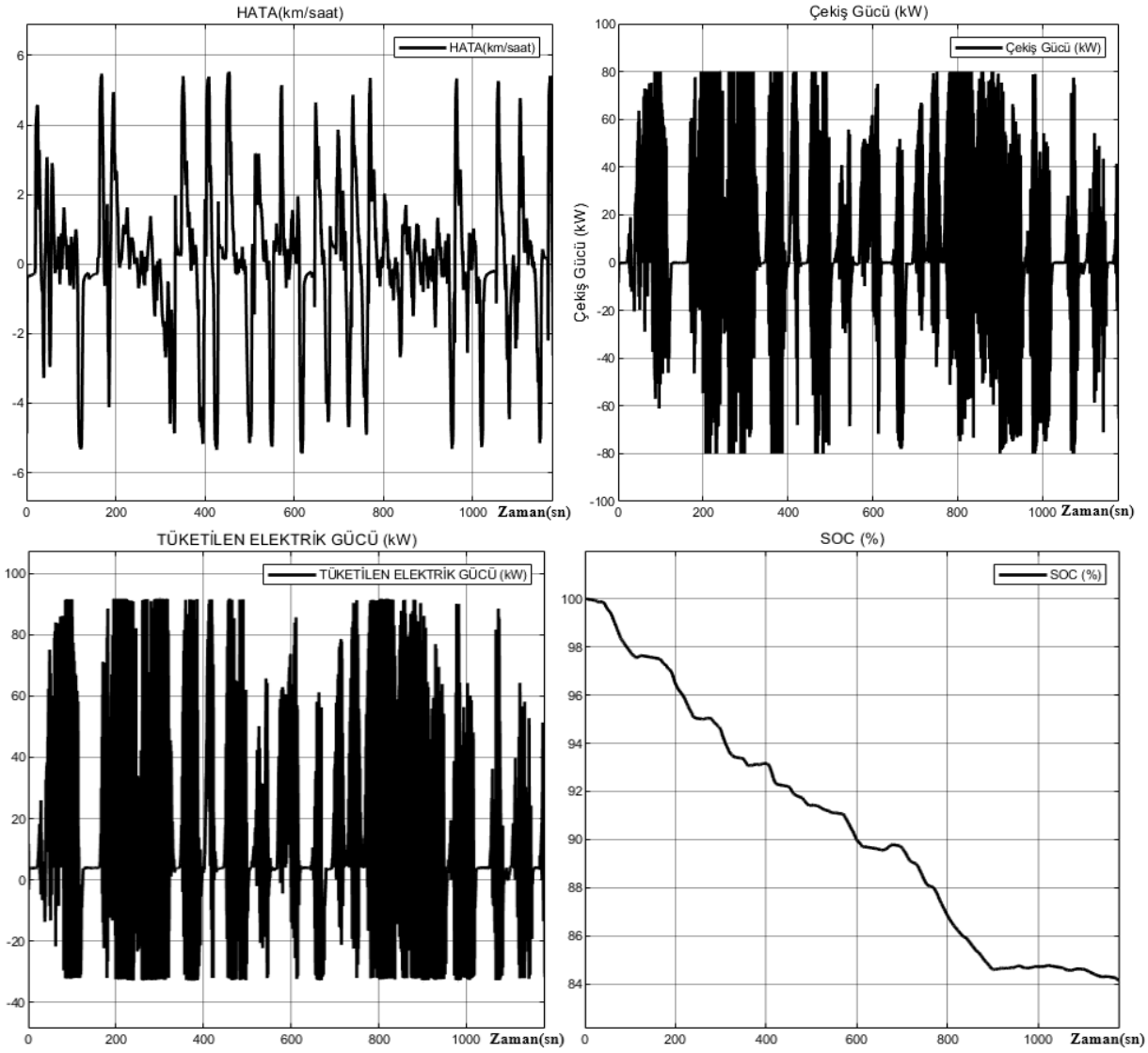


Şekil 4.16. WLTP tipi sürüş çevriminde indirekt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları

Optimize edilen parametrelere göre alınan çıktılar içerisinde görüldüğü gibi şarj durumu ve hız takibi başarımı adına en verimli sonuç NEDC için olduğu gibi WLTP sürüş çevriminde de indirekt MRAC kontrolcü uygulaması ile elde edilmiştir.

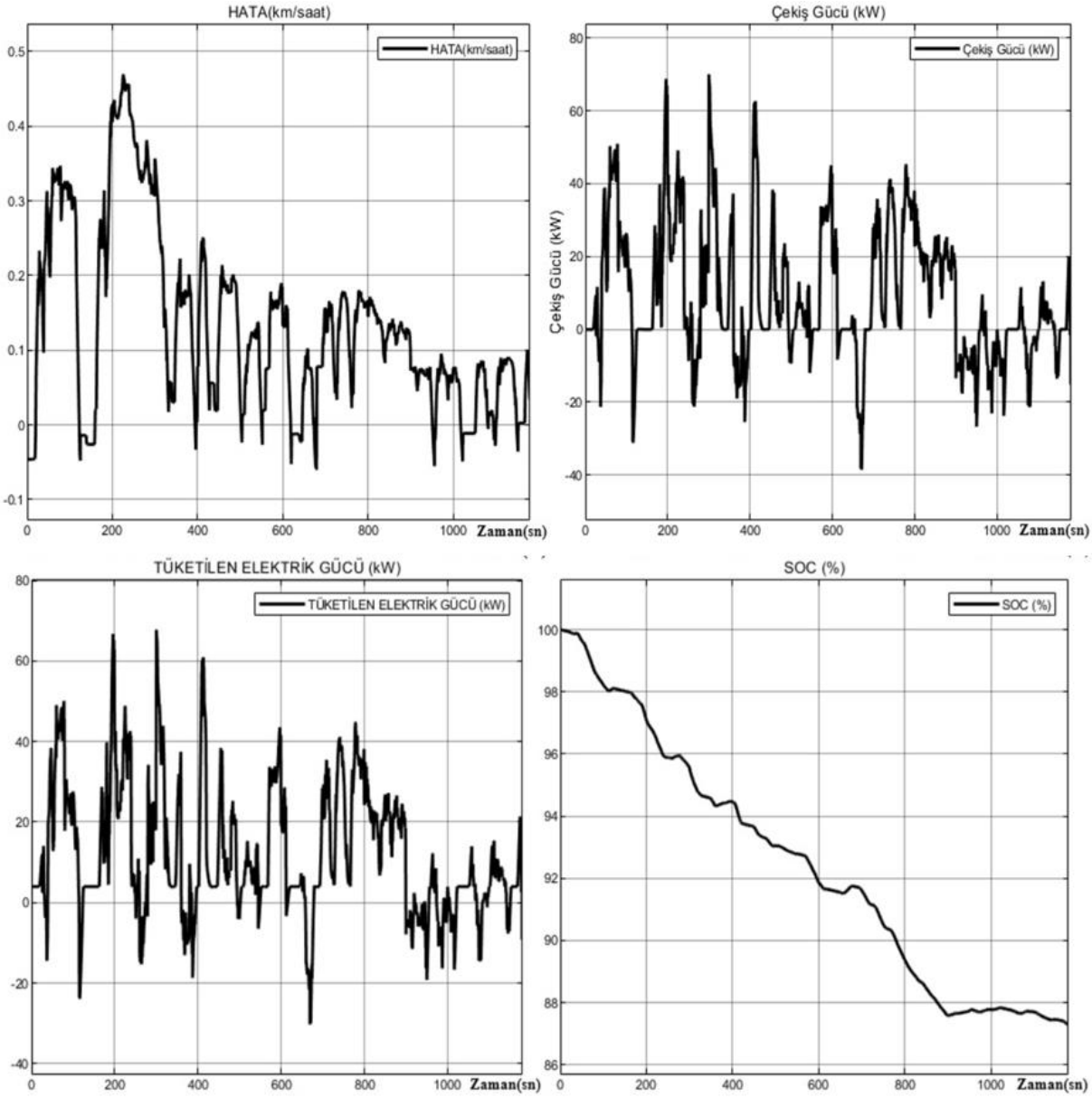
4.2.3 FTP75 Sürüş Çevrimi için MRAC Kontrolcü Denetimi

Son değerlendirme, direkt MRAC için FTP-75 sürüş çevrimi ile yapılmış ve parametrelerin WLTP sürüş çevrimi için optimize edilen değerlerinin FTP-75 sürüş çevrimi için optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. FTP75 tipi sürüş çevriminde direkt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları

Sonrasındaki değerlendirme, indirekt MRAC uygulaması için FTP75 sürüş çevrimi ile yapılmış ve parametrelerin WLTP sürüş çevriminde indirekt MRAC adına optimize edilen parametreleri ile uygulama yapılmıştır. Bu değerlerin de FTP-75 sürüş çevrimi için optimizasyonu sonucunda elde edilen çıktı grafikleri şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. FTP75 tipi sürüş çevriminde indirekt MRAC denetim organı ile hız denetimi sonuçları

WLTP ve NEDC sürüş çevrimlerinde de görüldüğü gibi hız takibi, şarj durumu adına en verimli sonuç FTP75 sürüş çevrimi için indirekt MRAC kontrolcü ile elde edilmiştir.

Sonuçlara göre hız takibi için en az hata değeri indirekt MRAC denetleme sonuçlarında gözlenmiştir.

Nissan Leaf (ilk nesil) aracı için paylaşılan en yüksek menzil değeri 110 km iken sürüş çevrimleri için elde edilen 10,97 km ve ortalama SOC değerleri ile değerlendirildiğinde yaklaşık 109,6 km menzil NEDC'de, 93,6 km menzil WLTP'de, 88,63 km menzil FT75 sürüş

çevriminde elde edilmiştir. Ayrıca modelleme içerisinde de belirtildiği gibi direnç kuvvetleri çalışmaya dahil edildiğinde bu sonuçlar elde edilebilmiştir.

4.3. PID ve MRAC Kontrolcü Denetimleri ile Araç Şarj Durumu

PID ve MRAC kontrolcüler için parametre optimizasyonları ile sürüş çevrim takipleri arasında, P, PI, PD ve PID denetim organları ile yapılan hız denetiminde en verimli en hız takibi başarımı sonucu PID denetim organı ile elde edilmiştir. MRAC denetleyicisi, referans hız takibi açısından PID temelli denetleyicilere kıyasla daha yüksek başarı göstermiştir ancak bu hassas hız takibi, sistemin daha fazla enerji tüketmesine neden olmuş ve sonuç olarak MRAC altında elde edilen SOC değerleri, P, PI, PD ve PID denetleyicilere kıyasla daha düşük kalmıştır.

Yapılan kontrolcü gözlemleri adına sistemin SOC gözlemi PID ve MRAC ile hız kontrolü, farklı sürüş çevrimleri için sağlanarak karşılaştırılmıştır. Parametre optimizasyonu sağlanmış olan PID kontrolcü ve MRAC kontrolcü için elde edilen SOC ve maksimum hata çıktıları çizelge 4.1 içerisinde NEDC sürüş çevrimi için paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1. NEDC'de PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları

Kontrolcü	SOC (%)	Maksimum Hata (km/saat)
P	92,93	6,96
PI	92,03	17,44
PD	92,69	5,26
PID	91,97	6,95
MRAC (Direkt)	89,36	5,053
MRAC (İndirekt)	91,79	0,36

Ardından SOC gözlemi için WLTP sürüş çevrimi ile devam edilmiş ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.2 içerisinde paylaşılmıştır.

Çizelge 4.2. WLTP'de PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları

Kontrolcü	SOC (%)	Maksimum Hata (km/saat)
P	89,96	6,51
PI	88,93	13,78
PD	89,71	5,18
PID	88,91	4,28
MRAC (Direkt)	86,69	5,58
MRAC (İndirekt)	88,52	0,34

Son olarak FTP75 sürüş çevrimi için SOC ve maksimum hata değerleri çizelge 4.3 içerisinde paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3. FTP75'te PID ve MRAC ile hız kontrolleri sonucunda elde edilen SOC çıktıları

Kontrolcü	SOC (%)	Maksimum Hata (km/saat)
P	89,96	7,23
PI	88,93	18,97
PD	89,71	5,49
PID	88,91	6,34
MRAC (Direkt)	85,69	5,54
MRAC (İndirekt)	88,52	0,42

SOC çıktılarındaki düşük değerler aslında sürüş çevrimi takibinin daha doğru yapılabildiğini gösterebildiği gibi sürüş çevriminde paylaşılan hız değerlerinden daha yüksek takip yapılmasından kaynaklı da meydana gelebilmektedir ancak indirekt MRAC ve PID kontrolcü denetimleri için daha verimli sonuçlar elde edildiği gözlenmiş olduğu için genel hatlarıyla SOC değerlerinde yaklaşık %94 sürüş çevrimleri için ortalama kat edilen 10,97 km yol için elde edilen sayısal değer olmuştur.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında elektrikli bir aracın hız denetimi P, PI,PD, PID ve MRAC denetim organları kullanılarak incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, her iki kontrol yönteminin de hız denetiminde etkili olduğu görülmüştür. PID kontrolün basitliği ve düşük hesaplama maliyeti gibi avantajlarına rağmen, değişken sürüş koşullarında yetersiz kalabileceği gözlemlenmiştir. Bu gözlem özellikle PID denetleme organı denetimi sonucunda elde edilen hata değerlerinin karşılaştırması ile gerçekleştirilmiştir. MRAC kontrolü ise sistemin dinamik değişimlerine uyum sağlama yeteneği ile öne çıkmış, daha stabil ve hız takibi için verimli bir performans sunmuştur. Bu gözlem ise sürüş çevrimlerinin değişimi ve buna göre hız takibi başarımının özellikle indirekt MRAC denetiminde hata değerlerindeki düşüş ile gözlenmiştir.

Çalışmada, PID denetleyiciler (P, PI, PD, PID) değişken rüzgâr hızı, yol eğimi ve değişen sürüş çevrimleri için makul bir hız takibi sağladı. Simulink'te kullanılan direk MRAC bloğu PID'den biraz daha iyi performans gösterdi. İndirekt MRAC yöntemi ile değişken sistem dinamiklerine daha iyi uyum sağlandığı ve hız takibinde daha düşük hata değerinin elde edildiği görüldü.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, gelecekteki araştırmalarda PID ve MRAC yöntemlerinin kombinasyonu üzerinde durulabilir. Bu hibrit kontrol sistemlerinin, her iki yöntemin avantajlarını birleştirerek daha verimli ve esnek bir araç kontrol mekanizması oluşturabileceği düşünülmektedir. Araçlar için enerji yönetimi ve batarya ömrünü optimize etmeye yönelik ek stratejilerin uygulanması, sistemin genel verimliliğini artıracaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, MRAC'in gerçek zamanlı parametre uyarlamalarındaki başarısını daha da iyileştirmek ve batarya yönetim sistemlerinin etkinliğini artırmak adına yenilikçi çözümler geliştirmeye odaklanabilir.

KAYNAKÇA

Addenbrooke, G. L. (1891). Aluminium, uses and applications of. *RSA Journal, 40*, 661.

Altun, Ş. (2012). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi algoritması tasarımı ve uygulaması* (Master's thesis, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü).

Anderson, B. D., Moore, J. B. (2007). *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation.

Anderson, C. D., Anderson, J. (2010). *Electric and Hybrid Cars: A History*. McFarland.

Antony, A. P., Varghese, E. (2016, Mart). Comparison of performance indices of PID controller with different tuning methods. In 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT) (pp. 1-6). IEEE.

Apkarian, P., Noll, D. (2017). The H∞ control problem is solved. *Aerospace Lab, (13)*, 1.

Aström, K. J., Wittenmark, B. (2013). *Adaptive control (2nd ed.).* Dover Publications.

Audi. (2024). *WLTP: Yeni dönemin standart ölçüm yöntemi*. Audi. Erişildiği adres: https://www.audi.com.tr/tr/wltp/

Aydoğan, F. (2019). *Elektrikli araç tahrik sistemlerinde kullanılan SMSM'nin minimum kayıp kontrolü*. [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Polen.

Balakrishnan, V., Dinh, T., Phan, H. P., Dao, D. V., & Nguyen, N. T. (2018). A generalized analytical model for Joule heating of segmented wires. *Journal of Heat Transfer, 140*(7), 072001.

Bascetta, L., Magnani, G., Rocco, P. (2008). Velocity estimation: Assessing the performance of non-model-based techniques. *IEEE Transactions on Control Systems Technology, 17*(2), 424-433.

Bakker, S., Maat, K., Van Wee, B. (2014). Stakeholders interests, expectations, and strategies regarding the development and implementation of electric vehicles: The case of the Netherlands. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 66,* 52-64.

Barkenbus, J. N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy policy, 38*(2), 762-769.

Beaty, H. W., Kirtley, J. L. (1998). *Electric motor handbook.* McGraw-Hill Professional.

Bennett, S. (1993). Development of the PID controller. *IEEE Control Systems Magazine, 13*(6), 58-62.

Bhat, V. S., Kumar, V., Dayanand, N., Shettigar, A., Nikhitha, N. (2020, Mayıs). *Comparative study of PID control algorithms for an electric vehicle. AIP Conference Proceedings: Vol. 2236.* AIP Publishing.

Bierling, T., Höcht, L., Holzapfel, F., Maier, R., Wildschek, A. (2010, Ağustos). Comparative analysis of mrac architectures in a unified framework. *In AIAA guidance, navigation, and control conference (p. 7536)*.

BMW. (t.y.). *Hidrojen yakıt hücreli otomobiller.* BMW. Erişildiği adres: https://www.bmw.com.tr/tr/topics/fascination-bmw/bmw-joy-blog/hidrojen-yakit-hucreli-otomobiller.html

Bose, B. K. (1986). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall.

Boyalı, A. (2008). *Hibrid elektrikli yol taşıtlarının modellenmesi ve kontrolü.* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Polen.

Bruce, J. (2021). *Indirect Model Reference Adaptive Control with Online Parameter Estimation.* [Doktora tezi, Embry-Riddle Aeronautical Üniversitesi]. Spring.

Bryson, A. E., Ho, Y. C. (1975). *Applied Optimal Control*. Taylor & Francis.

Burkucu, H., Kabave, S., Korkmaz, Ş., Orak, A., Çetin, M. H. (2020). Mekanik Sistemlerde Rejeneratif Frenleme ile Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Belirlenmesi ve Verimlilik Analizi. *Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Dergisi, 1*(1), 1-8.

BYD. (2024). *Çeşit Çeşit Elektrikli Otomobil: HEV, MHEV, PHEV, BEV… Farkları Neler?.* BYD. Erişildiği adres: https://www.bydauto.com.tr/blog/elektrikli-arac-turleri

Camacho, E. F., Bordons, C. (2007). *Model Predictive Control*. Springer.

Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE, 95*(4), 704–718.

Charai, A., Hörnström, S. E., Thomas, O., Fryer, P. M., Harper, J. M. E. (1989). A comparison between aluminum and copper interactions with high-temperature oxide and nitride diffusion barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 7*(3), 784-789.

Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*. Wiley-IEEE Press.

Chauvin, L. (2020). Weight reduction in electric motors: aluminum vs copper wires [Yüksek lisans tezi, Windsor Üniversitesi]. ProQuest LLC.

Chehade, M. F. E. H., Cho, Y. H., Chinchali, S., Zhu, H. (2024, Ekim). Should We Use Model-Free or Model-Based Control? A Case Study of Battery Control. In *2024 56th North American Power Symposium (NAPS)* (ss. 1-5). IEEE.

Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies, 8*(1), 490-500.

Czerwinski, F. (2024). Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science, 59*(32), 14847-14892.

Çetinkaya, S. (2004). *Taşıt mekaniği*. Nobel Akademik Yayıncılık.

Dan, D., Zhao, Y., Wei, M., Wang, X. (2023). Review of Thermal Management Technology for Electric Vehicles. *Energies, 16*(12), 4693. https://doi.org/10.3390/en16124693

Dieselnet. (t.y.). https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php

Dikmen, İ. C., Karadağ, T. (2022). Elektrikli Araç Batarya Yönetim Sistemleri Ve Yeni Trendler. ISBN: 978-625-6971-84-4

Dorf, R. C., Bishop, R. H. (2017). *Modern Control Systems.* Pearson.

Doyle, M., Fuller, T. F., Newman, J. (1993). Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. *Journal of The Electrochemical Society, 140*(6), 1526. https://doi.org/10.1149/1.2221597

Durmuş, F. S., Kaymaz, H. (2020). Elektrikli araç şarj yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 3*(2), 123-139.

Eberle, U., Von Helmolt, R. (2010). Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview. *Energy & Environmental Science, 3*(6), 689-699.

Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., Ebrahimi, K. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle*s. CRC Press.

Emadi, A., Lee, Y. J., Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55*(6), 2237–2245. https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2000243

Erdem, Y., Taci, M. S. (2018). Effect of regenerative braking and power analysis in electric vehicles. *Journal of Current Researches on Engineering, Science and Technology, 4*(2), 75-88.

EV FireSafe. (2021). https://www.evfiresafe.com/ev-hv-cable-components

Faghihian, H., & Sargolzaei, A. (2023). Energy efficiency of connected autonomous vehicles: A review. *Electronics, 12*(19), 4086.

Faiz, A., Weaver, C. S., & Walsh, M. P. (1996). *Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions*. World Bank Publications.

Figes. (2024). *Standart seyir çevrimleri ve model tabanlı simulasyonda elektrikli araçta harcanan enerji karşılaştırması.* Figes. Erişildiği adres: https://figes.com.tr/blog/standart-seyir-cevrimleri-ve-model-tabanli-simulasyonda-elektrikli-aracta-harcanan-enerji-karsilastirmasi

Fotouhi, A., Montazeri-Gh, M. J. S. I. (2013). Tehran driving cycle development using the k-means clustering method. *Scientia Iranica, 20*(2), 286-293.

Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A. (2002). *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson.

Goodwin, G. C., Graebe, S. F., Salgado, M. E. (2001). *Control System Design*. Prentice Hall.

Google Earth. (t.y.). https://earth.google.com/

Gökçe, C., Üstün, Ö. (2015). Elektrikli araçlarda tam elektrikli frenleme için bulanık mantık tabanlı yeni bir yöntemin geliştirilmesi ve uygulaması. *Sakarya University Journal of Science, 19*(3), 339-352.

Grainger, J. J., Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.

Güneş, B., Ateş, K., Keskin, H. İ., Özen, Ş. (2020). *Elektrikli araçlarda elektromanyetik alan seviyelerinin elektromanyetik girişim ve uyumluluk açısından incelenmesi* [Powerpoint sunusu]. Akdeniz Üniversitesi. https://www.emo.org.tr/ekler/e715f16bc2b45aa_ek.pdf

Haddoun, A., Benbouzid, M. E. H., Diallo, D., Abdessemed, R., Ghouili, J., Srairi, K. (2007, Eylül). Comparative analysis of control techniques for efficiency improvement in electric vehicles. *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* içinde (ss 629-634). IEEE.

Hartani, K., Merah, A., Draou, A. (2015). Stability enhancement of four-in-wheel motor-driven electric vehicles using an electric differential system. *Journal of Power Electronics, 15*(5), 1244-1255.

Husain, I. (2021). *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*. CRC Press.

Iulia, V. Ă. S. C. A. N., & Loránd, S. Z. A. B. Ó. (2022). A Brief History of Electric Vehicles. *Journal of Computer Science & Control Systems*, *15*(1).

Ioannou, P. A., Sun, J. (2012). *Robust Adaptive Control.* Dover Publications.

Jazar, R. N. (2008). *Vehicle dynamics*. New York: Springer.

Kaba, M. Y., Kalkan, O., Celen, A. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar ve termal yönetim sistemlerinin incelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences, 9*(4), 1119-1136.

Kavuran, G., Alagoz, B. B., Ates, A., Yeroglu, C. (2016). Implementation of model reference adaptive controller with fractional order adjustment rules for coaxial rotor control test system. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, *4*(2), 84-88.

Kaya, B., Altıntaş, A., Kök, Ü. (2015). Esnek otomasyon sistemli veri takip sisteminin tasarim ve uygulamasi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 7*(2), 30-38.

Kebbati, Y., Ait-Oufroukh, N., Vigneron, V., Ichalal, D., Gruyer, D. (2021, Eylül). Optimized self-adaptive PID speed control for autonomous vehicles. *2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC) içinde (ss. 1-6*). IEEE.

Keleşoğlu, A., Kocaoglu, S., Yöntem, M., Çağlar, S., Aydın, İ. N., Bayır, E., ... Ünver, Ü. (2023). Elektrik motorlarında enerji sınıfları arası tüketim farklılıkları ve verimlilik artırıcı metotlar. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1*(35), 1-15.

Keshmiri, M., Jahromi, A. F., Mohebbi, A., Amoozgar, M. H., Wen-Fang, X. (2012). Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. *International Journal on smart sensing and intelligent systems, 5*(1), 14.

Kıyaklı, A. O., Solmaz, H. (2019). Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink. *International journal of automotive science and technology, 2*(4), 9-15.

Kirsch, D. A. (2000). *The Electric Vehicle and the Burden of History*. Rutgers University Press.

Kocabıçak, Z., (2020). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan Elektrik Motorlarının Karşılaştırılması. *Uluslararası Göbeklitepe Uygulamalı Bilimler Kongresi*, (29-40). https://www.ubakkongre.com/_files/ugd/d0a9b7_7518414aa5cb4848884157fe60288bee.pdf#page=45

Kökçam, E., Tan, N. (2022). Model Referans Adaptif Sistemlerde (MRAS) Katsayı Diyagram Metodu (KDM) Kullanılarak Referans Modeli ve Kontrolör Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi, 1*(1), 55-60.

Kumar, S. C. V., Karunanithi, K., Raja, S. P., Ramesh, S., Chandrasekar, P., Obulupathy, R. (2023). Modelling of electric vehicle charging station and controlled by fuzzy logic controller with different modes of operation. *Journal of Control and Decision, 10*(1), 26-39.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.

Kuzu, Z. (2019). Elektrikli araçlar için batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin yönetimi (Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi). Fırat Üniversitesi. https://openaccess.firat.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11508/18216/479147.pdf?sequence=1

Küçükcıpracı, B., Ceylan, M., Balıkçı, A. (2024, Kasım). Design of a Wireless Battery Management System for Lithium-Ion Batteries Based on a Wi-Fi and BLE Module. In *2024 15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 1-5). IEEE.

Larminie, J., Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained* (2nd ed.). Wiley.

Lechner, G., Naunheimer, H. (1999). *Automotive transmissions: fundamentals, selection, design and application*. Springer Science & Business Media.

Lin, X., Feng, Q., Mo, L., Li, H. (2019). Optimal adaptation equivalent factor of energy management strategy for plug-in CVT HEV. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 233*(4), 877-889.

Liu, X., Guo, H., Cheng, X., Du, J., Ma, J. (2022). A robust design of the model-free-adaptive-control-based energy management for plug-in hybrid electric vehicle. *Energies, 15*(20), 7467.

Liu, Z., Lu, S., Du, R. H. (2020). A genetic-fuzzy control method for regenerative braking in electric vehicle. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, *11*(3), 263-277.

Loos, F. (2014). *Joule Heating in Connecting Structures of Automotive Electric Devices. In Modelling, Simulation and Optimization* [Doktora tezi, Bundeswehr Üniversitesi].

Lupberger, S., Degel, W., Odenthal, D., Bajcinca, N. (2021). Nonlinear control design for regenerative and hybrid antilock braking in electric vehicles. *IEEE transactions on control systems technology*, *30*(4), 1375-1389.

Mahmoudi, C., Flah, A., Sbita, L. (2014, Kasım). An overview of electric vehicle concept and power management strategies. *In 2014 international conference on electrical sciences and technologies in Maghreb* (CISTEM). IEEE.

Manoharan, S., Krishnamoorthy, K., Sathyaseelan, A., Kim, S. J. (2021). High-power graphene supercapacitors for the effective storage of regenerative energy during the braking and deceleration process in electric vehicles. *Materials Chemistry Frontiers*, *5*(16), 6200-6211.

Masuda, S. (2014). A Model Reference Adaptive Control Based on On-line Frit Approaches Using a Normalized Recursive Least Square Method. *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 133*(10), 1950-1956.

Mathworks. (2024). *Model Reference Adaptive Control.* https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/model-reference-adaptive-control.html

MathWorks (2024). *Parameter Estimation*. https://www.mathworks.com/help/ident/parameter-estimation.html

Mathworks. (2024). When tuning the pid controller, the d gain has a different sign from the i gain. https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/when-tuning-the-pid-controller-the-d-gain-has-a-different-sign-from-the-i-gain.html

Mazali, I. I., Daud, Z. H. C., Hamid, M. K. A., Tan, V., Samin, P. M., Jubair, A., … Talib, M. H. A. (2022). Review of the methods to optimize power flow in electric vehicle powertrains for efficiency and driving performance. *Applied Sciences, 12*(3), 1735.

Meyer, N., Whittal, I., Christenson, M., Loiselle-Lapointe, A. (2012, Mayıs). The impact of driving cycle and climate on electrical consumption & range of fully electric passenger vehicles. In *Proceedings of EVS* (Vol. 26, p. 11).

Millî Eğitim Bakanlığı. (2011). *Elektrik Elektronik Teknolojisi: Elektriğin Temel Esasları*. Millî Eğitim Bakanlığı. https://www.mku.edu.tr/files/1056-53af58df-ab8a-480c-9bcd-a45541f829a3.pdf

Mock, P., Kühlwein, J., Tietge, U., Franco, V., Bandivadekar, A., German, J. (2014). The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU. *International council on clean transportation, 9(*3547), 1-20.

Mom, G. (2004). *The Electric Vehicle: Technology and Expectations in the Automobile Age.* Johns Hopkins University Press.

Mutoh, N. (2009). Front-and-rear-wheel-independent-drive-type electric vehicle (FRID EV) with compatible driving performance and safety. *World Electric Vehicle Journal, 3*(1), 17-26.

Musii, R., Pukach, P., Kohut, I., Vovk, M., Šlahor, L. (2022). Determination and analysis of Joule's Heat and temperature in an electrically conductive plate element subject to Short-Term induction heating by a Non-Stationary electromagnetic Field. *Energies, 15*(14), 5250.

Narendra, K. S., Annaswamy, A. M. (2012). *Stable adaptive systems.* Courier Corporation.

Narendra, K. S., Parthasarathy, K. (1990). Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks, 1*(1), 4–27.

Nguyen, N. T. (2018). *Model-Reference Adaptive Control*. Springer.

Nise, N. S. (2020). *Control Systems Engineering (8th ed.).* Wiley.

Nissan EM motoru. (2024, 22 Aralık). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_EM_motor

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering (5th ed.)*. Prentice Hall.

Otomotiv Lab. (2015). *Seyir çevrimleri ve yakıt tüketimi hesaplanması*. Otomotiv Lab. Erişildiği adres: https://otomotivlab.net/seyir-cevrimleri-ve-yakit-tuketimi-hesaplanmasi/

Öz, N. (2024). *Elektrikli araçlar için seri paralel bağlantı kombinasyonunu destekleyen yeni bir batarya paketi tasarımı* (Master's thesis, Marmara Universitesi (Turkey)).

Öztürk, T. (2013). *Asenkron Motor ile Sürülen Elektrikli Aracın Modellenmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bil. Ens* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, 97).

Paredes, M. G., & Pomilio, J. A. (2019, Aralık). Comparative Strategies of Control for Regenerative Braking in Electric Vehicles. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)* (pp. 1-5). IEEE.

Park, J., Jeong, H., Jang, I. G., & Hwang, S. H. (2015). Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. *Energies, 8*(8), 8537-8561.

Parsa, M., Toliyat, H. A. (2007). Fault-tolerant interior-permanent-magnet machines for hybrid electric vehicle applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56*(4), 1546–1552. https://doi.org/10.1109/TVT.2007.896728

Peng, C., Chen, L. (2022). Model reference adaptive control based on adjustable reference model during mode transition for hybrid electric vehicles. *Mechatronics*, *87*, 102894.

Rüşen, S. E. (2019). Elektrik Motorlarının Verimlilik ve CO2 Emisyon Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 564-569.

Sastry, S., & Bodson, M. (2011). *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. Dover Publications.

Sharaf, A. M., Altaş, İ. H., Özkop, E. (2007). Elektrikli Araçlar İçin Çift Çevrim Destekli DA Motor Kontrol Uygulaması. *XII. EEBB Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*, 14-18.

Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation*. Springer New York.

Singh, V. P., Kumar, A., Meena, C. S., Dwivedi, G. (Eds.). (2024). *Energy efficient vehicles: Technologies and challenges*. CRC Press.

Skogestad, S., Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Wiley.

Slotine, J. J. E., Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall.

Solmaz, H., & Kocakulak, T. (2020). Determination of lithium ion battery characteristics for hybrid vehicle models. *International Journal of Automotive Science and Technology*, *4*(4), 264-271.

Sutton, R. S., Barto, A. G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press.

Tezde, E. İ., Okumuş, H. İ. (2018). Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme. *EMO Bilimsel Dergi, 8*(1), 21-25.

Tsiakmakis, S., Fontaras, G., Cubito, C., Pavlovic, J., Anagnostopoulos, K., Ciuffo, B. (2017). *From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO2 emissions of light-duty vehicles* (Vol. 50). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Topçu, E. E., Aksay, H. M. (2025). Bir otonom elektrikli aracın hız kontrolünün farklı sürüş çevrimleri ve çevre şartlarında incelenmesi. O. Çağlayan (Ed.). *Internatıonal Yıldırım Bayezıd Scıentıfic Research And Innovatıon Symposıum Vol.1* içinde (ss. 625-638). New York: Liberty Academic Publishers.

Turğut, M. (2018). Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük: Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Van Der Heijden, F., Duin, R. P., De Ridder, D., Tax, D. M. (2005). *Classification, parameter estimation and state estimation: an engineering approach using MATLAB.* John Wiley & Sons.

Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Springer Science & Business Media.

Visualcrossing. (t.y.). https://www.visualcrossing.com/

Watkins, C. J. C. H., Dayan, P. (1992). "Q-learning." *Machine Learning, 8*, 279–292.

Wikipedia katılımcıları. (22 Aralık 2024). Nissan EM motoru. *Wikipedia, Özgür Ansiklopedi* . Erişim tarihi: 13 Mart 2025, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nissan_EM_motor&oldid=1264641764

Wilson, A. C., Recht, B., Jordan, M. I. (2016). A lyapunov analysis of momentum methods in optimization. arXiv preprint arXiv:1611.02635.

Wolf, E. J., Cruz, T. H., Emondi, A. A., Langhals, N. B., Naufel, S., Peng, G. C., ... Wolfson, M. (2020). Advanced technologies for intuitive control and sensation of prosthetics. *Biomedical engineering letters, 10*, 119-128.

Woodcraft, A. L. (2005). Recommended values for the thermal conductivity of aluminium of different purities in the cryogenic to room temperature range, and a comparison with copper. *Cryogenics, 45*(9), 626-636.

Xu, G., Li, W., Xu, K., Song, Z. (2011). An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energies, 4*(9), 1461-1477.

Yang, X., Zhou, D., Song, W., She, Y., Chen, X. (2021). A cable layout optimization method for electronic systems based on ensemble learning and improved differential evolution algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 63*(6), 1962-1971.

Yazaki. (t.y.). Wire Harness. https://www.yazaki-group.com/en/automobile/wireharness/index.html

Yılmaz, G. (2023). Comparison of different methods for optimization of PID controller gain coefficients. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science, 9*(2), 254-264.

Yu, K., Yang, H., Tan, X., Kawabe, T., Guo, Y., Liang, Q., ... & Zheng, Z. (2016). Model predictive control for hybrid electric vehicle platooning using slope information. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, *17*(7), 1894-1909.

Yucelen, T. (1999). Model reference adaptive control. *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering*, 1-13.

Yüksel, İ. (2021). *Otomatik Kontrol.* Dora Basım Yayın Dağıtım Ltd. Şti.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control, 8*(3), 338–353.

Zhang, D., Wei, B. (2016). Convergence performance comparisons of PID, MRAC, and PID+ MRAC hybrid controller. *Frontiers of Mechanical Engineering, 11*(2), 213-217.

Zhou, K., Doyle, J. C., Glover, K. (1996). *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall.

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