T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ARAÇLARDA UYGUN GÜÇ YÖNETİM STRATEJİLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet BAŞYİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI

Mayıs, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ARAÇLARDA UYGUN GÜÇ YÖNETİM STRATEJİLERİNİN BELİRLENMESİ

Mehmet BAŞYİĞİT tarafından hazırlanan tez çalışması 08.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Levent YÜKSEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Ögr. Üyesi Erdem UZUNSOY, Üye
Bursa Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Tarkan SANDALCI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan hibrit araçlarda uygun güç yönetim stratejilerinin belirlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet BAŞYİĞİT

İmza



Biricik Eşime

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, bilgi ve tecrübeleriyle tez konusunda ve çalışmasında yol gösteren tez danışmanım Doç.Dr. Tarkan SANDALCI'ya, tez çalışması sırasında bilgi ve tecrübeleriyle çalışmamda açık noktalarda tavsiyeleriyle yardımcı olan mesai arkadaşlarıma, tüm yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olan ve çalışma motivasyonumu yüksek tutmamda yardımcı olan hayat arkadaşım Sümeyye ODUNCU BAŞYİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet BAŞYİĞİT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ 7
KISALTMA LİSTESİ 11
ŞEKİL LİSTESİ 12
TABLO LİSTESİ 16
ÖZET 17
ABSTRACT 19
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 30
1.3 Hipotez 32
2 KOMPLEKS PLUG IN HEV TAHRİK SİSTEMİ 34
2.1 Kompleks Hibrit Elektrikli Taşıt 34
2.2 Kural Bazlı Enerji Yönetim Stratejisi 39
2.3 Taşıt Tahrik Sistemi Modelleme 46
3 ENERJİ YÖNETİMİ OPTİMİZASYONU 59
3.1 Dinamik Programlama 59
3.2 HEV Enerji Yönetiminde Dinamik Programlama Uygulaması 68e
3.3 Kompleks HEV Enerji Yönetiminde Dinamik Programlama Uygulaması 71
4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 82
4.1 Simulasyon Testi Planlama 82
4.2 Simulasyon Testi Sonuçları 86
4.3 Sonuçlar ve Öneriler 126
Kaynakça 132
Tezden Üretilmiş Yayınlar 137

SİMGE LİSTESİ

α	Yol Eğim Açısı
$a_{Taşıt}$	Taşıt İvmesi
$A_{Taşıt}$	Taşıt Projeksiyon Alanı
C	Karbon
C	Batarya Nominal Kapasitesini
C_D	Aerodinamik Hava Direnç Katsayısı
C_0	1. Coast Down Katsayısı
C_1	2. Coast Down Katsayısı
C_2	3. Coast Down Katsayısı
CO	KarboN·monoksit
CO_2	Karbondioksit
δ	Rotasyonel Atalet Katsayısı
ΔSOC	Batarya Şarj Durumu Ayrıklaştırma Oranı
$dSOC$	SOC Farkı
dt	Zaman Farkı
ΔT_{EM}	Elektrik Motoru Torku Ayrıklaştırma Oranı
$\Delta T_{İYM}$	İçten YaN·malı Motor Torku Ayrıklaştırma Oranı
f_0	Yola Bağlı YuvarlaN·ma Direnci Katsayısı
f_1	Taşıt Hızı ve Lastiğe Bağlı YuvarlaN·ma Direnci Katsayısı
$F_{eğim}$	Eğim Direnci
F_{hava}	Aerodinamik Hava Direci
$\Phi_k(x_k)$	İlk ve Ara İşlem Adımları için Ceza Fonksiyonu
$\Phi_N(x_N)$	Son İşlem Adımı için Ceza Fonksiyonu
$F_{iç}$	İç Direnç Kuvveti
$F_{iç.fo}$	Çok Düşük Hızlarda Güç Aktarma Organlarının Neden Olduğu Hareket Direnç Kuvveti
$F_{iç.f1}$	Güç Aktarma Organlarının Neden Olduğu Hareket Direncinin Taşıt Hızı ile Artan Oranı
F_{ivme}	İvmeleN·me Direnci
$F_k(x_k, \mu_k)$	Durum ve Kontrol Değişkenlerine Bağlı Model Fonksiyonunu
F_{Teker}	Toplam Teker Kuvveti
F_{Toplam}	Toplam Hareket Direnci
$F_{yuvarlanma}$	YuvarlaN·ma Direnci
g	Yerçekimi İvmesi
$g_N(x_N)$	Son Hesaplama Adımındaki Maliyet
$G(\,)$	Son Maliyet Fonksiyonu
HC	Hidrokarbon
$h_k(\,)$	Maliyet Fonksiyonu
HNO_3	Nitrik Asit
H_2O	Saf Su
H_2SO_4	Sülfürik Asit
H^+	Artı Yüklü Hidrojen İyonu
$H(\,)$	Zamana Bağlı Maliyet Fonksiyonu
I	Batarya Şarj – Deşarj Akımı

i_{EM1}	Ön Elektrik Motoru ve Aks Arasındaki Çevrim Oranı
i_{EM2}	Arka Elektrik Motoru ve Aks Arasındaki Çevrim Oranı
i_{GEN}	Generatör ile İYM Arasındaki Çevrim Oranı
η_{EM1Red}	Ön Elekrik Motoru ve Aks Arasındaki Redüksiyon Dişli Sistemi Verimi
η_{EM2Red}	Arka Elektrik Motoru ve Aks Arasındaki Redüksiyon Dişli Sistemi Verimi
$\eta_{GENİYM}$	Generatör ve İYM Arasındaki Redüksiyon Dişli Sistemi Verimi
$J(\ )$	Toplam Maliyet Fonksiyonu
k	Ayrıklaştırılmış Zaman Eksenindeki Başlangıçtan, En Sondan Bir Önceki İşlem Adımına Kadar Olan Hesaplama Adımları
$L_{Çevrim}$	Çevrim mesafesi
Li-ion	Lityum İyon
Li-poly	Lityum Polimer
$MOD_{Anlık_k}$	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Anlık Sürüş Modu
$MOD_{Anlık_{maks}}$	Anlık Sürüş Modu Maksimum Limiti
$MOD_{Anlık_{min}}$	Anlık Sürüş Modu Minimum Limiti
MOD_{Son_k}	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Bir Sonraki Sürüş Modu
$MOD_{Son_{maks}}$	Bir Sonraki Sürüş Modu Maksimum Limiti
$MOD_{Son_{min}}$	Bir Sonraki Sürüş Modu Minimum Limiti
$M_{Taşıt}$	Taşıt Kütlesi
μ_k	k'ıncı Adımdaki Kontrol Değişkeni
$\mu(\ )$	Kontrol Değişkeni
N	Her bir Zaman Adımının Aşama Numarası
Na_2S	Soydum Sülfür
NiMh	Nikel Metal Hidrit
$N_{İYM}$	İçten YaN·malı Motor Torku için Değer Sayısı
Ni-Cd	Nikel Kadmiyum
NO	Nitrojen Monoksit
NO_x	Nitrojen Oksitler
NO_2	Nitrojen Dioksit
N_{SOC}	Batarya Şarj Durumu için Değer Sayısı
$N_{T_{EM}}$	Elektrik Motoru Torku için Değer Sayısı
N_2	Nitrojen
N_2O	Dinitrojen Monoksit
ω_{EM1}	Ön Elektrik Motoru Açısal hızı
ω_{EM2}	Arka Elektrik Motoru ve Aks Arasındaki Çevrim Oranı
$\omega_{İYM}$	İçten YaN·malı Motor Açısal Hızı
$\omega_{İYM_k}$	k'ıncı Hesaplama Adımındaki İçten YaN·malı Motor Açısal Hızı
$\omega_{İYM_{maks}}$	İçten YaN·malı Motor Açısal Hızı Maksimum Limiti
$\omega_{İYM_{min}}$	İçten YaN·malı Motor Açısal Hızı Minimum Limiti
$\omega_{Teker.Arka}$	Arka Teker Açısal Hızı
ω_{GEN}	Generatör Açısal Hızı
$\omega_{Teker.Ön}$	Ön Teker Açısal Hızı
O_2	Oksijen
Pb	Kurşun
P_{Bat}	Batarya Tarafından Sağlanan Elektrik Gücü
$P_{EM,el}$	Elektrik Motorunun Elektrik Gücü

$P_{EMKayıp}$	Elektrik Motorunda Mekanik Güç Üretimi Sırasında Meydana Gelen Verim Kayıplarından Dolayı Oluşan Güç Kaybı
$P_{EM,max}$	Elektrik Motorunun Verdiği Maksimum Mekanik Güç
$P_{EM,Mek}$	Elektrik Motoru Tarafından Temin Edilen Mekanik Güç
$P_{EM,Tal}$	Elektrik Motorundan Talep Edilen Mekanik Güç
$P_{GEN,el}$	Generatörüm Ürettiği Elektrik Gücü
$P_{GENKayıp}$	Generatörde Elektrik Gücü Üretimi Sırasında Meydana Gelen Verim Kayıplarından Dolayı Oluşan Güç Kaybı
$P_{GEN,Mek}$	Generatörün İYM'den Talep Ettiği Mekanik Güç
π	Pi Sayısı
$\pi = \{\}$	Kontrol Politikası
π^0	Toplam Maliyeti Minimize Eden Maliyet Politikası
r_{ef}	Efektif Teker Yarıçapı
$R_{\text{İÇ}}$	Batarya Toplam İç Direnci
ρ_{hava}	Hava Yoğunluğu
$\rho_{yakıt}$	Yakıt Yoğunluğu
R_{Tork}	Ön/Arka Aks Tork Dağılım Oranı
R_{Tork_k}	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Ön/Arka Aks Tork Dağılım Oranı
$R_{Tork_{maks}}$	Ön/Arka Aks Tork Dağılım Oranı Maksimum Limiti
$R_{Tork_{min}}$	Ön/Arka Aks Tork Dağılım Oranı Minimum Limiti
$SAN_{hiz\ k}$	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Şanzıman Hız Kademesi
$SAN_{hiz\ maks}$	Şanzıman Hız Kademesi Maksimum Limiti
$SAN_{hiz\ min}$	Şanzıman Hız Kademesi Minimum Limiti
SOC_k	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Batarya Şarj Durumu
SOC_{maks}	Batarya Şarj Durumu Maksimum Limiti
SOC_{min}	Batarya Şarj Durumu Minimum Limiti
SOC_{k+1}	Bir Sonraki Hesaplama Adımındaki Batarya Şarj Durumunu
SO_x	Sülfür Oksitler
SO_2	Sülfür Dioksit
SO_3	Sülfür Trioksit
t	Anlık Zaman
t_f	Son Zaman
T_{EMk}	k'ıncı Hesaplama Adımındaki Elektrik Motoru Torku
T_{EMmaks}	Elektrik Motoru Torku Maksimum Limiti
T_{EMmin}	Elektrik Motoru Torku Minimum Limiti
T_{EM1}	Ön Elektrik Motorundan Talep Edilen Tahrik Torku
T_{EM2}	Arka Elektrik Motorundan Talep Edilen Tahrik Torku
T_{GEN}	Generatöre İletilen Tork
$T_{\text{İYM}}$	İçten YaN·malı Motor Torku
$T_{\text{İYM}k}$	k'ıncı Hesaplama Adımındaki İçten YaN·malı Motor Torku
$T_{\text{İYM}maks}$	İçten YaN·malı Motor Torku Maksimum Limiti
$T_{\text{İYM}min}$	İçten YaN·malı Motor Torku Minimum Limiti
T_{Teker}	Toplam Teker Tahrik Torku
$T_{Teker.Arka}$	Arka Teker Toplam Tahrik Torku
$T_{Teker.\text{Ön}}$	Ön Teker Toplam Tahrik Torku
U	Batarya Yük Gerilimi
U_{AD}	Batarya Açık Devre Gerilimi

$\vec{V}$	Efektif Taşıt Vektörel Hızı
$\vec{V}_{Rüzgar}$	Rüzgar Vektörel Hızı
$\vec{V}_{Taşıt}$	Taşıt Vektörel Hızı
$V_{Taşıt}$	Taşıt Hızı
x_k	k'ıncı Adımdaki Durum Değişkeni
x_{k+1}	Model Fonksiyonunda Bir Sonraki Adım için Hesaplanan Durum Değişkeni
$x(\,)$	Durum Değişkeni
YD	Yakıt Debisi
YT	Yakıt Tüketimi
$YT_{harita}(\,)$	Özgül Yakıt Tüketimi Fonksiyonu
$YT_{Taşıt.Özgül}$	Taşıt Özgül Yakıt Tüketimi
YT_{Toplam}	Toplam Yakıt Tüketimi
$YT(x_k, \mu_k)$	Yakıt Tüketimi Açısından Maliyet Fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AMKÜ	Arka Motor Kontrol Ünitesi
BEV	Battery Electric Vehicle (Tam Elektrikli Taşıt)
BSG	Belt Starter Generator (Kayış Tahrikli Generatör)
CHEV	Complex Hybrid Vehicle (Kompleks Hibrit Taşıt)
CVT	Continuously Variable Transmission (Sürekli Değişken Şanzıman)
DP	Dinamik Programlama
DPF	Diesel Particulate Filter (Dizel Partikül Filtresi)
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Dizel Oksidasyon Katalisti)
EATS	Exhaust After Treatment System (Egzoz Sonu Arıtma Sistemi)
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Egzoz Gaz Resirkülasyonu)
EM	Elektrik Motoru
EM1	Ön Elektrik Motoru
EM2	Arka Elektrik Motoru
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Yakıt Hücreli Elektrikli Taşıt)
FTP-72	Federal Test Procedure (Federal Test Prosedürü)
GEN	Generatör
GKÜ	Güç Kontrol Ünitesi
GPF	Gasoline Particulate Filter (Benzin Partikül Filtresi)
GSÜ	Güç Sürüş Ünitesi
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hibrit Elektrikli Taşıt)
ICE	Internal Combustion Engine (İçten YaN·malı Motor)
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
İYM	İçten YaN·malı Motor
İYM-EKÜ	İçten YaN·malı Motor Elektronik Kontrol Ünitesi
KB	Kural Bazlı Kontrol
LNT	Lean NOx Trap (Fakir Nitrojen Oksit Tutucu)
NEDC	New European Driving Test Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Test Çevrimi)
NŞA	Normal Şartlar Altında
OB	Optimizasyon Bazlı Kontrol
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve KalkıN·ma Örgütü)
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries (Petrol İhraç Eden Ülkeler Organizasyonu)
ÖMKÜ	Ön Motor Kontrol Ünitesi
PEM	Proton Exchange Membrane (Proton Değişim Membranı)
PHEV-EKÜ	Plug in Hibrit Elekrtrikli Taşıt Elektronik Kontrol Ünitesi
SCR	Selective Catalytic Reduction (Seçici Katalitik İndirgeme)
SOC	State of Charge (Batarya Şarj Durumu)
TWC	Three Way Catalyst (3 Yollu Katalist)
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Çevrimi)
USD	United States Dollar (Amerika Birleşik Devletleri Resmi Para Birimi)
YH	Yakıt Hücresi
YT	Yakıt Tüketimi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Dünya ham petrol üretimi (1970 – 2018) 2
Şekil 1.2 OECD ülkeleri ham petrol ithalat fiyatları (1997-2017) 3
Şekil 1.3 Taşımacılık sektörü alt sektörlere göre CO2 salınım miktarları (1990,2016)[15] 6
Şekil 1.4 Benzinli binek araçlarda NO_x ve CO için Euro emisyon standartları 7
Şekil 1.5 ABD kümülatif HEV ve EV satış rakamları (2010-2016)[20] 8
Şekil 1.6 Tam elektrikli taşıt (BEV) mimarisi 10
Şekil 1.7 PEM tipi yakıt hücresi çalışma prensibi[26] 12
Şekil 1.8 Yakıt hücreli elektrikli taşıt (FCEV) mimarisi 13
Şekil 1.9 Seri hibrit elektrikli taşıt mimarisi 15
Şekil 1.10 Seri hibrit elektrikli taşıtlar için teker tipi (Wheel -Hub) elektrik motoru uygulaması 17
Şekil 1.11 Paralel hibrit elektrikli taşıt mimarisi 19
Şekil 1.12 Mikro hibrit elektrikli taşıt mimarisi 21
Şekil 1.13 Mild hibrit elektrikli taşıt mimarisi 22
Şekil 1.14 Seri - paralel hibrit elektrikli taşıt mimarisi 23
Şekil 1.15 Kompleks hibrit elektrikli taşıt mimarisi 24
Şekil 1.16 Güç kontrol stratejilerinin sınıflandırılması 26
Şekil 2.1 Tez çalışmasında kullanılan kompleks taşıt tahrik mimarisi 35
Şekil 2.2 Ön transaks sistemi 39
Şekil 2.3 Tam elektrikli sürüş modunda güç akışı 41
Şekil 2.4 Seri hibrit sürüş modunda güç akışı 42
Şekil 2.5 Paralel hibrit sürüş modunda güç akışı 43
Şekil 2.6 Taşıt modeli 46
Şekil 2.7 Kontrol modeli temel algoritması 47
Şekil 2.8 Batarya modeli 57
Şekil 3.1 Dinamik programlama yörünge problemi 60
Şekil 3.2 Dinamik programlama optimum yörünge maliyeti 61
Şekil 3.3 Ayrıklaştırılmış durum zaman uzayı 62
Şekil 3.4 Ayrıklaştılmış kontrol uzayı 63
Şekil 3.5 Geriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon 66
Şekil 3.6 İleriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon 67
Şekil 3.7 Durum ve kontrol değişkenleri 74
Şekil 3.8 Baz tahrik sisteminde optimizasyon kodu algoritması 77
Şekil 3.9 6 ileri hız kademeli şazımana sahip kompleks hibrit tahrik sistemi mimarisi 78
Şekil 3.10 Şanzımanlı tahrik sisteminde optimizasyon kodu algoritması 81
Şekil 4.1 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 87
Şekil 4.2 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 88
Şekil 4.3 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı 89
Şekil 4.4 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 89
Şekil 4.5 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 90

Şekil4.6 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 91
Şekil 4.7 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 91
Şekil 4.8 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 92
Şekil 4.9 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 93
Şekil 4.10 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi İYM açısal hızı ve torku 94
Şekil 4.11 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 95
Şekil 4.12 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağlım oranı 95
Şekil 4.13 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 96
Şekil 4.14 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 96
Şekil 4.15 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı 98
Şekil 4.16 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 98
Şekil 4.17 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 99
Şekil 4.18 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 100
Şekil 4.19 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 101
Şekil 4.20 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı 101
Şekil 4.21 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 102
Şekil 4.22 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 102
Şekil 4.23 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 103
Şekil 4.24 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 104
Şekil 4.25 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 104
Şekil 4.26 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 105
Şekil 4.27 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi İYM açısal hızı ve torku 106
Şekil 4.28 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 106
Şekil 4.29 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 108
Şekil 4.30 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 108

Şekil 4.31 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 109
Şekil 4.32 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 109
Şekil 4.33 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 110
Şekil 4.34 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 110
Şekil 4.35 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 112
Şekil 4.36 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 112
Şekil 4.37 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 113
Şekil 4.38 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 113
Şekil 4.39 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 114
Şekil 4.40 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 115
Şekil 4.41 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 115
Şekil 4.42 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 116
Şekil 4.43 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı 116
Şekil 4.44 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı 117
Şekil 4.45 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi, İYM açısal hızı ve torku 118
Şekil 4.46 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 119
Şekil 4.47 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 119
Şekil 4.48 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları 120
Şekil.4.49 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları 121
Şekil 4.50 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 121
Şekil 4.51 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları 122
Şekil 4.52 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ve SOC ayrıklaştırma oranlarının SOC yörüngesine etkisi 122
Şekil 4.53 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ayrıklaştırma oranının yakıt tüketimi ve son SOC üzerindeki etkisi 123
Şekil 4.54 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde SOC ayrıklaştırma oranının yakıt tüketimi ve son SOC üzerindeki etkisi 124

Şekil 4.55 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ayrıklaştırma oranının özgül yakıt tüketimi ve optimizasyon süresi üzerindeki etkisi 125
Şekil 4.56 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde SOC ayrıklaştırma oranının özgül yakıt tüketimi ve optimizasyon süresi üzerindeki etkisi 125
Şekil 4.57 Kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolde NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimlerinde özgül yakıt tüketimi değerleri 128

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Otomotiv uygulamalarında kullanılan batarya sistem spesifikasyonları [11] 11
Tablo 1.2 Tez çalışması temel ve ara hedefler 31
Tablo 2.1 Enerji komponentleri spesifikasyonları 37
Tablo 2.2 Güç komponentleri spesifikasyonları 37
Tablo 2.3 Güç aktarma komponentleri spesifikasyonları 38
Tablo 2.4 Güç aktarma verimleri 38
Tablo 2.5 Sürüş modları aktivasyon özellikleri 44
Tablo 3.1 Kontrol ve durum değişkenleri ayrıklaştırma oranları 75
Tablo 3.2 Şanzıman hız kademesi ayrıklaştırma oranları 80
Tablo 4.1 Simülasyon test planı 84
Tablo 4.2 Optimizasyon performansı test planı 85
Tablo 4.3 Simülasyon testleri yakıt tüketimi ve SOC sonuçları 126
Tablo 4.4 Optimizasyon bazlı kontrolde özgül yakıt tüketimi ve son SOC sonuçlarının kural bazlı kontrole göre farkı 127

ÖZET

Hibrit Araçlarda Uygun Güç Yönetim Stratejilerinin Belirlenmesi

Mehmet BAŞYİĞİT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Tarkan SANDALCI

Hibrit araçlarda uygun güç yönetimi stratejilerini belirleme çalışmasında, en az yakıt tüketimini elde etmek için dinamik programlama yöntemi kullanılarak, karmaşık plug-in hibrit elektrikli taşıtta enerji yönetimi kontrolü optimize edilmiştir. Enerji yönetimi optimizasyonu NEDC, WLTC, FTP-72 test döngüleri altında yapılmıştır. Çalışma sırasında taşıt, fiziksel taşıt ve kontrol modeli olarak modellenmiştir. Taşıt modeli, hem baz kompleks hibrit mimarisi hem de 6 ileri şanzıman eklenerek değiştirilmiş kompleks hibrit mimarisi için geliştirilmiştir. Kontrol modeli kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol stratejisi ile çalıştırılmıştır. Batarya şarjı sürdürme modunda, geliştirilmiş bir kod tarafından dinamik programlama işlemi yapılmıştır. Enerji yönetimi optimizasyonu, elektrikli sürüş, seri ve paralel hibrit mod için değerlendirilmiştir. Geliştirilen baz ve değiştirilmiş taşıt modelleri, optimizasyon bazlı ve kural tabanlı kontrol stratejisi simüle edilmiştir.

Simülasyon sonuçları, batarya şarj durumu (SOC), yakıt tüketimi, sürüş modları, tork dağılım oranı, şanzıman hız kademesi, içten yanmalı motor (İYM), generatör parametreleri baz ve değiştirilmiş taşıt modelleri için değerlendirilmiştir. Ek olarak, FTP-72 test döngülerinde optimizasyon verimliliğini görmek için farklı SOC ve İYM tork ayrıklaştırma oranlarında dinamik programlama tabanlı optimizasyon yapılmıştır. Temel taşıt modelinde, simülasyon sonuçlarına dayanarak, optimizasyon bazlı kontrol stratejisi, NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimleri altındaki kural bazlı stratejiye göre yakıt tüketiminde sırasıyla %7,77, %4,45, %10,7 iyileşme sağlamıştır. Değiştirilmiş taşıt modelinde, simülasyon sonuçlarına dayalı olarak, optimizasyon bazlı kontrol stratejisi, NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimleri altındaki kural bazlı stratejiye göre yakıt tüketiminde sırasıyla %19,78, %16,41, %15,92 iyileşme sağlamıştır. Ayrıca, dinamik programlama sürecinde, SOC'nin ve İYM torkunun ayrıklaştırma oranları, yakıt tüketimindeki iyileşmeyi etkilemiştir. SOC ayrıklaştırma hassasiyeti %1'den %0,01'e yükseldiğinde, yakıt tüketimi iyileşmesi FTP-72 test döngüsündeki kural bazlı kontrol stratejisine kıyasla %-13,41'den

%10,77'e yükselmiştir. İYM tork ayrıklaştırma hassasiyeti 30 N·m'den 10 N·m'ye yükseldiğinde, yakıt tüketimindeki iyileşme, FTP-72 test döngüsündeki kurala dayalı stratejiye kıyasla %7,97'den %10,77'ye yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit elektrikli taşıtlarda kontrol stratejisi, HEV enerji yönetimi optimizasyonu, ayrık dinamik programlama, CPHEV güç yönetim stratejisi.

ABSTRACT

Determination of Suitable Power Management Strategies in Hybrid Vehicles

Mehmet BASYIGIT

Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

At the study of determining of suitable power management strategies in hybrid vehicles, the complex plug-in hybrid electric vehicle energy management control has been optimized by using dynamic programming method to obtain minimum fuel consumption. Energy management optimization has done under NEDC, WLTC, FTP-72 test cycles. During the study, the vehicle was modeled as physical vehicle and control model. Vehicle model was developed for both base complex hybrid architecture and complex hybrid architecture modified by adding a 6-Speed transmission. Control model was been operated by rule-based and optimization based control strategy. Dynamic programming process has been done by a developed script code in case of battery charge-sustaining mode. Optimization of energy management has been evaluated for e-drive, serial, parallel hybrid mode. The optimized and rule-based control strategy has been simulated with the developed base and modified vehicle models.

Simulation results were evaluated for state of charge (SOC), fuel consumption, drive modes, torque distribution ratio, transmission speed, internal combustion engine (ICE), generator parameters at the base and modified vehicle models. In addition, dynamic programming based optimization has been performed at different SOC and ICE torque discretization ratio to see optimization efficiency at FTP-72 test cycles. At base vehicle model, based on simulation results, optimization based control strategy has provided 7,77%, 4,45%, 10,7% fuel consumption improvement compared to rule-based strategy under NEDC, WLTC, FTP-72 test cycles respectively. At modified vehicle model, based on simulation results, optimization based control strategy has provided 19,78%, 16,41%, 15,92% fuel consumption improvement compared to rule-based strategy under NEDC, WLTC, FTP-72 test cycles respectively. In addition, at the dynamic programming process, discretization rate of SOC, ICE torque has been affected fuel consumption improvement. When SOC discretization sensitivity increase from 1% to 0,01%, fuel consumption improvement has been increased from -13,41% to 10,77% compared to rule-based

control strategy under FTP-72 test cycle. When ICE torque discretization sensitivity increase from 30 N·m to 10 N·m, fuel consumption improvement has been increased from 7,97% to 10,77% compared to rule-based control strategy under FTP-72 test cycle.

Keywords: Hybrid electric vehicle control strategy, HEV energy management optimization, discrete dynamic programming, CPHEV power management strategy.

1

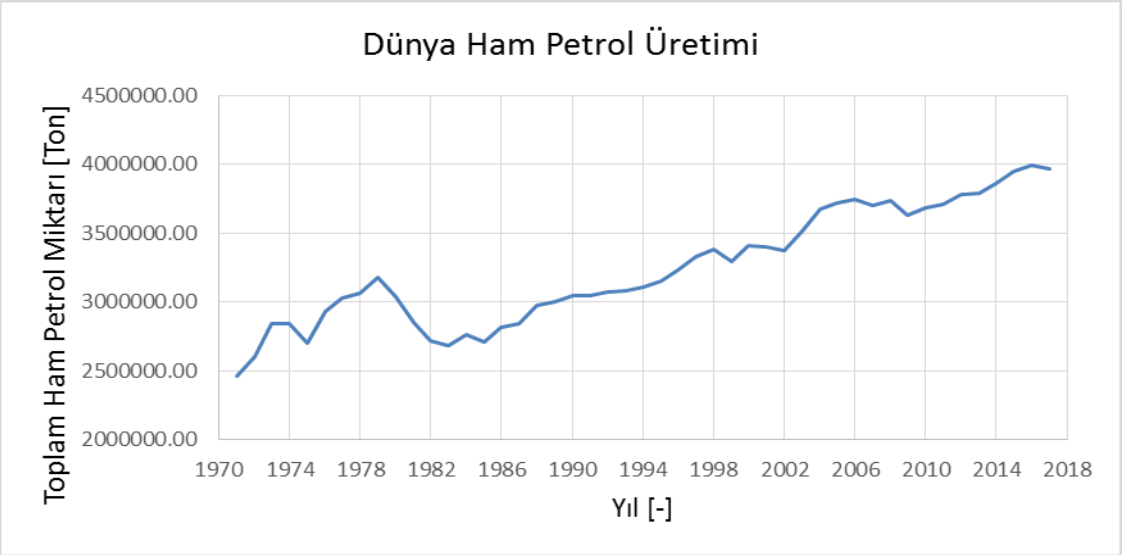
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Çağımızın önemli teknolojilerinden olan motorlu taşıtlar, hayatımızda ulaşım ve taşımacılık alanında sağladığı önemli katkılarla medeniyetin ve birçok teknolojinin gelişmesine imkân tanımıştır. Yüzyıl öncesinden günümüze kadar motorlu taşıtların gelişimi ve kullanım alanları gittikçe artmış, toplumda kullanılması vazgeçilemez bir teknoloji halini almıştır. Günümüzde var olan motorlu taşıtlar farklı ihtiyaç alanlarına özgü evrilerek, talep edilen ihtiyaçları karşılaması adına farklı teknolojilerle donatılmıştır ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Diğer taraftan, motorlu taşıtlarda gerekli olan tahrik gücünü sağlamak amacıyla geçmişten günümüze fosil yakıtlardan elde edilen kimyasal enerji kullanılmış ve bu durum beraberinde zararlı etkiler ve akabinde sınırlamalar getirmiştir. Motorlu taşıtların beraberinde getirdiği önemli sınırlamalar ve zararlı etkiler aşağıda açıklanmıştır.

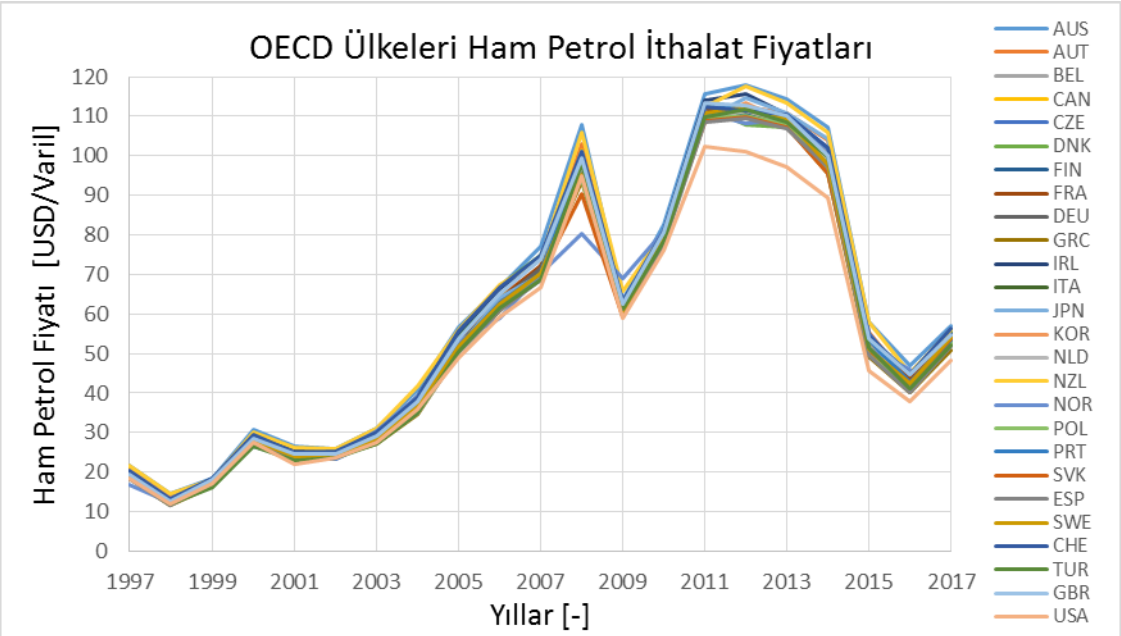
Konvansiyonel tahrik mimarisine sahip motorlu taşıtlarda 19 yy. dan günümüze, ham petrol türevleri (benzin, motorin, likit petrol gazı) ve diğer hidrokarbon çeşitleri (sıkıştılmış doğalgaz, etanol, bio-dizel…vs.) enerji kaynağı olarak içten yanmalı motorlarda (İYM) kullanılmaktadır. 1973-74 yıllarında OPEC (The Organization of the Petroleum Exporting Countries) ülkeleri tarafından getirilen petrol ambargosuyla ham petrol rezervlerinde yaşanan krizde, taşıtlarda yakıt ekonomisi önemli bir konu haline gelmiştir. O dönemlerde OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) üyesi ülkeler tarafından, yaşanan petrol krizinin aşılması, enerji güvenliği, enerji işbirliği ve alternatif enerji kaynakları

üzerinde çalışmalar başlatmak amacıyla, üye ülkeler arasında imzalanan ''Uluslararası Enerji Programı Anlaşması'' ile Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 18 Kasım 1974 tarihinde kurulmuştur [1]. Ham petrol kullanımının günümüze kadar sürekli artması mevcut petrol rezervlerinin azalmasını hızlandırmaktadır. Ham petrol üretimi 1971 - 2018 yılları arasında 2 462 778,7 tondan 3 970 914,7 tona yükselerek, 46 yılda toplam %61,1 oranında artmıştır. Yıllara göre dünyada üretilen toplam ham petrol miktarındaki artış Şekil 1.1'de gösterilmektedir [2].



Şekil 1.1 Dünya ham petrol üretimi (1970 – 2018)

Ham petrol talebinin artmasıyla ham petrol fiyatlarında da artış gözlemlenmektedir. OECD ülkelerinde ham petrol ithalat fiyatları son 20 yılda yaklaşık 20 USD/varil seviyelerinden 50 USD/varil seviyelerine yükselerek, toplamda %250 oranında artmıştır [3]. Yıllara göre OECD ülkelerindeki ham petrol ithalat fiyatlarındaki artış Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 OECD ülkeleri ham petrol ithalat fiyatları (1997-2017)

Ham petrol fiyatlarının artmasıyla beraber, taşıtlar için daha verimli güç kaynakları geliştirilmeye başlanmıştır. Bu kısıtlama ile, içten yanmalı motorlarda, yakıt tüketimini azaltmak adına daha verimli teknolojiler uygulanmaya başlanmış ve günümüzde geliştirilmeye devam etmektedir. Geliştirilen, hassas ve hızlı elektronik kontrol üniteleri, yüksek basınçta çalışan enjektörlü yakıt sistemleri, optimize edilmiş yanma odası tasarımları, değişken valf zamanlaması, yüksek sıkıştırma oranları, aşırı dolduma sistemleri vs. teknolojiler sayesinde günümüzde yakıt tüketimi açısından daha ekonomik motor operasyonları sağlanmaktadır. Ancak, içten yanmalı motorun, kimyasal enerjiyi (sıvı yakıtın barındırdığı enerji), mekanik tahrik gücüne (motor krank şaftından elde edilen güç) dönüştürmesi sırasında kullanılan termodinamik çevrimde, kullanılan yakıtın enerjisinin önemli bir bölümü termal kayıp ve sürtünme kaybı olarak tüketilmektedir. Bu sebeple İYM'lerde termal verim düşük seviyelerdedir (dizel motorlar için %45<, benzinli motorlar için %35<)[4]. Ayrıca güç aktarma sisteminde oluşan mekanik verim kayıplarından, sadece şanzımandaki mekanik verim kaybı %20'ye kadar ulaşmaktadır [5], ve dinamik taşıt işletme koşullarında meydana gelen frenlemeden dolayı fren sisteminde sürtünmeyle beraber oluşan kayıplar toplam sistem verimini düşürmektedir. İçten yanmalı motorların bu olumsuz özelliklerinin yanında, kullanılan ham petrol türevlerinin birim hacimde sahip olduğu yüksek enerji

yoğunluğu (benzin için 45,8 MJ/kg, dizel için 45,5 MJ/kg) [6] ve akabinde sağladığı uzun sürüş menzili (ortalama 800 km/depo), günümüzde konvansiyonel sistemlerin tercih edilmesini sağlamaktadır.

Konvansiyonel sistemlerde kullanılan İYM'lerde yakıtın kimyasal enerjisini ortaya çıkarmak için yanma odasında yakıt havada bulunan oksijen ile yanma reaksiyonuna girmektedir. Oluşan yanma sonucunda ortaya çıkan egzoz gazının çevreye ve insan sağlığına ciddi zararları vardır. Motorlu taşıtların neden olduğu hava kirliliği ilk olarak 1940'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde Los Angeles Havzası'nda ortaya çıkmıştır. Bu bölgede meydana gelen duman sorununun nitrojen oksitlerin (NO, NO2) ve hidrokarbon (HC) bileşikleri arasında güneş ışığı altında gerçekleşen reaksiyonlardan kaynaklandığı 1952 yılında Prof. A. J. Haagen Smit tarafından ortaya çıkartılmıştır [7]. Bu süreçte otomobillerden salınan karbonmonoksitin (CO) yanı sıra, nitrojen oksit (NO, NO_2) ve hidrokarbon (HC) salınımının da önemli bir katkısı olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla beraber, özellikle dizel motorlarından salınan is partiküllerinin çevreye ve insana olan zararları bilinmektedir. Bu gelişmelerle beraber, 1960'lı yıllarda California eyaleti başta olmak üzere ABD'de emisyon standartları getirilmiş, sonrasında emisyon standartları Japonya ve Avrupa ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır [8], [9], [10].

İYM'lerde hidrokarbon bileşiklerinin hava ile reaksiyona girmesi sonucu tam verimli bir yanmada sadece karbondioksit (CO_2) ve saf su (H_2O) ortaya çıkmaktadır. Ancak yanma fazının tam verimli gerçekleşmemesi CO, yanmamış HC ve özellikle dizel motorlarda önemli miktarda is partikülü salınımına yol açmaktadır. Ayrıca oksidasyon reaksiyonları havada buluna nitrojen (N_2) ve oksijenin (O_2) yanma odasında oluşan yüksek sıcaklıklarda (2000 K>) reaksiyona girerek nitrik oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO_2) formasyonu oluşmaktadır. Bunun dışında sülfür içeriğinin reaksiyona girerek sülfür dioksit (SO_2) ve sülfür trioksit (SO_3) oluşturması, benzinde bulunan kurşun içeriğinin (Pb) partikül emisyonları oluşturması, nitrojen oksitin (NO_x) düşük seviye ozon tabakası oluşumuna neden olması diğer zararlı emisyonları oluşturmaktadır [8], [11], [12]. Bu emisyoların çevre ve insan sağlığına etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Normal organik bileşik oksidasyonunda açığa çıkan CO_2 normalde doğada bitkiler için fotosentez çevriminde kullanılan doğrudan insana ve çevreye zararı olmayan bir gazdır. Ancak aşırı CO_2, salınımıyla beraber atmosferde bunulan sera gazlarının önemli bir bölümünü oluşturur. Sera gazları, güneşten gelen ve dünya tarafından yansıtılan kızılötesi radyasyonu atmosfer içinde tutarak, atmosferdeki enerjiyi korur ve ortalama sıcaklığı arttırarak akabinde küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Bunun yanında diğer bir sera gazı elemanı olan dinitrojen monoksit (N_2O) yanma reaksiyonları sonucu oluşan egzoz gazlarındandır [11], [12].

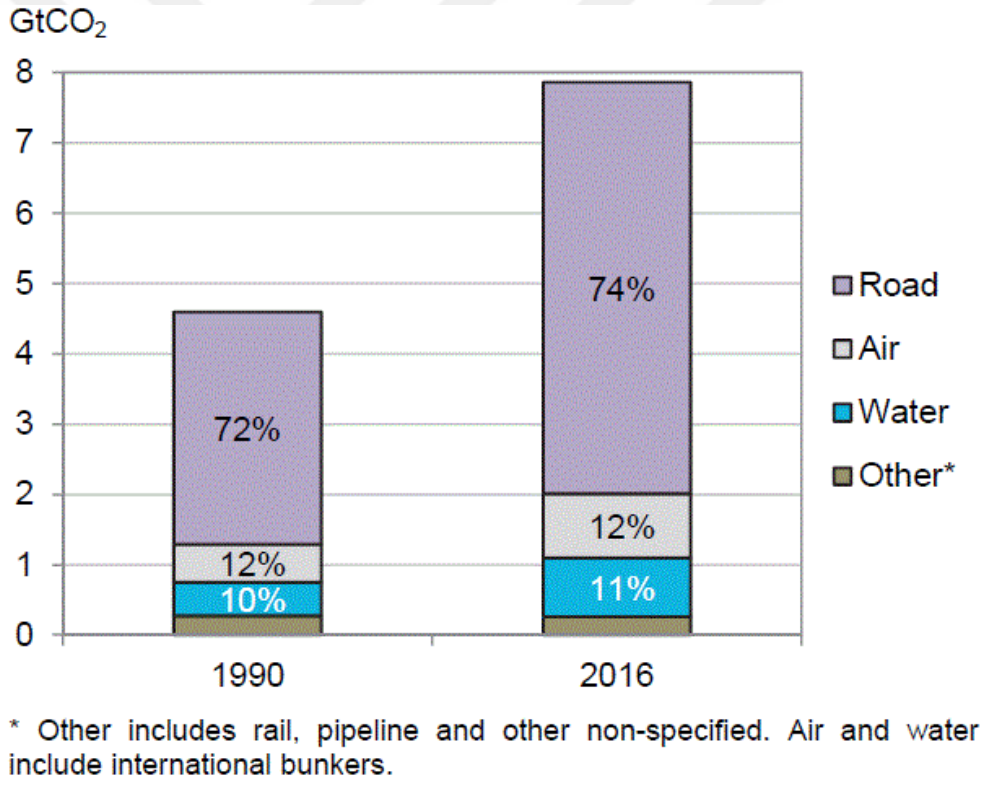
Hidrokarbon oksidasyonunda eksik yanma sonucu CO ve HC açığa çıkmaktadır. CO nefes alan canlılar için zehirli bir gazdır. CO nefes alan canlılar için zehirli bir gazdır. Nefes alımında dolaşım sistemine katılmakta ve oksijen tutucu hemoglobinlere sabitlenmektedir. Bu nedenle dolaşım sisteminde hemoglobin oksijen (O_2) taşıyamamakta ve organlara yaşamsal faaliyetler için O_2 sevk edememektedir. CO zehirlenmesine bağlı olarak baş dönmesi ve ölüm meydana gelmektedir.

Yanmamış HC, içeriğine göre farklı zararları mevcuttur. İçerisinde kanserojen bileşikler bulundurur. Ayrıca havadaki NO ile güneş ışığı altında reaksiyona girerek alçak seviye ozon (O_3) tabakası oluşturmaktadır. Ozon tabakası canlı hücre zarlarına zarar vermekte, solunum yolları rahatsızlıklarına neden olmakta ve özellikle çocuklar ve yaşlı insanlar bu durumdan ciddi zarar görmektedirler.

Yanma sırasında havada bulunan nitrojen (N_2) yüksek sıcaklıklarda nitrojen oksitleri (NO_x) oluşturmaktadır. Bunun yanında büyük oranda kömür kullanan termik santrallerden ve çelik fabrikalarından salınan sülfür dioksit (SO_2) ve ayrıca küçük oranda özellikle yüksek sülfür (S) içeriği bulunan dizel yakıtta oksidasyon sonucu sülfür dioksit (SO_2) oluşturmaktadır. Bu gazlar atmosferdeki su, oksijen ve diğer kimyasallarla reaksiyona girerek nitrik asit (HNO_3) ve sülfürik asitleri (H_2SO_4) oluşturmaktadır. Oluşan asitler atmosferden yeryüzüne asit yağmuru olarak inmektedir. Asit yağmuru, özellikle ormanlara, akarsu ve göllerdeki canlılara zarara vermektedir.

Salınan bu kimyasal maddeler ayrıca reaksiyona girerek partiküller oluşturmaktadır. Oluşan partiküller çok farklı boyutlarda ve farklı kimyasal reaksiyonların sonucu olabilmektedir. Başlıca NO_x ve SO_2'nin partikül emisyonuna

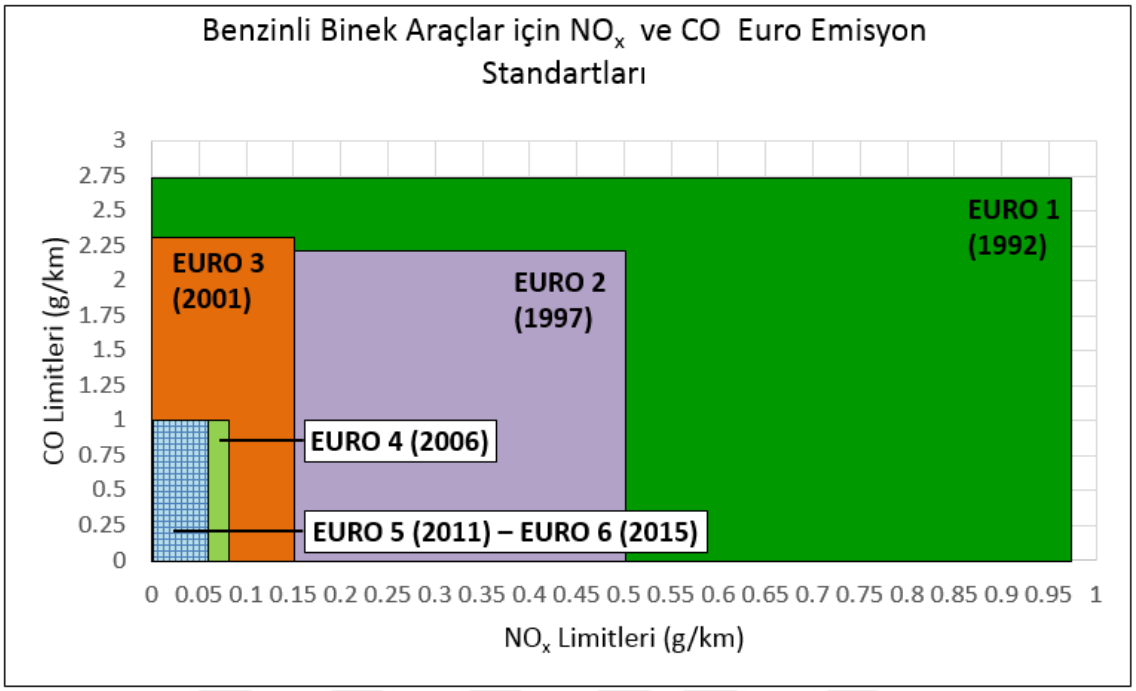
neden olmasıyla beraber benzinde kullanılan kurşunda bu partikül oluşumuna dahil olabilmektedir. Ayrıca eksik yanma sonucu oluşan karbon (C) partikülleri is emisyonlarının temelini oluşturur. Oluşan partiküller çok küçük boyutlarda (<2 μm) olup, solunumla beraber ciğerlerde canlı dokular arasına kolaylıkla erişebilmektedir. Bu denli ağır metaller ve kanserojen etkiye sahip maddeler içeren partiküller, kalp veya akciğer hastalığı olan kişilerde erken ölüm, ölümcül olmayan kalp krizi, düzensiz kalp atışı, ağırlaştırılmış astım, azalmış akciğer fonksiyonu, solunum yollarının tahrişi, öksürme veya solunum zorluğu gibi solunum semptomlarında artışa neden olmaktadır [11], [12], [13], [14]. Dünya genelinde taşımacılık sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonları 1990 – 2016 yılları arasında %71 artmıştır. CO_2 salınımının taşımacılık sektöründe yıllara göre artışı Şekil 1.3' te gösterilmiştir [15].



Şekil 1.3 Taşımacılık sektörü alt sektörlere göre CO2 salınım miktarları (1990,2016)[15]

Geçmişten günümüze emisyon gazlarının çevre ve insan sağlığı üzerinde zararlı etkileri gözlemlenmiş ve emisyon gazları için sınırlamalar getirilmeye başlanmıştır. Avrupa Birliği 1992 yılında ilk olarak motorlu taşıtlar için Euro 1 standartlarını

getirmiştir [16], [17], [18]. 1992 yılından günümüze bu sınırlamalar güncellenmekte ve daha alt seviyelere indirilmektedir. Şekil 1.4'te benzin motorlu binek araçlarda NO_x ve CO için Euro emisyon standartları gösterilmiştir.



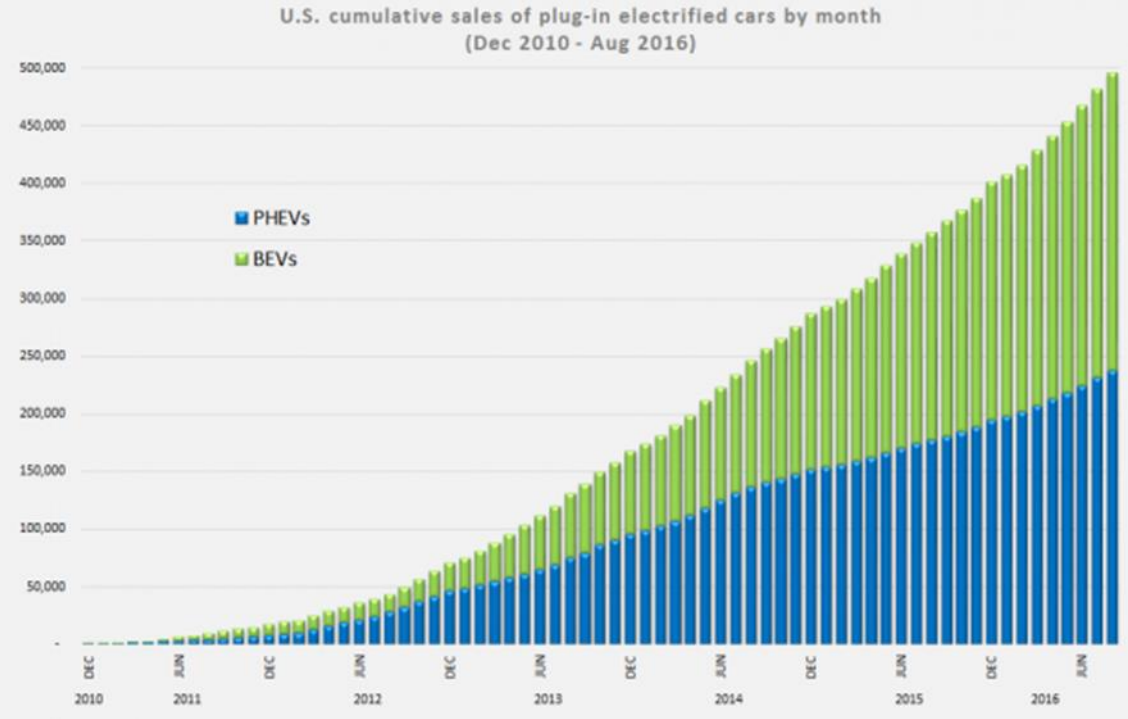
Şekil 1.4 Benzinli binek araçlarda NO_x ve CO için Euro smisyon standartları[1][2]

Getirilen sınırlamalarla beraber egzoz sisteminde ilave art gaz arıtma sistemleri (EATS) geliştirilmiştir ve günümüzde benzinli araçlar için egzoz gaz resirkülasyonu (EGR), üç yollu katalist (TWC), benzin partikül filtresi (GPF) gibi teknolojiler geliştirilmekte olup, dizel motorlar için, egzoz gaz resirkülasyonu (EGR), dizel oksidasyon katalisti (DOC), seçici katalitik indirgeme (SCR), fakir nitrojen oksit tutucu (LNT) ve dizel partikül filtresi (DPF) gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler sayesinde CO, HC, NOx, SOx ve partikül emisyonlarında iyileşme sağlanmış, geliştirilen arıtma sistemleri taşıt ve işletme maliyetlerini arttırmıştır.

[1] Euro 1 ve Euro 2 Emisyon Standartlarında NO_x limiti toplam NO_x + HC limitini ifade etmektedir [16], [17], [18].
[2] Euro 6 emisyon standartlarında Euro 5'ten farklı olarak direkt enjeksiyon sistemine sahip benzinli motorlar için partikül numarası sınırlaması getirilmiştir (6×10^{12}/km) [16], [17], [18].

1.1.1 Alternatif Tahrik Sistemleri

Emisyon standartları limitlerinin gittikçe daralması ve petrol fiyatlarındaki artış üreticileri ve kullanıcıları daha çevreci ve ekonomik taşıt çözümlerine yönlendirmiştir. Konvansiyonel taşıt tahrik sistemlerine alternatif olarak günümüzde birkaç alternatif ön plana çıkmaktadır. Alternatif olarak, tam elektrikli taşıtlar (BEV), yakıt hücreli elektrikli taşıtlar (FCEV), hibrit elektrikli taşıtlar (HEV) üzerinde çalışılmaktadır. Geliştirilen alternatif, elektrik temelli tahrik sistemlerinin gelişimi özellikle 1990'lı yıllarda (GM EV1, PSA 106 electric, Honda Prius) [11], [19], ivmelenme kazanmış ve modern seri üretim modeller yine bu dönemde piyasaya sürülmüştür. Günümüzde, hibrit ve tam elektrikli taşıtların toplam taşıt pazarının önemli bir payını oluşturmakla beraber, elektrikli ve hibrit elektrikli modeller için pazar payı, başta binek araçlar olmak üzere, hafif - ağır ticari ve yol dışı araçlarda gittikçe artmaktadır. Şekil 1.5'te ABD'de elektrik ve hibrit elektrikli araçların 2010-2016 yılları arasındaki kümülatif satış adetleri gösterilmektedir [20].

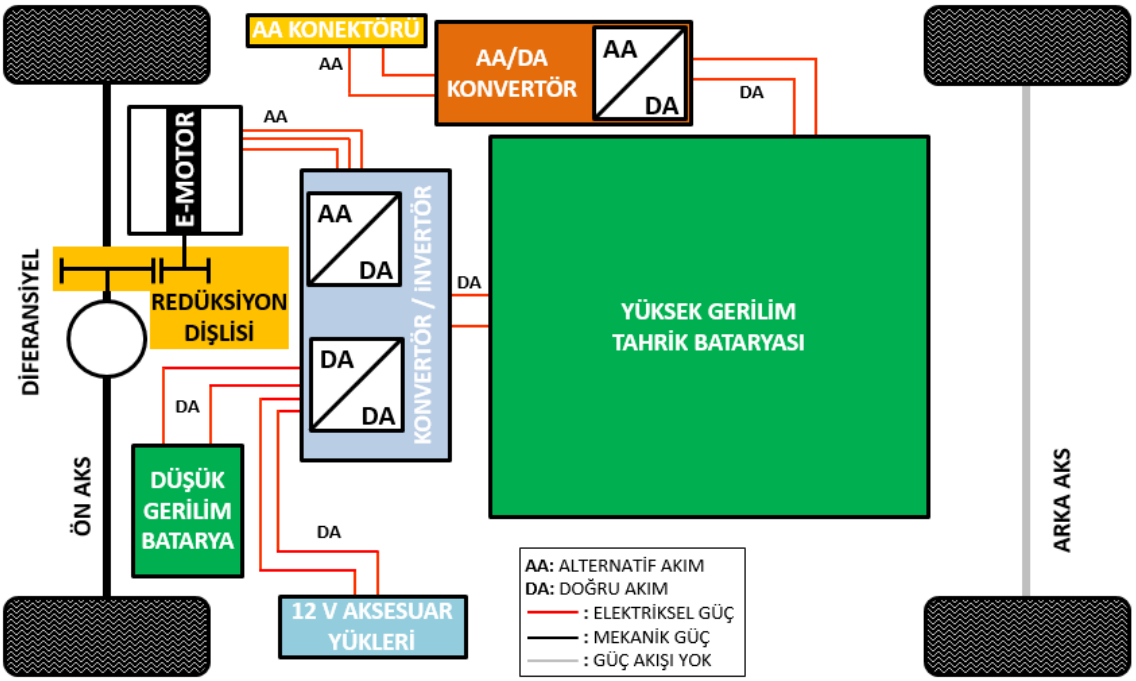


Şekil 1.5 ABD kümülatif HEV ve EV satış rakamları (2010-2016)[20]

1.1.1.1 Tam Elektrikli Taşıtlar (BEV)

Tam elektrikli taşıtlar (BEV), sadece elektrik enerjisi ile tahrik gücünü temin eden sistemlere sahip olan taşıtlar olarak tanımlanabilir. Elekrikli taşıtlar tahrik gücünü elektrik motorundan/motorlarından sağlamaktadır. Gerekli olan enerji elektrik enerjisi formunda bataryalarda depolanmaktadır. Çevreye ve insanlara zararlı gaz emisyonlarına sebep olmadığından konvansiyonel araçlara nazaran daha çevrecidir. Ayrıca tahrik enerjisi olarak kullanılan elektrik enerjisi tahrik sisteminde karmaşık tahrik mekanizmalarına ihtiyaç kalmadan direkt olarak elektrik enerjisini elektrik motorlarına besleyerek gerekli tahrik gücü kontrolü, gerilim ve akım kontrolü ile sağlanabilmektedir [21]. Rejeneratif frenleme teknolojisi sayesinde frenleme esnasında harcanan enerjinin önemli bir kısımı geri kazanılarak taşıt bataryası şarj edilebilmektedir. Diğer taraftan elektrikli araçlardaki bataryaların düşük özgül enerji kapasitesi, taşıt sürüş menzilini ciddi ölçüde azaltmaktadır [4], [11], [19].

Ayrıca, bataryayı yeniden şarj etme süresi, aynı sınıftaki bir taşıt için bir depo yakıtı doldurma süresinden ciddi anlamda uzundur ve uzun menzilli seyahatlerde henüz daha güvenilir bir batarya teknolojisi sağlanamamıştır. Bunun yanında bataryalarda enerji akışı sırasında kullanılan yüksek gerilimler (300 - 400 V) sürüş güvenliğini riske atmaktadır [22]. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların kullanım şekline bağlı olarak ve zamanla kullanım ömrünün azalması taşıt ömrü boyunca uzun ömürlü bir enerji kaynağı sağlamamaktadır. Ayrıca kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar, çevre için ayrı bir kirlilik unsuru oluşturmaktadır. Dahası, batarya şarjı sırasında kullanılan elektrik enerjisinin üretim kaynağının neden olduğu emisyonlar ihmal edilecek seviyenin üzerindedir. Yenilenebilir enerji dışında kullanılan veya termik santrallerden elde edilen elektrik enerjisi azımsanmayacak ölçüde zararlı emisyonlara sebebiyet vermektedir [11], [23], [24]. Örnek tam elektrikli taşıt mimarisi Şekil 1.6'da gösterilmektedir.



Şekil 1.6 Tam elektrikli taşıt (BEV) mimarisi

Elektrik tahrikli taşıtların gelişimi motorlu taşıtların icadı ile başlamıştır. 19. yüzyılın başlarında elektrikli taşıtlar için kurşun asit bataryalar kullanılmıştır [19]. Günümüzde kurşun asit bataryalar taşıtlarda tahrik enerjisi haricinde aksesuaralar için elektrik enerjisini temin etmek için kullanılmaktadır. Ancak tahrik gücü için gerekli enerji daha güçlü ve farklı teknolojiler barındıran batarya kümelerinden oluşmaktadır. Son 30 yıldan günümüze başlıca Nikel Kadmiyum (Ni-Cd), Nikel Metal Hidrit (Ni-Mh), Lityum İyon (Li-ion), Lityum polimer (Li-poly), Soydum Sülfür (Na2S), Zirkonyum Hava (Zn-Air) gibi farklı batarya tipleri kullanılmıştır [25]. Günümüzde güç kapasitesi ve uzun kullanımda kararlı güç karakteristiği dolayısıyla Lityum İyon (Li-Ion) bataryalar elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Otomotiv uygulamalarındaki batarya sistemlerinin spesifikasyonları Tablo 1.1'de paylaşılmıştır [11].

Tablo 1.1 Otomotiv uygulamalarında kullanılan batarya sistem spesifikasyonları [11]

TABLE 10.2

Status of Battery Systems for Automotive Applications

System	Specific Energy (Wh/kg)	Peak Power (W/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle Life	Self-Discharge (% per 48 h)	Cost (US$/kWh)
Acidic aqueous solution						
Lead/acid	35–50	150–400	>80	500–1000	0.6	120–150
Alkaline aqueous solution						
Nickel/cadmium	50–60	80–150	75	800	1	250–350
Nickel/iron	50–60	80–150	75	1500–2000	3	200–400
Nickel/zinc	55–75	170–260	65	300	1.6	100–300
Nickel/metal hydride	70–95	200–300	70	750–1200+	6	200–350
Aluminum/air	200–300	160	<50	?	?	?
Iron/air	80–120	90	60	500+	?	50
Zinc/air	100–220	30–80	60	600+	?	90–120
Flow						
Zinc/bromine	70–85	90–110	65–70	500–2000	?	200–250
Vanadium redox	20–30	110	75–85	—	—	400–450
Molten salt						
Sodium/sulfur	150–240	230	80	800+	0[a]	250–450
Sodium/nickel chloride	90–120	130–160	80	1200+	0[a]	230–345
Lithium/iron sulfide (FeS)	100–130	150–250	80	1000+	?	110
Organic/lithium						
Lithium-ion	80–130	200–300	>95	1000+	0.7	200

[a]No self-discharge, but some energy loss by cooling.

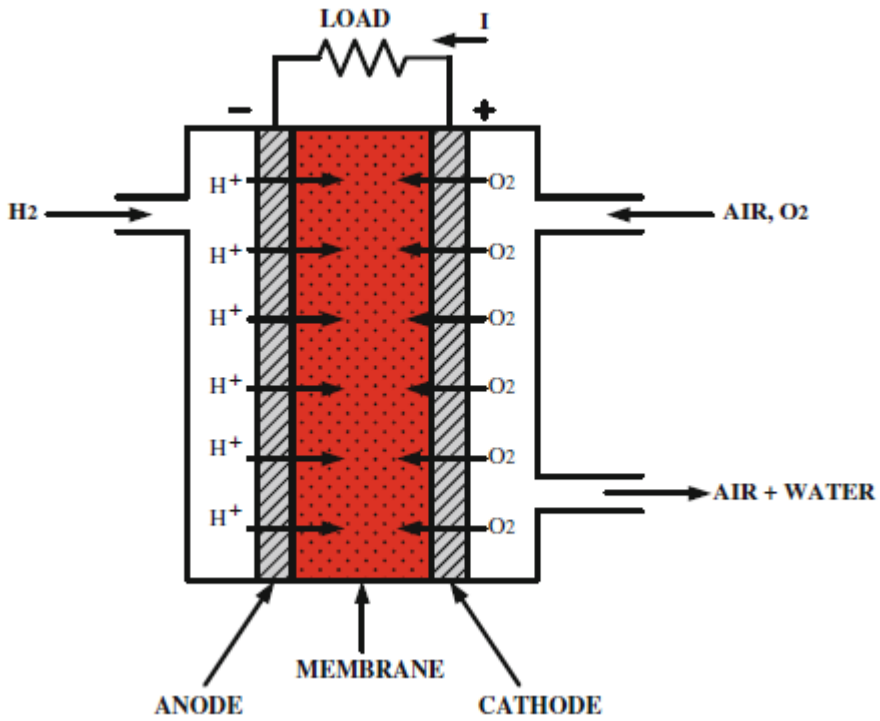
Elektrikli tahrik sisteminde, sadece dışardaki bir enerji şebekesiyle şarj edilebilen batarya sistemleri ile limitli menzillerde ve belirlenmiş işletme şartlarında taşıt operasyonları işletme maaliyetleri için en uygun çözüm olarak düşünülmekle beraber, tahmin edilemeyen taşıt işletme şartları için sistemin güvenilir bir şekilde amaçlanan sürüş menzilini sağlaması her şartta olası görülmemektedir.

Tam elektrikli tahrik sisteminin yanı sıra elektrik enerjisini taşıt operasyonu sırasında sürdürülebilir bir şekilde temin etme ihtiyacı, hibrit tahrik sistemlerini doğurmuştur. Hibrit tahrik sistemlerinde bataryayı, taşıt kullanımı esnasında şarj etmek amacıyla ilave bir güç kaynağı bulunur. Güç kaynağı olarak, içten yanmalı motor veya yakıt hücresi kullanılmaktadır.

HEV'ler temel olarak iki farklı enerji kaynağından tahrik gücünü temin eden taşıt tahrik sistemleri olarak tanımlanmaktadır [26]. Hibrit tahrik mimarisinde genel olarak elektrik enerjisi, batarya – elektrik motoru sistemi, tahrik enerjisini oluşturur. Elektrik enerjisinin yanında bataryayı şarj etmek için İYM, volan sistemleri, yakıt hücreleri, ultra kapasitör gibi teknolojileri barındıran sistemler de hibrit elektrikli taşıt olarak sınıflandırılmaktadır [11], [25], [26], [27].

1.1.1.2 Yakıt Hücreli Elektrikli Taşıtlar (FCEV)

Yakıt hücreli hibrit elektrikli taşıtlarda (FCEV), yakıt hücresi elektrokimyasal reaksiyonlarla hidrojen ve atmosfer havasını kullanarak kimyasal enerjiyi direkt olarak kullanılabilir elektrik enerjisine çevirmektedir [23]. Şekil 1.7'de proton değişim membranı tipi (PEM) yakıt hücresi çalışma prensibi gösterilmiştir [26].

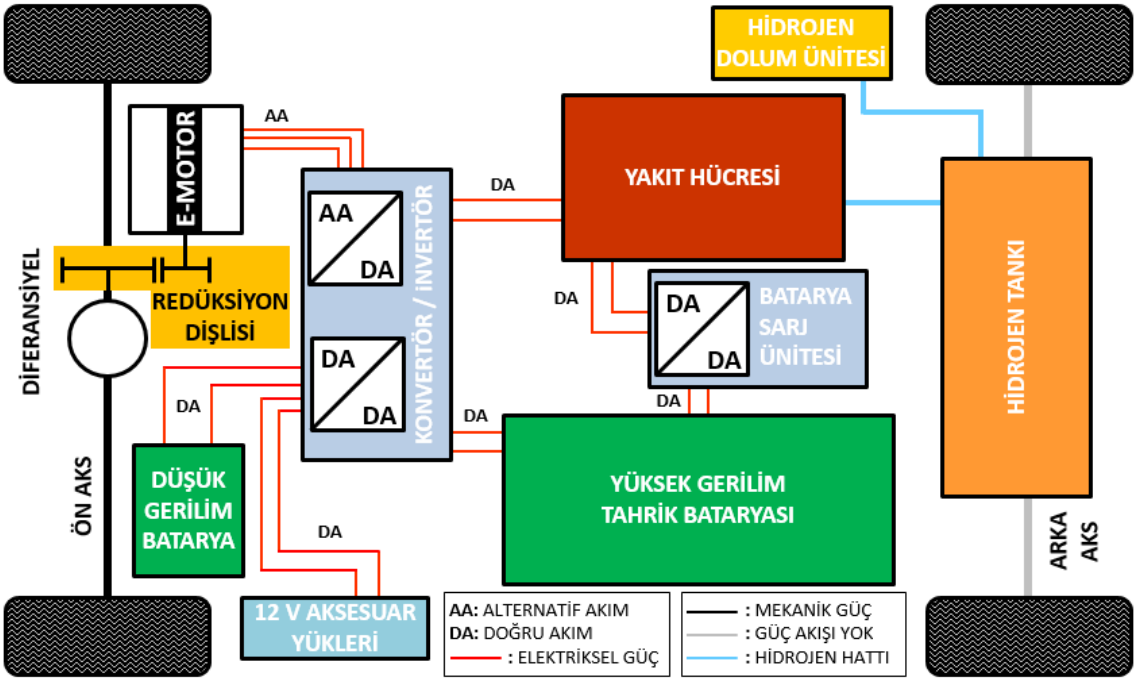


Şekil 1.7 PEM tipi yakıt hücresi çalışma prensibi [26]

Yakıt hücresine beslenen hidrojen (H_2) anot (-) elektrodunda elektronlarını bırakarak pozitif yüklenir. Artı yüklü hidrojen (H^+) iyonlarının, membran tarafından katot (+) elektroduna geçmesine izin verilir. Bu arada hidrojenden alınan elektronların membran tarafından katot elektroduna geçmesine izin verilmez ve

elektronlar membran dışından katot kısmına iletilerek elektrik akımı elde edilmiş olunur. Daha sonra katot kısmında geçen elektronlar hidrojen iyonu (H^+) ve oksijen (O_2) ile birleşerek saf su (H_2O) meydana getirmektedir [28].

Yakıt hücrelerinde okside edilebilen tüm sıvı maddeler elektrik enerjisi elde etmek için teorik olarak kullanılabilir. Pratik uygulamalarda ise hidrojen, doğalgaz, etanol ve metanol kullanılabilmektedir [23]. Yakıt pillerinde gerçekleşen reaksiyonlarda tepkime sonucunda çıkan ürün olarak sadece saf su (H_2O) elde edilmektedir. Bu sayede, yakıt hücreli araçlar 0 emisyon araç sınıfında değerlendirilmektedir. Ancak hidrojen kaynağı olarak doğalgaz, etanol veya metanolün kullanılması sonucu saf suyun yanında karbondioksit (CO_2) doğaya salınmaktadır. Örnek yakıt hücreli elektrikli taşıt mimarisi Şekil 1.8'de gösterilmektedir.



Şekil 1.8 Yakıt hücreli elektrikli taşıt (FCEV) mimarisi

Ayrıca yakıt hücrelerinin araç uygulamalarındaki yeterli verimi (%40-%50) yakıt hücrelerini taşıt uygulamarında makul kılmaktadır. Diğer taraftan kullanılan hidrojenin yoğunluğu normal şartlar altında çok düşüktür (NŞA'da 0.08988 g/L) ve taşıt operasyonunda yeterli miktarda hidrojeni sıvı fazda tutabilmek için, araç üzerinde yüksek basınçlı tanklarda (300 veya 700 bar) depolama zorunluluğu

vardır [24]. Bunun yanında hidrojeni yüksek basınçta depolamak ve bunun taşıtlara dağıtım işlemi ilave enerji tüketimi ve maliyet olarak yansımaktadır [23], [26].

1.1.1.3 Hibrit Elektrikli Taşıtlar (HEV)

Konvasiyonel tahrik sistemlerine başka bir alternatif olarak İYM'ye sahip hibrit elektrikli taşıtlar (HEV) günümüzde önemli bir yere sahiptir. İYM'li tahrik sistemlerinin uzun sürüş menzili avantajı ve yüksek özgül enerji depolama kapasitesiyle beraber, İYM'nin dinamik taşıt operasyonu sırasında talep edilen değişken güç talebini her koşulda yüksek bir verimle karşılayamaması ve dinamik koşullarda meydana gelen mekanik ve termal enerji kayıplarının geri kazanılamamasıyla beraber, elektrikli araçlardaki bataryaların düşük enerji kapasiteleri ve uzun şarj süreleri hibrit tahrik mimarilerinin geliştirilmesini sağlamıştır [11], [23], [26], [29].

Günümüzde İYM'ye sahip hibrit tahrik sistemleri çoğunlukla tercih edilmektedir. Geçmişten günümüze hâlihazırda geliştirilmiş, güvenilir İYM teknolojisi, yakıtta olan yoğun kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye daha sonra generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine çevirmektedir. İYM'den elde edilen elektrik enerjisi bataryada depolanarak tahrik gücü sağlamak için elektrik motorunda kullanılmaktadır. Ayrıca, İYM mekanik tahrik gücü olarak farklı HEV tahrik mimarilerinde direkt olarak kullanılabilmektedir.

Bu prensip sayesinde İYM, dinamik taşıt operasyonlarında termal verim olarak en verimli bölgelerinde kontrollü bir şekilde çalıştırılmaktadır. Ek olarak HEV'lerde, daha yüksek sistem verimi sayesinde konvansiyonel araçlarda kullanılan İYM'lere kıyasla, daha küçük hacimli İYM ile aynı güç talebi karşılanabilmektedir. Bu sayede aynı güç talebi için daha az yakıt tüketimi, akabinde daha düşük emisyonlar sağlanmaktadır. Son olarak, elektrik üretiminde temel olarak yüksek özgül enerji kapasitesine sahip fosil yakıtların kullanılması sürüş menzilini arttırmakta ve bataryaların düşük özgül enerji kapasitelerinin olumsuz etkisini ortadan kaldırmaktadır [23], [24], [26].

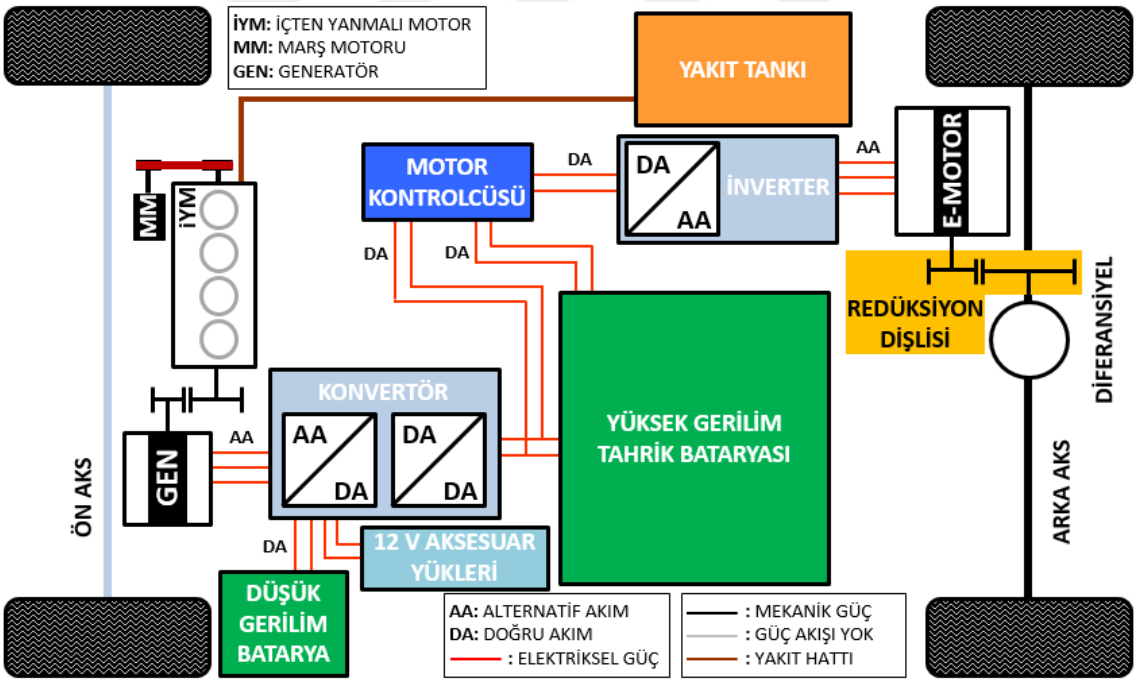
Elektrik motorunun yüksek verimli işletme karakteristiği ve kısa sürede yüksek tork kabiliyeti sayesinde, taşıt performansından ödün vermeden sürüş operasyonu

sağlanmaktadır. Son olarak, dinamik taşıt operasyonlarında, frenleme sırasında meydana gelen enerji kayıpları, elektrik motoru sayesinde (rejeneratif frenleme) geri kazanılarak, toplam sistem verimi artmaktadır [23].

HEV'ler tahrik mimarisi olarak, birçok farklı tahrik mimarisi kombinasyonu olmakla beraber, seri, paralel, mikro-mild, seri-paralel (kombine)-kompleks HEV' ler olmak üzere dört ana bölüme ayrılmıştır [11], [23], [26], [29].

i. Seri Hibrit Elektrikli Taşıtlar

Seri hibrit sistemlerde, taşıt sadece elektrik motorunun sağladığı tahrik gücü ile hareket enerjisini kazanır. Elektrik enerjisi bataryada depolanan elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır. İYM generatör ile beraber bataryaya elektrik enerjisini temin eder. Ayrıca elektrik motoru tarafından dinamik sürüş koşullarında frenleme esnasında harcanan enerjinin büyük bir bölümü rejeneratif frenleme yoluyla geri kazanılmaktadır. Seri HEV mimarisi Şekil 1.9'da gösterilmiştir.

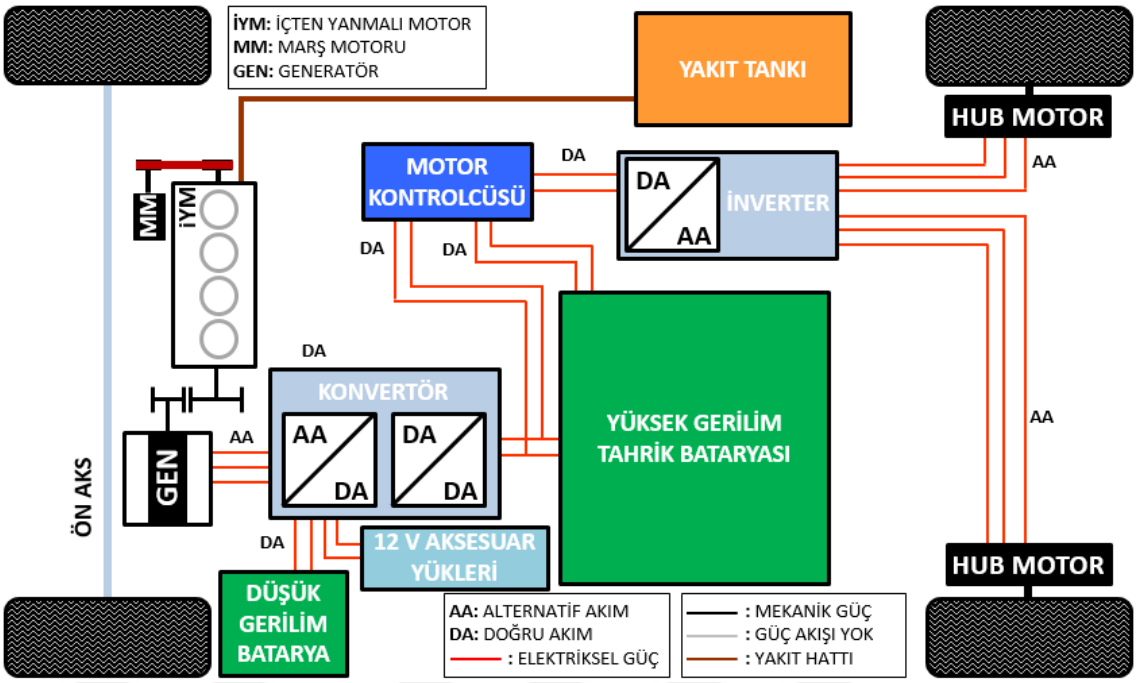


Şekil 1.9 Seri hibrit elektrikli taşıt mimarisi

Seri hibrit mimariler ayrıca bataryayı elektrik şebekesi ile şarj etmek amacıyla şarj ünitesine (plug-in) sahiptir. Bu sayede batarya, taşıt park pozisyonundayken daha

az maliyetli bir şekilde şarj edilebilmektedir. Seri hibrit mimarisinin sağladığı başlıca avantajlar aşağıda listelenmiştir:

1. Seri hibrit araçlarda İYM çalışması doğrudan taşıt sürüş şartlarına bağlı değildir. İYM'nin temel amacı elektrik generatörü (GEN) ile bataryaya elektrik gücü sağlamak olduğu için, İYM yakıt ekonomisi ve emisyonlar açısından en verimli bölgelerde çalıştırılabilir.
2. İYM ve tahrik tekerleri arasında herhangi bir mekanik bağ yoktur. Bu yüzden içten yanmalı motorda kavrama ve şanzıman kullanma ihtiyacı da ortadan kalkmıştır. İYM direk olarak generatöre bağlanarak istenilen elektriksel gücü bataryaya iletir.
3. İYM'nin tahrik sisteminden bağımsız olması, araç içerisinde komponent yerleştirmede esneklik sağlar. Özellikle sınırlı alana sahip araçlarda İYM – GEN sistemi farklı pozisyonlarda yerleştirilebilir.
4. HEV'lerde taşıt tüm tahrik gücünü elektrik motorundan sağlamaktadır. Elektrik motoru taşıt hareketi ve devamında talep edilen değişken torku redüksiyon dişli sistemi ve gerilim kontorlü ile hızlı ve hassas bir şekilde sağlar.
5. Ayrıca tahrik sırasında teker tipi (wheel - hub) elekrik motorları kullanılarak her bir teker için ayrı tahrik kontorlü sağlanabilir. Bu şekilde, ilave güç aktarma sistemlerine ve karmaşık tasarımlara ihtiyaç duymadan, 4 tekerden çekişli bir tahrik sistemi sağlanmış olur. Seri hibrit teker tipi elektrik motor uygulaması Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Seri hibrit elektrikli taşıtlar için teker tipi (Wheel -Hub) elektrik motoru uygulaması

Seri HEV'lerin avantajlarının yanı sıra, konstrüktif ve operasyonel açıdan dejavantajları da bulunmaktadır:

1. Seri HEV'lerde sadece elektrik motorundan tahrik gücünün sağlanması, elektrik motoru kapasitesinde önemli sınırlamalar getirmektedir. Elektrik motoru aracın talep ettiği maksimum gücü tek başına sağlamak zorundadır. Bu yüzden seri HEV tasarımında elektrik motoru seçiminde belirli bir motor büyüklüğünün üzerinde seçim yapılabilir. Motor büyüklüğünün ağırlık ve hacim olarak araç tasarımında olumsuz etkisi vardır.
2. Seçilen elektrik motorunun diferasiyel sisteminden önce araç kalkış torkuna sağlaması için redüksiyon dişli sistemine ihtiyacı vardır. Redüksiyon dişli sistemi ölçüleri çevrim oranına bağlı olarak, tasarım esnasında ciddi ölçüde hacim kaplayabilir.
3. Taşıt üzerine ilave generatör, batarya ve elektrik motorunun ilave edilmesi, İYM ile bağlantılı mekanik güç aktarma sisteminin bulunmamasına rağmen taşıta ilave ağırlığa neden olur. Aynı şartlarda toplam araç ağırlığını ve yakıt tüketimini azaltmak için daha düşük hacimli ve yakıt tüketimi açısından daha

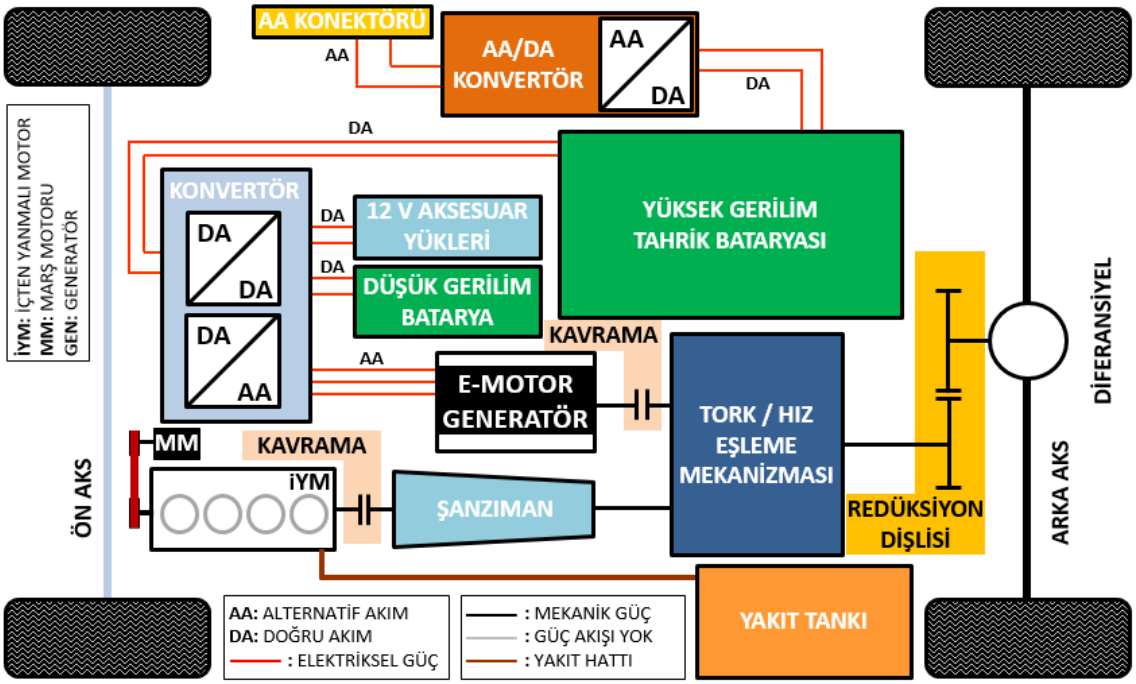
verimli İYM'ler seçilmek zorundadır. Ayrıca eklenen her konponent ilave maliyetlere sebep olmaktadır.

4. Taşıtın talep ettiği tahrik gücünü daha düşük güçlü ve hacimli teker tipi elektrik motorları ile dört teker üzerinden tahrik sağlanabilir. Ancak bu mimaride differansiyel kullanılmadığından tekerler üzerindeki tork dağılımı elektrik motorlarının koordineli bir şekilde kontrolü ile mümkündür. Ayrıca motor tork limitlerinin, tork dağılımını kısıtlama riski vardır. Dört ayrı elektrik motorunun tork dağılım kontrolü ayrı bir çaba gerektirmektedir.

İYM'den üretilen elektik enerjisini generatör vasıtasıyla bataryalara göndermek için üretilen dalgalı akımın doğrultucuda doğrultulması gerekmektedir. Ayrıca bataryadan elektrik motoruna beslenen gerilimin, elektrik motorunun tipine göre, inverter ile yükseltilmesi gerekmektedir. Tüm bu iletim döngüsü sırasında verim kayıpları yaşanmaktadır. Ayrıca elektrik motorunda güç üretimi sırasında yaşanan kayıplarla beraber toplam sistem kaybı ihmal edilemeyecek düzeydedir.

ii. Paralel Hibrit Elektrikli Taşıtlar

Paralel HEV'lerde, konvansiyonel İYM ve güç aktarma sistemi elektrik tahrik sistemiyle donatılmıştır. Paralel HEV'de tahrik gücü sağlamak için İYM ve elektrik motoru beraber kullanılmaktadır. Taşıt oparasyonlarında elektrik tahrik gücü İYM sistemine yardımcı olmaktadır. Elektrik motoru ve İYM tahrik gücü mekanik olarak bir mekanizmada (tork/hız eşleme mekanizması) bağlanmıştır. Bu mekanizma temel olarak CVT veya planet dişli mekanizmasından oluşmaktadır. Güç aktarımında kullanılan mimariler çeşitli kombinasyonlar halinde kullanılabilmekte olup, paralel hibrit mimarisine tipik bir örnek Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11 Paralel hibrit elektrikli taşıt mimarisi

Paralel hibrit sistemlerde elektrik motoru tahrik dışında generatör modunda bataryayı şarj etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca paralel hibrit mimarilerde de batarya sistemi elektrik şebekesiyle şarj edilebilmektedir. Bu sayede elektrik enerjisi daha az maliyetli şekilde elde edilmektedir. Paralel hibrit mimarisinin sağladığı avantajlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Elektrik motoru hem teker tahriği hem de bataryayı şarj etmek için kullanıldığından ilave generatör sistemine ihtiyaç duymaz.
2. İYM ve elektrik motorundan elde edilen tahrik gücü enerji çevrimi olmadan (mekanik – elektrik – mekanik) direkt olarak tahrik tekerlerine iletilir. Bu sayede enerji çevriminde meydana gelen kayıplar azaltılmış olur.
3. Elektrik motoru özellikle durk-kalk sürüş çevrimlerinde ve ivmelenme esnasında gerekli olan pik güç taleplerinde İYM'ye tahrik desteği vererek İYM'nin dinamik şartlarda daha verimli çalışmasını sağlar.
4. Taşıtın ihtiyaç duyacağı maksimum güç, elektrik motoru (EM) ve İYM arasında paylaştırılarak, tasarım esnasında güç hacim ve ağırlık anlamında daha düşük ölçülerde komponentler seçme olanağı tanımaktadır.
5. Herhangi bir güç kaynağının (İYM veya EM) arızasında çalışabilir güç kaynağı ile taşıt tahriği sürdürülebilir.

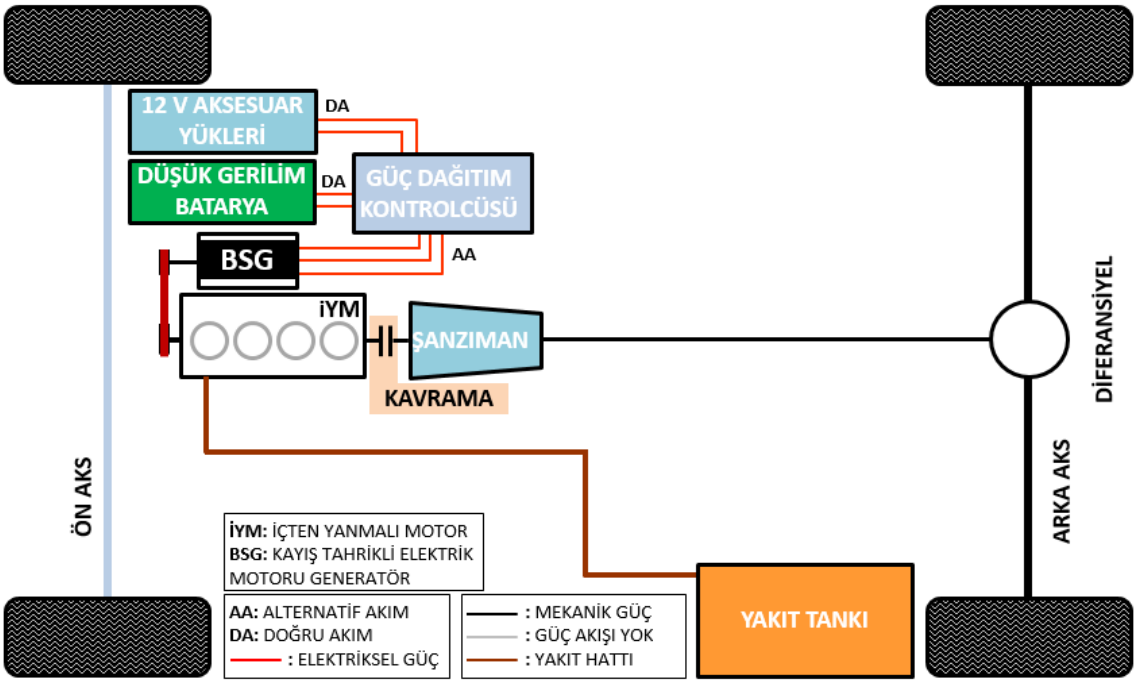
Paralel hibrit tahrik sisteminin getirdiği kolaylıkların yanı sıra sistemin karmaşıklığı ve operasyon stratejisi birkaç dezavantajı da beraberinde getirmektedir,

1. EM ve İYM'den gelen tahrik gücünün tek bir şaft üzerinde birleştirmek için birden fazla kavrama ve şanzıman sistemi kullanılabilmektedir. Bu durumda toplam sistem verimi azalmakta ve sistem kontrolü karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır.
2. İYM tahrik tekerlerine mekanik olarak bağlantılıdır ve dinamik işletme şartlarında yakıt tüketimi açısından en verimli bölgede her zaman çalıştırılamayabilir. Bu sorun şanzıman ile çevrim oranları ve batarya şarj stratejileriyle giderilmeye çalışılır. Ancak bu durum bir yandan karmaşık güç yönetim algoritmaları ihtiyacını doğurmuştur.
3. Sistemde kullanılan karmaşık güç aktarma sistemi mimarisi aynı zamanda maliyetleri arttırmaktadır. Mekanik İYM ve EM bağlantıları taşıt içerisinde güç komponentlerini yerleştirme esnekliğini sınırlamaktadır. Ayrıca konvansiyonel araçlara göre artan toplam ağırlık, aynı operasyon şartlarında daha fazla özgül enerji tüketimine yol açabilir.

iii. Mikro ve Mild Hibrit Elektrikli Taşıtlar

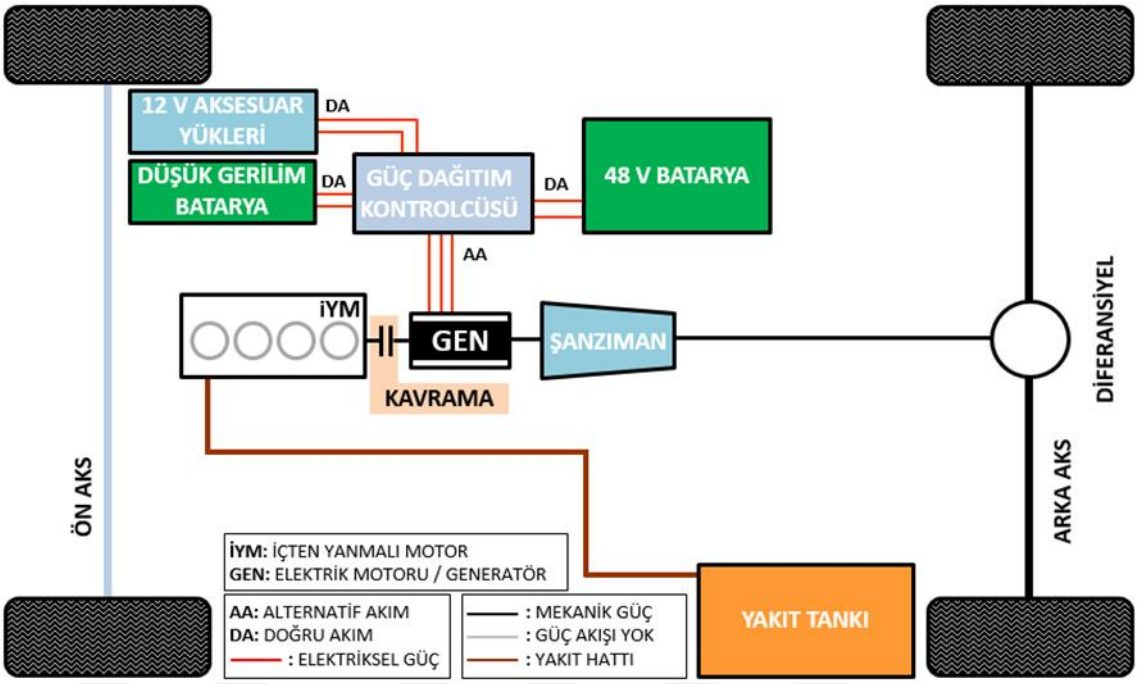
Mikro hibrit taşıtlar tam olarak hibrit kavramını karşılamamasına rağmen, taşıt operasyonlarında, enerji korunumunu arttırarak toplam sistem verimini arttırmaktadır. Mikro hibritler İYM'de bulunan kayış sisteminde marş motoru/ generatör (BSG) elemanı olarak düşük güçte (<10 kW) elektrik motoru barındırır. Mikro hibrit taşıt, start/stop kontrol sistemiyle beraber araç durağan pozisyondayken İYM'yi durdurur, sürücüden gelen bilgiler doğrultusunda (debriyaj veya fren pedalının serbest bırakılması) İYM motoru tekrar çalıştırmaktadır. Bu sayede motor rölanti durumunda çalışmamış olup yakıt tüketiminde iyileşme sağlanır. İkinci bir özellik ise güç yönetim kontrol sistemi taşıyan mikro hibritlerde, BSG tarafından şarj edilen 12 V klasik taşıt bataryası her durumda bataryayı şarj etmek için sadece İYM'den sağlanan gücün yanında rejeneratif frenleme yoluyla frenleme esnasında harcanan enerjiyi bataryayı şarj etmek için kullanabilmektedir. Bunun yanında batarya, İYM'nin en verimli çalışma bölgelerinde çalışırken, enerji

kontrolü sayesinde BSG tarafından şarj edilebilmektedir [11], [24]. Örnek mikro HEV mimarisi Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12 Mikro hibrit elektrikli taşıt mimarisi

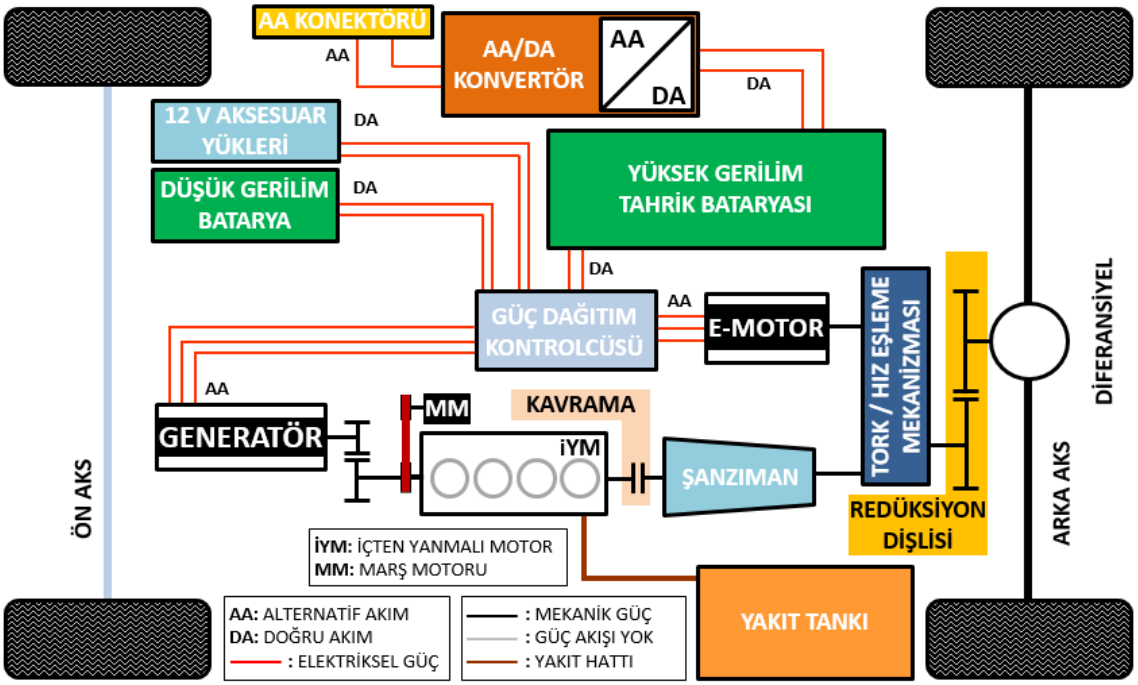
Mild HEV'lerde ise elektrik motoru kayış sistemine bağlı olarak veya İYM ile şanzıman arasında direkt krank miline bağlanmaktadır. Elektrik motoru, İYM tahrik sistemi üzerinde küçük tahrik yükleri ve rejeneratif frenleme sırasında enerji geri kazanımı için sadece tahrik destek sistemi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede ivmelenme durumunda elektrik motoru İYM'ye güç desteğinde bulunabilmektedir. Böylelikle İYM'den daha az güç talebi ile beraber yakıt tüketiminde iyileşme sağlanabilmektedir. Ayrıca rejeneratif frenleme özelliği kullanılarak taşıt üzerinde bulunan ilave batarya (48 V) şarj edilerek sistemin toplam enerji kaybı azaltılmaktadır. Bataryada depolanan enerji, taşıt içerisinde ihtiyaç duyulan diğer sistemlerde (hava şartlandırma, aydınlatma vs.) ve elektrik motorunda kullanılabilmektedir. Bu tip uygulamalarda elektrik motoru karmaşık güç aktarma mimarilerine gerek kalmadan elektrik gücünü sisteme dahil edebilmektedir. Bunun yanında mikro HEV'lerde bulunan start - stop (başlat-durdur) sistemi mild HEV'lerde de bulunmaktadır [11], [24], [30]. Mild hibrit tahrik sistemi Şekil 1.13'te gösterilmektedir.



Şekil 1.13 Mild hibrit elektrikli taşıt mimarisi

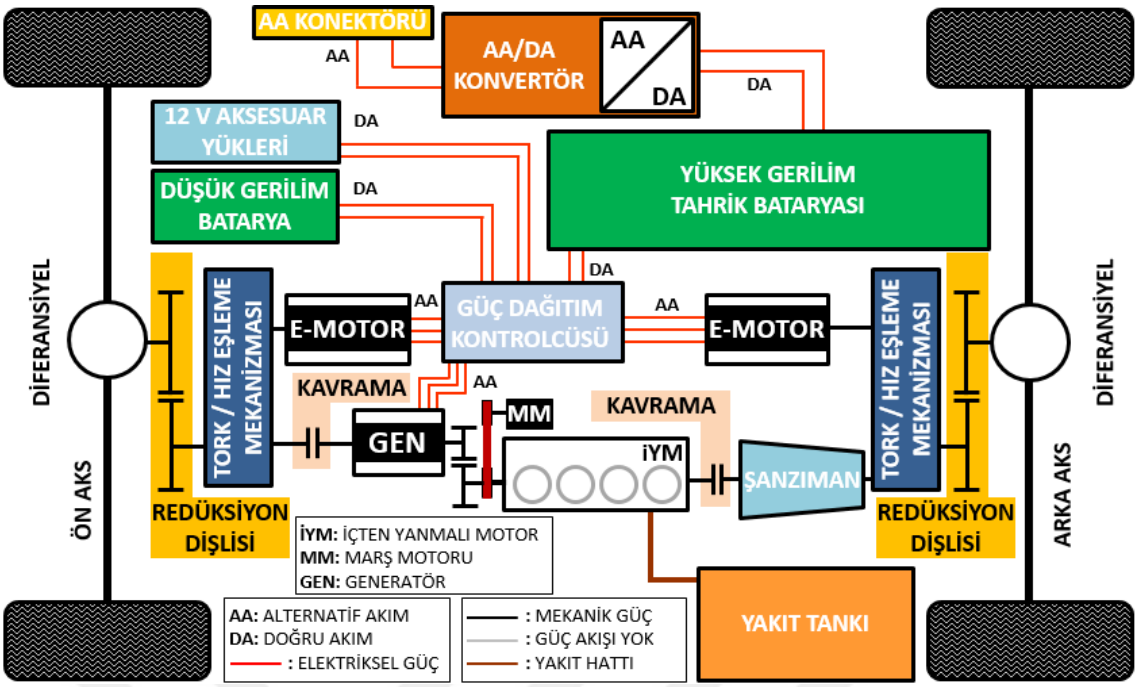
iv. Seri – Paralel / Kompleks Hibrit Elektrikli Taşıtlar

Günümüzde seri ve paralel HEV'lerin yanı sıra her iki sistemin özelliklerini barındıran seri-paralel ve kompleks hibrit sistemler geliştirilmiştir. Seri-paralel HEV'lerde İYM mekanik olarak tahrik tekerlerine direkt bağlanabilmektedir. Bunun yanısıra taşıtta ek olarak generatör sistemi bulunur ve İYM tarafından generatöre güç sağlanarak batarya şarj edilmektedir. Batarya İYM'nin tahrik ettiği tahrik tekerleklerini elektik motoru ve İYM ile beraber veya sadece elektrik motoruyla tahrik edebilmektedir. İYM ile EM aynı tahrik tekerlerine güç iletmek için planet dişli, CVT gibi güç aktarma sistemiyle bağlanmıştır [31], [32]. Şekil 1.14'te seri-paralel hibrit tahrik mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 1.14 Seri - paralel hibrit elektrikli taşıt mimarisi

Kompleks HEV'ler seri - paralel HEV'den farklı olarak dört tekeri de tahrik edebilmektedir. Ön veya arka akslardan bir tanesi İYM ve EM tarafından tahrik edilirken, diğer aks ilave bir elektrik motoruyla tahrik edilmektedir. Bu sayede iki aks birbirinden bağımsız olarak tahrik edilip İYM, hem teker tahriği için hem de üzerinde bulunan generatör sistemi sayesinde bataryayı şarj etmek için kullanılabilmektedir. İYM, EM ve generatör aynı sistem üzerinde transaks ile veya İYM ve EM planet dişli sistemine, generatör ve diğer elektrik motoru ilave bir planet dişli sistemine bağlanarak farklı aksları tahrik edebilmektedir. Şekil 1.15'te kompleks hibrit tahrik mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 1.15 Kompleks hibrit elektrikli taşıt mimarisi

Kompleks HEV'lerde (CHEV) kullanılan tahrik kombinasyonları sayesinde seri paralel ve tam elektrikli sürüş aynı tahrik sisteminde gerçekleştirilebilmektedir. CHEV'ler bu sayede, dinamik sürüş şartlarında İYM'yi optimum yakıt tüketimi ve emisyonları sağlayan çalışma aralığında çalıştırmanın yanı sıra sürüş performasından ödün vermeyen esnek güç yönetim stratejilerinin uygulanmasını sağlamaktadır. Bunun yanında sistem, ön ve arka aksların koordineli bir şekilde tahrik edilmesine olanak sağlayarak 4 tekerden çekişli tahrik sistemini sağlamaktadır ve dört tekerden rejeneratif frenleme yoluyla elde edilen enerji toplam sistem verimliliğini de arttırmaktadır. Ancak sistemde kullanılan güç kaynaklarının fazlalığı ve paralel tahrik sisteminde kullanılması zorunlu olan karmaşık güç aktarma mimarisi sistem toplam maliyetini ve ağırlığını, seri ve paralel HEV'lere oranda ciddi miktarda arttırmaktadır. Ayrıca seri ve paralel hibrit tahrik modlarını tek tahrik mimarisi üzerinde işletmek, karmaşık kontrol stratejileri gerektirmektedir. Bunun yanında seri ve paralel hibrit operasyonlarında oluşan enerji çevrim kayıpları ve mekanik kayıplar toplam sistem verimi üzerinde önemli etkiye sahiptir [31]. İleriki adımlarda bu çalışmada şeçilen kompleks hibrit mimarisi üzerinde detaylı bilgiler verilmektedir.

1.1.2 Hibrit Elektrikli Taşıtlarda Güç Kontrolü

HEV tiplerinin getirdiği tahrik mimarisi çeşitliliği, taşıt tasarım aşamasında birçok tahrik sistemi konfigürasyonunu beraberinde getirmektedir. Sistem tasarımında HEV' lerin sağladığı bu esneklik, taşıt tasarımı aşamasında üreticilere, taşıt tipine ve müşteri taleplerine en uygun tahrik mimarilerini belirleme zorluğu doğurmuştur. Ayrıca toplam tahrik sistemi içerisinde taşıt ölçüleri limitleri ve sürüş performasından ödün vermeksizin, tasarlanan tahrik sistemi düşük maliyetli, seri üretime uygun, servis edilebilir ve uzun ömürlü sistemler olmak zorundadır. Bunun yanında tahrik sisteminde bulunan güç (İYM, EM, YH), enerji (batarya, sıvı yakıt sistemi, yüksek basıçlı hidrojen tankları) ve güç aktarma (CVT, planet dişli, transaks, kavramalar, diferansiyel) komponentlerindeki farklı teknoloji ve kapasite opsiyonları tasarım anlamında esneklik sağlamasıyla beraber, diğer yandan optimum sistem tasarımı gerektirmektedir. Ayrıca güç aktarma mimarisinin farklı güç kaynaklarından gelen enerji akışını ortak bir güç aktarma hattından tahrik gücü olarak iletme zorunluluğu, özellikle paralel ve kompleks hibrit sistemlerde oldukça karmaşık mekanik güç aktarma sistemleri kullanımını zorunlu kılmıştır. Optimum sistem tasarımı zorunluluğu, komponent ve tahrik mimarisi belirlemede sistem optimizasyonu problemini doğurmaktadır [32], [33].

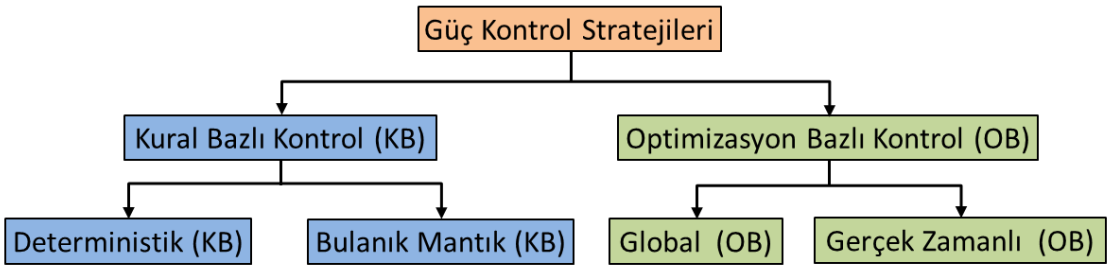
Diğer taraftan taşıt operasyonu sırasında talep edilen güç ihtiyacı farklı güç kaynakları tarafından sağlanmaktadır. Konvansiyonel tahrik sistemlerinden daha karmaşık yapıda olan hibrit tahrik sistemleri sistem üzerindeki enerji akışını kimyasal, elektriksel ve mekanik enerji formlarında sağlamaktadır. Bu süreçte sistem güç talebini güç üniteleri arasında dağıtacak bir karar kontrol sistemine ihtiyaç duyar. Birçok enerji (batarya, yakıt tankı) ve (EM, İYM GEN) güç kaynağının senkronizasyonu beraberinde karmaşık kontrol ihtiyacını doğurmaktadır.

HEV kontrol sistemleri güç dağıtım kontrolü yanında birçok kontrol ihtiyacını da karşılamak zorundadır. Taşıt operasyonu sırasında gerçekleşen tüm fonksiyonlar kontrol sistemleri tarafından yönetilmektedir. Operasyon içerisinde, sürücü ve araçta bulunan diğer komponentler tarafından gelen sinyaller, taşıtta kullanılan kontrolcüler tarafından değerlendirilir ve aktüatörlere komutlar yine kontrolcüler tarafından sağlanır. Genel anlamda kontrolcüler, araç üzerinden toplanan sensör

sinyal bilgileri ve diğer kontrolcülerden gelen geri bildirimlerle, birtakım matematiksel hesaplamalar ve mantıksal sınamalar yaparak aktüatörler için komut sinyalleri üretir. Kontrolcüler bu işlemleri barındırdıkları yazılımlar sayesinde çok hızlı işlem adımlarında (<100 ms) senkronize olarak gerçekleştirebilmektedir. Ancak kontrolcüler bu denli karmaşık bir tahrik sistemini yönetebilmek için farklı ve karmaşık yapıya sahip kontrol algoritmalarını ve matematiğini kullanır.

Kontrol sistemleri HEV'lerde farklı termodinamik, elektriksel, kimyasal ve mekanik prosesleri yönetmek için geliştirilmiştir. Ayrıca tahrik sistemi mimarisinin müşteri ihtiyaçları ve taşıt tipine göre şekillenmesi, farklı sistem opsiyonlarını ve her bir farklı kombinasyonun farklı sistem elemanlarını barındırmasına neden olmaktadır. Bu farklılıkları karşılamak adına kontrol sistemleri her bir tahrik sistemi için özel ve karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır. Temel olarak kontrol stratejileri güç yönetimi konusu altında, yakıt tüketimi iyileştirmesi, araç üzeri batarya şarj-deşarj kontrolü, emisyon iyileştirmesi, komponent ömrü uzatma, araç sürüş ve performans konforu (driveability) vs. gibi kontrol konuları incelemekte ve bunun yanı sıra güç aktarma sistemi titreşim kontrolü, yumuşak vites geçiş kontrolü, kabin içi iklimlendirme kontrolü, çekiş kontrolü gibi konular üzerinde de çalışmaktadır [34].

HEV'lerde kullanılan güç kontrol sistemleri temel olarak kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol olarak ikiye ayrılmaktadır. Güç kontrol stratejileri temel sınıflandırılması Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16 Güç kontrol stratejilerinin sınıflandırılması

1.1.2.1 Kural Bazlı Kontrol Sistemleri

Kural bazlı kontrol sistemlerinde, kontrolcüler bir dizi mantıksal değerlendirme algoritmaları, fiziksel hesaplamalar için matematiksel formüller, tablolar, üç boyutlu haritalar ve sabitler barındırmaktadır. Kontrol yazılımları çalışma moduna bağlı

olarak geliştirilmektedir ve tahrik hattındaki güç akışını gerçek zamanlı yönetmek için kullanılır. Burada geliştirilen algoritmalar yazılım geliştiricinin sezgiselliğine, bilgisine ve taşıt mimarisine hakimiyetine bağlı olarak geliştirilir. Kontrolcü üzerinde uygulaması kolay ve matematiksel işlem yükü azdır. Bunun yanında tahrik sisteminden alınan parametreler anlık olarak değerlendirilir, hesaplanır ve komutlar gerekli aktüatörlere gönderilir. Geliştirilen algoritmalar matematiksel ve mantıksal değerlendirme işlemlerinden meydana gelmesi, taşıt sisteminde gerçekleşecek tüm tahrik gücü kombinasyonlarını kapsayacak bir yazılım geliştirilmesi, yazılım geliştiricinin sistem üzerindeki tecrübesine, öngörüsüne ve kontrolcünün hesaplama limitlerine bağlıdır. Ayrıca, geliştirilen yazılımlar, matematiksel analiz yapma kabiliyeti taşımaz ve çoğu zaman teorik bir temele sahip değildir. Yazılımın kabiliyeti kullanılan eşik değerlerinin, tabloların ve mantıksal kuralların gelişmişliğiyle sınırlıdır.

Kural bazlı kontrol stratejileri, içerisinde bulunan tablolar ve üç boyutlu haritalar ve eşik değerlerine göre bilgi ve komut üretir. Burada algoritmada bulunan bu elementlerin uygun değerlerle kalibrasyonu ciddi anlamda çaba ve zaman tüketmektedir. Ayrıca kalibrasyon mühendisi tablo ve harita değerlerini hesaplama aşamasında yazılımın limitleri dahilinde testler planlamak ve olası taşıt sürüş koşullarını kapsayan verimli bir kalibrasyon sağlamak zorundadır.

Geliştirilen kural bazlı algoritma taşıt tahrik sistemine göre evrilmek zorunda olduğundan her farklı sistem için aynı kontrol algoritması kullanılamamaktadır. Yukarda bahsedilen bu kısıtlamalar neticesinde, kural bazlı kontrol algoritması güç yönetimi kontrolünde, taşıt kullanımı esnasında sağlanabilecek optimum kontrolü sağlayamamaktadır [35], [36], [37], [38].

i. Deterministik Kural Bazlı Kontrol

Deterministik kontrol, bir dizi tanımlanmış kural çerçevesinde, durum makinesi mantığını kullanarak kontrol sağlamaktadır. Durum makinesi mantığında, tanımlanmış bir dizi durumun, bu durumlar arasında geçiş ve eylemlerini sağlayan algoritmalar bulunmaktadır. Anlık olarak gelen verilerle, çalışma durumları için tanımlanan limitler değerlendirilerek durumlar arası geçişler sağlanmaktadır. Sahip

olduğu sabit kurallar sayesinde her koşulda kurallar ve limitler çerçevesinde belirlenen komutlar üreterek, pratik ve başarılı bir kontrol sağlamaktadır. Ancak öngörülmemiş sürüş koşullarında ve modelleme hatalarının olduğu noktalarda kaynaklanan belirsizliklerin üstesinden gelme kabiliyeti bulunmamaktadır. Deterministik metod seri üretim araçlarda kullanılmakta olup (Toyota Prius, Honda Inside) genellikle, termostat açma-kapatma, İYM açma-kapatma, güç dağıtımı, batarya şarj etme gibi kontrollerinde kullanılmaktadır [34], [36], [39], [40].

ii. Bulanık Mantık Bazlı Kontrol

Bulanık mantık (Fuzzy Logic), kural bazlı kontrolün bir uzantısı olarak çalışmaktadır. Doğrusal olmayan zamanla değişkenlik gösteren sistemler için ideal bir kontrol yöntemidir. Sistem insan bilgi ve tecrübesiyle oluşturulmuş kuralları, kontrol sistemi için nitel bir şekilde tanımlamaktadır. Bulanık kontrol kuralları kolay bir şekilde ayarlanabilmekte olup, kontrol sistemi farklı model bileşenlerine adapte olabilmektedir. Bulanık mantık uygulanan bir kontrolcü ilgili sürücünün davraşını analiz etmekte ve bu şartlar için kendisini en iyi şekilde adapte edebilmektedir. Bunun yanında bulanık kontrolde kuralların önceden tanımlanması gerekmekte ve belirli bir çevrim için optimizasyon yapılabilmektedir. Ayrıca birden fazla kontrol konsu için (yakıt tüketimi ve emisyon iyileştirme) sistem karmaşıklaşmaktadır ve hesaplama yükü artmaktadır. Hesaplama yükü dolayısı ile gerçek zamanlı olarak uygulanması zordur [34], [36], [39], [40].

1.1.2.2 Optimizasyon Bazlı Kontrol

Optimizasyon bazlı güç yönetim stratejisi, HEV sisteminde iyileştirilmesi hedeflenen parametreleri tanımlayan maliyet fonksiyonunu minimuma indirir. Bu yaklaşımda HEV sisteminde hedeflenen her bir iyilleştirme konusu için farklı maliyet fonksiyonları ve optimizasyon yaklaşımları kullanılabilir. Burada optimizasyonda oluşturulan maliyet fonksiyonu, daha önceden test edilmiş çevrim sonuçlarını geriye dönük olarak hesaplamaktadır. Bu şekilde var olan bir durum üzerinden en optimum kontrol hesaplanmaktadır. Bu yüzden gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında direkt olarak kullanılması zor bir yöntemdir. Diğer taraftan, gelecek durumun tahmin edilmesi durumunda anlık optimizasyon yöntemleri de

mevcuttur. Yukarıdaki bilgiler ışığında optimizasyon bazlı yöntemler global optimizasyon ve gerçek zamanlı optimizasyon olarak ikiye ayrılır [34], [36], [39], [40].

i. Global Optimizasyon

Global optimizasyon yönteminde, maliyet fonksiyonu önceden tanımlanmış çevrim koşulları içerisinde, tüm çevrim boyunca global optimum sonucu verir. Burada optimizasyon sadece tanımlanmış çevrim için geçerlidir ve çevrim parametreleri önceden bilinmek zorundadır. Ayrıca hesaplama boyunca dahil edilen tüm kontrol parametrelerinin kombinasyonları, en optimum sonuca ulaşmak için hesaplanır. Bu nedenle global optimizasyon yönteminin hesaplama yükü oldukça fazladır. Hesaplama yükü fazlalığı nedeniyle gerçek zamanlı uygulanması mümkün değildir.

Bunun yanında tanımlanan sistem ve çevrim şartları için global optimizasyon yöntemi, iyileştirme hedefi (Örn.: yakıt tüketimi) için optimum kontrol stratejisini hesaplar. Bu özelliği sayesinde var olan tahrik sisteminde kullanılan kural bazlı algoritmalar, elde edilen en optimum sonuçlarla mukayese edilerek, yazılım verimi değerlendirilebilir. Ayrıca kullanılan tahrik sistemi mimarisi aynı test koşullarında farklı mimariler ve komponent kombinasyonlarıyla, optimizasyon bazlı kontrol stratejilerinde denenip tahrik sistemi verimi açısından karşılaştırılma yapılabilir.

Global optimizasyon metodu kendi içerisinde temel olarak statik ve dinamik optimizasyon metodu olarak ayrılabilir. Dinamik optimizasyon metodunda belirlenen çevrimde her bir hesaplama adımı için optimum değeri sağlayacak kontrol parametleri hesaplanırken, statik optimizasyonda tüm çevrimi karşılayacak yaklaşık optimum kontrol parametreleri hesaplanmaktadır [34], [36], [39], [40].

Dinamik Programlama

Global optimizasyon yöntemlerinden çoğunlukla tercih edilen dinamik programlama yöntemi çevrimdışı bir optimizasyon yöntemidir. Dinamik programlama Belman'ın optimallik ilkesine dayanan, ayrıklaştırılmış bir ortamda doğrusal olmayan dinamik sistemlere, global optimizasyon yapmak için kullanılmaktadır. Dinamik programlama, sistemde belirlenen kontrol parametreleri

ve durum değişkenleri için parametlerin belirlenmiş sınırları ve bu sınırlar içerisinde belirli bir hassasiyette ayrıklaştırılmış hesaplama noktalarıyla, sınırlı sayıda hesaplamayla beraber hassas bir optimizasyon sunmaktadır. Hibrit tahrik sistemlerininde güç veya enerji optimizasyonu probleminde birden fazla parametreyi hesaba katarak belirli bir çevrimde en uygun optimizasyonu sağladığı için, çalışmalarda sıklıkla uygulanmaktadır. Yöntem, daha önceden yapılmış testler için optimum kontrol yörüngesini hesapladığı için, taşıt üzerinde aktif bir şekilde uygulanamamaktadır ve kontrol parametleri ve durum değişkenlerinin belirlenen sınırlar içinde arttırılan hassasiyeti hesaplama yükünü arttırmaktadır [33], [34], [36], [41], [42].

Tez çalışmasında dinamik programlama, kompleks hibrit taşıtın enerji yönetimi optimizasyonu için kulanılmaktadır. Dinamik programlama ve sisteme uygulanması hakkında detaylı bilgi Bölüm 3'te verilmektedir.

ii. Gerçek Zamanlı Optimizasyon

Gerçek zamanlı optimizasyon yöntemi, temel olarak gelecekte kısa vadede yapılan güç talep tahminleri için anlık verilerin durumuna göre maliyet fonksiyonunu minimize eder. Bu sayede güç dağıtım kontrolü kısa vadedeki tahminler için optimize edilir. Ancak bu yöntem, gerçek zamanlı kontrolde hesaplama yükünü aşmayacak şekilde sınırlandırılmaktadır [34], [36], [39], [40].

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, dışardan şarj edilebilir (plug-in) kompleks hibrit güç aktarma mimarisinine sahip dört tekerden çekişli bir SUV (sport utility vehicle) tipi taşıtın, mevcut olan kural bazlı güç yönetim kontrol stratejisi yerine optimizasyon bazlı kontrol stratejisi ile WLTC, NEDC, FTP-72 test çevrimleri için, yakıt tüketiminde iyileşme sağlamaktır.

Taşıtta kullanılan kural bazlı enerji yönetim kontrol stratejisi yerine kullanılacak olan optimizasyon bazlı enerji yönetim stratejisinde, global optimizasyon metodlarından dinamik programlama (DP) metodu kullanılarak, minimum yakıt tüketimi için optimize edilmiş kontrol stratejisi geliştirmek hedeflenmiştir.

Geliştirilen optimizasyon bazlı kontrol stratejisi ve taşıtın kullandığı kural bazlı kontrol stratejisi, simülasyon ortamında WLTC, NEDC, FTP-72 test çevrimleri için simüle edilecektir. Simulasyon, batarya şarjı koruma modunda, taşıtın kullandığı baz güç aktarma sisteminde ve 6 ileri hız kademeli şanzıman içeren güç aktarma sisteminde yapılacaktır. Simülasyon için taşıt tahrik sistemi Matlab Simulink ® programında modellenecektir. Simülasyon sonrasında kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolle elde edilen sonuçlar, sürüş modu (e-sürüş seri-hibrit, paralel-hibrit), ön-arka aks tahrik torku dağılım oranı, batarya şarj durumu (SOC) ve yakıt tüketimi açısından, baz ve şanzımanlı güç aktarma sistemi için irdelenecektir. Tez çalışmasını sonuçları olarak tahrik sistemlerinin (baz, şanzımanlı) karşılaştırılmasının yanında, dinamik programlama metodunun analizi, olumlu ve olumsuz özelliklerinin karşılaştırılması da tez çalışmasının diğer amaçlarındandır. Tez çalışmasında ulaşılması planlanan temel ve ara hedefler Tablo 1.2'de sıralanmıştır.

Tablo 1.2 Tez çalışması temel ve ara hedefler

Hedefler	**Açıklama**
Ara Hedef 1	Taşıt tahrik sisteminin modellenmesi
Ara Hedef 2	Kural bazlı kontrol sisteminde WLTC, NEDC ve FTP-72 çevrimlerinde simülasyon testlerinin yapılması
Ara Hedef 3	Optimizasyon bazlı kontrol sisteminin geliştirilmesi ve taşıt modeline entegrasyonu
Ara Hedef 4	Optimizasyon bazlı kontrol siteminde WLTC, NEDC ve FTP-72 çevrimlerinde simülasyon testlerinin yapılması
Ara Hedef 5	Dinamik programlama metodunun analiz edilmesi
Ana Hedef	Taşıt kontrol sisteminde WLTC, NEDC ve FTP-72 çevrimleri için yakıt tüketiminin iyileştirilmesi, kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol sisteminde baz tahrik ve 6 ileri hız kademeli şanzıman içeren tahrik sisteminde temel parametrelerin analiz edilmesi

1.3 Hipotez

Lineer olmayan sistemlerdeki kontrol stratejilerinde optimal kontrol stratejileri kullanılarak belirlenen hedeflerde iyileşme sağlanmaktadır. Hibrit taşıt tahrik sisteminde lineer olmayan enerji kontrol stratejisi optimal kontrol stratejisi uygulanarak yakıt tüketimi iyileştirilmesi sağlanabilir.

Bellman'a göre optimallik ilkesi,

''The principle of optimality. An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decision must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision'' olarak tanımlanmaktadır [41].

Optimallik ilkesi, sistemin tanımlanan matematiksel modelinde, belirli bir hedef doğrultusunda sistemin süreç içerisindeki ilk kararı ne olursa olsun tüm süreç boyunca en optimum sonuçları hesaplar [41], [42].

Optimallik ilkesine dayanan Bellman'ın dinamik programlama yöntemiyle lineer olmayan sistemlerde belirli sistem çalışma koşullarında, sınırlandırılmış paramete aralıkları için optimum kontrol yörüngesi temin edilebilir. Optimum kontrol yörüngesini hesaplamak için yöntem, iki nokta arasında gerçekleşen bir hareketin toplam maliyetini hesaplamakta ve iki nokta arasındaki hareket boyunca optimum maliyeti sağlayan yörünge optimum yörünge olarak hesaplamaktadır. Burada yöntem, tüm yörünge olasılıklarını belirlenen parametreler için hesaplamakta ve hesaplama işlemi sırasında tüm değerlendirmeleri alt problemler halinde çözmektedir. Optimallik ilkesinin hibrit taşıtlarda uygulanabilir bir maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [43],

$$J(\mu(t)) = G(x(t_f)) + \int_0^{t_f} H(x(t), \mu(t), t)dt \qquad (1.1)$$

Burada $H(x(t), \mu(t), t)$ zamana bağlı maliyet fonksiyonu, $G(x(t_f))$ son maliyet, $J(\mu(t))$ maliyet fonksiyonu, $\mu(t)$ kontrol ve $x(t)$ durum değişkeni, t ve t_f ise sırasıyla anlık ve son zamanı ifade etmektedir.

Hibrit tahrikli taşıt sisteminde enerji kontrolü temel olarak yakıt tüketimini iyileştirme ve aynı zamanda batarya şarj durumunu (SOC) sürdürme konularında

çalışmaktadır. Belmann'ın Optimallik İlkesi'ne dayananan, dinamik programlama metodu batarya şarj durumunu sürdürmek koşuluyla, belirli test koşullarında ve belirli parametre limitleri arasında mümkün olan en az yakıt tüketimini sağlayan, optimal kontrol stratejisi hesaplanabilmektedir [41], [42], [43].

Tez çalışmasında, dinamik bir sistem olan kompleks hibrit tahrik sisteminin belirli çevrimler için dinamik programlama yöntemiyle optimize edilmiş enerji yönetimi stratejisinin kural bazlı enerji yönetimine kıyasla, belirlenen çevrimler için yakıt tüketimini iyileştirmesi beklenmektedir.

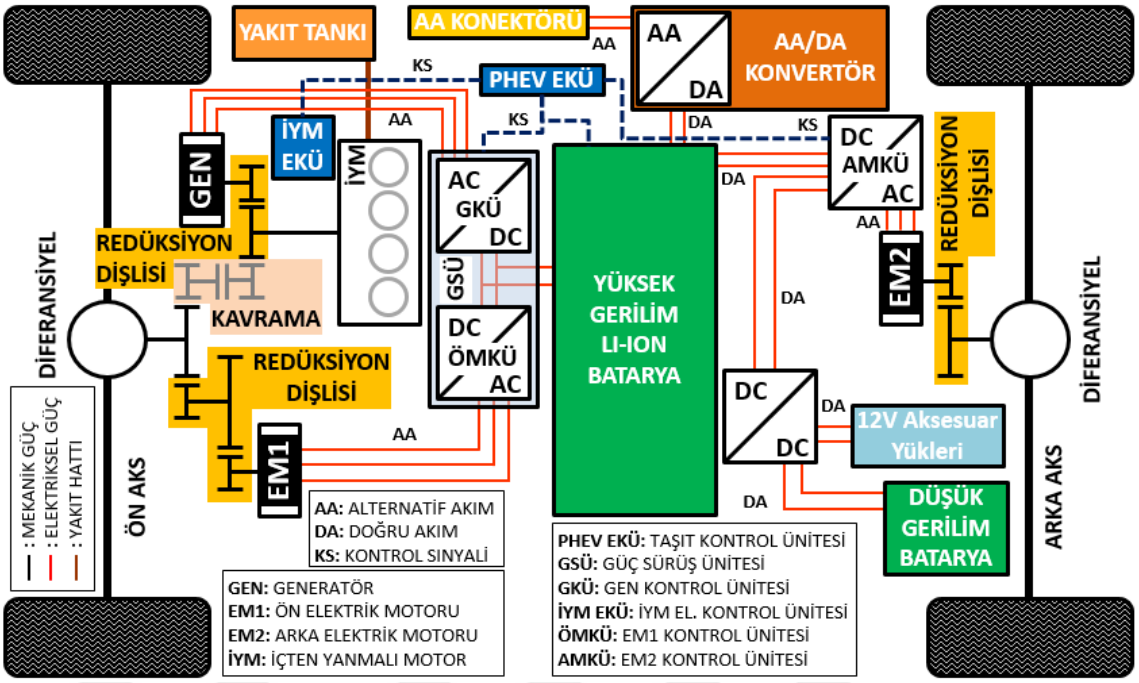
2

KOMPLEKS PLUG IN HEV TAHRİK SİSTEMİ

2.1 Kompleks Hibrit Elektrikli Taşıt

2.1.1 Genel Bakış

Tez çalışmasında kompleks hibrit tahrik mimarisine sahip bir SUV sınıfı taşıt modellenmiştir. Bölüm 1.1'de anlatıldığı gibi, kompleks hibrit mimari sayesinde taşıt dört tekerden tahrik edilebilmekte ve seri hibrit, paralel hibrit veya sadece elektrikli tahrik modunda (e-sürüş) taşıt tahrik edilebilmektedir. Tahrik modlarında sağlanan esneklikle beraber enerji yönetimi ve araç performansında daha verimli operasyonlar sürdürmenin yanında, farklı sürüş modlarının getirdiği ilave güç komponentleri, sistem kontrolünün karmaşıklaştırmakla beraber, taşıtta maliyet ve ağırlığı da arttırmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan tahrik sistemi mimarisi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Tez çalışmasında kullanılan kompleks taşıt tahrik mimarisi

Çalışmada kullanılan tahrik sistemi, tahrik gücünü ön akstan hem İYM hem de elektrik motorundan temin edebilen, arka aksta ise sadece elektrik motorunun sağladığı tahrik gücü kullanılmaktadır. Sistem içten yanmalı motor olarak 1998 cc, 89 kW gücünde benzinli bir motor kullanmaktadır. İYM ön aksa transaks sistemiyle tahrik sağlamaktadır. Aynı transaks sisteminde diğer bir tahrik kaynağı olan elektrik motoru (EM1) bağlanmıştır. Ayrıca, yüksek gerilim bataryayı şarj etmek için kullanılan generatörde aynı transaks sisteminde İYM'a bağlanır. Generatör aynı zamanda İYM'a çalışması için gerekli olan tahrik gücünü (marş motoru fonksiyonu) sağlamaktadır. Ön aks sistemine direkt olarak güç sağlayabilen İYM bir kavrama ile sistemden ayrılmaktadır. Ayrıca İYM dişli mekanizmasıyla sürekli bağlı olduğu generatöre batarya şarjı mekanik güç temin eder. Ön aksta bulunan EM1 yüksek gerilimli bataryadan aldığı elektrik enerjisini kullanarak ön aksa tek başına veya İYM ile beraber tahrik gücü sağlamaktadır. Arka aksta bulunan elektrik motoru EM2, yüksek gerilimli bataryadan temin ettiği enerji ile, redüksiyon dişli sistemi kullanarak, arka aks için gerekli tahrik gücünü sağlamaktadır. Ayrıca iki aksta daimi temaslı bulunan elektrik motorları sayesinde rejeneratif frenleme yapılarak enerji geri kazanımı sağlanıp yüksek gerilimli batarya şarj edilmektedir [44], [45], [46].

Tahrik sisteminde enerji depolamak için iki sistem bulunmaktadır. Yakıt tankı içten yanmalı motorun güç üretmesi için gerekli akaryakıtı depolamada kullanılmaktadır. Elektriksel enerji ise yüksek gerilimli ve düşük gerilimli (12 V) bataryalarda depolanmaktadır. Düşük gerilimli batarya taşıt içerisinde bulunan aksesuar yükleri (taşıt içi aydınlatma, multimedya sistemleri ve diğer sistemlerde kullanılan küçük elektrik motorları... vs.) için elektrik gücü depolamaktadır. Yüksek gerilimli batarya (300 V) ise taşıt tahriğinde kullanılan elektrik motorlarının ana enerji kaynağıdır. Bunun yanında yüksek gerilimli batarya yan sistemler için de elektrik enerjisi temin edebilmektedir. Yüksek gerilimli batarya taşıt üzerinde bulanan batarya şarj cihazı sayesinde elektrik şebekesinden harici bir şekilde şarj edilebilmektedir.

Güç ve enerji komponentleri sistemde bulunan kontrol üniteleriyle kontrol edilmektedir. Elektrik güç akışını kontrol eden güç sürüş ünitesi (GSÜ), yüksek gerilim batarya şarj durumu (SOC), tekerlerden istenen tahrik gücü talebine bağlı olarak generetör (GEN), EM1 ve EM2 için denetim sağlamaktadır. Her bir elektrik komponenti ayrı bir güç kontrol ünitesine sahip olup GEN, EM1 ve EM2 için sırasıyla generatör kontrol ünitesi (GKÜ), ön motor kontrol ünitesi (ÖMKÜ), arka motor kontrol ünitesi (AMKÜ) olarak adlandırılır. Ayrıca GSÜ, GKÜ ve ÖMKÜ'yü kapsamaktadır. Güç kontrol üniteleri güç sürücü ünitesine bağlı olarak elektrik motorlarını çalıştırmaktadır. Ayrıca İYM için ayrı bir elektronik kontrol ünitesi (İYM-EKÜ) bulunmaktadır. Tüm enerji akışı ve sürücü tarafından gelen inputlar (gaz /fren pedalı sinyali, batarya şarj modu talebi…vs.) plug-in hibrit elektrikli taşıt elektronik kontrol ünitesi (PHEV-EKÜ) tarafından kontrol edilerek gerekli denetim sağlanmakta ve komutlar bu üniteden GSÜ, İYM, EKÜ, AMKÜ'ne gönderilmektedir [44], [45], [46].

2.1.2 Tahrik Sistemi Komponentleri

Tahrik sisteminde bulunan komponentler enerji, güç ve güç aktarma komponentleri olarak sınıflandırılmıştır.

Enerji depolama sistemi olarak taşıtta İYM motor için yakıt tankı, EM1 ve EM2 için yüksek gerilimli tahrik bataryası kullanılmaktadır [44], [45], [46]. Tablo 2.1'de enerji komponentleri spesifikasyonları gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Enerji komponentleri spesifikasyonları

Komponent	**Kapasite**	**Yakıt Tipi**	
Yakıt Tankı	45 Litre	Kurşunsuz Benzin (RON 90 ve üzeri)	
Komponent	**Kapasite**	**Gerilim**	**Batarya Tipi**
Tahrik Bataryası	12 kWh	300 V	Lityum İyon
Aksesuar Bataryası	36 Ah	12 V	Kurşun Asit

Tahrik sisteminde tekerleri tahrik etmek amacıyla EM1, EM2 ve İYM olmakla beraber sistemde bataryayı şarj etmek için kullanılan generatör ile beraber 4 temel güç komponenti bulunmaktadır. Tablo 2.2'de enerji komponentleri spesifikasyonları gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Güç komponentleri spesifikasyonları

Komponent	**Maks. Güç**	**Maks.Tork**	**Motor tipi**
Ön elektrik Motoru (EM1)	60 kW	137 N·m	3 faz asenkron
Arka Elektrik Motoru (EM2)	60 kW	195 N·m	3 faz asenkron
Generatör (GEN)	70 kW	-	3 faz asenkron
Komponent	**Maks. Güç**	**Maks.Tork**	**Motor Tipi**
İçten Yanmalı Motor	89 kW @4500 dev/dak	190 N·m @4500 dev/dak	Buji ateşlemeli içten yanmalı
	Toplam Silindir Hacmi	**Çap / Strok**	**Sıkıştırma Oranı**
	1998 cc	86 mm X 86 mm	10,5

Tahrik sistemi üretilen gücü ön ve arka aksa aktarmak için her bir aksta transaks sistemini kullanmaktadır. Transaks redüksiyon dişlileri ile beraber diferansiyel sistemini de kapsamaktadır. Ök transaks sisteminde ek olarak İYM'nin ön aksla fiziksel bağlantısını kontrol eden çok diskli ıslak tip kavrama sistemi

bulundurmaktadır. Tablo 2.3'te güç aktarma komponentleri spesifikasyonları, Tablo 2.4'te güç aktarma verimleri gösterilmiştir.

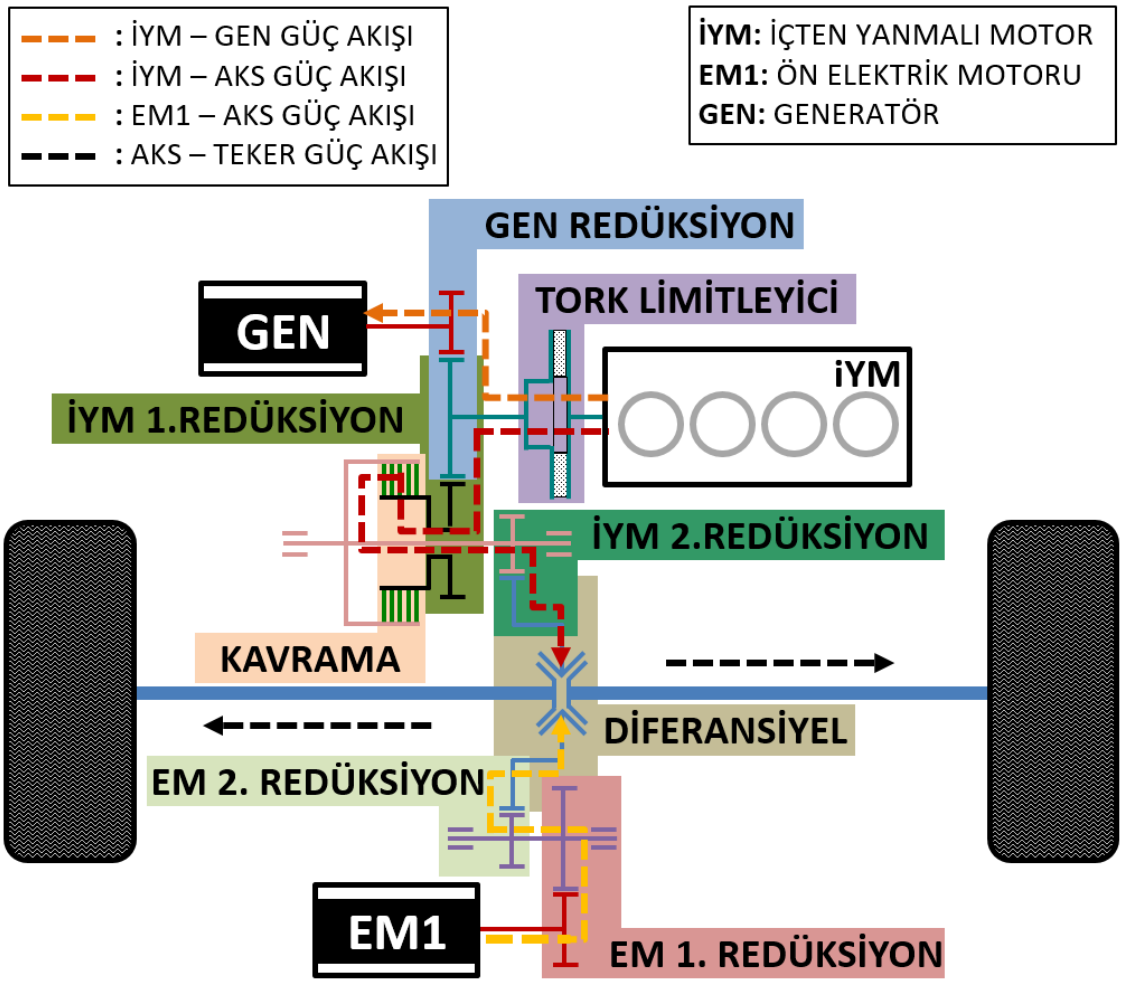
Tablo 2.3 Güç aktarma komponentleri spesifikasyonları

Komponent	**Pozisyon**	**Çevrim Oranları**	**Bağlantı Durumu**
Ön Transaks	İYM – GEN	2,736	Sürekli
Ön Transaks	İYM – Ön Aks	3,425	Ayrılabilir
Ön Transaks	EM1 – Ön Aks	9,663	Sürekli
Arka Transaks	EM2 – Arka Aks	7,065	Sürekli

Tablo 2.4 Güç aktarma verimleri

Komponentler	**Verim Kaybı**
Batarya – Elektrik Motorları	%15
İYM – Generatör	%15
İYM – Ön Aks	%2 (+2,8 kW GEN Tarafından Güç Çekimi)

Baz tahrik sisteminde direkt olarak şanzıman sistemi kullanılmamıştır. Paralel hibrit sürüş modu aktivasyonunda İYM, ön aksa belirli bir hız limitinin (65 km/h) üzerinde güç sağlamaktadır. İYM sistemi ayrıca tork limitleyicisi ile ani tork piklerinde temas yüzeyinden kayarak İYM'nin ve generatörün zarar görmesini engellemektetir. Ön transaks sistemininin şematik gösterimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir [44], [45], [46].



Şekil 2.2 Ön transaks sistemi

2.2 Kural Bazlı Enerji Yönetim Stratejisi

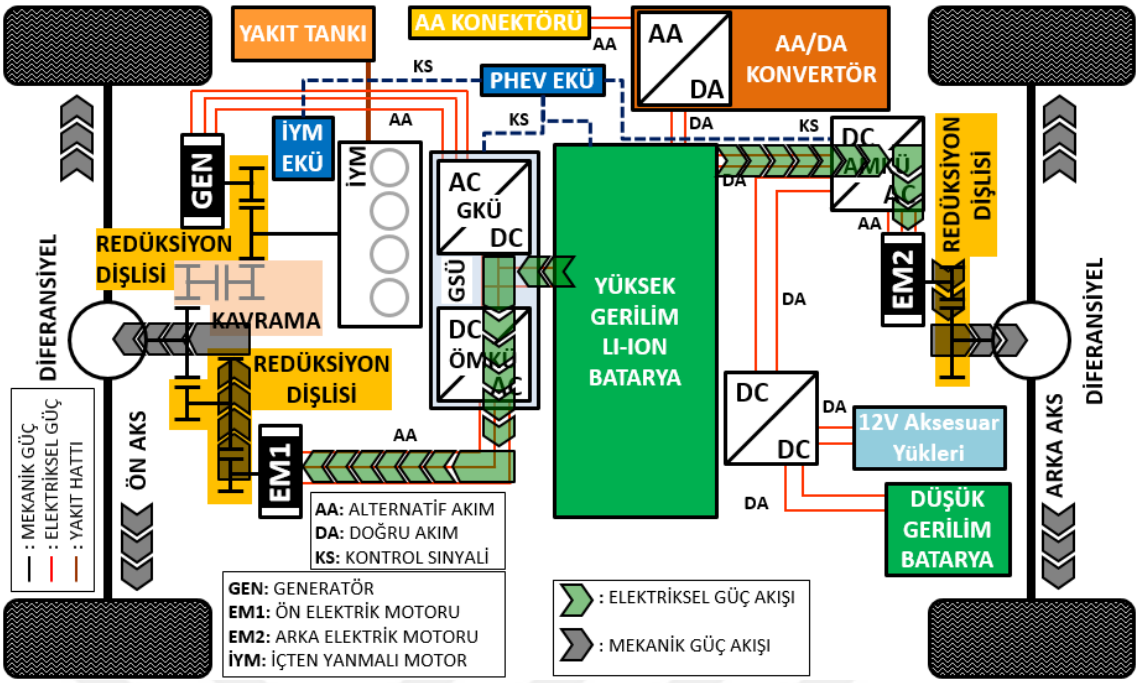
Taşıt tahrik sistemi, Bölüm 2.1'de anlatıldığı gibi, sistemi kontrol etmek için PHEV-EKÜ kullanmaktadır. Kullanılan kontrol ünitesi sürücünün sürüş karakteristiklerini (gaz/fren pedalı sinyalleri, manuel batarya şarj koruma, batarya şarj etme, ekonomik sürüş modu aktivasyonları...vb.), taşıtın dinamik durumunu (yol eğimi, aktif hız, batarya şarj durumu, yakıt seviyesi...vb.), analiz ederek, gerekli kontrol ünitelerine (güç sürüş ünitesi, arka motor kontrol ünitesi, İYM kontrol ünitesi) gerekli komutları temin etmektedir.

Kontrol sisteminde, sürüş modları olarak, seri paralel ve tam elektrikli sürüş modlarının yanı sıra İYM çalıştırma modu, batarya şarj modu, batarya koruma modu gibi farklı operasyon modları da tanımlanmıştır. Çalışmada, sadece temel sürüş

modları (seri hibrit, paralel hibrit ve tam elektrikli sürüş (e-sürüş)) üzerinde modelleme yapılacaktır [44], [45], [46].

Kontrol stratejisi, taşıtın ilk tahriğini sadece tam elektrikli sürüş moduyla sağlamaktadır. Tam elektrikli sürüş modunda tahrik sistemi ön ve arka elektrik motorları ileri ve geri yönde tahrik için kullanmaktadır. Tahrik enerjisi yüksek gerilimli bataryadan temin edilmektedir ve toplamda ön ve arkadan tahrikle taşıt tahriği için toplam 60 kW güç temin edilmektedir. Sistemde batarya şarj durumunun çok düşük olması halinde PHEV- EKÜ, bataryayı şarj etmek için generetörü İYM'yi çalıştırmak için marş motoru olarak kullanmakta ve İYM çalıştıktan sonra batarya şarj edilmeye başlanmaktadır. Bu operasyon seri hibrit mod olarak adlandırılıp ileriki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bunun yanında batarya statik elektrik şebekesinden araç üzerinde bulunan şarj cihazı sayesinde park pozisyonunda şarj edilebilmektedir. Bu şekilde toplam enerji maliyetleri azaltılmaktadır [44], [45], [46].

Tam elektrikli mod, özellikle tam dolu bir tahrik bataryasıyla şehir içi kullanımlarda sessiz, çevreci ve enerji korunumu açısından verimli bir sürüş sağlamaktadır. Ayrıca kalkışta ve ivmelenmelerde yeterli gücü sağlayarak araç performansından ödün vermemektedir. Otobanlarda yüksek ve sabit hızlı yolculuklarda yeterli batarya şarjı bulunması durumunda 120 km/h hıza kadar tam elektrikli sürüş yapılabilmektedir. Burada tahrik gücü toplamda 60 kW ile sınırlanmıştır. Ayrıca frenleme esnasında tahrik motorları ters yönde sürülerek, rejeneratif frenleme yapılmakta ve batarya şarj edilmektedir. Tam elektrikli sürüş modunda tahrik sistemindeki güç akışı Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

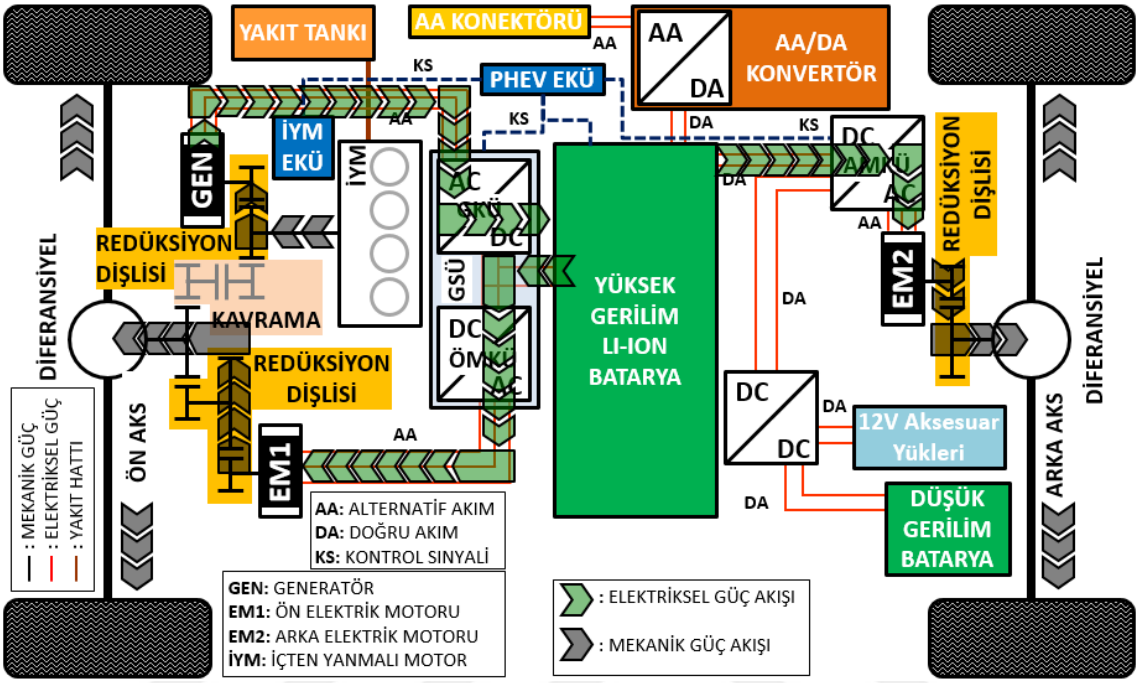


Şekil 2.3 Tam elektrikli sürüş modunda güç akışı

Tam elektrikli motorun karşılayamayacağı taşıt yüklerinde (>60 kW) ve düşük batarya şarj seviyesinde (<%26) seri hibrit sürüş modu PHEV-EKÜ tarafından aktif edilmektedir. Seri hibrit modunda sistem generatör sistemini ilk olarak İYM'yi çalıştırmak için kullanılmaktadır. Generatör tahrik bataryasından aldığı enerjiyle İYM'yi hızlandırır (200 dev/dak) ve İYM çalıştırılmaktadır. Daha sonra generatör İYM tarafından sağlanan mekanik gücü elektrik gücüne çevirerek tahrik bataryasını şarj etmektedir. Seri hibrit modda taşıt tahriği yine elektrik motorlarından sağlanarak, her bir motordan sağlanan tahrik gücü 60 kW olmak koşuluyla toplamda akslara 120 kW güç aktarılmaktadır [44], [45], [46].

Seri hibrit mod taşıt pozitif eğimli yolda tırmanırken, ivmelenirken ve şehir içi kullanımla düşük batarya şarj seviyelerinde kullanılmaktadır. İYM generatörü şarj etmek için kullanılırken, yakıt tüketimi açısından en verimli bölgelerde çalıştırılmak için kalibre edilmiştir. Ayrıca seri hibrit sürüş modu sürücü tarafından harici olarak bataryayı şarj etmek veya şarj durumunu korumak için de kullanılabilir. İYM, taşıt yavaşlarken 1100 dev/dak, taşıt ivmelendiğinde veya ilave güç talebinde 1700 dev/dak hızda çalışmaktadır [44], [45], [46].

Seri hibrit modda tam elektrikli sürüş moduna göre generatörden ve İYM' den elektrik üretilmesi dolayısıyla, tahrik sistemine ilave generatör çevrim kayıpları ve redüksiyondan (İYM-GEN) dolayı mekanik kayıplar meydana gelmektedir. Seri hibrit sürüş modunda meydana gelen enerji akışı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

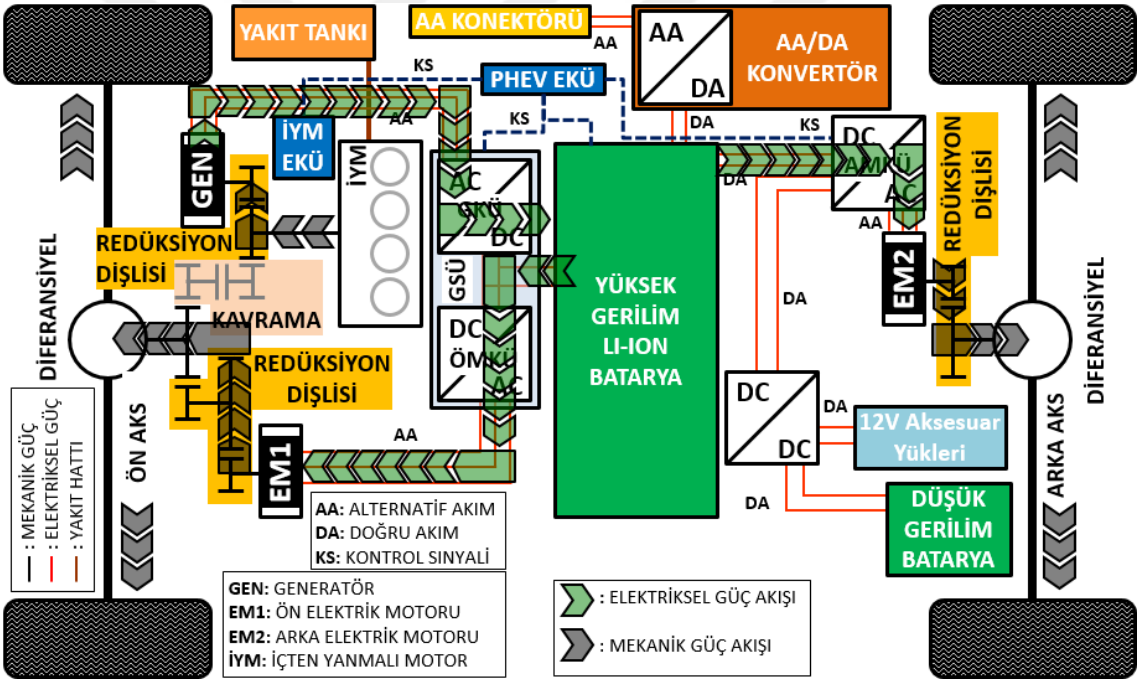


Şekil 2.4 Seri hibrit sürüş modunda güç akışı

Paralel hibrit mod, yüksek performanslı sürüş talebinde, düşük batarya şarj durumunda aktif edilmektedir. Paralel hibrit sürüş modu, güç aktarma sisteminde tek çevrim oranı kullanılması sebebiyle 65 km/h hızın üzerinde aktif edilebilmektedir. Paralel hibrit modda İYM ön aksa elektrik motoruyla beraber tahrik gücü sağlamaktadır. Arka aksta ise tahrik gücü temini arka elektrik motoruyla sürdürülmektedir. Bu sürüş modunda toplam 143 kW güç tahrik sistemine aktarılabilmektedir. Paralel hibrit mod talebi, taşıt hızı 65 – 120 km/h hızları arasıda ise, batarya şarj durumu %30'un altında olduğunda aktif edilmektedir. İYM paralel hibrit sürüş modu talebinde seri hibritte olduğu gibi generatör tarafından 200 dev/dak'ya kadar hızlandırılır ve İYM çalıştırılır. İlk adımda sistem seri hibrit mod olarak çalışarak generatörle bataryayı şarj etmeye başlamaktadır. Daha sonra çok diskli ıslak kavrama ile motor ön aksa çekiş gücü iletmek için bağlanır. İYM 65 km/h'te 1700 dev/dak 170 km/h'te ise 4500 dev/dak hızda çalışmaktadır. Paralel hibrit modda taşıt değişken hızlarda kullanılırken sürekli İYM çalışma noktası tek

çevrim oranı nedeniyle, İYM çalışma noktası geniş devir aralığında (1700 – 4500 dev/dak) değişmektedir. 65 – 120 km/h aralığında kullanılan paralel hibrit modda İYM hem generatörü şarj etmekte hem de tahrik gücü sağlamaktadır. Ayrıca batarya şarj durumuna göre, elektrik motorları tahrik desteği sağlamakta ve yavaşlama esnasında rejeneratif frenlemeyle bataryayı şarj etmektedir [44], [45], [46].

Taşıt 120 km/h hız civarında iken sistem generatörü deaktif etmekte ve sadece arka elektrik motoru tahrik desteğini sürdürmektedir. İYM sadece taşıt tahriği için güç harcamaktadır. Bu durumda bataryadaki ve yakıt tankındaki enerji tüketilmektedir. Taşıt 120 km/h hızı aştığında ise ön elektrik motoru da aktif hale gelir ve bataryada mevcut olan enerji kullanarak tahrik gücü sağlamaktadırlar. Bu durumda İYM yine sadece tahrik sistemi için güç temin etmektedir [44], [45], [46]. Paralel hibrit sürüş modunda meydana gelen enerji akışı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Paralel hibrit sürüş modunda güç akışı

Tam elektrikli, seri hibrit ve paralel hibrit sürüş modları, PHEV-EKÜ'de ve alt kontrol ünitelerinde (ön, arka elekrik motoru kontrolcüsü…vb.) bulunan kural bazlı kontrol algoritmaları tarafından yönetilmektedir. Kural bazlı kontrol algoritmaları edinilen veriye ve sistem durumuna bakarak matematiksel ve mantıksal işlemlerle komutlar üretmektedir. Burada sistem önceden tasarlanmış algoritmalarla

matematiksel modellerle ve öngörülen senaryolar için kontrol sağlamaktadır. Öngörülemeyen senaryolar ve geliştirilen modeldeki eksik hesaplamalar kontrolün yeteneklerini sınırlamaktadır. Ayrıca sürücü tarafından manuel olarak yapılan batarya koruma, batarya şarj etme, ekonomik sürüş modu gibi, kontrolcüye gelen talepler de karar algoritmasını etkilemektedir. Tahrik sisteminde karar algoritmasının tam elektrikli sürüş, seri, paralel hibrit sürüş modlarına geçiş mantığı temel bir şekilde Tablo 2.5'te gösterilmiştir [44], [45], [46].

Tablo 2.5 Sürüş modları aktivasyon özellikleri

Sürüş Modu	**Taşıt Hızı**	**Batarya Şarj Durumu**	**Maksimum Güç**	**Batarya Şarj Tüketimi**
Tam Elektrikli Sürüş	0-120 km/h	>%30	60 kW	Tüketim aktif / Şarj etme pasif
Komponent Durumu	**EM1**	**EM2**	**İYM**	**GEN**
	Aktif	Aktif	Pasif	Pasif
Sürüş Modu	**Taşıt Hızı**	**Batarya Şarj Durumu**	**Maksimum Güç**	**Batarya Şarj Tüketimi**
Seri Hibrit Sürüş	0-120 km/h	<%30	120 kW	Tüketim aktif / Şarj etme aktif
Komponent Durumu	**EM1**	**EM2**	**İYM**	**GEN**
	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif

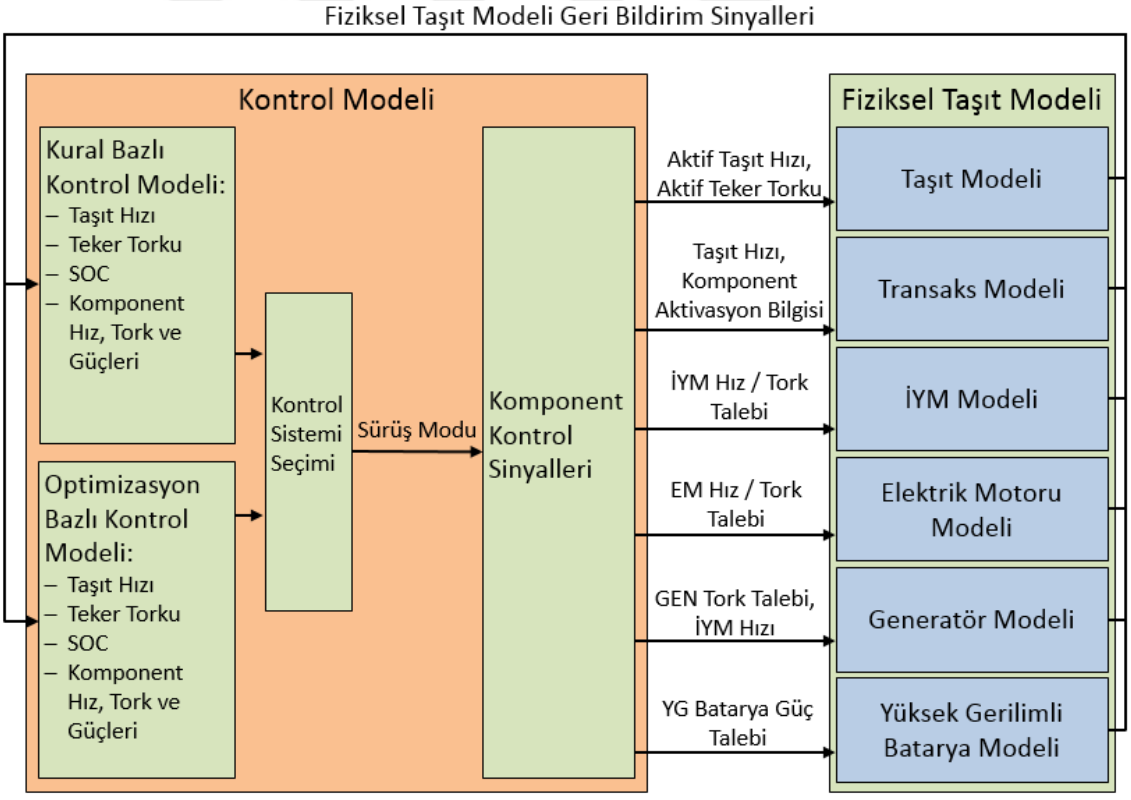
Tablo 2.5 Sürüş modları aktivasyon özellikleri (devamı)

Sürüş Modu	**Taşıt Hızı**	**Batarya Şarj Durumu**	**Maksimum Güç**	**Batarya Şarj Tüketimi**
Paralel Hibrit Sürüş[1]	65-120 km/h	<%30	143 kW	Tüketim aktif / Şarj etme aktif
Komponent Durumu	**EM1**	**EM2**	**İYM**	**GEN**
	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif
Sürüş Modu	**Taşıt Hızı**	**Batarya Şarj Durumu**	**Maksimum Güç**	**Batarya Şarj Tüketimi**
Paralel Hibrit Sürüş[2]	120 km/h	-	143 kW	Tüketim aktif / Şarj etme pasif
Komponent Durumu	**EM1**	**EM2**	**İYM**	**GEN**
	Pasif	Aktif	Pasif	Pasif
Sürüş Modu	**Taşıt Hızı**	**Batarya Şarj Durumu**	**Maksimum Güç**	**Batarya Şarj Tüketimi**
Paralel Hibrit Sürüş[3]	120-165 km/h	-	143 kW	Tüketim aktif / Şarj etme pasif
Komponent Durumu	**EM1**	**EM2**	**İYM**	**GEN**
	Aktif	Aktif	Pasif	Pasif

Kompleks tahrik sistemi sürüş modları karar mantığı yukarıda temel bir şekilde açıklanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda taşıt tahrik sistemi kural bazlı kontrol algoritması modellenmiştir. Bir sonraki bölümde modellemede kullanılan fonksiyonlar ve temel model yapısı açıklanmaktadır.

2.3 Taşıt Tahrik Sistemi Modelleme

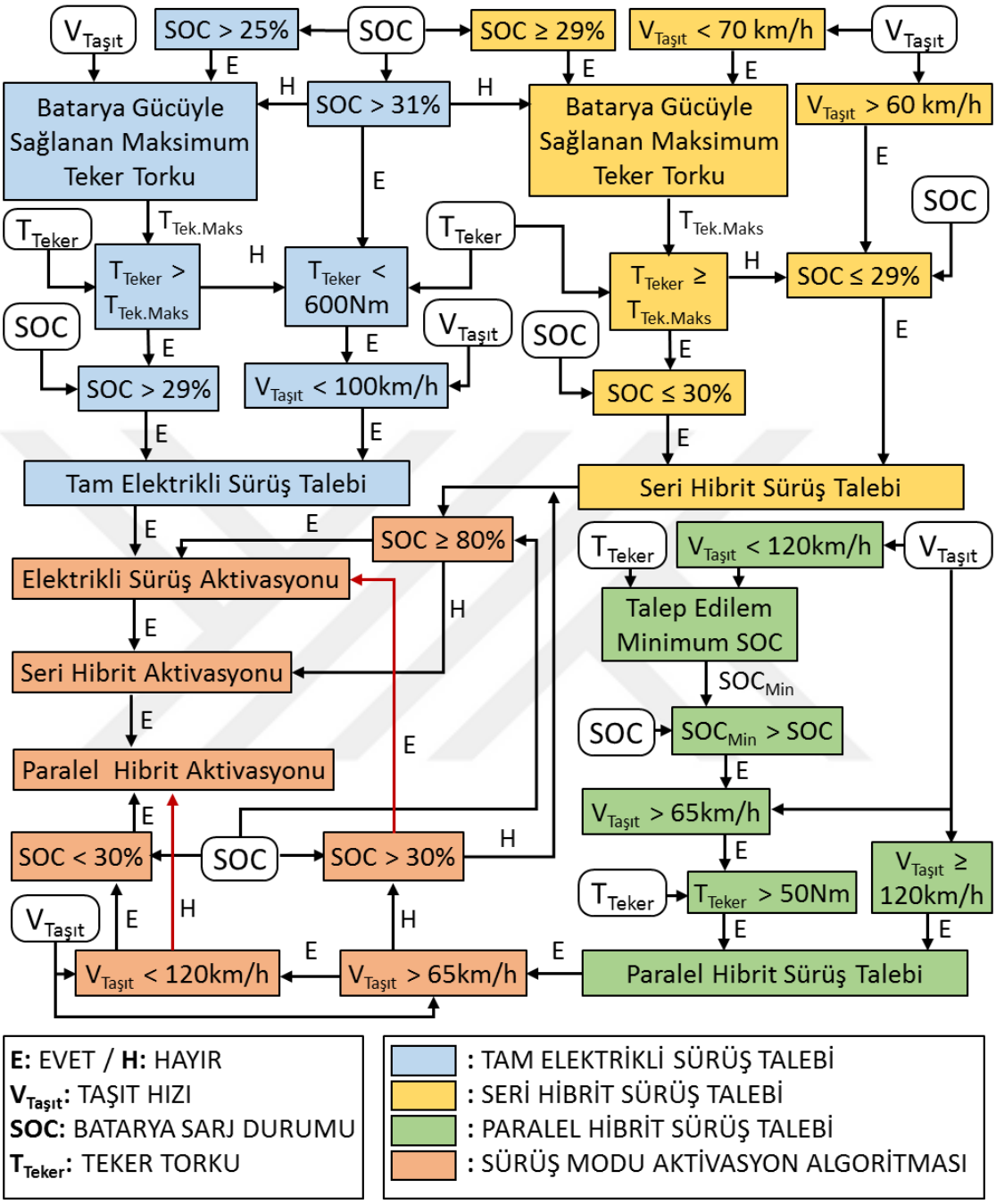
Tahrik sistemi, fiziksel ve ampirik modeller kullanılarak MATLAB Simulink ® programında modellenmiştir. Tahrik sistemindeki her bir sistem elemanı (elektrik motoru, generatör, İYM...vs.) ayrı alt modeller şeklinde modellenerek toplam taşıt modelini oluşturmaktadır. Taşıt modeliyle beraber, sistem içinde sürüş modunu kontrol eden kontrol bloğu da bulunmaktadır. Bu blok Bölüm 2.2'de açıklanan kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol sistemini içermektedir. Kontrol bloğu, model simülasyonu sırasında kullanılacak test çevrimlerine dayanarak taşıt sürüş dirençlerini hasaplamakta ve simülasyon sırasında gerekli olan komutları üretmektedir. Ayrıca komponent modellerinin fiziksel hesaplamaları sonucu ortaya çıkan parametreler tekrar kontrol bloğuna geri bildirim olarak iletilmekte ve kontrol bloğu son işlem adımında hesaplanan parametrelere göre sürüş moduna karar vermektedir. Taşıt modelinin şematik gösterimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Taşıt modeli

Modelde bulunan hibrit kontrol bloğu, taşıt hızı, taşıt tork talebi, batarya şarj durumu, güç komponentlerinin güç çıktıları gibi taşıt modelinin alt komponentleri

tarafından hesaplanan birçok girdiyi değerlendirmektedir. Kontrol modelinin temel algoritması Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kontrol modeli temel algoritması

Değerlendirme sonucunda kontrolcü bir sonraki hesaplama adımındaki sürüş moduna ve hangi güç kaynaklarının (elekrik motoru, generatör, İYM) çalışması gerektiğine karar vermektedir. Değerlendirme sürecinde, kontrol modeli Bölüm

2.2'de açıklanan parametre limitlerini kullanmaktadır ve değerlendirme sonucunda güç kaynaklarından talep edilen güç çıktıları ilgili fiziksel modellere iletilmektedir.

Kural bazlı kontrol modelinde Şekil 2.7'de gösterildiği gibi ana parametreler, batarya şarj durumu, taşıt tork talebi, taşıt hızı olarak tanımlanmaktadır. Sürüş modu kararından sornra kontrol modeli Şekil 2.6'da gösterildiği gibi güç komponentlerinden talep edilen tahrik torkunu ilgili alt model bloklarına iletmektedir. Alt model blokları tahrik sisteminde çalışan komponentlerin fiziksel modelleridir ve komponent bilgilerini içeren tablolar, 3 boyutlu haritalar barındırmaktadır. Ayrıca gereken yerlerde fiziksel formüllerle bu bilgileri içeren tabloları ve 3 boyutlu haritaları kullanarak hesaplamalar yapmaktadır. Alt komponentlerin modellenme süreci devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.3.1 Taşıt Yükleri Modellemesi

Taşıt tahrik sistemi modellemede ilk adım olarak taşıt hareketi süresince tekerleklerden talep edilen tahrik kuvveti talebi modellenmiştir. Burada tekerlerden istenen tahrik kuvveti, taşıt hareketi sırasında gerçekleşen hareket dirençleri ile doğrudan ilişkilidir. Hareket dirençleri, yuvarlanma direnci, hava (aerodinamik) direnci, eğim direnci, ivmelenme (atalet) direnci olarak sınıflandırılırılmaktadır [5], [48]. Aşağıda hareket dirençleri formüle edilmiştir,

Yuvarlanma direnci,

$$F_{yuvarlanma} = M_{Taşıt} * g * \cos\alpha * (f_0 + f_1 * V_{Taşıt}) \quad (2.1)$$

Eğim direnci,

$$F_{eğim} = M_{Taşıt} * g * \sin\alpha \quad (2.2)$$

İvmelenme direnci,

$$F_{İvme} = \delta * M_{Taşıt} * a_{Taşıt} \quad (2.3)$$

Hava (Aerodinamik direnç) direnci,

$$F_{hava} = \frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt} * \vec{V}^2 \quad (2.4)$$

Toplam hakeret direnci,

$$F_{Toplam} = F_{yuvarlanma} + F_{eğim} + F_{ivmelenme} + F_{hava} \quad (2.5)$$

Olarak tanımlanmaktatır. Burada $F_{yuvarlanma}$ yuvarlanma direnci (N), $M_{Taşıt}$ taşıt kütlesi (kg), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), α yol eğimi açısı (°), f_0 yola bağlı yuvarlanma direnci katsayısı (-), ve f_1 taşıt hızı ve lastiğe bağlı yuvarlanma direnci katsayısı (s/m), $V_{Taşıt}$ taşıt hızı (m/s), $F_{eğim}$ eğim direnci, $F_{İvme}$ ivmelenme direnci, δ rotasyonel atalet kaysayısı (-), $a_{Taşıt}$ taşıt ivmesi (m/s^2), ρ_{hava} hava yoğunluğu (kg/m^3), C_D aerodinamik hava direnç katsayısı (-), $A_{Taşıt}$ taşıt projeksiyon alanı (m^2), $\vec{V}$ efektif taşıt vektörel hızı (m/s), olarak tanımlanmaktadır. Taşıt vektörel hızı aracın üzerine etkiyen rüzgarın yönü ile hesaplanmaktadır. Rüzgar yönü taşıtın hareket yönü ile aynı ise rüzgar hızı negatif, taşıtın hareket yönününün karşısında ise pozitif değer alarak hesaplamaya dahil edilir. Taşıt vektörel hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

$$\vec{V} = \vec{V}_{Taşıt} + \vec{V}_{Rüzgar} \quad (2.6)$$

Burada $\vec{V}$ efektif taşıt vektörel hızı (m/s), $\vec{V}_{Taşıt}$ taşıt vektörel hızı (m/s), $\vec{V}_{Rüzgar}$ rüzgar vektörel hızı olarak ifade edilmektedir.

Bu tip formülizasyonlarda, taşıt hakkında birçok parametrenin bilinmesi gerekmekdedir. Alternatif bir çözüm olarak taşıt hareket dirençleri hızın bir fonksiyou olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanımlama sırasında, taşıt belirli bir hıza kadar hızlandırılıp düz bir yolda, tahrik ve frenleme yapmadan taşıtın kendi hareket dirençleri ve iç dirençleri nedeniyle enerji kaybederek durması sağlanır. Bu süreçte geçen süre ve hız farkı kayıt edilerek, taşıtın yavaşlama ivmesi hesaplanmaktadır. Kütlesi bilinen taşıtın hesaplanan yavaşlama ivmesiyle çarpımı toplam yavaşlama direnç kuvvetini vermektedir. Yavaşlama kuvveti, hareket ve toplam iç direnç kuvvetlerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Burada, yavaşlama esnasında tekerlere bağlı bulunan dişli mekanizmalarının uyguladığı direnç kuvveti, tekerlerden temin edilen tahrikle yenilmektedir. Teker, iç dirençleri yenmek için kullandığı tahrik kuvvetini herhangi bir güç kaynağından değil, hareket eden taşıtın enerjisini kullanarak elde etmektedir. Tekerlerlen talep edilen tahrik kuvveti,

serbest taşıt salınımı esnasında tekerlere bağlı güç aktarma organları ve hareketli mekanizmaların hareketini koruması için talep ettiği kuvvet olarak tanımlanmaktadır [49], [50], [51]. Taşıtta meydana gelen iç direnç kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır,

$$-F_{Toplam} = F_{iç} = F_{iç.fo} + F_{iç.f1} * V_{Taşıt} \quad (2.7)$$

Burada F_{Toplam} Tekerlerlen talep edilen tahrik kuvveti (N), $F_{iç.fo}$ çok düşük hızlarda güç aktarma organlarının neden olduğu hareket direnç kuvveti (N), bu direncin taşıt hızı $V_{Taşıt}$ ile artan orandır (N).

Taşıt hareket direncini ifade eden formül (2.7) yukardaki bilgiler ışığında yeniden tanımlandığında,

$$F_{Toplam} = F_{yuvarlanma} + F_{eğim} - F_{ivmelenme} + F_{hava} \quad (2.8)$$

Olarak elde edilmektedir. $F_{ivmelenme}$ kuvveti yavaşlama esnasında negatif ivmeye sahiptir ve kuvvet negatif değer olarak tanımlanmıştır. Sistemdeki toplam direnç kuvveti yavaşlama direnç kuvvetine eşit olduğundan,

$$F_{ivmelenme} = F_{yuvarlanma} + F_{eğim} + F_{hava} - F_{Toplam} \quad (2.9)$$

Olarak elde edilir. Formul 2.9'da formül 2.1, 2.2, 2.4, 2.5 yerine konulduğunda,

$$F_{ivmelenme} = \delta * M_{Taşıt} * a_{Taşıt} = \Big[M_{Taşıt} * g * \cos\alpha * \left(f_0 + f_1 * V_{Taşıt}\right) + M_{Taşıt} * g * \sin\alpha + \frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt} * \left(\vec{V}_{Taşıt} + \vec{V}_{Rüzgar}\right)^2 + F_{iç.fo} + F_{iç.f1} * V_{Taşıt} \Big] \quad (2.10)$$

Olarak tanımlanmakta ve taşıt ivmesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

$$a_{Taşıt} = \Big[M_{Taşıt} * g * \cos\alpha * \left(f_0 + f_1 * V_{Taşıt}\right) + M_{Taşıt} * g * \sin\alpha + \frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt} * \left(\vec{V}_{Taşıt} + \vec{V}_{Rüzgar}\right)^2 + F_{iç.fo} + F_{iç.f1} * V_{Taşıt} \Big] / (\delta * M_{Taşıt}) = C_0 + C_1 * V_{Taşıt} + C_1 * V_{Taşıt}^2 \quad (2.11)$$

Olarak tanımlanmaktadır. Burada,

$$C_0 = [M_{Taşıt} * g * (f_0 * \cos\alpha + \sin\alpha) + \frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt} * V_{Taşıt}{}^2 + F_{iç.fo}]/(\delta * M_{Taşıt}) \quad (2.12)$$

$$C_1 = [M_{Taşıt} * g * f_1 * \cos\alpha + \frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt} * \vec{V}_{Rüzgar} + F_{iç.f1}]/(\delta * M_{Taşıt}) \quad (2.13)$$

$$C_2 = [\frac{1}{2} * \rho_{hava} * C_D * A_{Taşıt}]/(\delta * M_{Taşıt}) \quad (2.14)$$

Olarak tanımlanmıştır. Yukadaki hesaplamalara dayanarak taşıt ivmesi taşıt hızına bağlı ikinci dereceden bir polinom olarak tanımlanabilmektedir,

$$a_{Taşıt}(V_{Taşıt}) = C_0 + C_1 * V_{Taşıt} + C_1 * V_{Taşıt}{}^2 \quad (2.15)$$

Diğer yandan toplam yol direnci Newton'un 2. Hareket Kanunu'na göre, taşıt kütlesi ve taşıt ivmesi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

$$F_{Teker} = M_{Taşıt} * a_{Taşıt}(V_{Taşıt}) = M_{Taşıt} * C_0 + M_{Taşıt}\, C_1 * V_{Taşıt} + M_{Taşıt} * C_1 * V_{Taşıt}{}^2 \quad (2.16)$$

Burada F_{Teker} toplam yol direnci (N), $M_{Taşıt}$ taşıt kütlesi (kg), $a_{Taşıt}$ taşıt hareket ivmesi (m/s^2) olarak tanımlanmaktadır. Toplam yol direnci aynı zamanda teker ile yol arasındaki kayma ihmal edilerek teker tahrik kuvveti olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen teker tahrik kuvveti kullanılarak, toplam teker tahrik torku olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

Toplam teker tahrik torku,

$$T_{Teker} = F_{Teker} * r_{ef} \quad (2.17)$$

Ön teker toplam tahrik torku,

$$T_{Teker.Ön} = \frac{T_{Teker}}{R_{Tork}} \quad (2.18)$$

Arka teker toplam tahrik torku,

$$T_{Teker.Arka} = \frac{T_{Teker}}{(1-R_{Tork})} \quad (2.19)$$

Ön / arka teker açısal hızı,

$$\omega_{Teker.Ön} = \omega_{Teker.Arka} = \left(\frac{V_{Taşıt}}{2,\pi.r_{ef}}\right) * 60 \quad (2.20)$$

Burada, F_{Teker} toplam taşıt tahrik kuvveti (N), r_{ef} efektif teker yarıçapı (m), T_{Teker} toplam taşıt tahrik torku (N·m), $T_{Teker.Ön}$ ön teker toplam tahrik torku, R_{Tork} ön/arka aks tork dağılım oranı, $T_{Teker.Arka}$ arka teker toplam tahrik torku, $V_{Taşıt}$ taşıt hızı (m/s), $\omega_{Teker.Ön}$, $\omega_{Teker.Arka}$ sırasıyla ön ve arka teker açısal hızı (dev/dak), olarak ifade edilmektedir. Teker devirleri hesaplanırken yol ile tekerler arasındaki kayma ihmal edilmiştir.

2.3.2 İYM Modellemesi

Tahrik sisteminde 1998 cc toplam silindir hacmine sahip benzinli bir içten yanmalı motor kullanılmaktadır. Çalışmada, İYM'den talep edilen hız ve torkun çıktısı olarak motorun özgül yakıt tüketimi elde edilmektedir.

İYM özgül yakıt tüketimi, İYM açısal hızı ve torkunun girdi olarak tanımlandığı bir harita tarafından elde edilmektedir. Test simülasyonu esnasında her hesaplama adımında İYM tarafından talep edilen hız ve tork bilgisiyle beraber, İYM özgül yakıt tüketimi her hesaplama adımı için özgül yakıt tüketimi haritası tarafından hesaplanmaktadır, [51], [52], [53]. Yakıt tüketimi aşağıdaki gibi formüle edilmiştir,

Özgül yakıt tüketimi,

$$YT = YT_{harita}(\omega_{İYM}, T_{İYM}) \quad (2.21)$$

Burada YT özgül yakıt tüketimi (g/kWh), YT_{harita} özgül yakıt tüketimi haritası, $\omega_{İYM}$ İYM açısal hızı (dev/dak), $T_{İYM}$ İYM torkunu (N·m) ifade etmektedir. Haritadan elde edinilen özgül yakıt tüketimi bilgisi, kütlesel yakıt debisini hesaplamak için kullanılmaktadır. Kütlesel yakıt debisi simülasyonda her bir işlem adımında aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır,

$$YD = YT * \left(\frac{\omega_{İYM} * T_{İYM}}{9549}\right) * \frac{1}{3600} \quad (2.22)$$

Burada YD yakıt debisi (g/sn), T özgül yakıt tüketimi (g/kWh), $\omega_{İYM}$ İYM açısal hızı (dev/dak), $T_{İYM}$ İYM torkunu (N·m) ifade etmektedir. Hesaplanan yakıt debisi her bir simülasyon işlem adımında (50 ms/işlem) simülasyon süresince integre edilerek toplam tüketilen hacimsel yakıt miktari ve taşıt özgül yakıt tüketimi, aşagıdaki formüllerle hesaplanmaktadır,

Simülasyon boyunca tüketilen toplam yakıt miktarı,

$$YT_{Toplam} = \sum_{k=0}^{N} \frac{\frac{YD}{1000}}{\rho_{yakıt}} \tag{2.23}$$

Simülasyon boyunca taşıt özgül yakıt tüketimi,

$$YT_{Taşıt.Özgül} = YT_{Toplam} * \left(\frac{100}{L_{Çevrim}}\right) \tag{2.24}$$

Burada YT_{Toplam} simülasyon boyunca tüketilen toplam yakıt miktarı (L), YD yakıt debisi (g/s), $\rho_{yakıt}$ yakıt yoğunluğu (kg/L) ve $YT_{Taşıt.Özgül}$ simülasyon boyunca taşıt özgül yakıt tüketimi (L/100km), $L_{Çevrim}$ simülasyon boyunca taşıtın katetttiği mesafe olarak ifade edilmiştir.

2.3.3 Transaks Modellemesi

Transaks sistemi, modellenirken ön ve arka transaks sistemi olarak modellenmiştir. Ön aks sistemi toplamda İYM, generatör ön elektrik motoru ve ön aks arasında gerçekleşen mekanik güç akışlarını sağlamaktadır. Ön transaks sisteminde, tam elektrikli sürüşte sadece elektrik motorundan gelen güç kullanılmakta ve ön elektirk motoru açısal hızı ve torku aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

Ön elektrik motoru açısal hızı,

$$\omega_{EM1} = i_{EM1} * \omega_{Teker.Ön} \tag{2.25}$$

Ön elektrik motoru torku,

$$T_{EM1} = \frac{1}{i_{EM1} * \eta_{EM1Red}} * T_{Teker.Ön} \tag{2.26}$$

Burada, ω_{EM1} ön elektrik motoru açısal hızı (dev/dak), i_{EM1} ön elektrik motoru ve aks arasındaki çevrim oranı (-), $\omega_{Teker.Ön}$ ön aks teker açısal hızı (dev/dak), T_{EM1}

elektrik motorundan talep edilen tahrik torku (N·m), η_{EM1Red} ön elekrik motoru ve tahrik tekeri arasındaki redüksiyon dişli sistemi verimi (%), $T_{Teker.Ön}$ ön akstan talep edilen tahrik torku (N·m) olarak ifade edilmektedir. Taşıt seri hibrit sürüş modunda ise yine sadece ön elektrik motoruyla ön aksa tahrik vermekte ve İYM bataryayı şarj etmek için generatöre güç vermektedir. Generatör açısal hızı ve torku aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

Generatör açısal hızı,

$$\omega_{GEN} = i_{GEN} * \omega_{İYM} \tag{2.27}$$

Generatör torku,

$$T_{GEN} = \frac{\eta_{GENİYM}}{i_{GEN}} * T_{İYM} \tag{2.28}$$

Burada, ω_{GEN} generatör açısal hızı (dev/dak), i_{GEN} generatör ile İYM arasındaki çevrim oranı (-), $\omega_{İYM}$ İYM açısal hızı (dev/dak), T_{GEN} generatöre iletilen tork (N·m), $\eta_{GENİYM}$ generatör ve İYM arasındaki redüksiyon dişli sistemi verimi (%), $T_{İYM}$ İYM'nin ürettiği tork (N·m) olarak ifade edilmektedir. Paralel hibrit sürüş sisteminde ise İYM motor hem tahrik sistemine hem de generatöre tork iletmektedir. Burada ön tahrik tekerleri aynı zamanda ön elektrik motorundan da tahrik torku almaktadır. Toplam taşıt tahrik torku aşağıdaki gibi açıklanmaktadır,

Taşıt tahrik torku,

$$T_{Teker.Ön} = [(T_{İYM} - T_{GEN}) * i_{İYM} * \eta_{İYMRed}] - [T_{EM1} * i_{EM1} * \eta_{EM1Red}] \tag{2.29}$$

İYM açısal hızı,

$$\omega_{İYM} = i_{İYM} * \omega_{Teker.Ön} \tag{2.30}$$

Ön elektrik motoru torku

$$T_{EM1} = \frac{1}{i_{EM1} * \eta_{EM1Red}} * T_{Teker.Ön} \tag{2.31}$$

Burada, $i_{İYM}$ İYM ve aks arasındaki çevrim oranı (-), $\eta_{İYMRed}$ İYM ve tahrik tekeri arasındaki redüksiyon dişli sistemi verimi (%), olarak ifade edilmektedir. Diğer semboller yukarıdaki bölümlerde açıklanmışıtır. Generatör açısal hız ve tork hesaplamaları seri hibrit modunda kullanılan hesaplamalarla aynıdır.

Tahrik sistemi arka transaksta sadece bir adet elektrik motoruyla tahrik gücü üretmektedir. Arka elektrik motoru açısal hızı ve torku aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

Arka elektrik motoru açısal hızı,

$$\omega_{EM2} = i_{EM2} * \omega_{Teker.Arka} \tag{2.32}$$

Arka elektrik motoru torku,

$$T_{EM2} = \frac{1}{i_{EM2} * \eta_{EM2Red}} * T_{Teker.\text{Arka}} \tag{2.33}$$

Burada, ω_{EM2} arka elektrik motoru açısal hızı (dev/dak), i_{EM2} arka elektrik motoru ve aks arasındaki çevrim oranı (-), $\omega_{Teker.Arka}$ ön aks teker açısal hızı (dev/dak), T_{EM2} arka elektrik motorundan talep edilen tahrik torku (N·m), η_{EM2Red} arka elektrik motoru ve tahrik tekeri arasındaki redüksiyon dişli sistemi verimi (%), $T_{Teker.\text{Arka}}$ arka akstan talep edilen tahrik torku (N·m) olarak ifade edilmektedir.

2.3.4 Elektrik Motoru Modellemesi

Tahrik sisteminde 2 adet 60 kW pik güce sahip 3 faz asenkron motor kullanılmaktadır. Elektrik motorlarından istenen mekanik güç talebi, öncelikli olarak elektrik motorunun verebileceği maksimum mekanik güç ile karşılaştırılarak, elektrik motorunun vereceği mekanik güç aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

$$P_{EM,Mek} = \min(P_{EM,Tal}, P_{EM,max}) \tag{2.35}$$

Burada, $P_{EM,Mek}$ elektrik motoru tarafından temin edilen mekanik güç (kW), $P_{EM,Tal}$, elektrik motorundan talep edilen mekanik güç (kW), $P_{EM,max}$ elektrik motorunun verdiği maksimum mekanik güç olarak hesaplanmaktadır. Bu sayede elektrik motorlarından alınacak mekanik güç, motor kapasiteleri tarafından sınırlandırılmıştır. Motor güç kapasiteleri deneysel olarak elde edilen verilerle üç boyutlu haritarlarda modellenmiştir.

Elektrik motorunun, mekanik tahrik esnasında bataryadan talep ettiği elektrik gücü aşağıdaki gibi formüle edilmiştir,

$$P_{EM,el} = P_{EM,Mek} \pm P_{EMKayıp} \quad (2.36)$$

Burada $P_{EM,el}$ elektrik motorunun elektrik gücü (kW), $P_{EM,Mek}$ elektrik motoru tarafından temin edilen mekanik güç (kW), $P_{EMKayıp}$ elektrik motorunda mekanik güç üretimi sırasında meydana gelen verim kayıplarından dolayı oluşan güç kaybı (kW), olarak ifade edilmektedir. Güç kaybı deneysel olarak elde edilen elektrik motoru verim haritasından elde edilen verim ve mekanik güç talebiyle hesaplanmaktadır. Rejeneratif frenleme sırasında, elektrik motor mekanik gücü negatif değer aldığında, güç kaybı pozitif değer almaktadır.

2.3.5 Generatör Modellenmesi

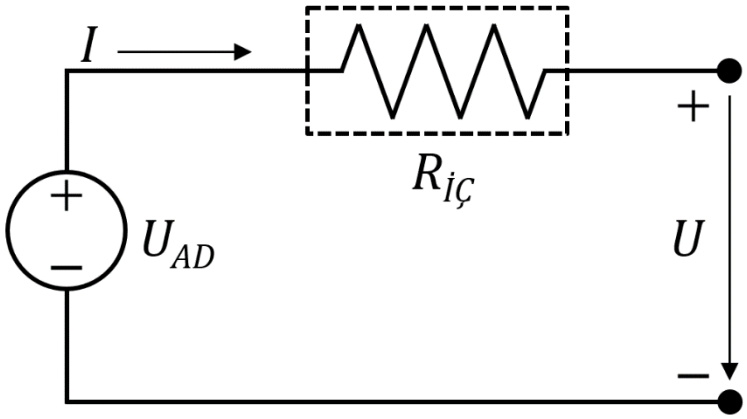
Elektrik motoru modellemesine benzer bir şekilde, generatör tarafından talep edilen tork ve İYM hızına bağlı olan anlık generatör hızı ile hesaplanan mekanik güç talebi, verim kayıplarından sonra elektriksel güce çevrilmektedir. Generatörün ürettiği elektriksel güç aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$P_{GEN,el} = P_{GEN,Mek} - P_{GENKayıp} \quad (2.37)$$

Burada $P_{GEN,el}$ generatörüm ürettiği elektriksel güç (kW), $P_{GEN,Mek}$ generatörün İYM'dan talep ettiği mekanik güç (kW), $P_{GENKayıp}$ generatörde elektrik gücü üretimi sırasında meydana gelen verim kayıplarından dolayı oluşan güç kaybı (kW) olarak ifade edilmektedir. Generatör verimi, deneysel verilerle modellenmiş 3 boyutlu haritadan temin edilmektedir.

2.3.6 Yüksek Gerilim Batarya (Tahrik Bataryası) Modellemesi

Tahrik bataryası olarak 12 kWh güç kapasitesine sahip 300 V gerilimli Lityum İyon batarya kullanılmaktadır. Lityum iyon bataryayı modellemek için, statik eşdeğer akım kullanarak Şekil 2.8'deki gibi fiziksel bir model kullanılmıştır [23], [51], [52].



Şekil 2.8 Batarya modeli

Burada , U_{AD} batarya açık devre gerilimi (V), I batarya şarj – deşarj akımı (A), $R_{\text{İÇ}}$ batarya toplam iç direnci (Ohm), U batarya yük gerilimi (V) olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.8'de gösterilen modelde Kirchhoff' un Gelirilimler Kanunu eşdeğer devre için uygulandığında aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir [23], [52], [54], [55], [56],

$$U = U_{AD} - I * R_{\text{İÇ}} \tag{2.38}$$

Burada U_{AD} açık devre gerilimi olarak tanımlanmıştır ve batarya şarj durumuyla doğrudan ilgilidir. $R_{\text{İÇ}}$ toplam iç dirençleri ifade etmektedir ve batarya omik, şarj/transfer, difüzyon/konsantrasyon dirençlerini kapsamaktadır . Eşdeğer akım modeliyle ve denklem (2.38) ile batarya gücü aşağıdaki gibi formüle edilmiştir [52], [55],

$$P_{Bat} = U * I = U_{AD} * I - I^2 * R_{\text{İÇ}} \tag{2.39}$$

Burada, P_{Bat} batarya tarafından sağlanan elektrik gücünü (VA) olarak ifade edilmektedir. Batarya gücü deşarj sırasında pozitif, şarj sırasında negatif değer almaktadır. Batarya şarj – deşarj akımı ise denklem (2.39) kullanılarak aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$I = \frac{U_{AD} - \sqrt{{U_{AD}}^2 - 4 * R_{\text{İÇ}} * P_{Bat}}}{2 * R_{iç}} \tag{2.40}$$

Batarya şarj durumu (SOC) Coulomb sayma tahmini yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. SOC'nin zamana bağlı birinci dereceden türevi Coulomb sayma tahmini modeline göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [52], [57],

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{I}{C} = \frac{U_{AD} - \sqrt{{U_{AD}}^2 - 4 * R_{\text{İÇ}} * P_{Bat}}}{2 * R_{iç} * C} \tag{2.41}$$

Burada C batarya nominal kapasitesini (Ah) , $\frac{dSOC}{dt}$ SOC'nin zamana bağlı birinci dereceden türevini yani SOC'nin birim zamandaki değişim miktarını (%/h) ifade etmektedir. Bataryanın bir sonraki hesaplama adımındaki şarj durumu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır,

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{dSOC}{dt} = SOC_k - \frac{U_{AD} - \sqrt{{U_{AD}}^2 - 4 * R_{\text{İÇ}} * P_{Bat}}}{2 * R_{iç} * C} \tag{2.42}$$

Burada SOC_{k+1} bir sonraki hesaplama adımındaki batarya şarj durumunu (%), SOC_k ise anlık batarya şarj durumunu (%) ifade etmektedir.

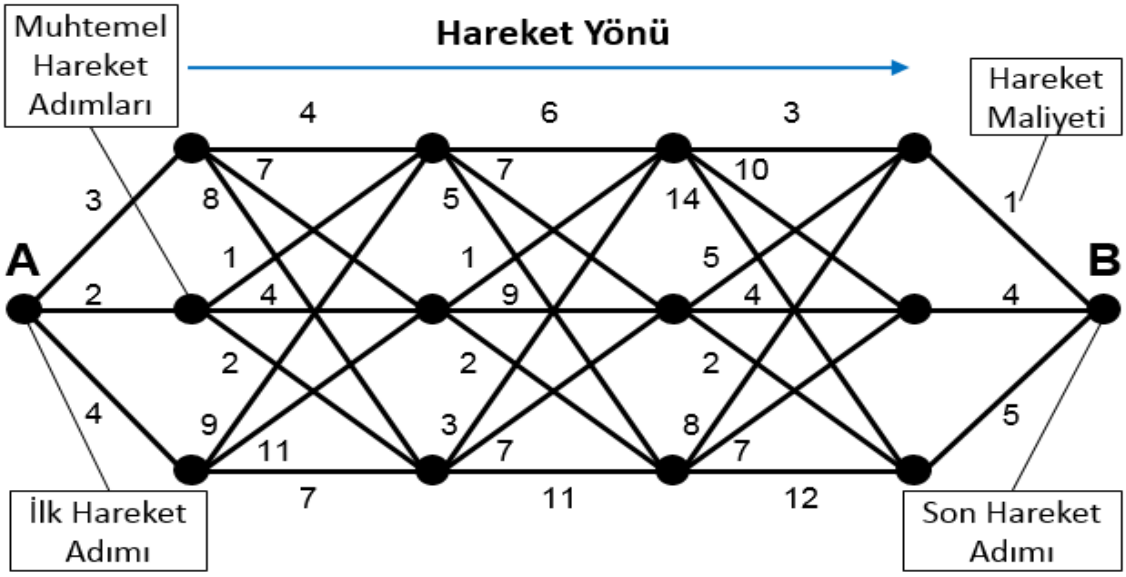
3

ENERJİ YÖNETİMİ OPTİMİZASYONU

3.1 Dinamik Programlama

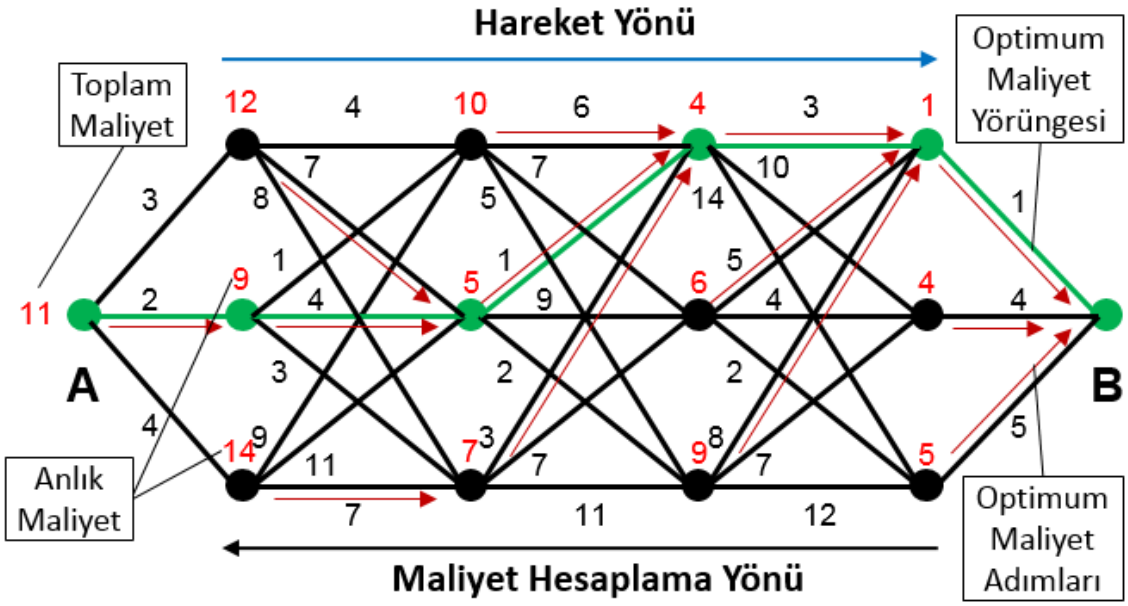
Dinamik programlama, lineer veya lineer olamayan sistemler için tanımlanan optimizasyon problemini, daha basit alt problemler haline indirgeyerek çözen nümerik bir yaklaşımdır. Yöntem optimizasyon problemi için tanımlanan tüm kontrol ve durum değişkenlerini kapsamlı bir şekilde değerlendirerek, kontrol stratejisinde optimum maliyeti sağlayacak kontrol yörüngesini hesaplamaktadır.

Dinamik programlama, Bellman'ın Optimallik İlkesi'ne dayanarak, çok aşamalı bir optimizasyon probleminde belirlenecek olan kararlar dizisi sistemin ilk kararı, aşaması ve durumu ne olursa olsun, sistemin görev süresince alacağı diğer kararlar ilk durumun belirlediği seviyeye bağımlı bir şekilde en uygun kararları içeren diziyi hesaplamaktadır. Yöntem basit bir yörünge optimizasyon problemi üzerinden açıklanabilir. Örneğin, A noktasından B noktasına giden bir taşıtta yakıt açısından minimum maliyeti sağlayacak olan yol yörüngesi dinamik programlama yöntemiyle hesaplanabilmektedir [41], [42], [44]. Yörünge problemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Dinamik programlama yörünge problemi

Şekil 3.1'de, A noktasından B noktasına giden bir taşıtın izleyebileceği yörünge noktaları ve her yörünge noktası için elde edilen maliyetler gösterilmektedir. Optimizasyon probleminin amacı ise A'dan B'ye en az maliyeti sağlayan yörünge hesaplamasını yapmaktır. Şekil 3.2'de, dinamik programlama yönteminin hasaplama mantığı gösterilmektedir. Şekil 3.1'de her bir nokta arasında gösterilen sayılar bir noktadan diğerine giderken oluşan maliyeti ifade etmektedir. Optimizasyonun amacı A ile B noktası arasında bulunan her nokta opsiyonu için maliyetleri değerlendirmekte ve minimum maliyeti sağlayan yörüngeyi bu şekilde hesaplamaktadır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yöntem bilinen maliyetler için optimallik ilkesine uyarak B noktasından A noktasına doğru ilerlemekte ve en az maliyetli yörüngeleri belirlemektedir. En az maliyeti sağlayan yörüngeler ok işareti ile belirtilmiştir. Her nokta için mümkün olan en az toplam maliyetler ise noktaların üzerinde gösterilmektedir. Örnekte A'dan B'ye giden en optumum yörüngenin maliyeti 11 olarak hesaplanmıştır.



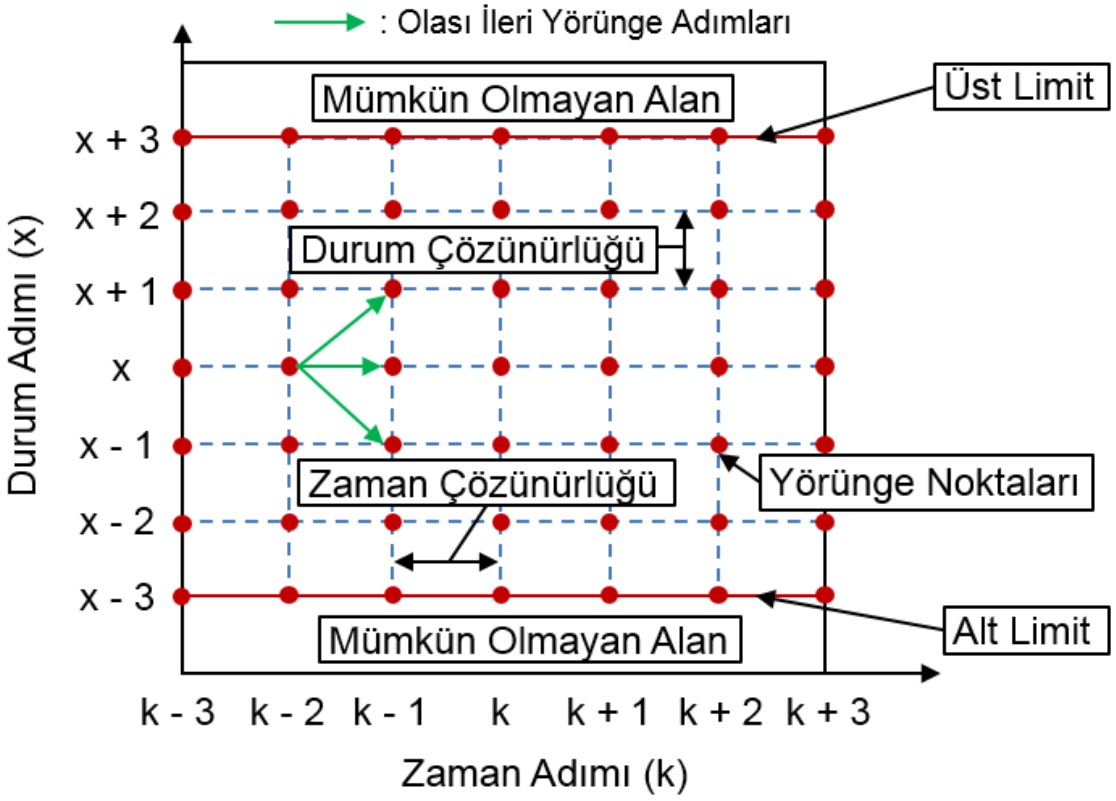
Şekil 3.2 Dinamik programlama optimum yörünge maliyeti

Yöntem lineer olmayan dinamik bir sistemde, sınırlandırılmış bir optimizasyon işleminde sınırlandırmaları ceza fonksiyonlarıyla belirlemektedir. Nümerik bir yöntem olan dinamik programlama yöntemi varyasyonların hesaplaması ile ilişkilidir. Langrange çarpanları, lineer veya lineer olmayan programlama yöntemleri yerine uygulanabilen bir yöntem değildir [42], [44].

Dinamik programlama nümerik bir yöntem olduğu için, devamlı zaman durumunda çalışan kontrol problemi, ayrık zaman durumunda ayrıklaştırılmaktadır. Bu sayede yöntem problemi alt parçalar halinde basit problemler halinde çözmektedir. Yöntem nümerik bir yaklaşım olarak bilgisayar hesaplamaları için kolaylık sağlamaktadır. Kontrol problemi tanımlanırken dikkate alınan kontrol ve durum değişkenleri de, dinamik programlamada ayrıklaştırılmak zorundadır. Burada, kontrol ve durum değişkenlerinin ayrıklaştırılmasıyla elde edilen noktalar (yörünge noktaları) ve ayrıklaştırma sürecinde belirlenen durum ve kontrol değişkenleri alt ve üst limitleri, sınırlı hesaplamaya sahip bir optimizasyon sağlamaktadır [43], [52].

Ayrıca kontrol probleminde tanımlanan tüm parametreler, belirlenen sınırlar içerisinde birbirleriyle olan olası tüm kombinasyonları hesaplanarak ve burada her hesaplama zamanındaki olası kontrol senaryolarından, hedeflenen maliyet için en optimum sonucu sağlayan kontrol politikası elde edilmektedir. Yöntem kontrol

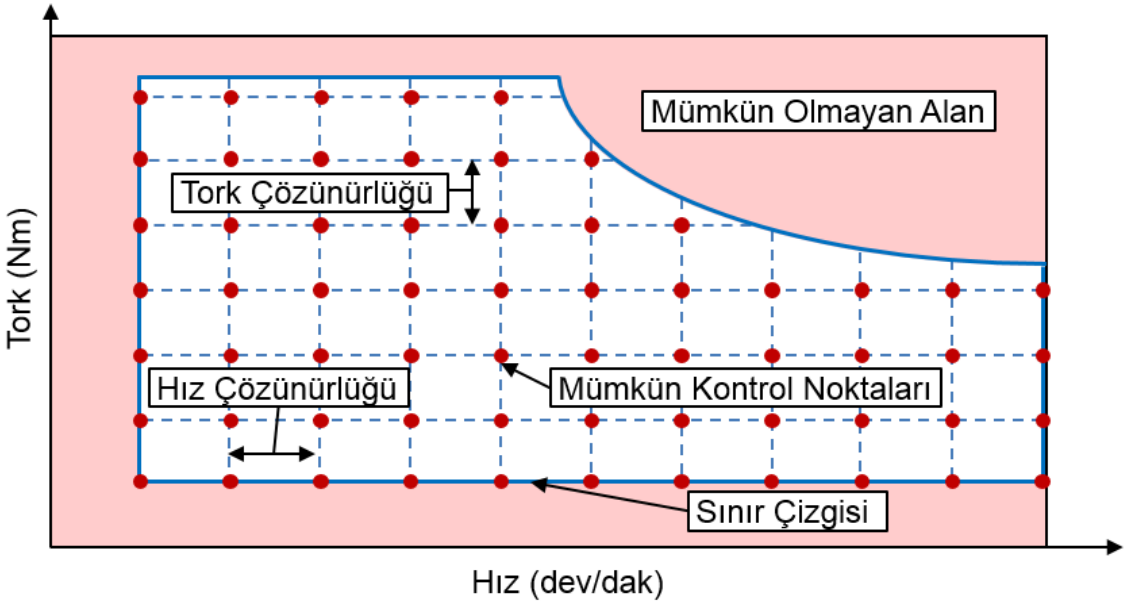
problemini uygulanan görev çevriminde en sondaki durumdan başlayarak ilk başa doğru belirlenen yörünge noktaları arasında en optimum sonuca ulaşmak için görev çevriminin ilk hesaplama adımına kadar hesaplama yapmaktadır. Şekil 3.3'te ayrıklaştırılmış durum-zaman uzayı örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Ayrıklaştırılmış durum zaman uzayı

Burada, durum uzayı, belirli bir aralıkta tanımlanan limitler dahilinde ayrıklaştırıldığından, kontrol problemimin durum çıktısı, belirlenen noktalar arasında kalabilmektedir. Böyle bir durumda, iki nokta arasda interpolasyonla bu sorun çözümlenmektedir. Burada, belirlenen sınırlar içerisinde nokta sayısı ne kadar artarsa, hesaplama hassasiyeti ve yükü o derecede artmaktadır. İkinci bir konu olarak belirlenen durum sınırları için maliyetin değerlendirilmesidir. Belirlenen durum sınırlanının dışında yani mümkün olmayan alanda bulunan bir nokta için sonsuz maliyet uygulanmaktadır. Ayrıca durum değişken limitleri opitimizasyon süreciden önce belirlenerek istenilen ölçüde limitleri tanımlama imkanı bulunmaktadır. Bu şekilde gereken sınırlar problem tanımında kolaylıkla sağlanabilmektedir [43], [52].

Bunun yanında kontrol değişkenleri için de aynı ayrıklaştırma zorunluluğu bulunmaktadır. Kontrol değişkenleri, değişken özelliğine bağlı olarak kendi limitlerini belirlemektedir. Şekil 3.4'te ayrıklaştırılmış kontrol uzayı örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Ayrıklaştılmış kontrol uzayı

Durum uzayında belirtildiği gibi, kontrol uzayında da ayrıklaştırma sürecinde, ayrıklaştırma oranı (nokta sayısı) ne kadar artarsa hesaplama hassasiyeti ve optimizasyonun hesaplama doğruluğu o kadar artmaktadır. Çünkü, daha fazla kontrol noktası tanımlanan limitlerde hesaplamalara dahil edilmekte ve hesaplanan maliyetler daha hassas kontrol aralıkları tarafından hesaplanmış olmaktadır. Diğer taraftan kontrol noktalarının sayısının artmasıyla beraber işlem sayısı artacağından toplam hesaplama yükü ciddi oranda artabilmektedir. Eğer durum ve kontrol değişkenleri yeterli hassasiyette ayrıklaştırılmazsa, nümerik hesaplama hatalarının toplam hesaplanan maliyet üzerinde doğruluk açısından olumsuz bir etkisi bulunmaktadır [52].

Dinamik programlama, kontrol probleminin toplam maliyetini hesaplamak için, maliyet fonksiyonu tanımlamaya ihtiyaç duymaktadır. Maliyet fonksiyonu kontrol ve durum değişkenlerine bağlı olarak ayrıklaştırılmış zaman uzayında tanımlanan sistem fonksiyonudur.

Dinamik programlamada yukarda açıklandığı gibi, sistem ayrıklaştırılmış zamanda kontrol ve durum değişkenlerini belirlemek zorundadır. Kontrol ve durum değişkenleri, bir sistem modeli fonksiyonunun elemanları olarak tanımlandığında,

$$x_{k+1} = F_k(x_k, \mu_k) \quad ; \qquad k = 1, 2, \dots N-1 \tag{2.42}$$

Formülü elde edilmektedir [43], [52]. Burada k ayrıklaştırılmış zaman eksenindeki başlangıçtan en sondan bir önceki işlem adımına kadar olan hesaplama adımlarını, $F_k(x_k, \mu_k)$ durum ve kontrol değişkenlerine bağlı model fonksiyonunu, x_k k'ıncı adımdaki durum değişkenini, μ_k k'ıncı adımdaki kontrol değişkenini, x_{k+1} model fonksiyonunda k'ıncı adımdaki durum değişkeni ve kontrol değişkeni uygulandığında bir sonraki işlem adımında hesaplanan durum değişkenini ifade etmektedir.

Dinamik programlama formülasyonunda, kontrol politikasını $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}\}$ olarak tanımlarsak, ayrıklaştırılmış maliyet fonksiyonu π ile ilk durum koşulunu $x(0) = x_0$ olarak kabul ederek, aşağıdaki gibi formüle edilmektedir [43],

$$J_\pi(x_0) = g_N(x_N) + \Phi_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} h_k\left(x_k, u_k(x_k)\right) + \Phi_k(x_k) \tag{2.42}$$

Burada $g_N(x_N)$ son hesaplama adımındaki maliyet ve $\Phi_N(x_N)$ gerektiğinde son durumda bir kısıtlama uygulanması için ceza fonksiyonu, $h_k\left(x_k, u_k(x_k)\right)$ durum ve kontrol değişkenlerine bağlı maliyet fonksiyonu , $\Phi_k(x_k)$ son hesaplama hariç her hesaplama aşaması için ceza fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Durum değişkenleri için maksimum limitlere ulaştığında ceza işlevi uygulanır. $k = 0,1, \dots N-1$.

Optimal kontrol politikası π^0 toplam maliyeti minimize eden kontrol politikası olarak tanımlanmaktadır,

$$J^0(x_0) = \min J_\pi(x_0) \tag{2.43}$$

Optimal kontrol politikası formül 2.43'te açıklandığı gibi $J(x_0)$ fonksiyonunu minimize etmektedir ve buna bağlı olarak dinamik programlama optimum maliyet fonksiyonunu $J_k(x)$, durum - zaman uzayında tanımlanan her nokta için $N-1$ 'den 0' a doğru geriye dönük bir şekilde değerlendirmektedir. Maliyet

hesaplamalarındaki son adım başlangıç maliyeti olarak kabul edilmekte ve görev çevrimindeki ilk hesaplama adımına doğru tanımlanmış tüm durum noktaları her bir zaman adımında geriye doğru (son durumdan başa) değerlendirilmektedir [43], [51], [52].

Son maliyet:

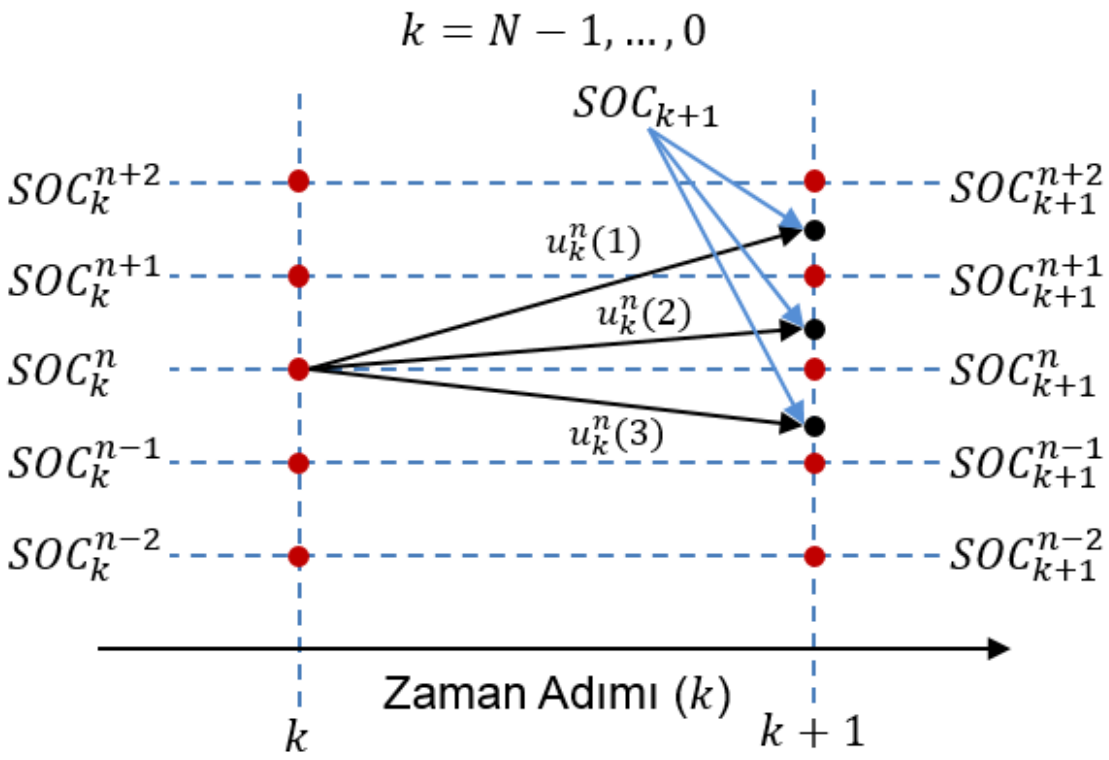
$$J_N(x) = g_N(x) + \Phi_N(x) \tag{2.44}$$

Anlık maliyet:

$$J_k(x) = \min \sum_{k=0}^{N-1} \{h_k(x_k, u_k) + \Phi_k(x_k) \ + J_{k+1}(f_k(x_k, u_k))\} \tag{2.45}$$

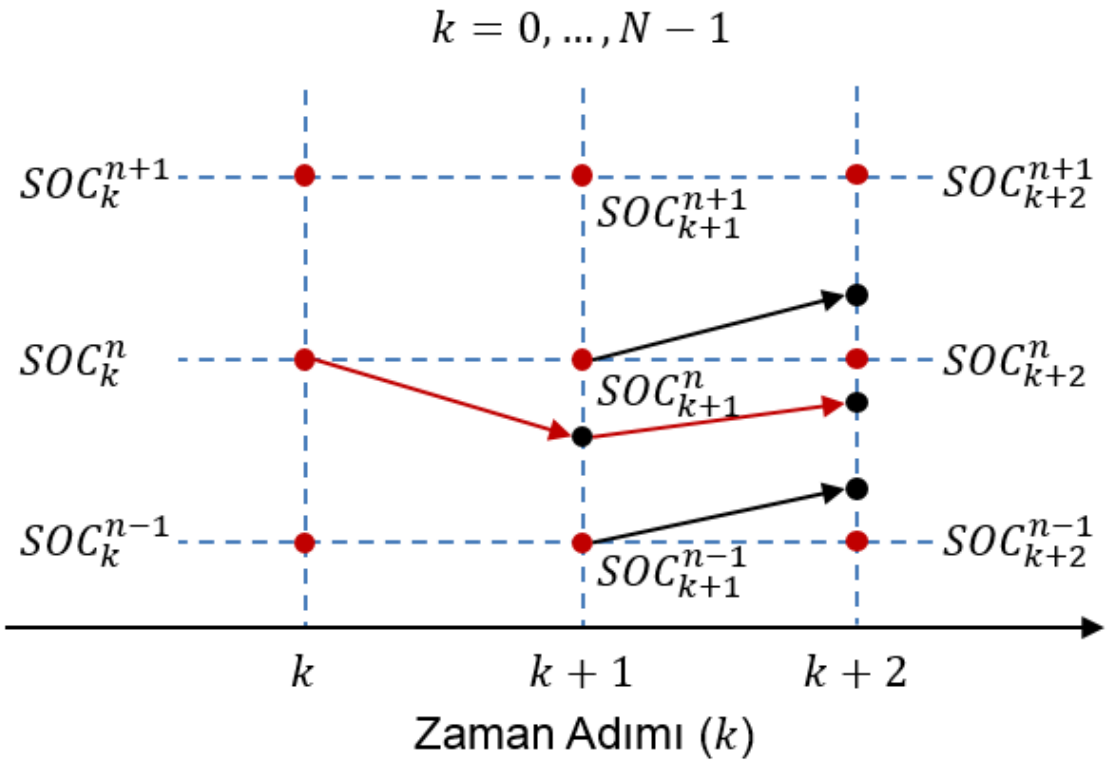
Optimal kontrol, tanımlanan eşiklik 2.45'in sağ tarafını k'ıncı adımdaki her bir durum değişkeni (x_k) için minimize etmektedir. Ek olarak, $J_{k+1}(x_k)$ ayrıklaştırılmış durum zaman uzayında her bir hesaplama noktası için değerlendirilirken $J_{k+1}(f_k(x_k, u_k))$ fonksiyonu aynı model foksiyonununun çıktısını, fonksiyon girdisi olarak olarak kullandığından fonksiyon durum noktalarında değerlendirilemez. Çünkü model fonksiyonu, $f_k(x_k, u_k)$ hesaplamalarda devamlı değişken olarak hareket etmektedir. Bu yüzden $J_{k+1}(f_k(x_k, u_k))$ yaklaşık olarak değerlendirilmektedir.

Optimizasyon esnasında ilk olarak maliyet fonksiyonu son durumdan başa kadar her bir durum noktası için optimal kontrol parametrelerini hesaplamaktadır. Yukarda anlatıldığı gibi model fonsiyonunun çıktısı sürekli değişken olduğundan tam olarak belirlenen durum noktalarıyla kesişmeyebilir ve tanımlanan iki durum noktasının arasında kalmaktadır. Bu durumda iki nokta arasında kalan nokta için maliyet hesaplamaları interpolasyon ile elde edilmektedir. Şekil 3.5'te geriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon mantığı gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Geriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon

Her nokta için optimum kontol stratejisi hesaplandıktan sonra tanımlanacak olan ilk durum değişkeni için optimum kontrol yörüngesi hesaplanmaktadır. Optimum kontrol yörüngesi tanımlanan ilk durumdan başlayarak son noktaya kadar minimum maliyet için hesaplanmaktadır. Burada geriye dönük hesaplamada olduğu gibi, ileriye döük hesaplama sırasında model fonksiyonunun çıktısı devamlı değişken olduğundan tanımlanan durum noktalarının arasında kalabilir. Bu durumda yine interpolasyona başvurulmaktadır. Şekil 3.6'da ileriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon mantığı gösterilmektedir.



Şekil 3.6 İleriye dönük hesaplamada kullanılan interpolasyon

Dinamik programlama, yukarda tanımlanan karakteristikleriyle, lineer olmayan sistemlerin optimizasyonu için uygun kapasiteye sahiptir. Lineer olmayan hibrit tahrik sistemleri, farklı amaçlar doğrultusunda dinamik programlama yöntemini kullanabilmektedir.

Hibrit taşıtlarda kullanılan dinamik programlama konularının başlıcaları: paralel HEV'lerde güç dağıtım optimizasyonu, optimumum tork veya dişli oranı belirleme, minimum yakıt tüketimi veya emisyon optimizasyonu, komponent kapasiteleri belirleme optimizasyonları olarak ifade edilebilir. Yine yapılan bir literatür araştırmasına bağlı olarak HEV'lerde enerji yönetimi optimizasyonu üzerine yapılan 515 çalışmanın %40,7'si (206) global optimizasyon üzerine olup, bu çalışmaların %46,1'i (95) dinamik programlama üzerine yapılmıştır [27]. Yukarıdaki verilere dayanarak, dinamik programlamanın hibrit taşıtlar için uygun bir optimizasyon yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmanın konusu olarak şeçilen hibrit araçta enerji yönetimi optimizasyonu uygulaması devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmaktadır [35], [36], [37], [58].

3.2 HEV Enerji Yönetiminde Dinamik Programlama Uygulaması

Hibrit tahrik sistemi uygulamalarında önemli bir ağırlıkta kullanılan dinamik programlama yöntemi, enerji yönetimi gibi lineer olmayan konularda, kontrol probleminin alt problemler halinde basitleştirerek çözmekte ve karmaşık kontrol politikaları için verimli kontrol yörüngelerini hesaplamaktadır. HEV'lerde enerji yönetimi optimizasyonunda, taşıt operasyonu sırasında yakıt tüketimi ile elde edilen enerji ve taşıtın tahrik sisteminde kullanılan enerjinin direkt olarak SOC'nin durumunu etkilediği görülmektedir. Bu durumda batarya şarj durumu (SOC) model fonksiyonunda durum değişkeni olarak kabul edilebilir. Yukarıda açıklanan bilgiler ışığında HEV tahrik sistemi model fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$x_{k+1} = F(x_k, \mu_k) \quad ; \quad k = 1, 2, \dots N-1 \tag{2.46}$$

Burada, $F(x_k, \mu_k)$ model foksiyonu, x_k k'ıncı hesaplama adımındaki durum değişkeni (SOC), μ_k k'ıncı hesaplama adımındaki kontrol değişkenleri, x_{k+1} k'ıncı adımdaki durum değişkeninde (SOC_k) (x_k), k'ıncı hesaplama adımındaki kontrol değişkenleri (μ_k) uygulandığında, k+1'inci hesaplama adımında elde edilen durum değişkeni (SOC_{k+1}) olarak ifade edilmektedir.

Sistem operasyon dinamikleri düşünüldüğünde, tahrik gücü ihtiyacına bağlı olarak, batarya şarj durumunun (SOC) sürekli değişkenlik gösterdiği ve SOC'ye göre İYM'nin çalıştırıldığı gözlemlenmiştir. İYM operasyonlarında harcanan toplam yakıt ise sistem operasyonu sırasında gerçekleşen toplam maliyet olarak ifade edilebilmektedir. Burada yakıt tüketimi (YT), dinamik programlamada, maliyet fonksiyonunu tanımlamakta kullanılmaktadır. Optimal kontrol problemi, aşağıdaki maliyet fonksiyonunu en aza indirecek kontrol dizilerini bulmaktır [52], [59],

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} YT(x_k, \mu_k) \tag{2.46}$$

Burada, $YT(x_k, \mu_k)$, yakıt tüketimi açısından maliyet fonksiyonu, N sürüş döngüsüde hesaplanan her bir zaman adımının aşama numarası olarak ifade edilmektedir.

Dinamik programlamada geriye dönük hesaplamada anlık maliyet ve gitmek için maliyet (cost-to-go) her bir durum noktası için değerlendirilerek, optimum gitmek için maliyet (cost-to-go), her bir çevrim adımı için hesaplanır. Burada gitmek için maliyet k'ıncı hesaplama adımındaki bir durum noktasına (μ_k), kontrol değişkenleri uygulandığında (x_k), k+1'inci adımdaki elde edilecek durum (x_{k+1}) için hesaplanan maliyeti açıklamaktadır. Optimum gitmek için maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi açıklanmaktadır,

$$J_k(x_k) = \min \sum_{k=0}^{N-1} \{YT(x_k, \mu_k) + \Phi_k(x_k) \ + J_{k+1}(F(x_k, \mu_k))\} \quad (2.47)$$

Burada, $J_k(x_k)$ gitmek için optimum maliyet fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Hibrit tahrik sistemlerinde, durum parametlerinin yanında, uygulanmakta olan kontrol parametleri de büyük önem taşımaktadır. Dinamik programlama aşamasına başlamadan tahrik sistemi analizi ve akabinde durum ve kontrol değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen kontrol parametreleri ve durum değişkenleri, dinamik programlama mantığı gereği ayrıklaştırma gerektirir. Burada, sistemde tanımlanan değişkenler için alt ve üst limitler belirlenmekte, bu limitler içerisinde yeterli hassasiyette parametreler ayrıklaştırılmaktadır. Parametre ayrıklaştırması yaparken, ayrıklaştırma hassasiyeti iki konu açısından sınırlanmaktadır. İlk olarak yeterince hassas yapılmayan bir ayrıklaştırmada model fonksiyonu hesaplamaları ayrıklaştırma noktaları arasında bir değer hesaplayabileceğinden burada interpolasyon yardımıyla tahminde bulunulmaktadır. Hassas olmayan bir ayrıklaştırma sürecinde bu tahmin daha fazla hesaplama hatasına sebebiyet vermekte ve optimizasyon doğruluğunu azaltmaktadır. İkinci olarak yüksek ayrıklaştırma hassasiyeti her bir hesaplama adımında daha fazla olan değişkenlerin arasındaki hesaplamaları yapmak zorundadır ve bu hesaplama yükünü azımsanmayacak ölçüde attırmaktadır. Bunun yanında, durum değişkenleri ve kontrol değişkenlerinin sayısının artması, bu değişkenler arasında gerçekleşecek olan hesaplama sayısını arttırdığından toplam hesaplama yükünü önemli ölçüde arttırmaktadır [43], [52], [59].

HEV'lerde yakıt tüketimini iyileştirmeyi amaçlamış bir dinamik programlama çalışmasında, durum değişkenleri olarak sistemde batarya şarj durumu ve taşıt hızı

en önemli değişkenler olarak ifade edilebilir. Ancak, dinamik programlamada, kullanılan test çevriminin daha önceden bilinmesi gerekmektedir (geriye dönük hesaplama) ve bu durumda bilinen bir test çevriminde taşıt hızı da daha önceden bilinmektedir ve taşıt hızı tanımlanan taşıt hızı profilinin dışında bir durum değişikliği gösterememektedir. Başka bir deyişle taşıt hızı her bir hesaplama adımında sadece bir değere sahiptir ve başka hız varyasyonları için değerlendirme yapılamamaktadır. Bu yüzden durum değişkeni için sadece batarya şarj durumu çoğunlukla kabul edilmektedir. Kontrol parametresi olarak, hibrit sistemde talep edilen tahrik gücü talebine karşı güç ve enerji kaynakları kontrolü sağlanmaktadır. Yakıt tüketimini minimize etme aşamasında, güç kaynaklarının yakıt tüketimine direkt etkisi, güç kaynaklarının tork ve açısal hız noktaları tarafından belirlenir. Burada tipik bir hibrit sistem için bir elektrik motoru ve bir içten yanmalı motor temel güç kaynakları olarak düşünülürse, İYM ve EM torku ve hızı kontrol parametleri olarak değerlendirilebilir. Ancak paralel hibrit sistemde güç aktarma mimarisinin getirdiği limitlerle, EM ve İYM motoru hızı taşıt hızına bağlı şekilde değiştiğinden, bağımsız değişken olarak kullanılamamaktadır. Bu yüzden İYM ve EM torku bu durumda kontrol değişkeni olarak seçilebilmektedir. Yukarıdaki tanımlanan örnek bir çalışma için durum ve kontrol değişkenleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir,

$$SOC_{min} \leq SOC_k \leq SOC_{maks} \tag{2.48}$$

$$T_{EMmin} \leq T_{EMk} \leq T_{EMmaks} \tag{2.49}$$

$$T_{\text{İ}YMmin} \leq T_{\text{İ}YMk} \leq T_{\text{İ}YMmaks} \tag{2.50}$$

Burada, SOC_{min} ve SOC_{maks} sırasıyla batarya minimum ve maksimum şarj durumu limitlerini, SOC_k ise k'ıncı hesaplama adımındaki batarya şarj durumunu ve T_{EMmin} ve T_{EMmaks} sırasıyla elektrik motoru torku minimum ve maksimum limitlerini, T_{EMk} ise k'ıncı hesaplama adımındaki elektrik motoru torkunu, yine aynı şekilde $T_{\text{İ}YMmin}$ ve $T_{\text{İ}YMmaks}$ sırasıyla içten yanmalı motor torku minimum ve maksimum limitlerini, $T_{\text{İ}YMk}$ ise k'ıncı hesaplama adımındaki içten yanmalı motor torkunu ifade etmektedir. Burada tanımlanan limitler içerisinde değişkenler, belirlenen değer

aralıklarında sonlu şekilde değer almaktadırlar, ayrıklaştırma oranları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır,

$$\Delta SOC = \frac{SOC_{min} - SOC_{maks}}{N_{SOC}} \quad (2.51)$$

$$\Delta T_{EM} = \frac{T_{EMmin} - T_{EMmaks}}{N_{T_{EM}}} \quad (2.52)$$

$$\Delta T_{\text{İYM}} = \frac{T_{\text{İYMmin}} - T_{\text{İYMmaks}}}{N_{\text{İYM}}} \quad (2.53)$$

Burada, ΔSOC, ΔT_{EM}, $\Delta T_{\text{İYM}}$ SOC , sırasıyla EM torku, İYM torku ayrıklaştırma oranlarını, N_{SOC}, $N_{T_{EM}}$, $N_{\text{İYM}}$ sırasıyla değer sayılarını ifade etmektedir. Kompleks PHEV'lerde enerji kontrolünde dinamik programlama uygulaması bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

3.3 Kompleks HEV Enerji Yönetiminde Dinamik Programlama Uygulaması

Bu çalışmada, kompleks HEV'de enerji yönetimi optimizasyonu dinamik programlama yöntemiyle yapılmıştır. Bölüm 3.2'de açıklandığı gibi, dinamik programlama aşamasından önce üzerinde çalışılacak sistemin analiz edilmesi gerekmektedir. Kompleks hibrit mimaride paralel hibrit yapıdan farklı olarak seri hibrit modu da aktif halde kullanılmaktadır. Ayrıca iki akstan da tahrik imkanı, beraberinde ilave bir kontrol durumu getirmektedir. Kısaca, tez çalışmasında kullanılan tahrik sistemi mimarisi, seri hibrit, paralel hibrit, ve e-sürüş modlarında kullanılmaktadır.

Tahrik anlamında oluşan çeşitlilikle beraber, dinamik programlama için gerekli olan durum ve kontrol değişkenlerinin sayısı da artmaktadır. Kompleks hibirit mimaride iki akstan tahrik edilme imkanı, akslar arasında tork dağılım oranı kontrolüne neden olmaktadır. Burada ön ve arka akstan talep edilen tork miktarı ve hız bilgisine göre taşıt paralel hibrit modunda hareketini sürdürürken İYM ve arka EM torku, batarya şarj durumunu, sistem verimini ve dolayısıyla yakıt tüketimini etkilemektedir. Burada tork dağılım oranına göre İYM ve EM'den talep edilen torklar, İYM ve EM'nin verimsiz bölgelerinde çalışması riskini oluşturmaktadır. Diğer bir önemli konu

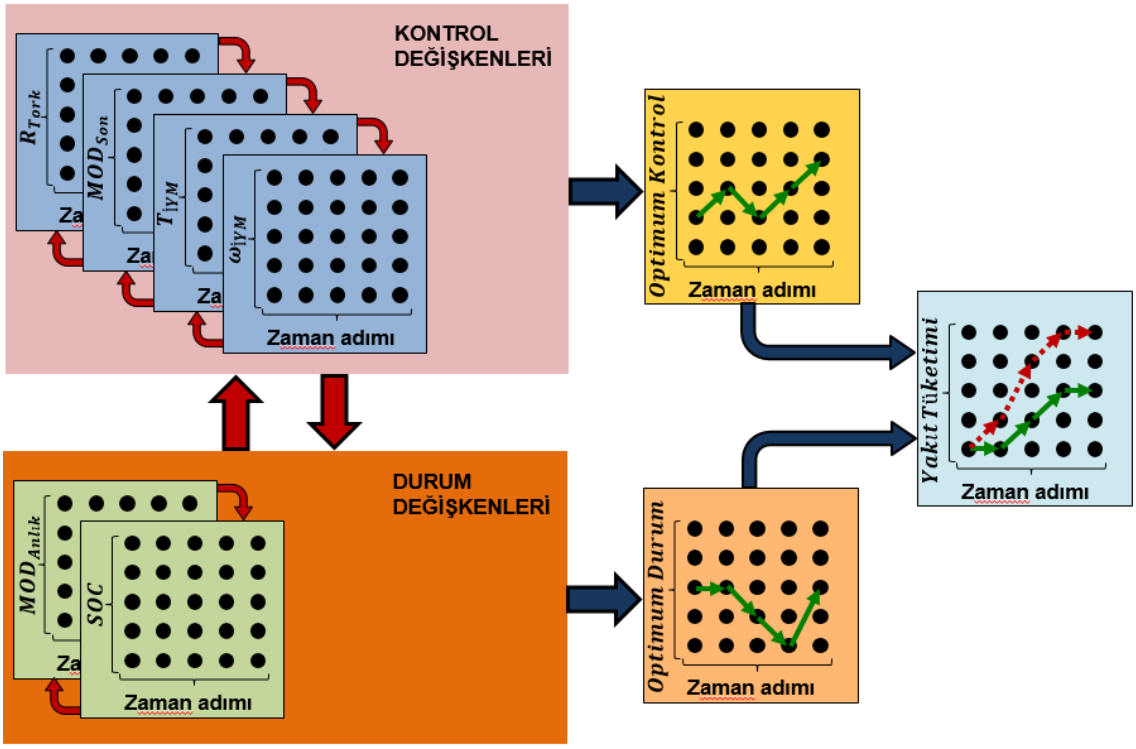
olarak, taşıt tahrik sisteminin karar verdiği hibrit moduna göre toplam operasyon sırasındaki, yakıt tüketimi açısından maliyet artmaktadır. Burada aynı şartlarda seri hibrit modda yapılan bir sürüşte, İYM yakıt tüketimi açısından en verimli bölgede çalışmasına rağmen toplam sistem verimi enerji çevrimlerinden dolayı (mekanik – elektrik – mekanik) azalmaktadır. Diğer taraftan aynı operasyon şartları için paralel hibrit modundaki bir sürüş için, İYM direkt olarak tahrik tekerlerine bağlıdır ve tahrik tekerlerinin açısal hızı İYM açısal hızını belirler, bu durum İYM'nin hedeflenen en iyi yakıt tüketimi noktasına gitmesine engel olmaktadır. Ama toplam sistem kayıpları seri moda göre daha düşük olduğundan, seri moda göre yakıt tüketimi açısından bir avantaj sağlanabilir.

Çalışmada, dinamik programlama, NEDC, WTLC, FTP-72 test çevrimlerinde yakıt tüketimini en aza indirecek kontrol yörüngelerini tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. Kompleks hibrit mimari için dinamik programla formülasyonundan önce durum ve kontrol değişkenleri belirlenmiştir. Kompleks HEV için dinamik programlamada durum değişkenleri olarak batarya şarj durumu ve anlık sürüş modu kararı seçilmiştir. Batarya şarj durumu (SOC), taşıt operasyonu sırasında çoğunlukla tahrik enerjisinin sağlandığı temel noktadır ve tahrik gücü talebine göre sürekli durumu değişmektedir. İkinci durum değişkeni olan, anlık sürüş modu ise, tahrik sistemindeki SOC ve tahrik gücü talebiyle doğrudan ilişkilidir. Anlık sürüş moduna göre SOC ve dolayısıyla yakıt tüketimi önemli ölçüde etklenmektedir.

Kontrol değişkenleri olarak ise birçok değişken tanımlamak mümkündür. Ancak, çok fazla kontrol değişkeni tanımlanması, hesaplama yükünü önemli derecede attırmaktadır, burada değişken sayısını azaltmak için birbiri içerisinde tanımlanmış değişkenler kullanılabilmektedir. Örneğin, tork dağılım oranı kontrol değişkeni olarak tanımlandığında seri ve e-sürüş modunda bilinen çevrim hızı için, elektrik motorları tork ve açısal hızları için bir ek bir kontrol parametresi tanımlamaya gerek kalmamaktadır. Çünkü, bilinen aks hızı ve talep edilen aks torkları için elektrik motorlarından talep edilen tork ve hız parametleri belirlemiş olmaktadır. İkincisi, bir sonraki sürüş modu kontrolü sistemdeki tahrik gücü kaynaklarını doğrudan etkilemektir. Bir sonraki adım için karar verilen sürüş modlarına göre seri hibrit, paralel hibrit ve e-sürüş için sistemde meydana gelecek yakıt tüketimi maliyeti

doğrudan değişmektedir. Örneğin, sürüş çevriminde bir noktadan diğerine geçiş esnasında e-sürüş kararı verildiğinde İYM çalışmadığı için yakıt tüketimi açısından maliyet oluşmamakla beraber batarya şarjı tüketilmektedir. Ancak aynı noktada elektrik tüketilmekte beraber, tüketilen elektriği aynı anda motoru en verimli noktasında çalıştırarak tekrar elde edebilir ve seri hibrit sürüş modu kullanılabilir. İkinci olarak aynı noktada İYM paralel sürüş şartı için yine yakıt tüketimi için en verimli noktada çalışıyorsa, bu durumda paralel mod devreye sokularak seri moddan kaynaklanan düşük sistem veriminin yerine, elde edilen tork direkt ön aksa taşındığından yüksek sistem verimi kullanan bir kontrol elde edilmiş olmaktadır. Bu nedenle bir sonraki sürüş modu kararı dinamik programlamada temel kontrol değişkeni olarak şeçilmiştir. Son olarak seri hibrit çalışma modunda İYM bağımsız bir şekilde tork ve hız noktalarını seçebilmekte, ayrıca paralel hibrit modunda da tork noktası taşıt hızından bağımsız bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Çünkü, taşıtın ihtiyaç duyduğu tahrik torkundan fazlası İYM'nin yakıt tüketimi açısından en verimli bölgesinde üretildiği durumlarda, fazla tork generatör ile tahrik bataryasında elektrik enerjisi olarak depolanmaktadır. Böylelikle İYM tork ve açısal hız kontrolü yakıt tüketimi açısından önemli bir etkiye sahiptir.

Özet olarak tez çalışmasında durum değişkenleri olarak, batarya şarj durumu SOC ve anlık sürüş modu ($MOD_{Anlık}$), ve kontrol değişkenleri olarak, İYM açısal hızı ($\omega_{İYM}$) ve torku, ($T_{İYM}$) tork dağılım oranı (R_{Tork}) ve bir sonraki sürüş modu (MOD_{Son}) parametreleri seçilmiştir. Şekil 3.7'de durum ve konttol değişkenleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Durum ve kontrol değişkenleri

Baz tahrik sistemi için dinamik programlamada optimum gitmek için maliyet, (cost to go) fonksiyonu, yukarıda tanımlanan değişkenleri, eşitlik (2.47)'de yerine konularak yeniden tanımlanmıştır,

$$J_k\left(SOC_k, MOD_{Anlık_k}\right)$$
$$= \min \sum_{k=0}^{N-1} \{YT\left((SOC_k, MOD_{Anlık_k}), (T_{İYM_k}, \omega_{İYM_k}, R_{Tork_k}, MOD_{Son_k})\right)$$
$$+ \Phi_k\left(SOC_k, MOD_{Anlık_k}\right)$$
$$+ J_{k+1}(F\left[(SOC_k, MOD_{Anlık_k}), (T_{İYM_k}, \omega_{İYM_k}, R_{Tork_k}, MOD_{Son_k})\right])\}$$

(2.54)

Tanımlanan gitmek için maliyet (cost to go) fonksiyonu için durum ve kontrol değişkenleri için belirli alt, üst sınırlar ve ayrıklaştırma oranları tanımlanmıştır. Durum ve kontrol değişkenleri aralıkları aşağıdaki gibi formüle edilmektedir,

$$SOC_{min} \leq SOC_k \leq SOC_{maks} \quad (2.55)$$

$$MOD_{Anlık_{min}} \leq MOD_{Anlık_k} \leq MOD_{Anlık_{maks}} \quad (2.56)$$

$$T_{\text{İYMmin}} \leq T_{\text{İYM}_k} \leq T_{\text{İYMmaks}} \quad (2.57)$$

$$\omega_{\text{İYM}_{min}} \leq \omega_{\text{İYM}_k} \leq \omega_{\text{İYM}_{maks}} \quad (2.58)$$

$$R_{Tork_{min}} \leq R_{Tork_k} \leq R_{Tork_{maks}} \quad (2.59)$$

$$MOD_{Son_{min}} \leq MOD_{Son_k} \leq MOD_{Son_{maks}} \quad (2.60)$$

Burada her bir durum ve kontrol değişkeni yukarıda formüle edilen alt ve üst limitler dahilinde ayrıklaştırılırmıştır. Ayrıklaştırma oranları, her bir değişken için çalışma özellikleri gözetilerek farklı oranda yapılmıştır. Dinamik programlama optimizasyonunda hibrit tahrik sistemi sadece şarj koruma (charge sustaining) modunda test çevrimleri için optimize edilmiştir. Burada şarj koruma modunda tahrik sistemi batarya şarjını test çevrimine başladığı ilk andaki SOC seviyesini son çevrim adımında aynı seviyede kalacak şekilde kontrol eder. Kural bazlı algoritma da açıklandığı gibi %30 SOC seviyesi kritik seviye olarak kabul edilmiş ve bu sınırın altında ve üstünde alt ve üst limitler belirlenmiştir. Bununla beraber hibrit sürüş modları numaralandırılarak belirli bir skaler aralıkta tanımlanmıştır. Burada, e-sürüş modu 1, seri hibrit mod 2, paralel hibrit mod 3 değerini alınmıştır. Ayrıklaştırma oranları, üst ve alt limit değerleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Kontrol ve durum değişkenleri ayrıklaştırma oranları

Değişkenler	**Minimum Limit**	**Maksimum Limit**	**Ayrıklaştırma Oranı**
SOC	25	35	0,0001
$MOD_{Anlık}$	1	3	1
$T_{\text{İYM}}$	0	$f(\omega_{\text{İYM}})$	10
$\omega_{\text{İYM}}$	1100	3500	50
R_{Tork}	0	1	0,1
MOD_{Son}	1	3	1

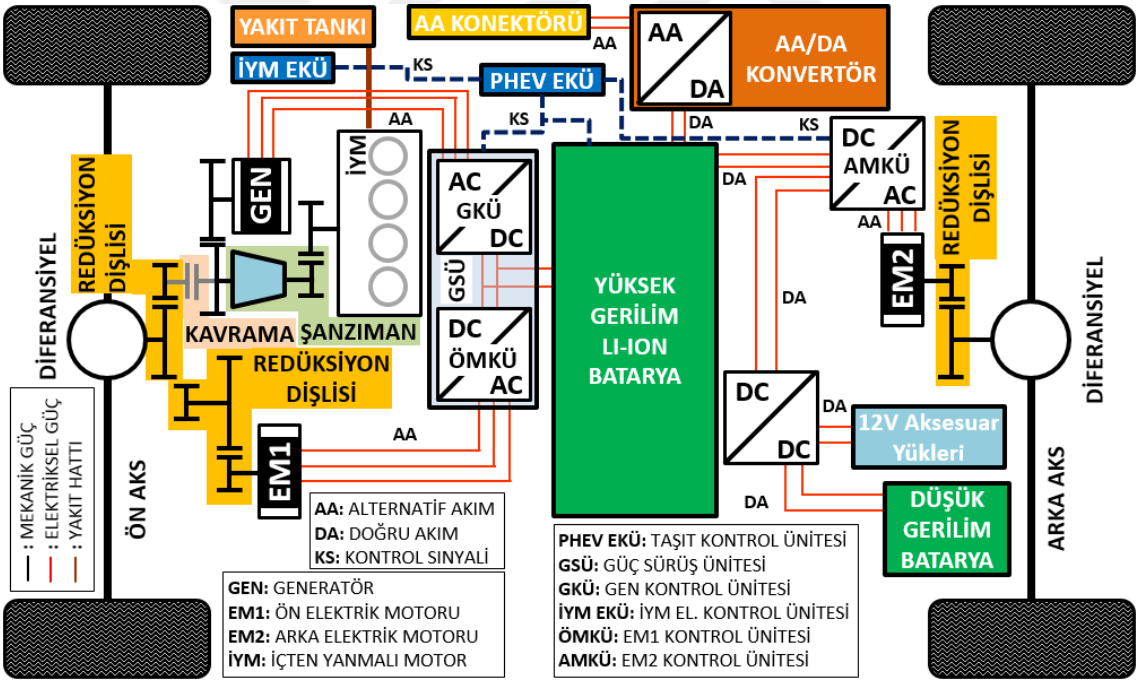
Ayrıklaştırma işlemiden sonra, dinamik programlama formülasyonu, MATLAB ® programında kodlanmıştır ve NEDC, WLTC, ve FTP-72 test çevrimleri için optimizasyon elde edilmiştir. Optimizasyonun çıktısı olarak elde edilen kontrol matrisleri, modellenmiş taşıt tahrik sistemine entegre edilerek, test çevrimleri için simülasyon yapılmıştır. Dinamik programlama için oluşturulan kodun hesaplama algoritması Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Yapılan simülasyon neticesinde yakıt tüketimi, SOC yörüngesi ve diğer kritik parametler değerlendirilmiştir. Burada yapılan işlemler dizisi Bölüm 4'te açıklanmıştır.



Şekil 3.8 Baz Tahrik sisteminde optimizasyon kodu algoritması

Yukarda anlatılan çalışmanın dışında HEV'lerde dinamik programlama yöntemiyle, tahrik sistemi için kullanılması muhtemel farklı komponentlerin uygulanmasıyla beraber hesaplanan sistem verimlilikleri optimizasyon konusu olarak uygulanmaktadır. Tez çalışmasının konusu olan kompleks hibrit mimaride, İYM ve aks arasında sadece tek çevrim oranının bulunmasından dolayı, İYM özellikle paralel hibrit modda belirli bir taşıt hızının üzerinde ve İYM açısal hızı olarak taşıt hızını takip eden bir İYM operasyonu gerçekleştirmektedir. Burada bağımlı İYM açısal hızı İYM'nin yakıt tüketimi açısından daha verimli çalışma noktalarında çalışmasına engel olmaktadır.

Burada İYM açısal hızını kontrol etmek için tahrik sistemine değişken çevrim oranları kullanmak amacıyla, 6 ileri hız kademesine bir şanzıman entegre edilmiştir. Sistem bu sayede farklı çevrim oranlarını kullanarak, İYM operasyonunda açısal hızı kontrol edebilmektedir. 6 ileri hızlı şazımana sahip kompleks hibrit tahrik sistemi mimarisi Şekil 3.9' da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 6 ileri hız kademeli şazımana sahip kompleks hibrit tahrik sistemi mimarisi

Burada şanzıman sistemi teorik olarak ön transaks sisteminde diferansiyel ve İYM arasındaki redüksiyon sistemine eklenmiş olup, İYM - ön aks ve İYM – GEN arasındaki makanik bağlantıdaki açısal hızı değiştirmektedir.

Değiştirilen tahrik sistemi, dinamik programlamada yeniden formüle edilerek şanzıman çevrim oranları dinamik programlamada kontrol değişkeni olarak ifade edilmiştir. Çünkü, şanzıman sayesinde İYM açısal hızı ve torku farklı bölgelerde çalıştırılabilmektedir. Bu durumda, İYM hızı, yine teker açısal hızını takip etmesine rağmen, değişken hız oranları sayesinde farkı hız aralıklarında İYM çalıştırılabilmektedir. Kontrol parametresi olarak tanımlanan şanzıman çevrim oranları, şanzıman hız kademesi SAN_{hiz} olarak tanımlanmıştır. Şanzıman eklenmiş tahrik sisteminde, gitmek için maliyet fonsiyonu aşağıdaki gibi yeniden tanımlanmıştır. Şanzımanlı tahrik sisteminde, dinamik programlama için oluşturulan kodun hesaplama algoritması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

$$J_k(SOC_k, MOD_{Anlık_k})$$
$$= \min \sum_{k=0}^{N-1} \{YT\big((SOC_k, MOD_{Anlık_k}), (T_{İYM_k}, \omega_{İYM_k}, R_{Tork_k}, MOD_{Son_k}, SAN_{hiz}\ )\ \big)$$
$$+ \Phi_k(\ SOC_k, MOD_{Anlık_k})$$
$$+ J_{k+1}(F\big[(SOC_k, MOD_{Anlık_k}), (T_{İYM_k}, \omega_{İYM_k}, R_{Tork_k}, MOD_{Son_k}, SAN_{hiz}\ )\ \big])\} \quad (2.61)$$

Burada SAN_{hiz} şanzıman hız kademesini ifade etmekte ve her hız kademesi için İYM çalışma noktaları yakıt tüketimi açısından değerlendirilmektedir. Burada şanzıman hız kademesinin diğer değişkenler gibi ayrıklaştırılması gerekmektedir. Ayrıklaştırma için gerekli olan alt ve üst limitler aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

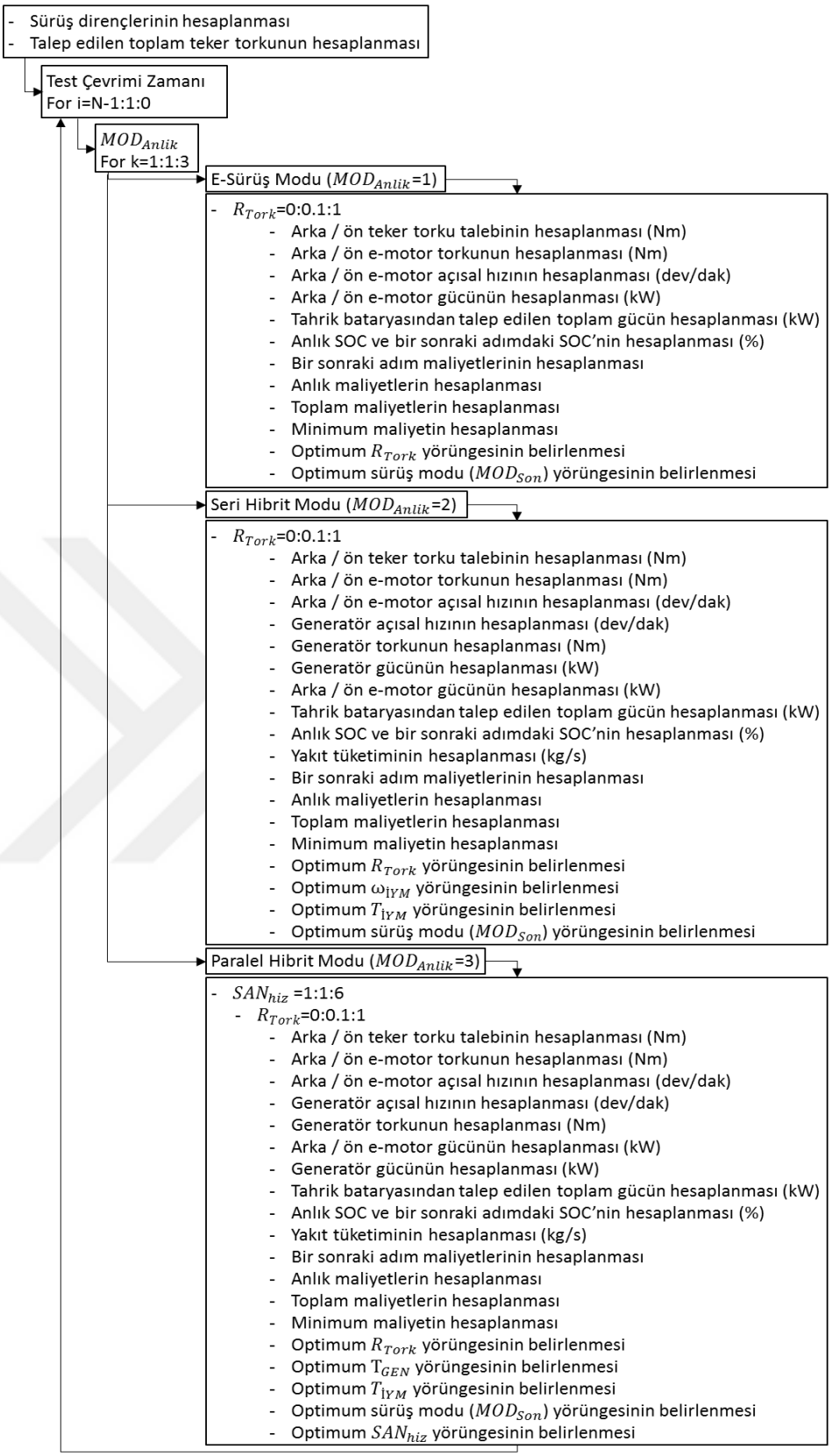
$$SAN_{hiz\ min} \leq SAN_{hiz\ k} \leq SAN_{hiz\ maks} \quad (2.62)$$

Burada $SAN_{hiz\ min}$ şanzımanın sahip olduğu en düşük vites kademesini, $SAN_{hiz\ maks}$ şanzımanın sahip olduğu en yüksek vites kademesini, $SAN_{hiz\ k}$ k'ıncı adımda şanzımanın anlık vites kademesini ifade etmektedir. Tablo 3.3'te şanzıman hız kademesi ayrıklaştırma oranları gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Şanzıman hız kademesi ayrıklaştırma oranları

Değişkenler	**Minimum Limit**	**Maksimum Limit**	**Ayrıklaştırma Oranı**
SAN_{hiz}	1	6	1

Şanzımana sahip tahrik sistemi için ayrı bir MATLAB ® kodu geliştirilmiştir. Burada dinamik programlama, paralel hibrit mod için farklı vites kademelerini her bir durum noktası için değerlendirerek en az yakıt tüketimini sağlayan kontrol yörüngesini hesaplamaktadır. Baz sisteme benzer şekilde, elde edilen optimum kontrol yörüngeleri, hibrit kontrolcüsüne yüklenerek test çevrimleri için simüle edilmiştir. Burada kullanılan baz taşıt modeline şanzıman modeli eklenerek, şanzıman sistemine sahip kompleks hibrit tahrik sistemi modeli oluşturulmuştur. Yapılan optimizasyon baz sistem simülasyonuyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılırmıştır. Bölüm 4'te yapılan uygulama adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 3.10 Şanzımanlı tahrik sisteminde optimizasyon kodu algoritması

4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Simulasyon Testi Planlama

Tez çalışmasında, kullanılan kural bazlı hibrit enerji kontrol stratejisinin yanı sıra optimizasyon bazlı kontrol stratejisi geliştirilerek belirlenen test çevrimleri için uygulanmıştır. Optimizasyon bazlı kontrol stratejisi dinamik programlama yöntemi kullanıralarak, Bölüm 3'te anlatıldığı üzere MATLAB ® programı kullanılarak kod biçiminde geliştirilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan temel tahrik mimarisinin yanında tahrik sisteminde 6 ileri hızlı bir şanzıman eklenerek bu varyasyon için de kontrol stratejisi güncellenmiştir. Çalışmanın temel hedefi olan yakıt tüketiminde iyileştirme konusu için farklı karakterlere sahip test çevrimlerinin kullanılması gerektiği düşünülmüş ve burada tahrik sistemmi enerji kontrolü NEDC, WLTC, FTP-72, test çevrimleri için simüle edilmiştir. NEDC (New European Driving Cycle) test çevrimi karakteristiği çok dinamik olmamakla beraber test 120km/h taşıt hızına kadar düşük (ECE 15, ortalama 18,35 km/h), yüksek (EUDC, ortalama 62,59 km/h) hız profillerini statik olarak yansıtmaktadır. Bu sayede statik farklı hız seviyelerinde, kullanılan kontrollerin nasıl davrandığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Bu çevrimde taşıt, sıcak İYM koşulunda başlatılmıştır. İkinci test çevrimi olarak ise WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) 3b Sınıfı (Class 3b) testi kullanılmıştır. WLTC test çevrimi düşük (ortalama 18,9km/h), orta (ortalama 39,5km/h), yüksek (ortalama 56,7km/h), çok yüksek (ortalama 92,0km/h) ortalama hızlara sahip olan dinamik bir hız karakteristiği barındırmaktadır. Bu sayede kontrol sistemlerinin dinamik hız profilinde farklı hız

gruplarında nasıl bir strateji izleyeceği gözlemlenebilmektedir. WLTC testinde de taşıt, sıcak İYM koşulunda başlatılmıştır. Son olarak FTP-72 (Federal Test Procedure) test çevrimi kullanılmıştır. FTP-72 şehir içi araç kullanımındaki hız profilinin yansıtan ortalama 31,5 km/h, maksimum 91,25 km/h hıza sahip soğuk motor şartında başlayan başlayan bir test çevrimidir [60]. FTP-72 test çevriminde düşük hız profilinde ve soğuk İYM şartında enerji yönetimi kontrollerinin vereceği kararlar gözlemlenmiştir.

Her test çevrimi için çalışma modlarında (e-sürüş, seri hibrit, paralel hibrit) batarya şarj stratejisi olarak şarj sürdürme (charge sustaining) modunda test simülasyonları yapılarak, batarya teste başladığı ilk şarj seviyesinde testi bitirerek taşıt üzerindeki toplam enerji seviyesi tüketilen yakıt haricinde aynı kalmıştır. Bu sayede yakıt tüketimi iyileştirme amacı, harici enerji kaynaklarından gelen etkilerden arındırılarak değerlendirilmiştir. Her çevrim için batarya şarj durumu seviyesi %33 olarak ayarlanmıştır. Kural bazlı kotrol stratejisinde %30 seviyeleri kritik seviye olarak görüldüğünden, Kritik seviyenin %10 üstünde simülasyon testleri başlatılmıştır ve kritik şarj seviyelerinde kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrollerin nasıl karar verdiği gözlemlenmiştir. Tablo 4.1'de test simülasyonu planı gösterilmektedir.

Test simülasyonu MATLAB Simulink ® programında modellenen taşıt tahrik sistemi kullanılarak yapılmıştır. Taşıt modeli, kural ve optimizasyon bazlı kontrol stratejilerini, kontrol bloğunun içerisinde her bir kontrol stratejisi için ayrı bulunan alt kontrol modüllerinden uygulamaktadır. Kural bazlı kontrol stratejisi, hâlihazırda modelin içerisinde mantıksal sınamalar, tablolar ve haritalar içeren algoritmalarla tanımlanmıştır. Kod yardımıyla elde edilen optimizasyon bazlı kontrol stratejisi ise model içerisindeki optimizasyon bazlı kontrol bloğunun içerisinde bunulan çok boyutlu tabloların içerisine kayıt edilip çevrim bazlı uygulanmaktadır. Burada, her bir çevrim için kontrol stratejileri her test simülasyonunda ilgili tablolara ayrı ayrı yüklenmiş ve simülasyonu yapılmıştır. Taşıt modeli tahrik sistemi olarak baz ve 6 ileri hızlı şanzımanlı sistemi içeren iki farklı taşıt modelinden oluşmaktadır. Baz tahrik sisteminde, İYM ve ön aks tek bir çevrim oranıyla bağlanırken, şanzıman içeren sistemde 6 farklı çevrim oranı ile İYM ön aksa bağlanmaktadır. Kural bazlı ve

optimizasyon bazlı kontrol stratejilerininin karşılaştırılmasının yanısıra, optimizasyon bazlı kontrol stratejisinin verimliliği birkaç parametreye bağlıdır.

Tablo 4.1 Simülasyon test planı

Test Çevrimi	**Kontrol Stratejisi (-)**	**Tahrik Sistemi (-)**	**SOC İlk (%)**	**Şarj Stratejisi (-)**	**İYM İlk Sıcaklığı (ºC)**	**Ortalama Hız (km/h)**
NEDC	Kural Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi	33	Şarj Sürdürme	90	35.9
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				
	Optimizasyon Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi				
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				
WLTC	Kural Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi	33	Şarj Sürdürme	90	46.52
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				
	Optimizasyon Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi				
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				
FTP-72	Kural Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi	33	Şarj Sürdürme	25	31.46
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				
	Optimizasyon Bazlı Kontrol	Baz Tahrik Sistemi				
		6 İleri Hızlı Şanzımanlı				

Dinamik programlama yöntemi Bölüm 3'te anlatıldığı üzere tanımlanan kontrol ve durum değişkenleri limitleri arasında ayrıklaştırılmış düğüm noktalarında tüm durumları değerlendirmektedir. Bu yüzden, kontrol ve durum değişkenleri için ayrıklaştırma çözünürlüğü ne kadar artarsa, kontrol hassasiyeti ve verimi o derece artmaktadır. Ancak diğer taraftan artan hesaplama sayısı, ciddi bir hesaplama yükünü de beraberinde getirmektedir.

Hesaplama yükünü ve kontrol verimliliğini gözlemlemek adına, FTP-72 çevriminde, kontrol ve durum değişkenleri üzerinde farklı ayrıklaştırma hassasiyetleri için baz tahrik sisteminde enerji yönetimi optimizasyonu yapılmış ve taşıt modeli simüle edilmiştir. Durum değişkeni olarak batarya şarj durumu (SOC), kontrol değişkeni olarak ise İYM torku ($T_{\text{İ}YM}$) seçilmiştir. Her iki değişken de sadece bir değişken ayrıklaştırma hassasiyeti değiştirilmek koşuluyla optimize edilmiş ve simülasyon sonuçları gözlemlenmiştir. Tablo 4.2'de optimizasyon performansı test planı gösterilmektedir.

Tablo 4.2 Optimizasyon performansı test planı

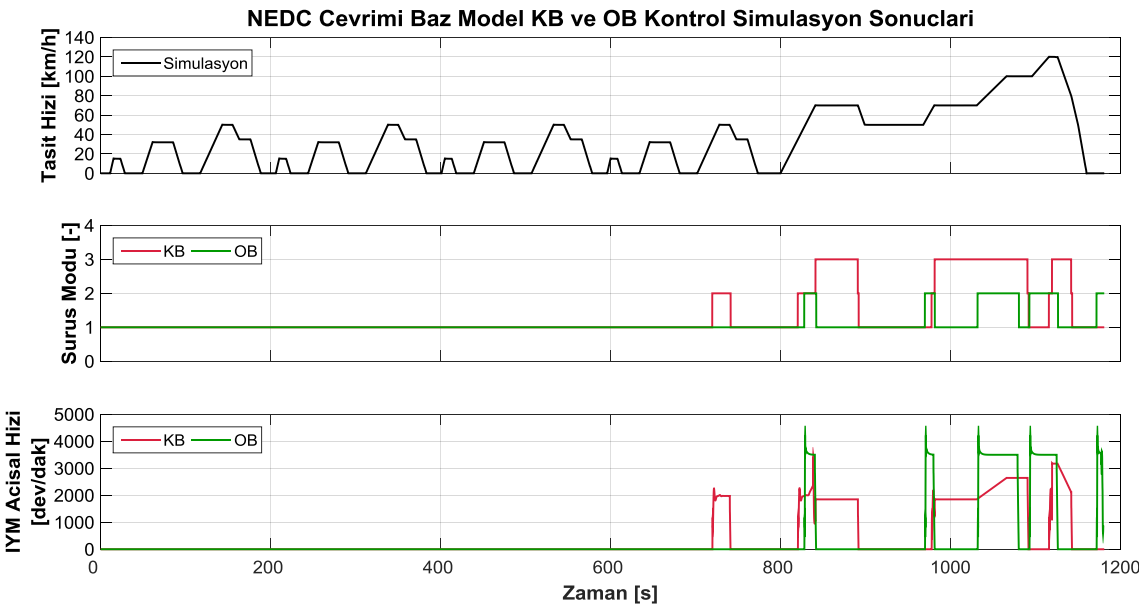
Test Çevrimi (-)	***SOC* Ayrıklaştırma Oranı (-)**	**$T_{\text{İ}YM}$ Ayrıklaştırma Oranı (N·m)**	**Performans Kriterleri**
FTP-72	0,01	10	• Toplam optimizasyon süresi • Yakıt tüketimindeki kural bazlı kontrole göre iyileşme oranı • Son SOC durumunun kural bazlı kontrol stratejisindeki son SOC durumuna göre yüzdesel farkı
	0,005	10	
	0,001	10	
	0,0005	10	
	0,0001	10	
		15	
		20	
		25	
		30	

4.1.1 Simulasyon Testi Sonuçları

Yapılan simülasyon testlerinde elde edilen sonuçlar NEDC, WTLC, FTP-72 çevrimleri için değerlendirilmiştir. Özetle, kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol stratejileri, mevcut tahrik sistemi ve 6 ileri hız kademeli şanzımana sahip tahrik sistemiyle simüle edilerek, yakıt tüketimindeki iyileşme ve bu doğrultudaki parametreler gözlemlenmiş ve yorumlanmıştır. Simülasyon sonucu incelenen başlıca parametreler, Test çevrimi hız profili (çevrim boyunca taşıt hızı), taşıt sürüş modu (e-sürüş, seri hibrit, paralel hibrit), İYM açısal hızı, toplam yakıt tüketimi, batarya şarj durumu, İYM sıcaklığı, İYM torku ve şanzıman hız kademesi değişikliği olarak belirlenmiştir. Ayrıca optimizasyon performansı için yapılan testlerdeki, farklı SOC ve $T_{\text{İYM}}$ ayrıklaştırma oranları ve hesaplama süreleri ayrı olarak FTP-72 test çevrimi için incelenmiştir. Simülasyon test sonuçları devam eden bölümlerde her çevrim için ayrı olarak incelenmiştir ve özet sonuçlar bu bölümün sonunda açıklanmıştır.

4.1.2 NEDC Test Çevrimi Simülasyon Sonuçları

NEDC test çevriminde, simülasyon sıcak motor şartında başlatılmış olup, kural ve optimizasyon bazlı kontrole sahip baz tahrik sistemi, kural ve optimizasyon bazlı kontrole sahip şanzımanlı tahrik sistemi olmak üzere dört farklı durum için simülasyon testi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon testleri esnasında temel ölçüt olarak yakıt tüketimindeki iyileşme ve SOC yörüngesindeki değişim incelenerek, sürüş modları, İYM sıcaklıkları, İYM, ve GEN çalışma noktaları, şanzıman hız kademesindeki değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de baz tahrik sistemine ait kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolde İYM parametreleri, yakıt tüketimi ve SOC için simülasyon test sonuçları gösterilmiştir.

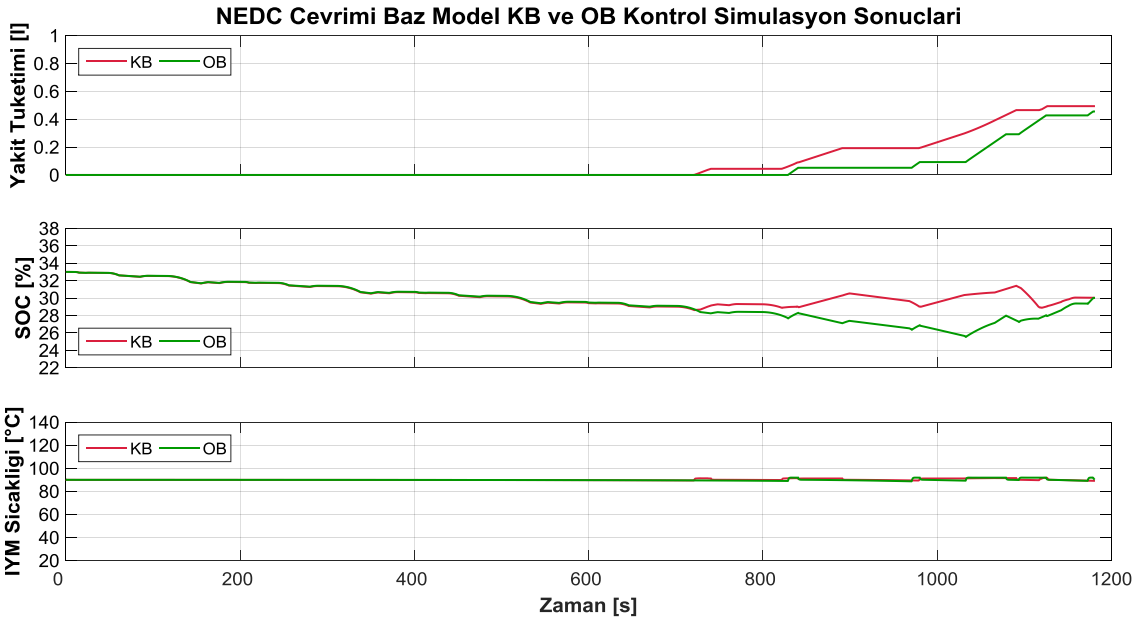


Şekil 4.1 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, NEDC test çevrimi sırasında kural bazlı kontrol (KB) sistemi orta hız bölgelerinde çoğunlukla e-sürüş, daha sonrasında seri hibrit, yüksek hız bölgelerine geçişte seri ve paralel hibrit sürüş modlarında şürüş çevrimine devam etmiştir. Paralel hibrit modda, İYM açısal hızı tek çevrim oranına sahip güç aktarma sisteminden dolayı taşıt hızına bağımlı olarak değişmektedir.

Optimizasyon bazlı kontrol sisteminde ise çevrimin orta hız bölgesinin büyük bir çoğunluğunu aynı şekilde e-sürüş modunda devam ettirerek yüksek hız bölgelerinde sadece seri hibrit sürüş modunda çevrim devam etmektedir. Seri hibrit modda İYM açısal hızı kontrol edilebildiğinden, hız ortalama 3500 dev/dak'da sürdürülmüştür.

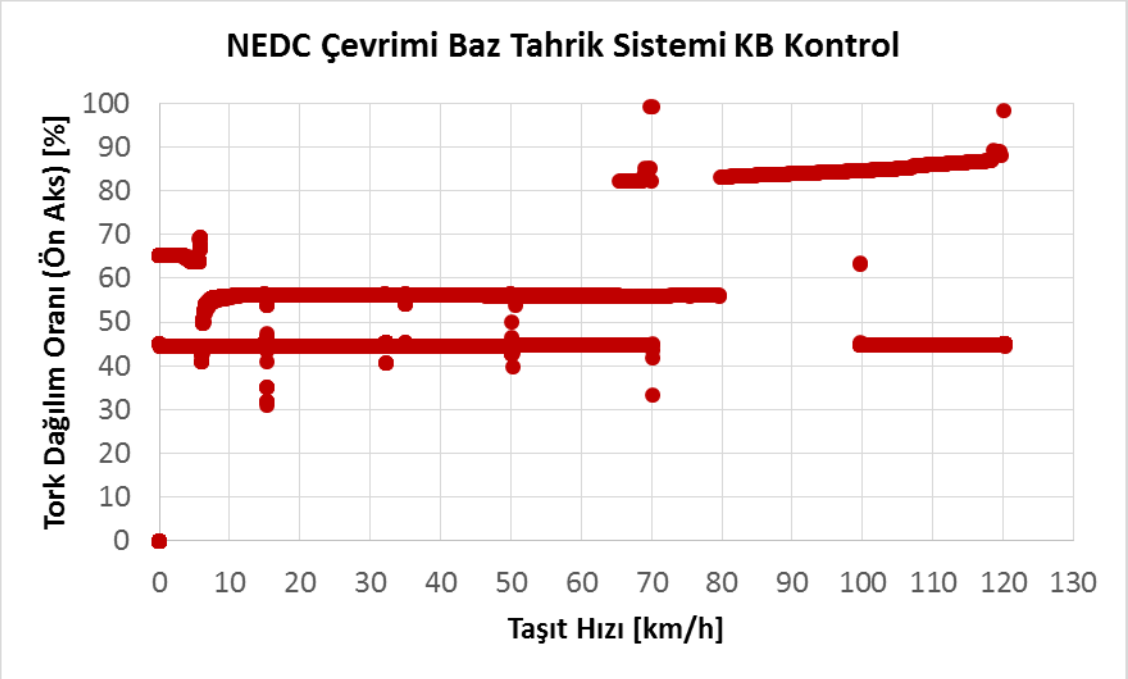
Şekil 4.2'de çevrim boyunca SOC yörüngesine bakıldığında kural bazlı kontrol sistemi, %29 seviyede seri hibrit modu aktifleştirilmiş ve SOC'yi %30 seviyelerinde sürdürmeye çalışmıştır. Ancak yakıt tüketimine baktığımızda, hem SOC seviyesi koruma eğilimi, hem de paralel sürüş modunda İYM çalışma noktalarının açısal hız dolayısıyla kontrolsüz bir şekilde değişmesi, hızlı yakıt tüketimi artışlarıyla sonuçlanmıştır. Burada optimizasyon bazlı kontrol stratejisi sadece seri hibrit modu kullanarak, İYM çalışmasını toplam sistem verimi açısından daha verimli bölgelerde gerçekleştirerek yakıt tüketiminin toplamda daha az olmasını sağlamıştır.



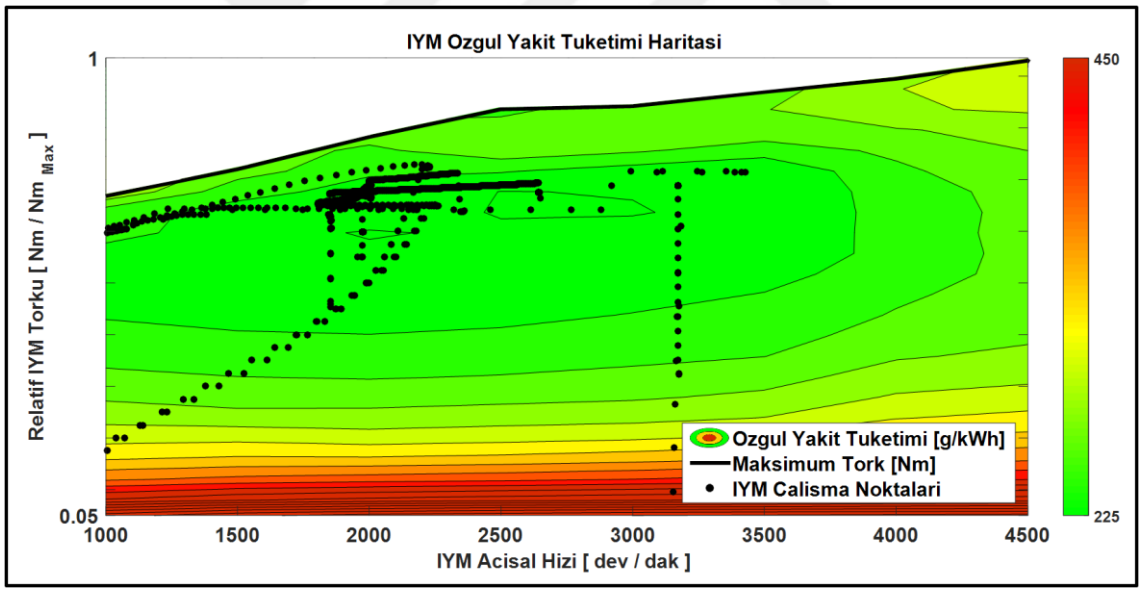
Şekil 4.2 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı

Ayrıca SOC'yi belirli bir seviyede tutmak yerine daha aşağı seviyelere kadar kullanarak uygun durumlarda İYM'yi aktifleştirip çevrim sonunda yaklaşık aynı SOC seviyesinde çevrimi tamamlamıştır. İYM sıcaklığında ise her iki kontrol için sıcak motor şartı çevrim başında sağlandığından önemli bir artış gözlemlenmemiştir. Şekil 4.3'te gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %45 - %57 civarında olmakla ve yüksek hız bölgelerinde %80 - %90 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranı taşıt hızına göre sabit bir karakteristik göstermektedir.

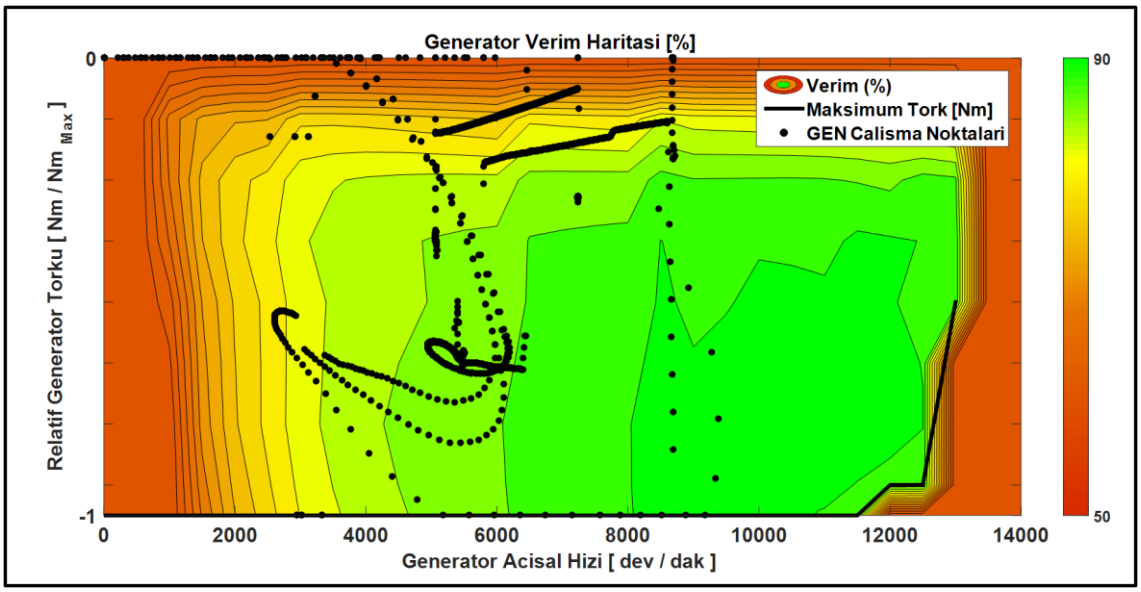
Şekil 4.4'te İYM çalışma noktaları incelendiğinde kural bazlı kontrol strajesi özgül yakıt tüketimi açısından verimli olan bölgelere yakın çalışmakla beraber paralel sürüş modundan dolayı daha verimsiz bölgelerde de çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca İYM verimli bölgede (<240 g/kWh) çalıştığı esnada Şekil 4.5'te gösterildiği gibi seri hibrit modunda generatör çalışma noktaları incelendiğinde generatörün verimli bölgeden (>%90) uzak daha düşük verimli bölgelerde çalıştırıldığı gözlemlenmektedir. Böylelikle sistemdeki toplam verimlilik azalarak batarya şarjı için uzun süren İYM operasyonu, İYM operasyonu verimli bölgede olsa bile yakıt tüketimini arttırmaktadır.



Şekil 4.3 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı



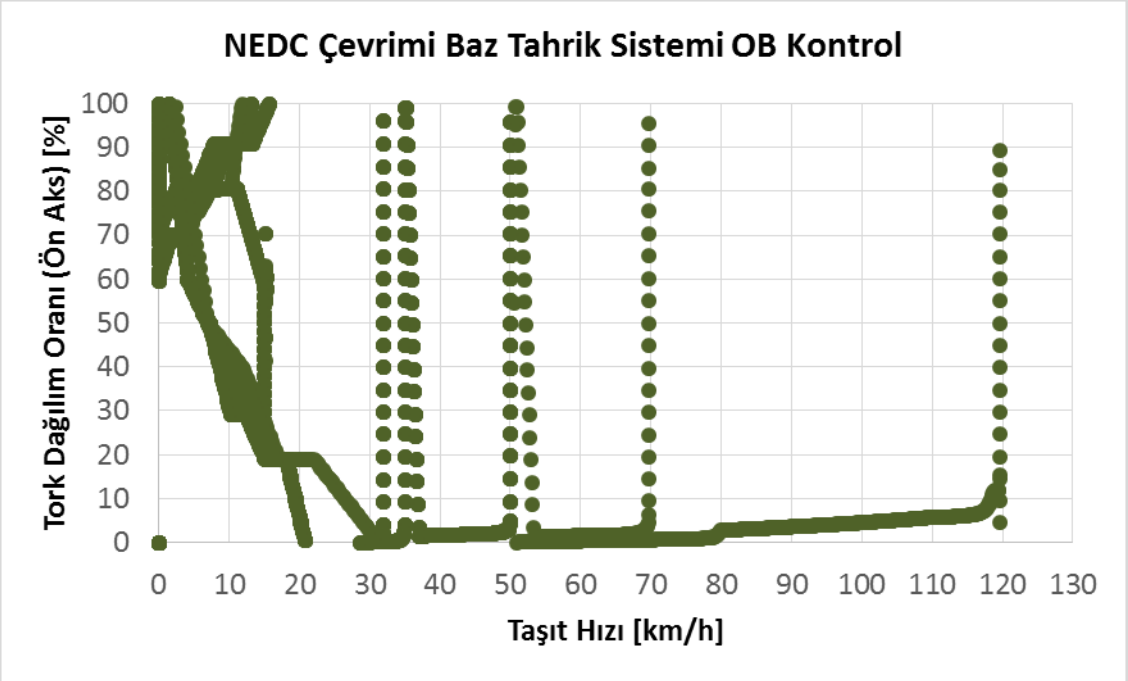
Şekil 4.4 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları



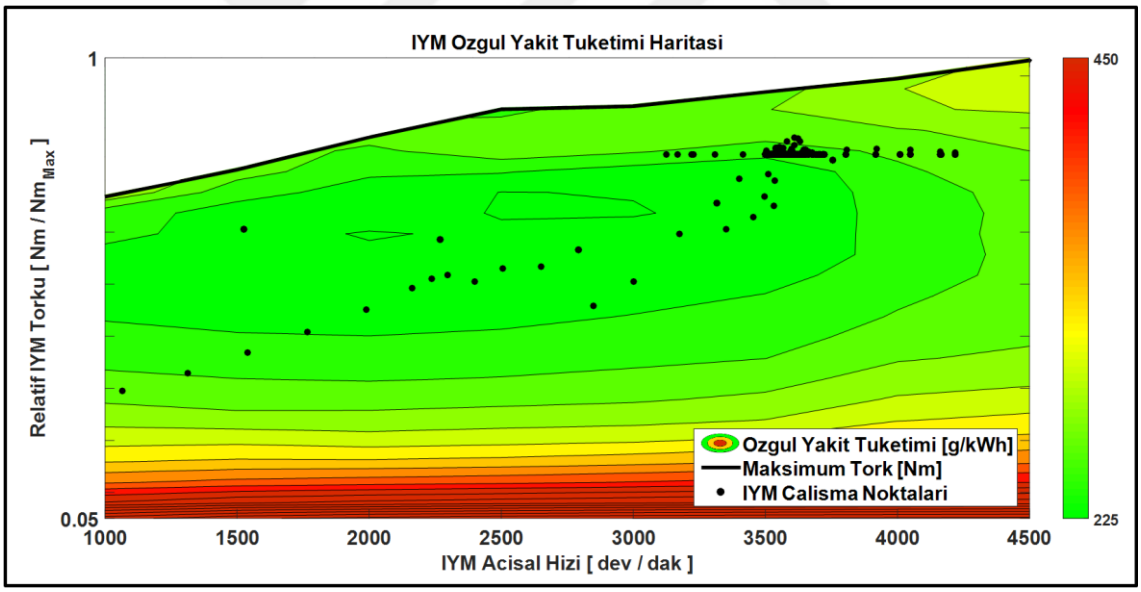
Şekil 4.5 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

Şekil 4.6'da gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %0 - %100 arasında dağılmakta ve yüksek hız bölgelerinde ise ağırlıklı olarak %0 - %10 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.

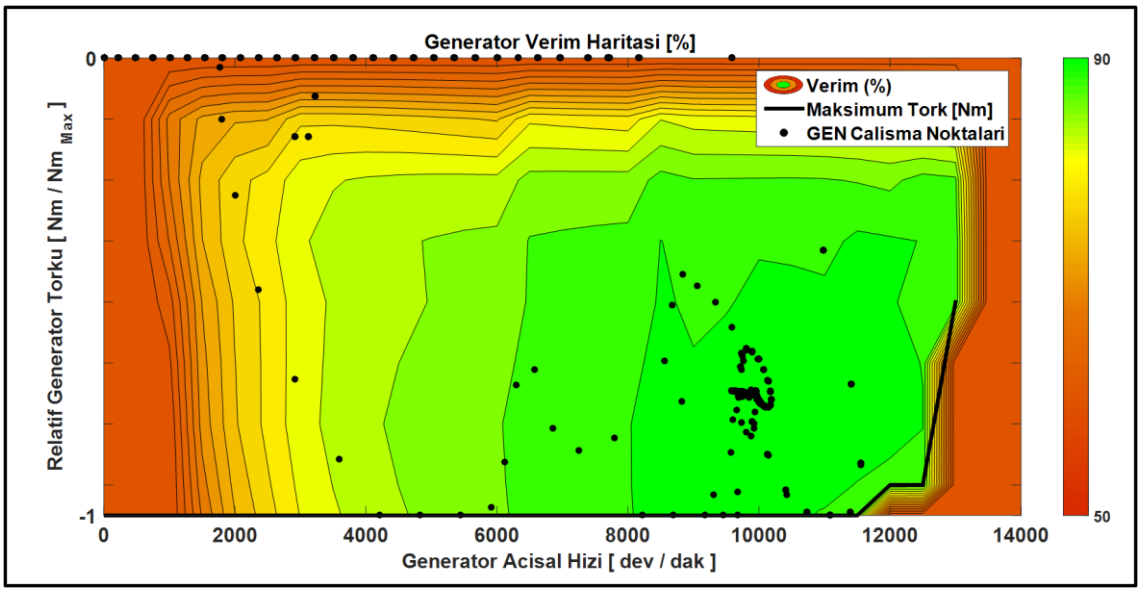
Optimizasyon bazlı kontrolde Şekil 4.7'de gösterilen İYM operasyon noktaları incelendiğinde, kontrolün İYM'u 3500 dev/dak hızda çalıştırma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Burada İYM en verimli noktanın dışında çalışmasına rağmen kural bazlı kontroldeki duruma göre daha az çalışmaktadır. Ayrıca Şekil 4.8'deki generatör çalışma koşulları incelendiğinde generatörün yüksek verimli bölgenin (>%90) içinde çalıştığı görülmekte ve toplam sistem veriminin seri hibrit modda kural bazlı kontrole göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek sistem verimliliği ve kısa süreli İYM kullanımı yakıt tüketiminde iyileşme sağlamıştır.



Şekil 4.6 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları

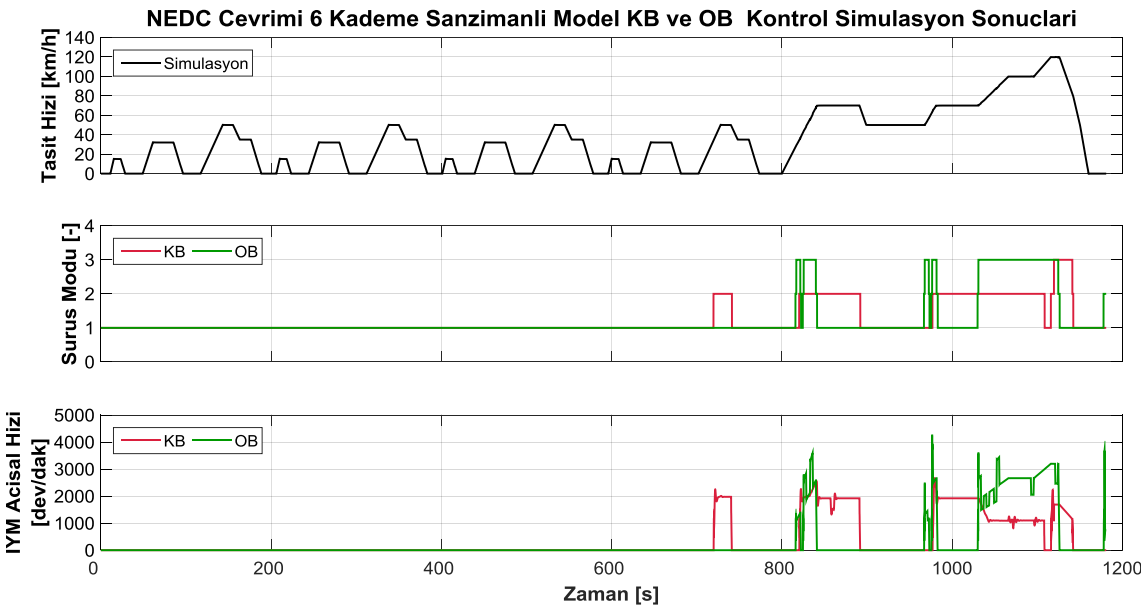


Şekil 4.7 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları



Şekil 4.8 NEDC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

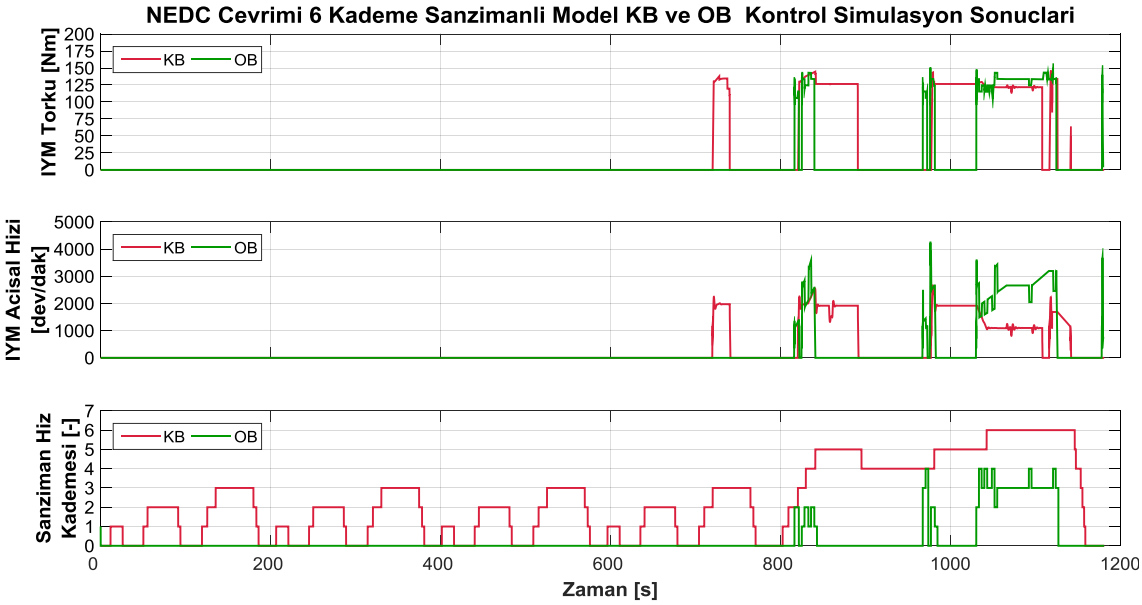
Baz sistemde, yakıt tüketimi açısından önemli parametreler incelenmiş ve paralel hibrit modda İYM açısal hızındaki kontrol kabiliyetininin eksikliğinin yakıt tüketimine olan etkisi gözlemlenmiştir. Bu kontrol eksikliğini gidermek amacıyla sisteme eklenen 6 ileri hız kademeli şanzımana sahip tahrik modeli aynı çevrim için kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrollerde simüle edilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da şanzımanlı tahrik sistemine ait kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolde İYM parametreleri, yakıt tüketimi ve SOC için simülasyon test sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.9 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı

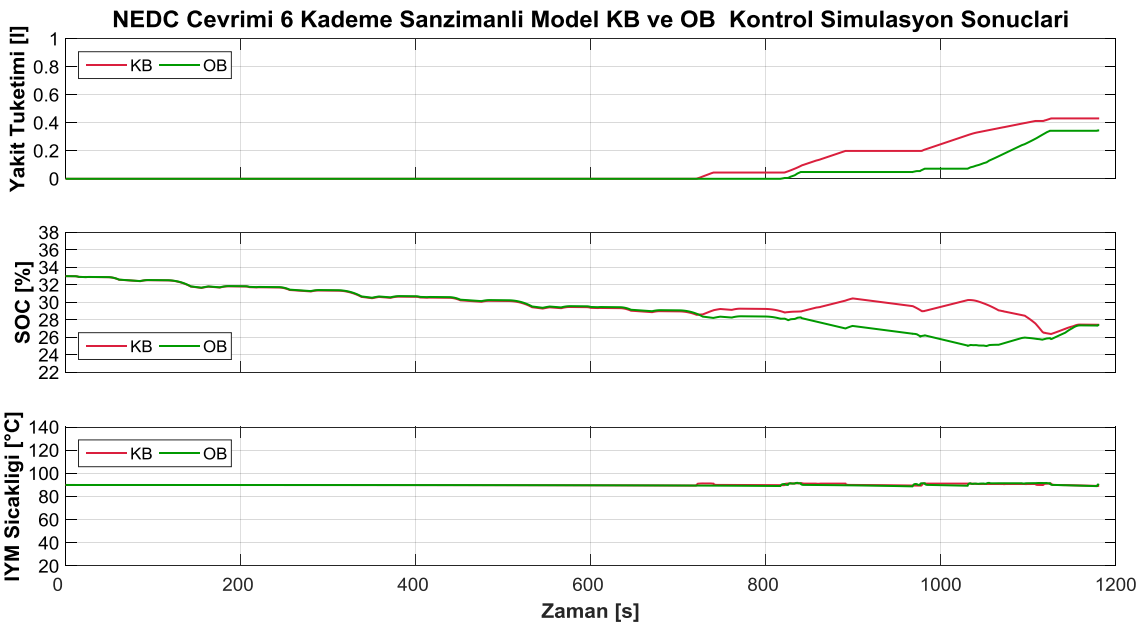
Şekil 4.9'daki sürüş modları incelendiğinde kural bazlı kontrol stratejisi çevirimin büyük bir çoğunlukta orta hızlı bölgede e-sürüş modunda gitmesine rağmen şarj durumuna bağlı olarak seri hibrit modu hız durumuna bağlı olarak ise paralel hibrit modu kullanmıştır. Yüksek hızlı bölgede sistem bu sefer paralel hibrit mod yerine farklı hız kademeleri kullanarak çoğunlukla seri hibrit modunda İYM motorunu verimli bölgeye yakın bölgelerde çalışmıştır. Kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolde hız kademesi değiştirme stratejisi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Kural bazlı kontrol stratejisinde hız kademesi değiştime stratejisi taşıt hızına göre uyarlandığından İYM taşıt hızına göre en verimli olabileceği bölgede çalıştırılmıştır. Kural bazlı kontrol yüksek hızlı bölgede 100 km/h hızın üzerinde Şekil 4.11'de gösterildiği gibi SOC durumuna bakmaksızın sistem ivmelenme ihtiyacını karşılamak için elektrik motorundan tahrik gücü alarak SOC'nin azalmasına neden olmuş, akabinde paralel sürüş modunu aktifleştirmiştir. Paralel hibrit modda taşıt hızını takip eden İYM açısal hızı, değişken çevrim oranlarıyla İYM'nin yakıt tüketimi açısından verimli olduğu noktalarda sürdürülmeye çalışılmıştır. Ancak paralel modda bir süre sonra taşıt hızının hızlı bir şekilde azalması, İYM'nin düşük verimli bölgelerde çalışmasına neden olmuştur. Özetle, bu dinamik davranışlarla beraber Şekil 4.13'te görüldüğü üzere İYM açısal hızı kural bazlı kontrolde, 1000-2500

dev/dak arasında çalışarak daha az verimli bölgelerde de çalışmaya neden olmuştur. Bunun yanında ağırlıklı olarak seri modda çalışan kural bazlı kontrolde generatör çalışma veriminin toplam sistem verimine olan etkisi önemli bir yer tutmaktadır. Şekil 4.14'te gösterilen kural bazlı kontrolde gerçekleşen generatör çalışma noktarı incelendiğinde, generatörün yüksek verimli bölgede (>%90) hiç çalışmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum toplam sistem verimini etkilemekte ve İYM nin SOC durumunu koruması için daha uzun süre çalışmasına ve yüksek yakıt tüketimine neden olmaktadır. İYM sıcaklığında ise her iki kontrol için sıcak motor şartı çevrim başında sağlandığından kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir.

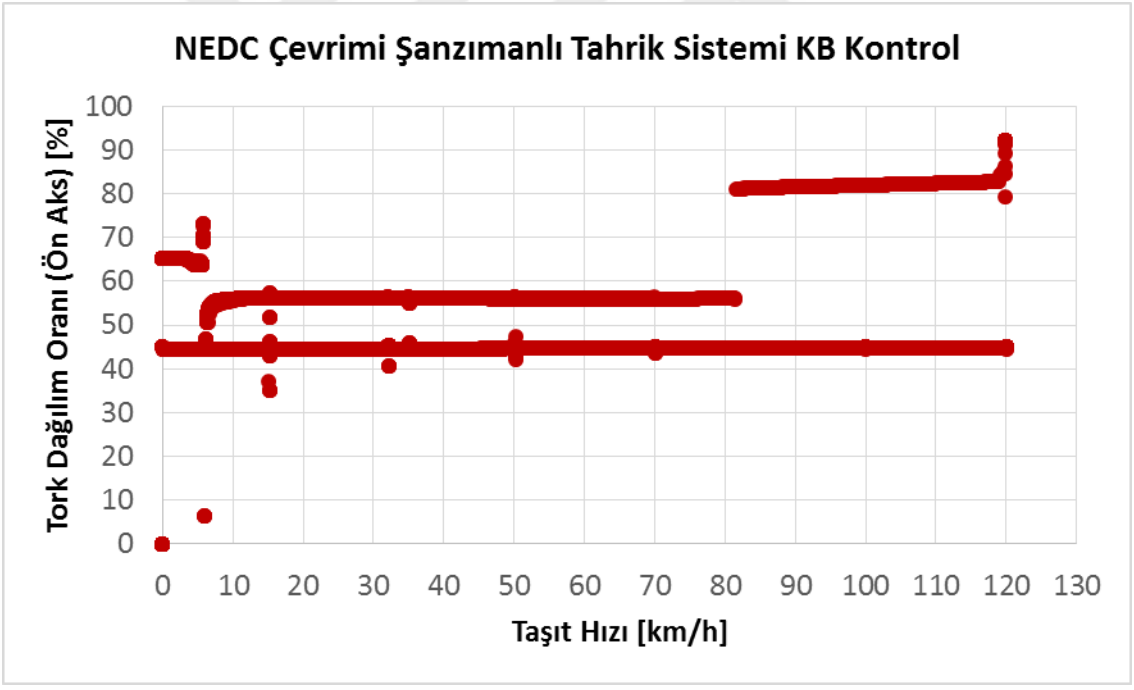


Şekil 4.10 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi İYM açısal hızı ve torku

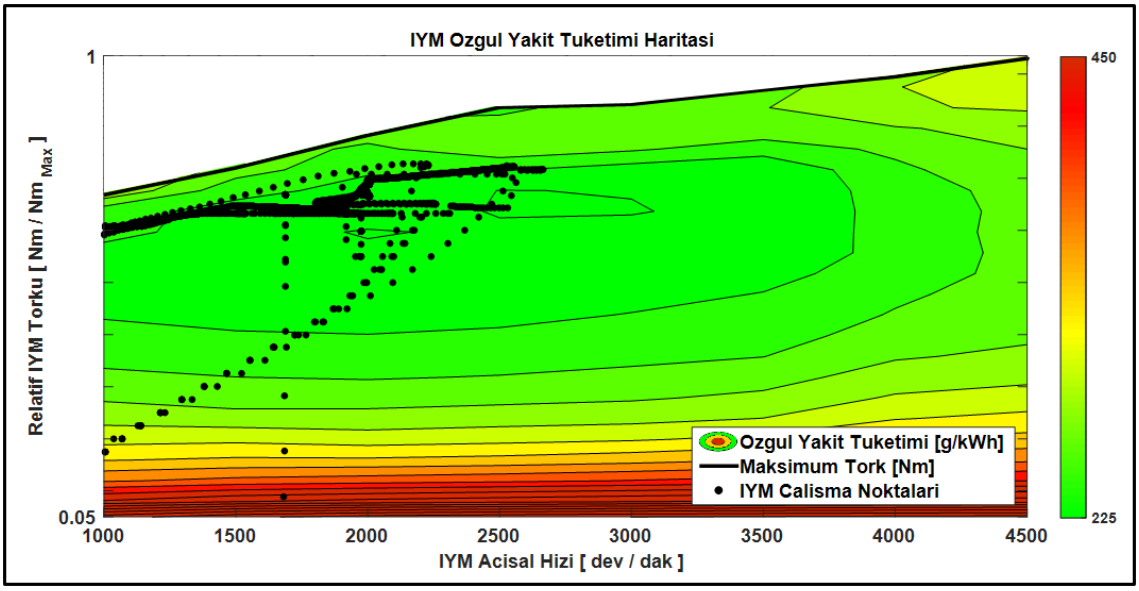
Şekil 4.12'de gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %45 - %57 civarında olmakla beraber yüksek hız bölgelerinde ise yaklaşık %45 ve %80 - %90 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre sabit bir karakteristik göstermektedir.



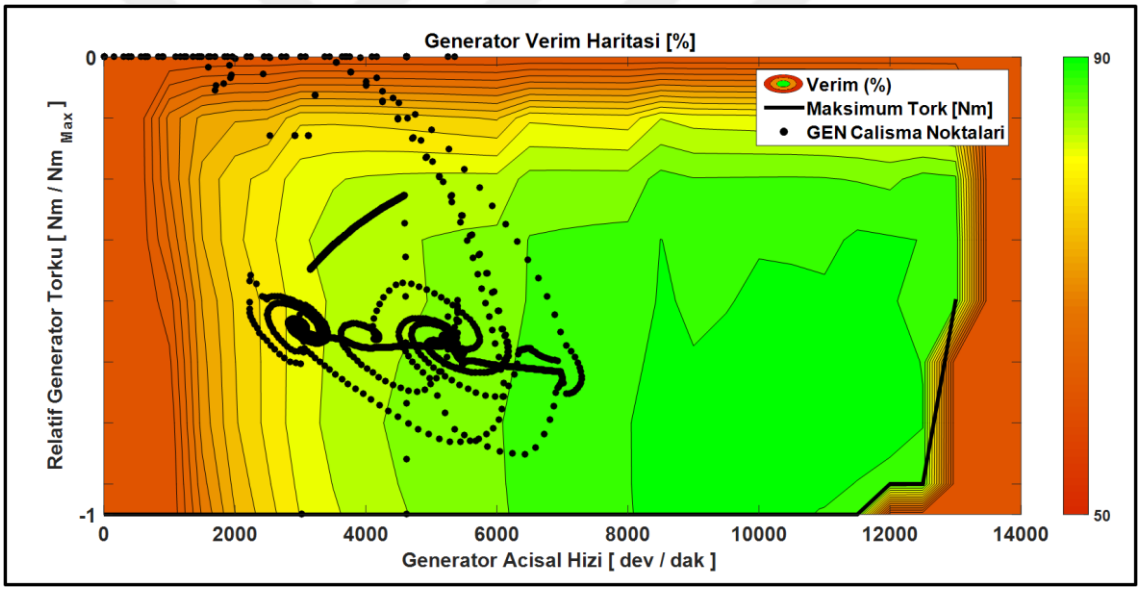
Şekil 4.11 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı



Şekil 4.12 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağlım oranı



Şekil 4.13 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

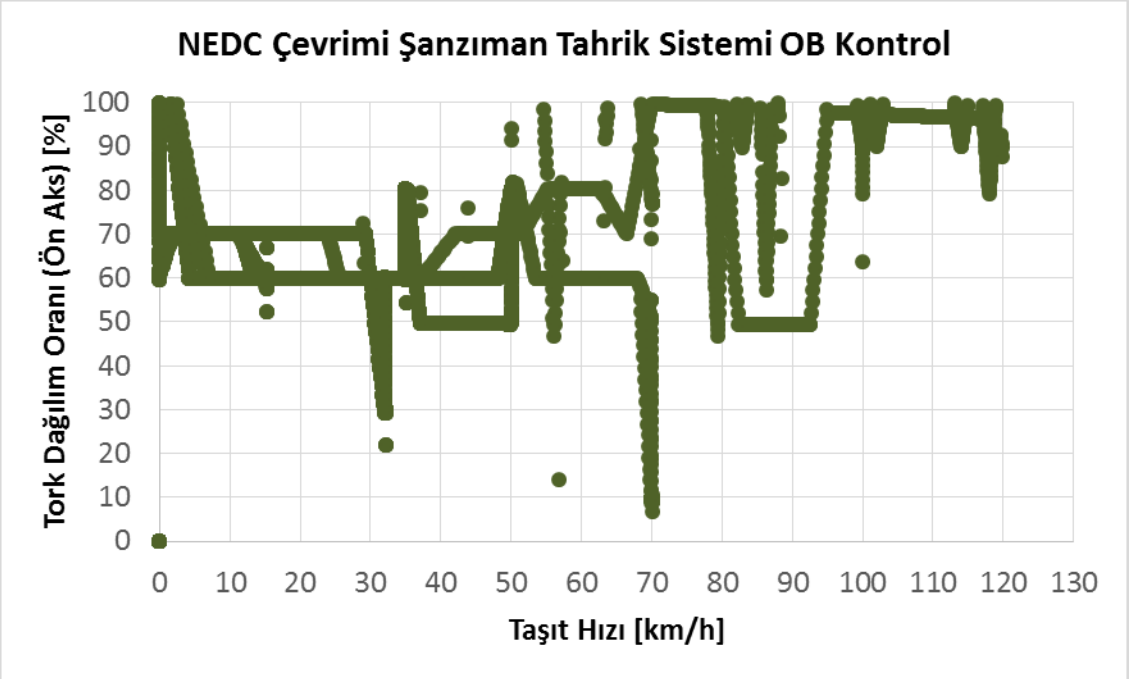


Şekil 4.14 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

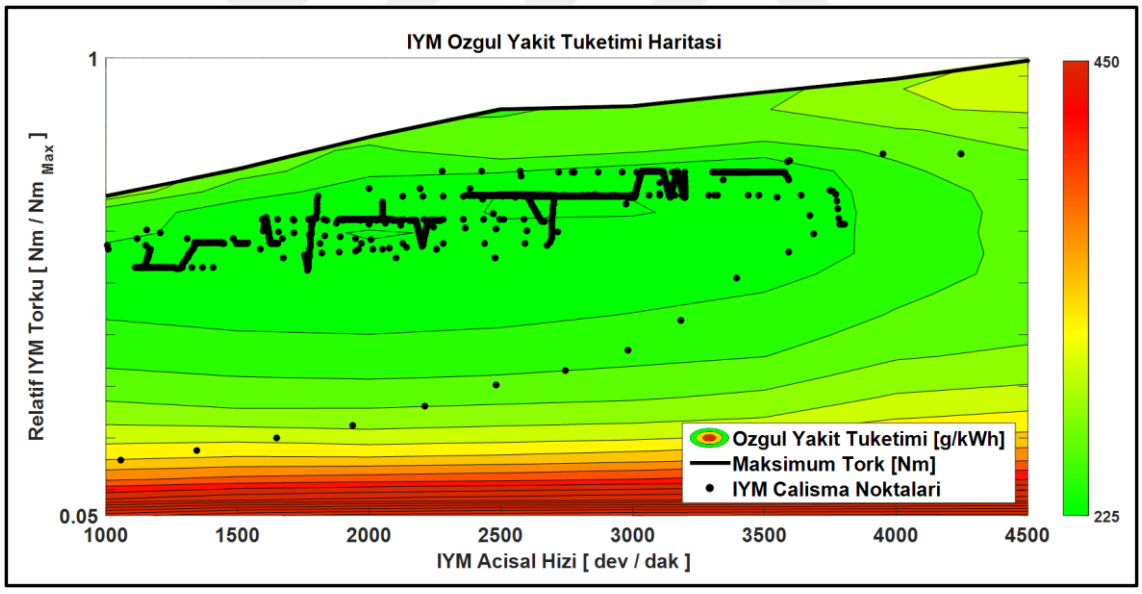
Optimizasyon bazlı stratejide ise Şekil 4.11'de gösterildiği üzere, taşıt çoğunlukla e-sürüş modunda ve düşük SOC durumunda paralel hibrit modunda taşıt tahriğini sağlamıştır. Paralel hibrit modunda Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, hız kademesi taşıt hızına göre farklı kademelerde kullanılmış ve İYM torku sabit seviyede tutulmaya çalışılmıştır. Şekil 4.16'da gösterilen optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları incelendiğinde çalışma noktalarının açısal hız olarak çoğunlukla

1000 - 3500 dev/dak hızda geniş bir aralığa yayıldığı, ancak İYM torkunun yakıt tüketimi açısından verimli olan aralıkta seçildiği gözlemlenmiştir. Diğer bir taraftan Şekil 4.17'de gösterilen optimizasyon kontrolünde generatör çalışma noktalarının çoğunlukla düşük tork ve düşük verim bölgelerinde çalıştığı görülmektedir. Bu durumda özellikle İYM operasyonunda büyük çoğunlukla paralel hibrit modunu kullanan optimizasyon bazlı kontrolün, İYM'yi en verimli alanda tutarak elde ettiği torkun büyük bir çoğunluğunu direkt olarak tahrik torkuna ilettiği anlaşılmaktadır. Seri modda gerçekleşen tahrik gücü aktarımındaki enerji dönüşümlerinin (Mekanik-Elektrik-Elektrik-Mekanik) neden olduğu verim kayıplarının paralel moddaki enerji dönüşümlerinden (Mekanik-Mekanik) fazla olması ve esnek çevrim oranı imkanı optimizasyon kontrolünü seri hibrit mod yerine paralel hibrit modda çalışmasını sağlamıştır. Baz modele göre daha uzun süre çalışmasına rağmen, en verimli bölgede çalışma ve daha az verim kaybı (seri yerine paralel hibrit) toplam çevrim sonundaki yakıt tüketiminin baz sistemdeki optimizasyon kontrolüne göre daha az yakıt tüketimini sağlamasına olanak tanımıştır.

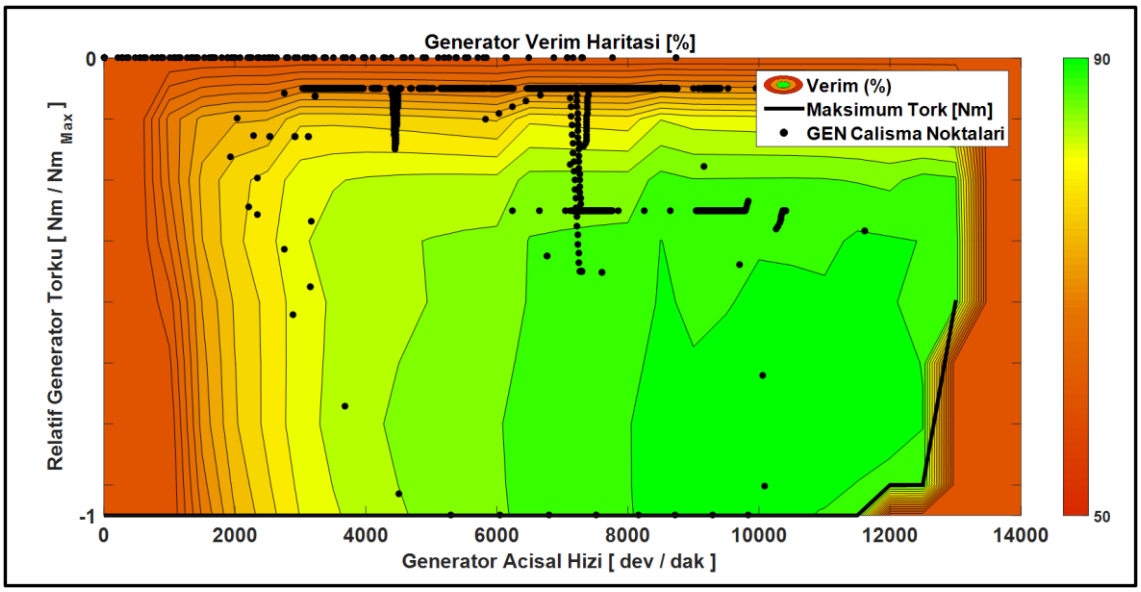
Şekil 4.15'te gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %10 - %100 arasında ve yüksek, çok yüksek hız bölgelerinde ise ağırlıklı olarak %50 - %100 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.15 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı



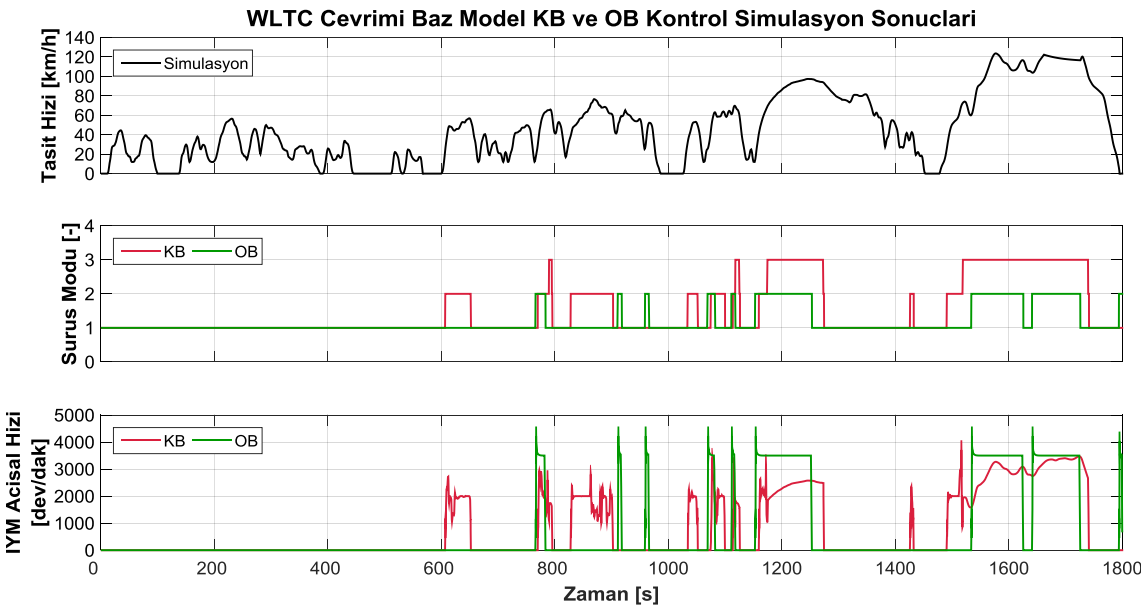
Şekil 4.16 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları



Şekil 4.17 NEDC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

4.1.3 WLTC Test Çevrimi Simülasyon Sonuçları

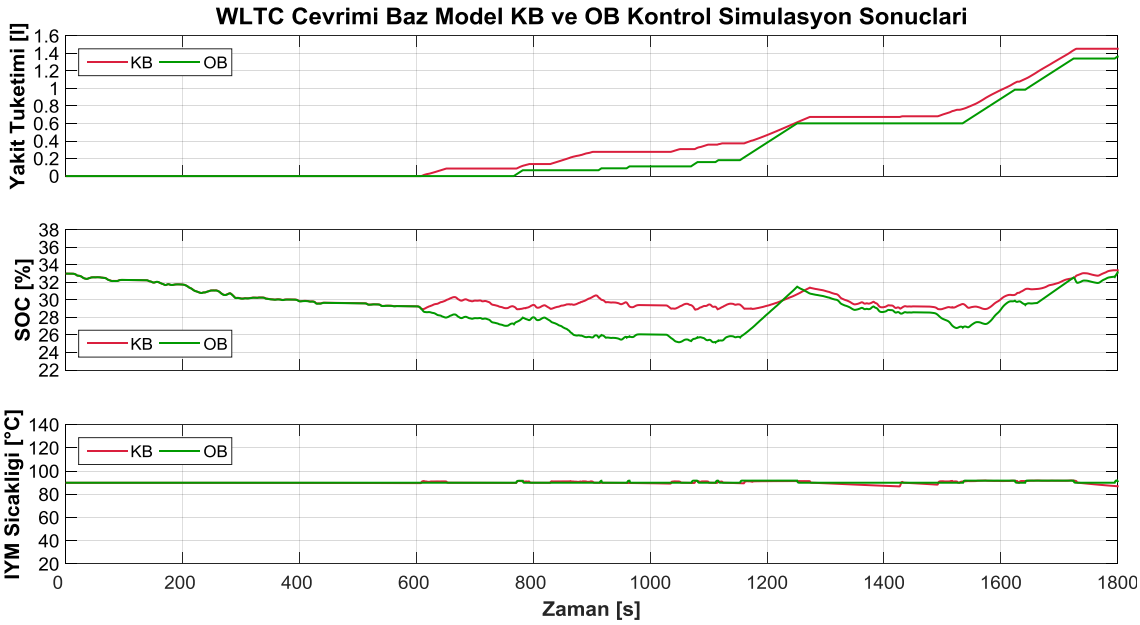
WLTC test çevriminde, NEDC'de olduğu gibi çevrim sıcak motor şartında başlamıştır. NEDC'ye göre daha dinamik bir hız prolifine sahip WLTC test çevriminde düşük, orta, yüksek ve çok yüksek hız profillerinde dinamik olarak kontroller değerlendirilmiştir. Kural bazlı kontrol stratejisinde Şekil 4.18'te gösterilen sürüş modu incelendiğinde, sürüş modunun düşük hızlarda e-sürüş, orta hızlarda seri hibrit ve ivmelenme taleplerinde paralel hibrit, yüksek ve çok yüksek hızlarda ise yine paralel hibrit sürüş modlarının kullanıldığı görülmektedir. İYM açısal hızı incelendiğinde ise benzer şekilde paralel sürüş modunda açısal hızın taşıt hızına göre değiştiği görülmektedir.



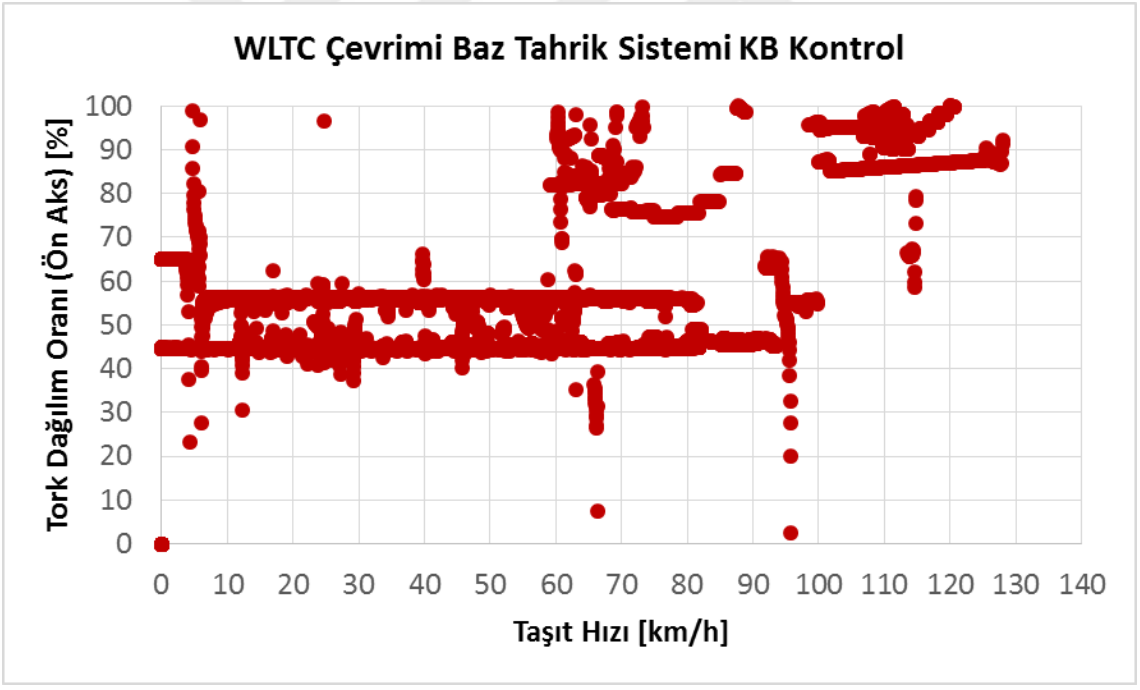
Şekil 4.18 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı

Şekil 4.19'da SOC yörüngesi incelendiğinde ise kural bazlı kontrolde SOC seviyesi %30 seviyelerinde korunmaya çalışmış ve çevrim sonunda ilk SOC seviyesine yakın bölgede çevrim tamamlanmıştır. Optimizasyon bazlı kontrolde ise sürüş modu olarak çoğunlukla e-sürüş olmak üzere düşük SOC seviyelerinde seri hibrit sürüş moduyla SOC seviyesi yükseltilmiştir. Yakıt tüketimi karakteristiği incelendiğinde ise kural bazlı kontrolde uzun süreli İYM çalıştırılması sonucu yakıt tüketimi artış hızı optimizasyon bazlı kontrolden daha düşük olmasına rağmen çevrim sonunda daha fazla yakıt tükemiyle sonuçlanmıştır. Bunun yanında Şekil 4.21'de kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları incelendiğinde İYM'nin yakıt tüketimi açısından verimli bölgelerde çalışmasına rağmen uzun süreli İYM çalışması ve paralel modda İYM noktalarının değişkenlik göstermesi yakıt tüketimini etkilemiştir.

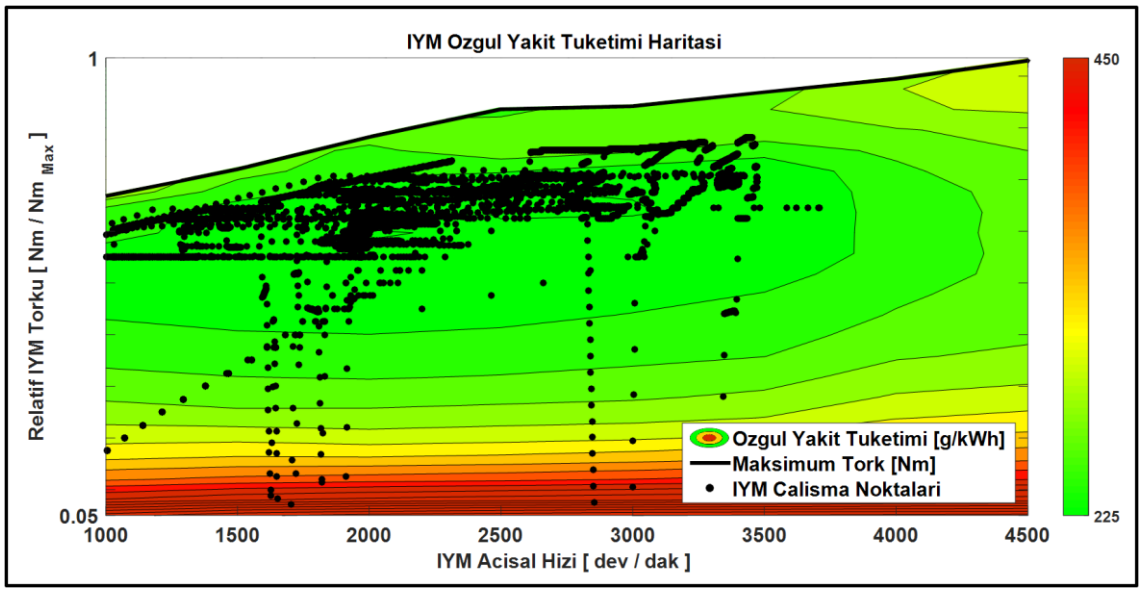
Şekil 4.20'de gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %45 - %57 civarında olmakla beraber yüksek, çok yüksek hız bölgelerinde ise %60 - %100 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.19 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı

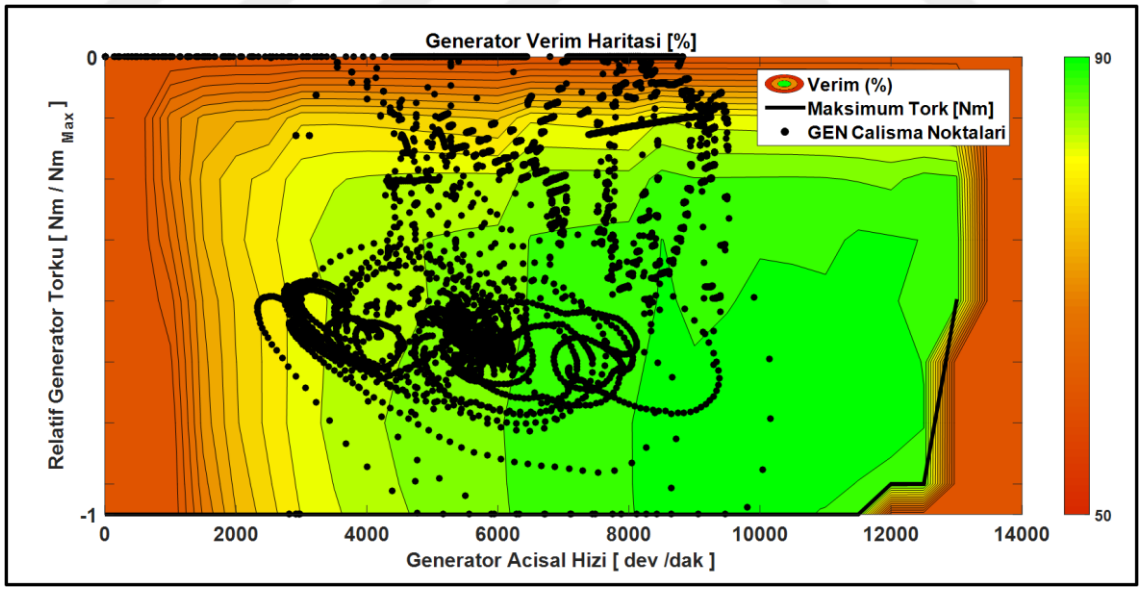


Şekil 4.20 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranı



Şekil 4.21 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

Ayrıca kural bazlı stratejide seri hibrit modu kullanımında Şekil 4.22'de gösterilen generatör çalışma noktaları incelendiğinde ise generatörün büyük çoğunlukla en verimli bölgenin (>%90) dışında çalıştığı ve toplam sistem verimini azalttığı görülmektedir.

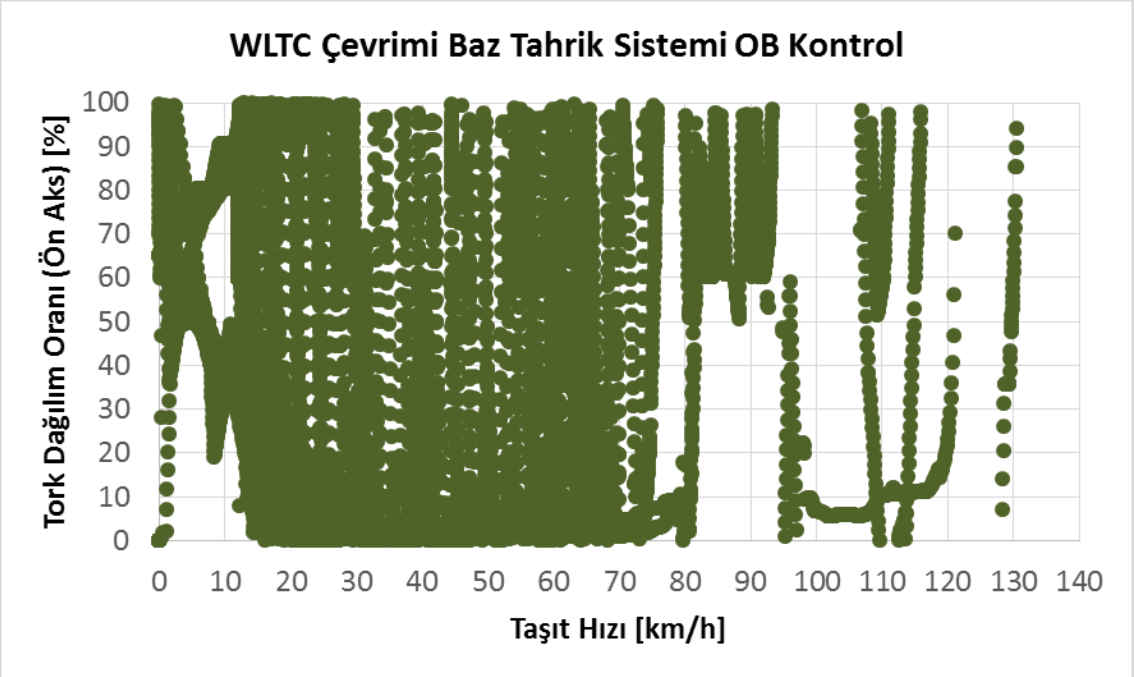


Şekil 4.22 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

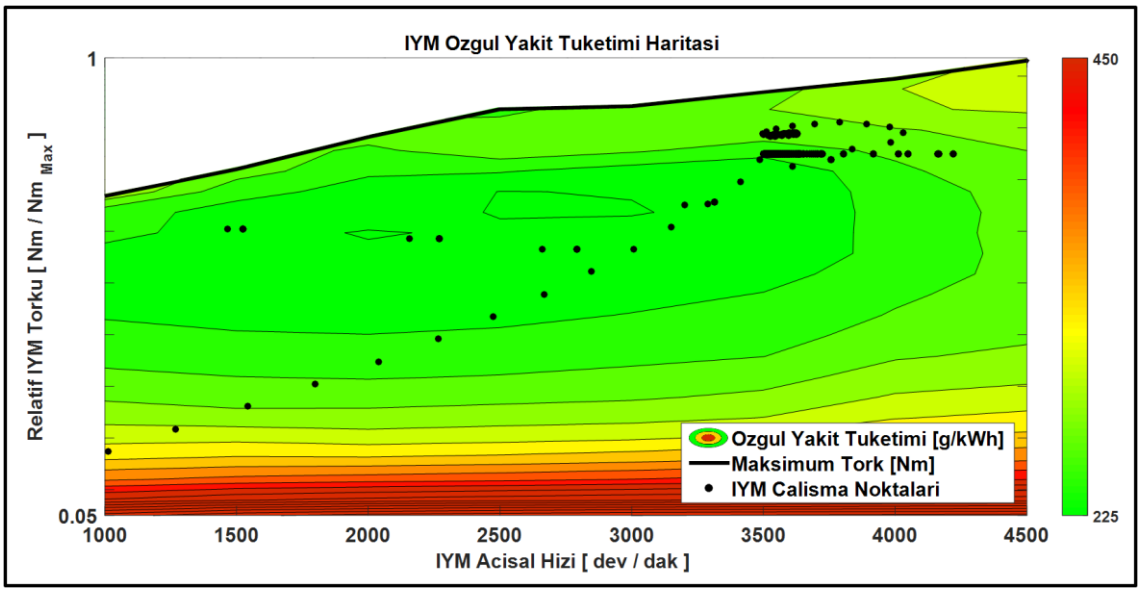
Yakıt tüketimi için optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları incelendiğinde İYM'nin en verimli bölge dışında çalıştığı görülmektedir. Aynı

zamanda optimizasyon bazlı kontrol için Şekil 4.19'da gösterilen yakıt tüketimi artış hızının kural bazlı kontrolde göre daha fazla olduğu bu durumu ispatlamaktadır. Diğer taraftan Şekil 4.24'te optimizasyon bazlı kontrol için gösterilen İYM çalışma süresi incelendiğinde çalışma süresinin kural bazlı kontrolden daha az olduğu ve Şekil 4.25'te gösterilen optimizasyon bazlı kontrolde generatör çalışma noktaları incelendiğinde ise generatörün en verimli bölgede (>%90) çalıştırılarak seri hibrit modda çalışan kontrol için toplam sistem verimini arttırdığı görülmektedir. Bu sayede, optimizasyon bazlı kontrolde yakıt tüketimi hızlı artmasına rağmen kısa süreli İYM kullanımı ve toplam yüksek sistem verimi kural bazlı kontrole göre daha az yakıt tüketimi sağlamıştır. İYM sıcaklıkları incelendiğinde ise sıcak motor koşulunda teste başlandığı için önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

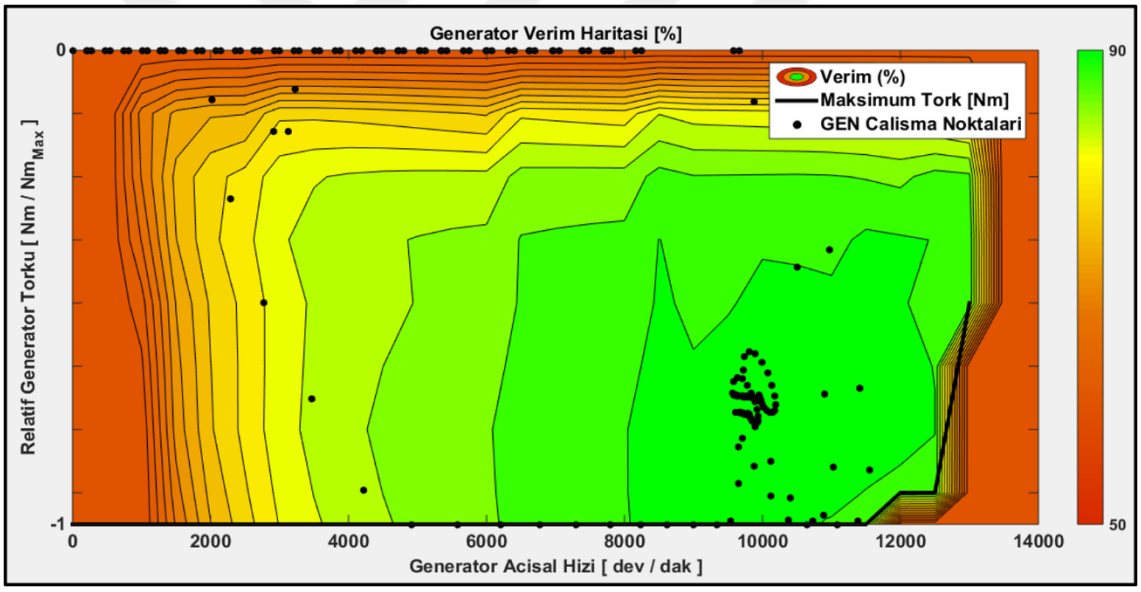
Şekil 4.23'te gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde tüm hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %0 - %100 arasında dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.23 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları



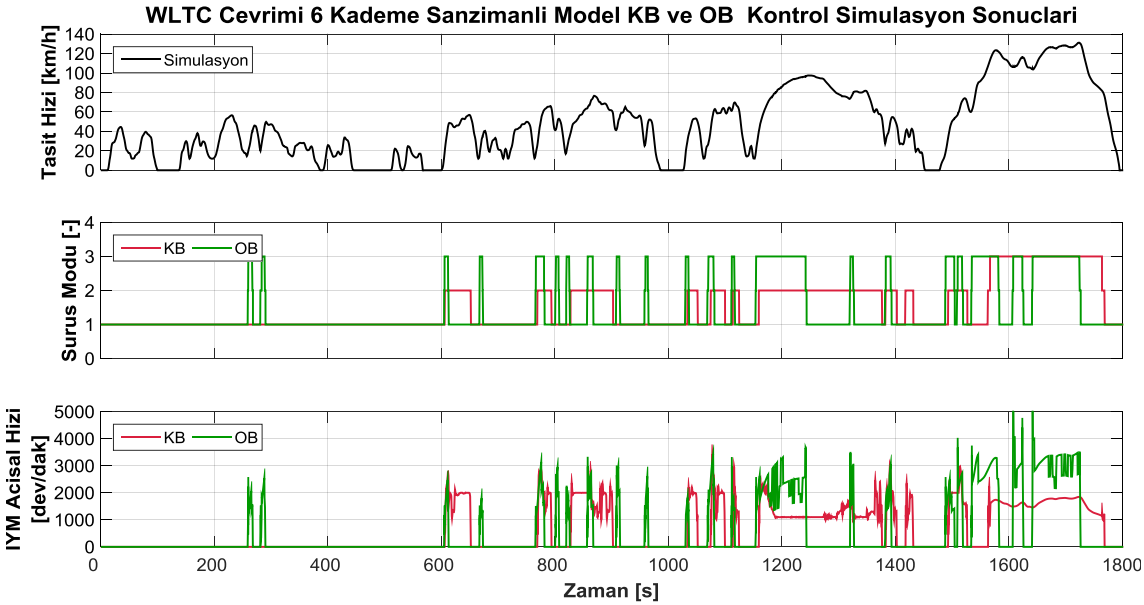
Şekil 4.24 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları



Şekil 4.25 WLTC çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

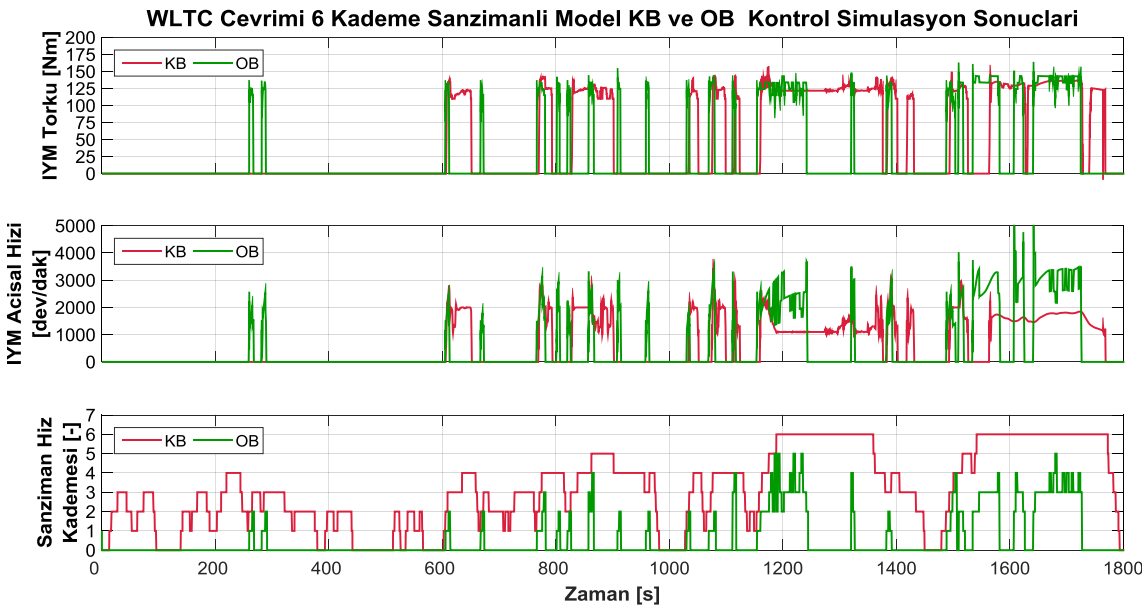
WLTC çevrimi paralel sürüş modunda NEDC test çevriminde de yaşanan İYM açısal hız kontrolü sorununu aşmak için aynı şekilde şanzımanlı tahrik sistemiyle simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda sürüş modu tercihlerine bakıldığında kural bazlı kontrol düşük hızlarda e-sürüş orta ve yüksek hızlarda e-sürüş ve seri hibrit mod, çok yüksek hızlarda ise paralel hibrit sürüş modunda çalışmıştır. Şekil 4.27'de şanzıman hız kademesi değişimleri incelendiğinde, seri hibrit mod kullanımında hız

kademesi değiştirilerek İYM'nin 2000 dev/dak'da tutulduğu, ancak aynı zamanda taşıt hız artışını takip eden şanzıman kontrolünün hız kademesinin yükseltmesiyle İYM açısal hızının 1000 dev/dak'ya düştüğü gözlemlenmiştir. Çok yüksek hız bölgesinde paralel hibrit sürüş moduna geçen kontrol taşıt hızını son hız kademesinde takip ederek İYM'nin 1000 - 2000 dev/dak arasında çalışmasına neden olmuştur. Optimizasyon bazlı kontrolü incelediğimizde ise sürüş modunun büyük çoğunlukla e-sürüş ve paralel hibrit modunda gerçekleştiği görülmektedir. İYM açısal hızı incelendiğinde ise 1000 - 3500 dev/dak arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



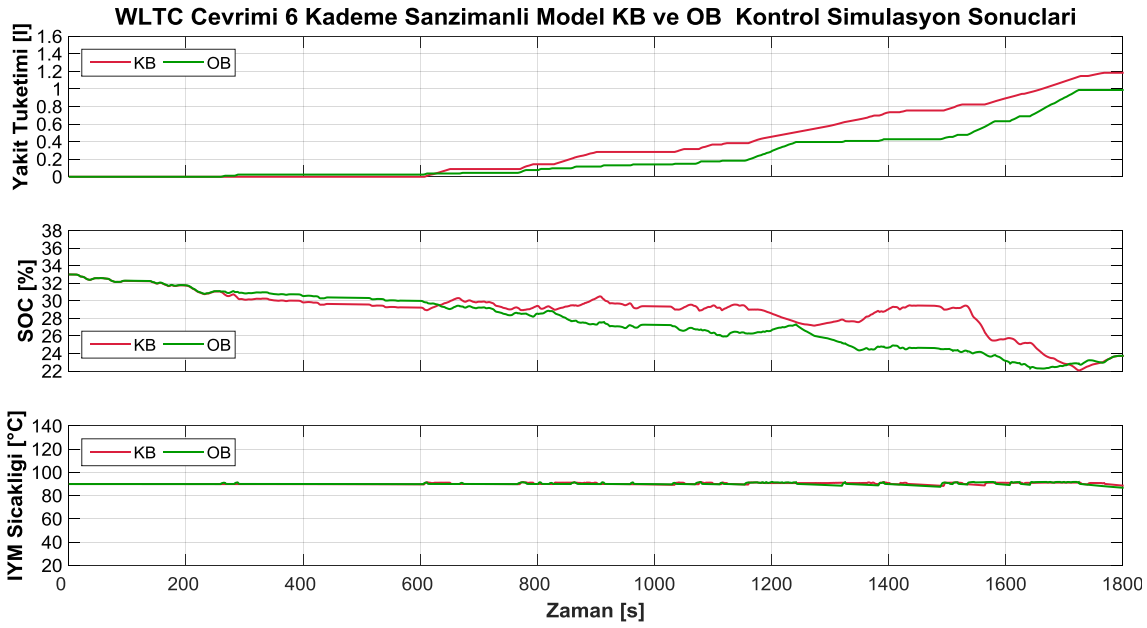
Şekil 4.26 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı

Şekil 4.28'de gösterilen SOC yörüngesine baktığımızda, kural bazlı kontrolde SOC seviyesi çok yüksek hızlı çevrim bölgesine kadar SOC seviyesini korumuş, çok yüksek hızlı bölgeden itibaren (>100 km/h) batarya paralel modda İYM torku batarya şarjı yerine teker tahriği için kullanılmıştır. Optimizasyon bazlı kontrolde ise SOC seviyesi çok yüksek hızlı çevrim bölgesine kadar korunmamış, daha sonra paralel hibrit modda batarya şarj edilmeye başlanmıştır.



Şekil 4.27 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi İYM açısal hızı ve torku

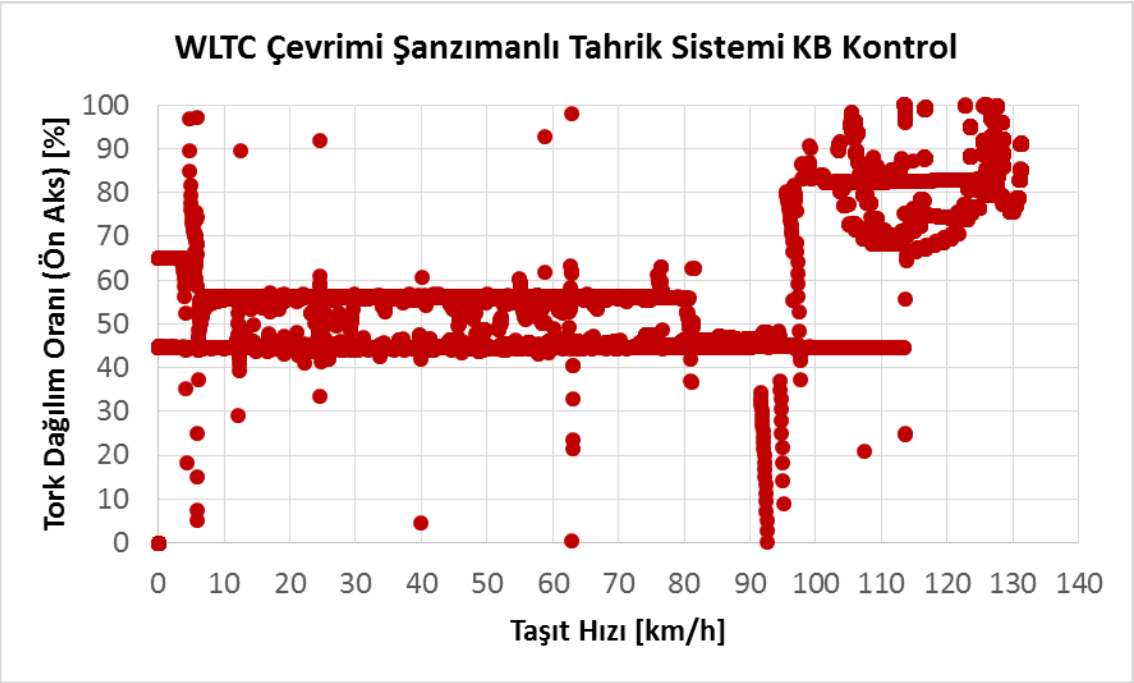
Yakıt tüketimine bakıldığında ise (Şekil 4.28) kural bazlı kontrolde yakıt tüketimi artış hızı optimizasyon bazlı kontrole göre daha yavaş olmasına rağmen, İYM'nin uzun süreli kullanımı toplam yakıt tüketimini arttırmıştır.



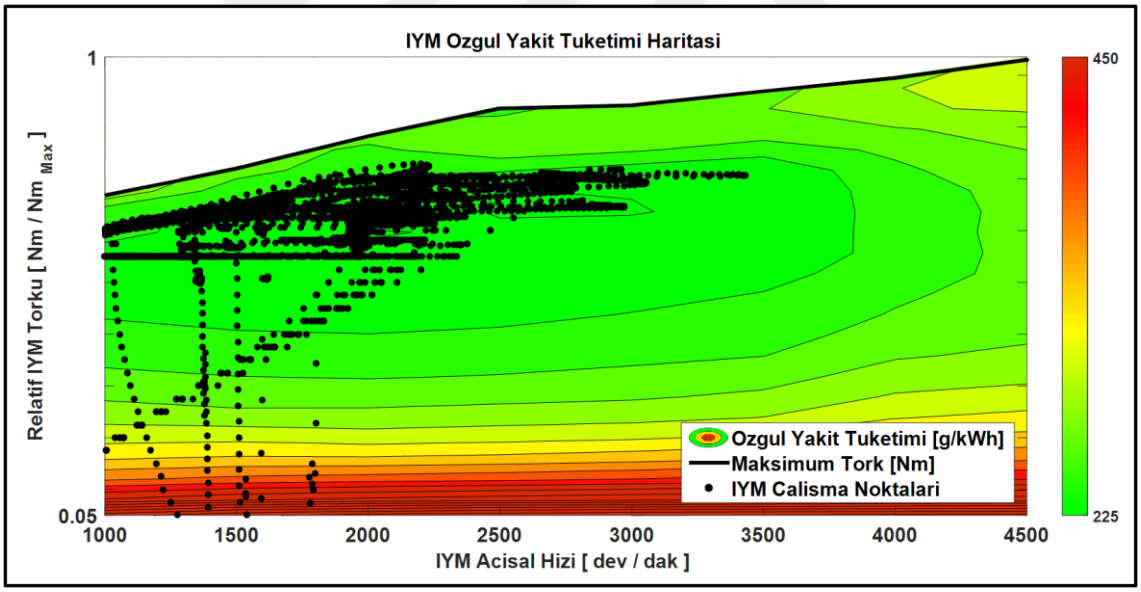
Şekil 4.28 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı

Ayrıca Şekil 4.30 ve Şekil 4.33'teki İYM çalışma noktaları incelendiğinde kural ve optimizasyon bazlı kontrolde İYM'nin 1000 – 3500 dev/dak arasında en verimli ve yakın bölgelerde çalıştığı, ancak kural bazlı kontrolde daha düşük verim bölgelerinde de İYM'nin çalıştırıldığı gözlemlemiştir. Ayrıca kural baz kontrolde önemli bir bölümde çalışan seri hibrit mod için generatör çalışma noktaları Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Burada generatörün kural bazlı kontrol için en verimli bölgenin (>%90) dışarısında çalıştığı görülmekte ve toplam sistem veriminin azaldığı anlaşılmaktadır. Optimizasyon bazlı stratejide İYM'nin çoğunlukla paralel hibrit mod için çalıştırıldığı ve Şekil 4.34'de gösterilen generatör çalışma noktaları incelendiğinde, paralel hibrit modda İYM'den elde edilen torkun az bir kısmının generatör tarafından kullanıldığı görülmektedir. Elde edilen torkun büyük bir kısmının ise toplam enerji çevriminden kaynaklanan kayıpların en aza indirilmesi amacıyla seri hibrit yerine (Mekanik-Elektrik-Elektrik-Mekanik), paralel hibrit modu ile (Mekanik – Mekanik) direkt olarak tahrik tekerlerine iletilmiştir. Bu sayede toplam sistem verimi arttırılarak en verimli bölgelerde çalışan İYM'den, çevrim sonunda kural bazlı kontrole göre daha az yakıt tüketimi elde edilmiştir.

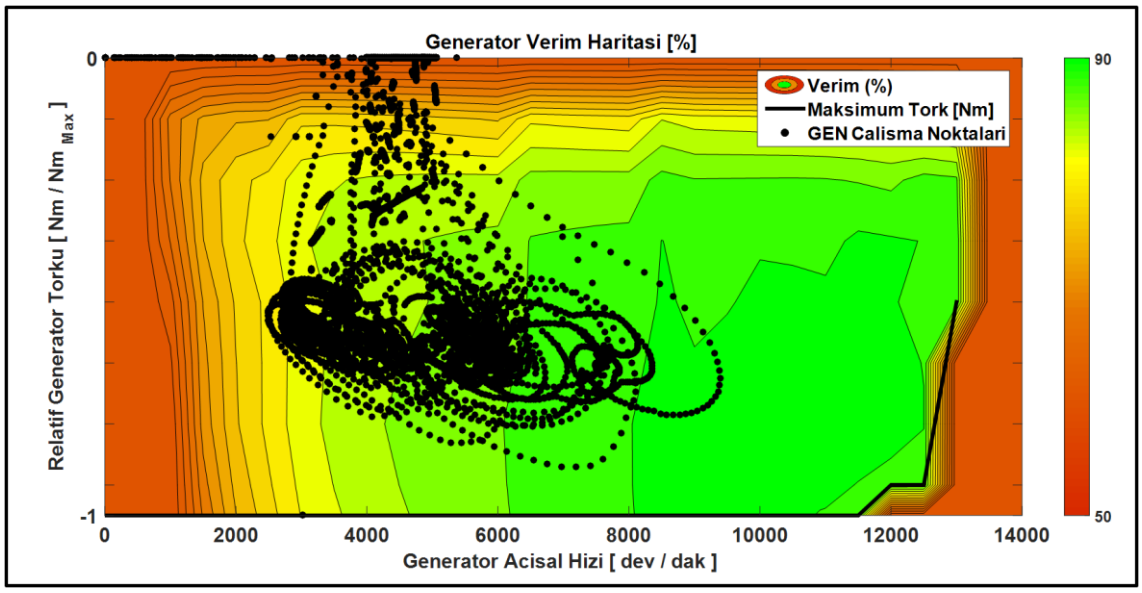
Şekil 4.29'da gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük-orta hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı ağırlıkla %45 - %57 civarında olmakla beraber yüksek hız bölgelerinde ise %45 - %100 arasında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.29 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları

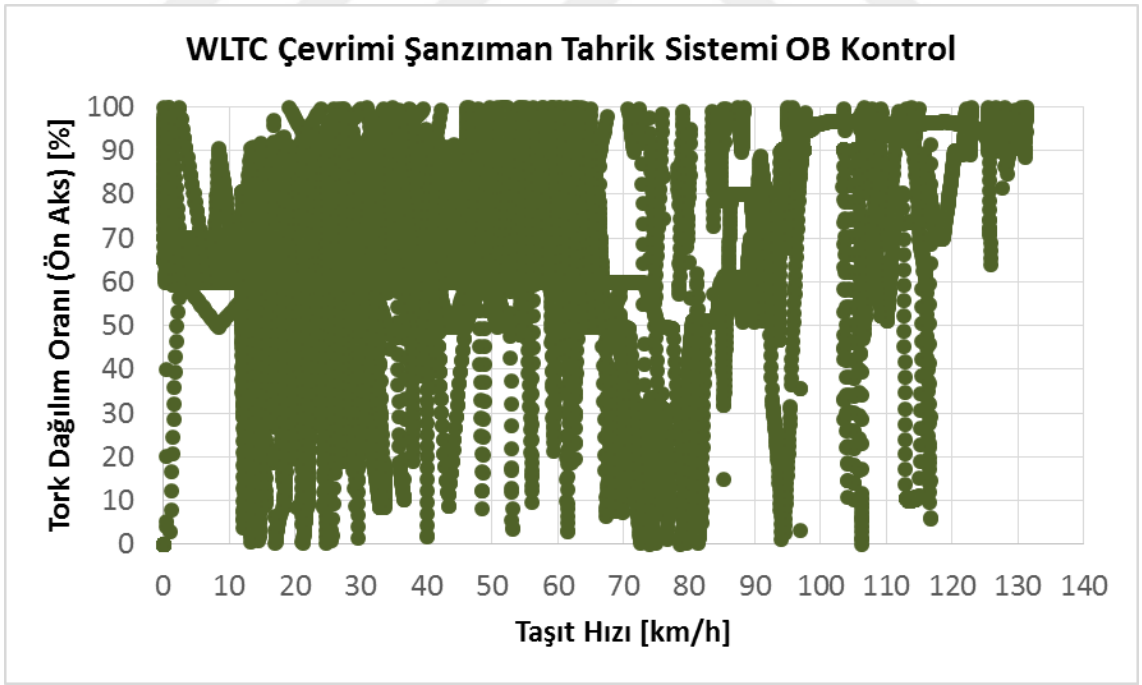


Şekil 4.30 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

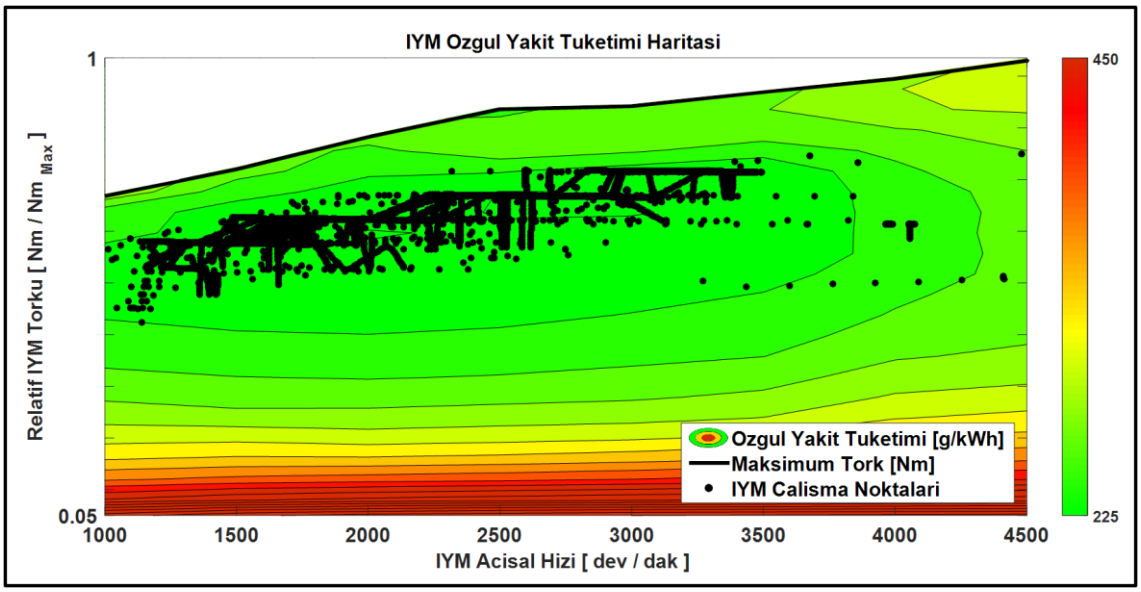


Şekil 4.31 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

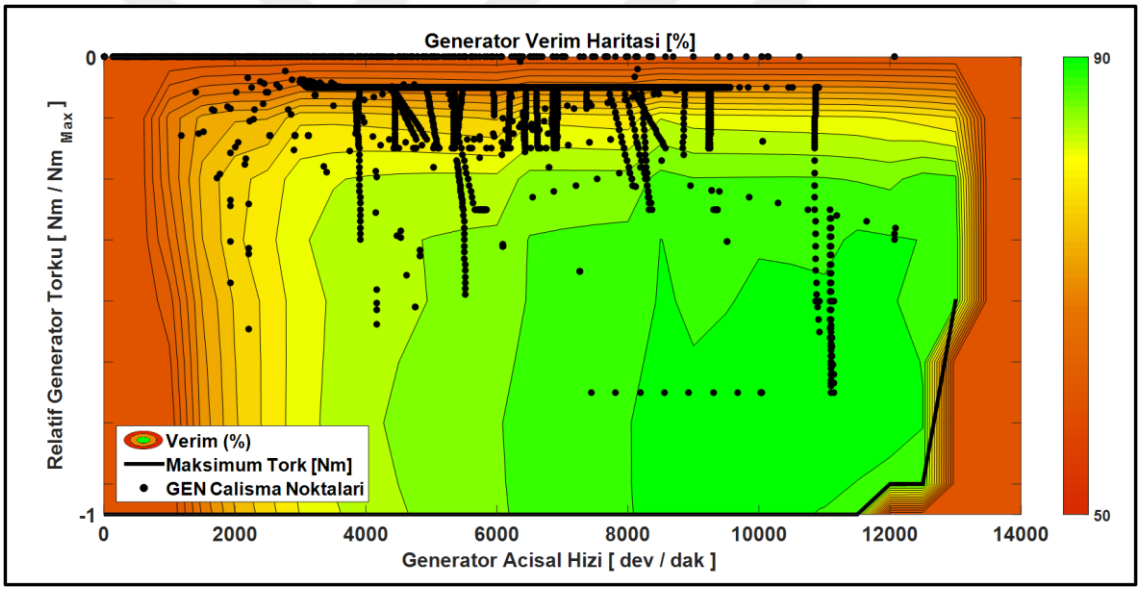
Şekil 4.32'de gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde tüm hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı %0 - %100 arasında dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.32 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları



Şekil 4.33 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları



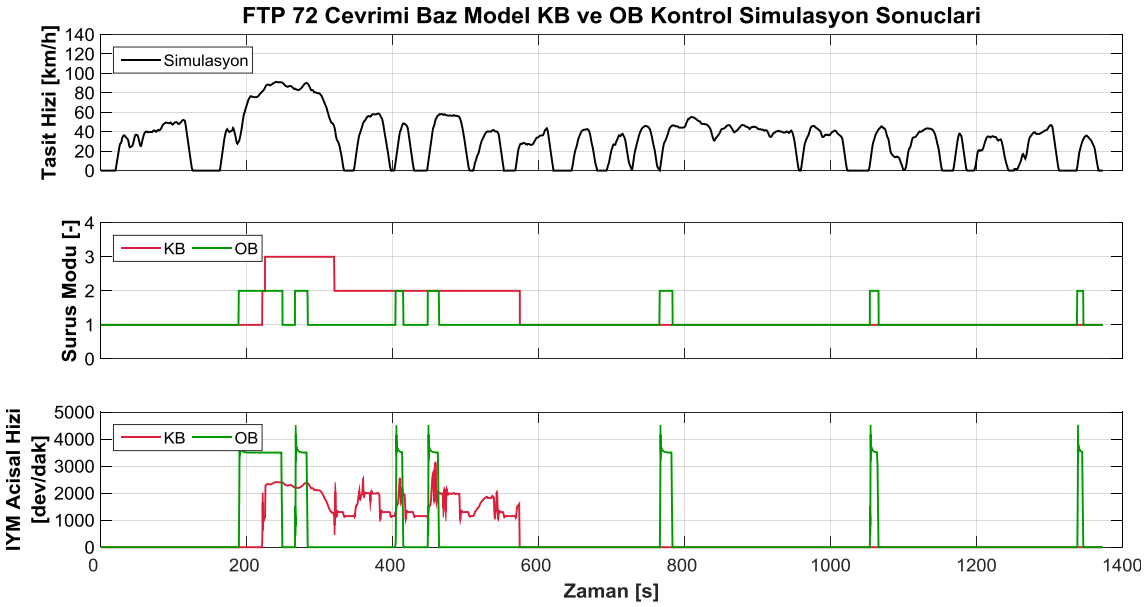
Şekil 4.34 WLTC çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

4.1.4 FTP-72 Test Çevrimi Simülasyon Sonuçları

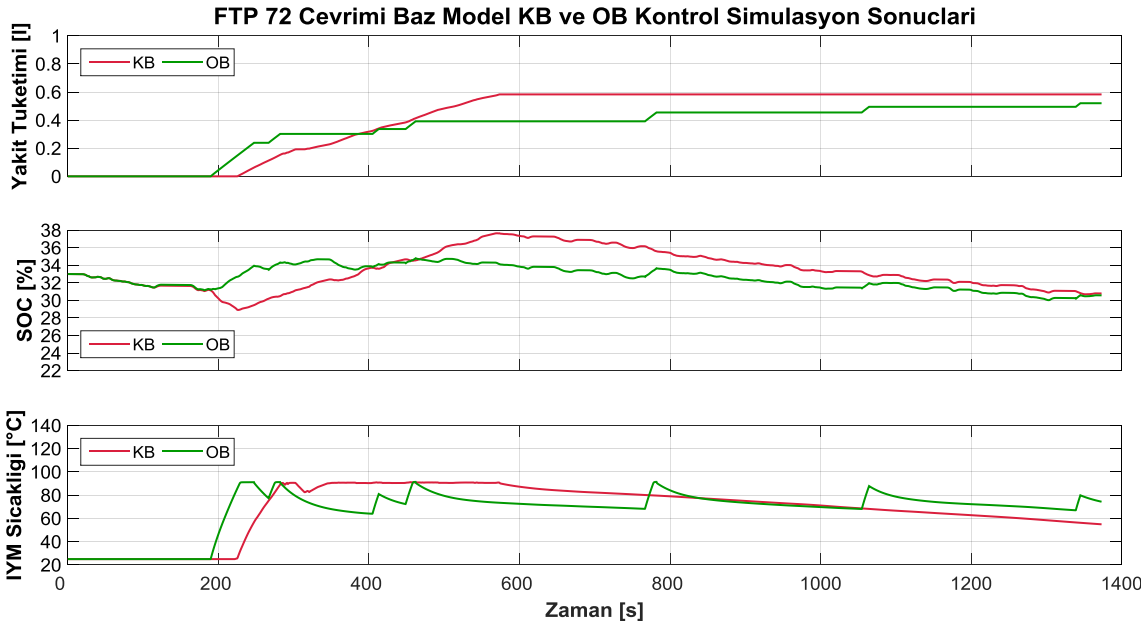
FTP-72 çevriminde yapılan test simülasyonunda WLTC ve NEDC test çevrimlerinden farklı olarak soğuk motor şartında simülasyon başlatılmıştır. Düşük, orta ve yüksek hız karakteristiklerine sahip olan çevrimde, ayrıca dinamik programlama yönteminde kullanılan SOC durum değişkeni ve İYM torku kontrol

değişkeni ayrıklaştırma oranları farklı değerler kullanılarak simüle edilmiş ve SOC yörüngesi, yakıt tüketimi parametreleri değerlendirilmiştir.

FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi için yapılan simülasyonlarda İYM, SOC kademesi değişimi parametreleri Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Şekil 4.35'te gösterilen sürüş modu incelendiğinde kural bazlı kontrol stratejisinde çoğunlukla e-sürüş olmak üzere seri ve paralel hibrit sürüş modu da kullanılmıştır. Burada kural bazlı kontrolde e-sürüş modundan sonra yüksek hızlı bölgede direkt olarak paralel moda geçiş gözlemlenmiş, Şekil 4.36'da gösterilen SOC durumu incelendiğinde ise paralel sürüş talebinden önce SOC seviyesinin ciddi miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca soğuk şartlarda çalışmaya başlayan İYM'nin ısınarak yüksek termal verim sağlayan sıcaklıklara ulaşması paralel hibrit modu aktifleştiren diğer bir unsurdur. Paralel hibrit sürüş modu, İYM sıcak motor koşuluna ulaşıncaya ve SOC seviyesi kritik seviyenin üzerine çıkana kadar devam etmiş daha sonra yerini seri hibrit moda bırakarak geri kalan orta hızlı çevrim profilinde batarya tahrik gücü için şarj edilmeye devam edilmiştir. Orta hızlı bölgede ise büyük çoğunlukla e-sürüş moduyla bataryada depolanan enerji kullanılmıştır. Yine aynı durum için optimizasyon bazlı kontrol incelendiğinde, orta hızdan yüksek hız bölgesine geçişin başlangıcında, İYM seri hibrit mod için çalıştırılmış, daha sonra İYM sıcak motor koşulunu sağlayıncaya kadar SOC seviyesine bakılmaksızın çalıştırılmıştır. Daha sonrasında sıcak motor ara ara çalıştırılıp seri hibrit modda batarya şarj ederek elektrik motorlarıyla taşıt tahriği devam etmiştir. Şekil 4.38'de gösterilen İYM açısal hızları incelendiğinde kural bazlı kontrolde paralel ve seri hibrit modda İYM hızının değiştiği, aynı zamanda taşıt ivmelenmesine bağlı olarak seri hibrit modunda İYM hızının arttığı gözlemlenmiştir. Buradan İYM'nin seri hibrit modda olmasına rağmen anlık taşıt tahrik torku talebine göre çalışma noktasında değişiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Aynı durumda optimizasyon bazlı kontrol stratejisi incelendiğinde, seri hibrit modda devam eden sürüşlerde İYM açısal hızının sabit bir seviyede (3500 dev/dak) kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.36'da gösterilen yakıt tüketimi incelendiğinde ise, paralel ve seri hibrit modda uzun süreli İYM çalıştırması gerektiren kural bazlı kontrol stratejisindeki yakıt tüketiminin, optimizasyon bazlı kontrolde gerçekleşen yakıt tüketimine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



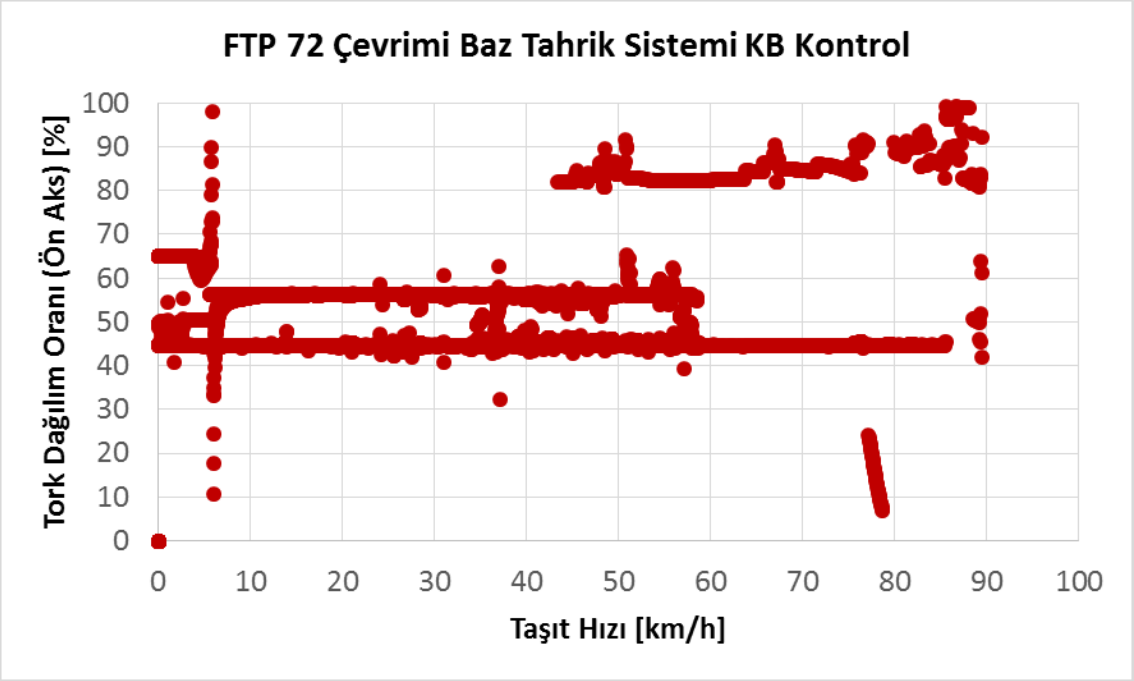
Şekil 4.35 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı



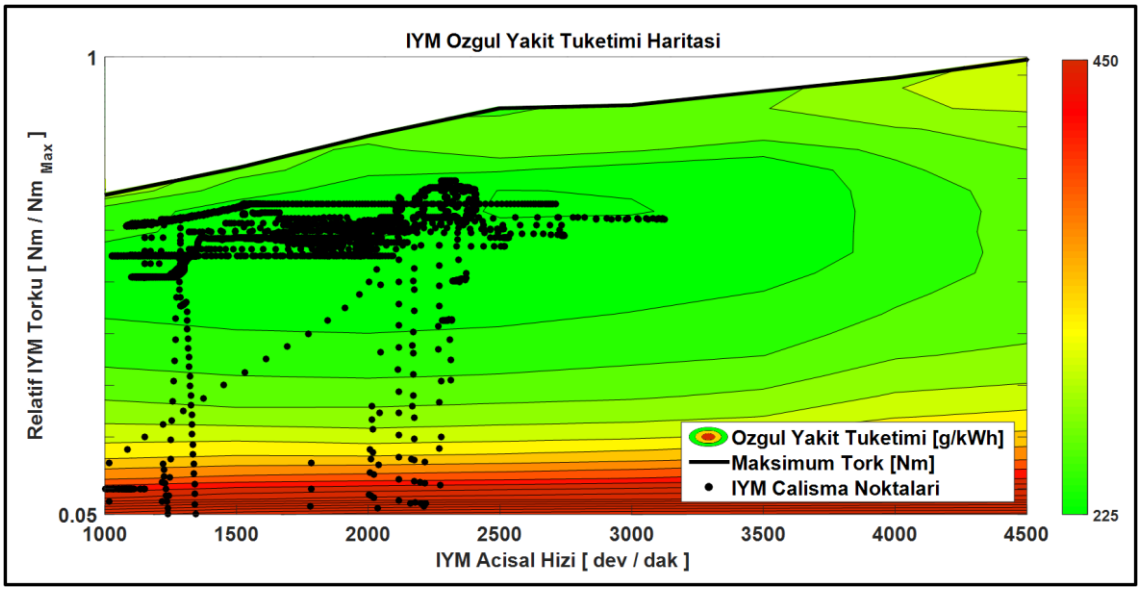
Şekil 4.36 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı

Kural bazlı kontrol için Şekil 4.38'de gösterilen İYM ve Şekil 4.39'da gösterilen genaratör paratmetreleri incelendiğinde, İYM'nin verimli bölgede çalıştırıldığı ancak verimli bölge dışında da çalıştığı noktalar gözlemlenmektedir.

Şekil 4.37'de gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde düşük hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı ağırlıklı olarak %45 - %57 civarında olmakla beraber, orta hız bölgelerinde ağırlıklı olarak %45 - %90 arasında yüksek hız bölgelerinde ise %5 - %100 arasında değişmektedir.

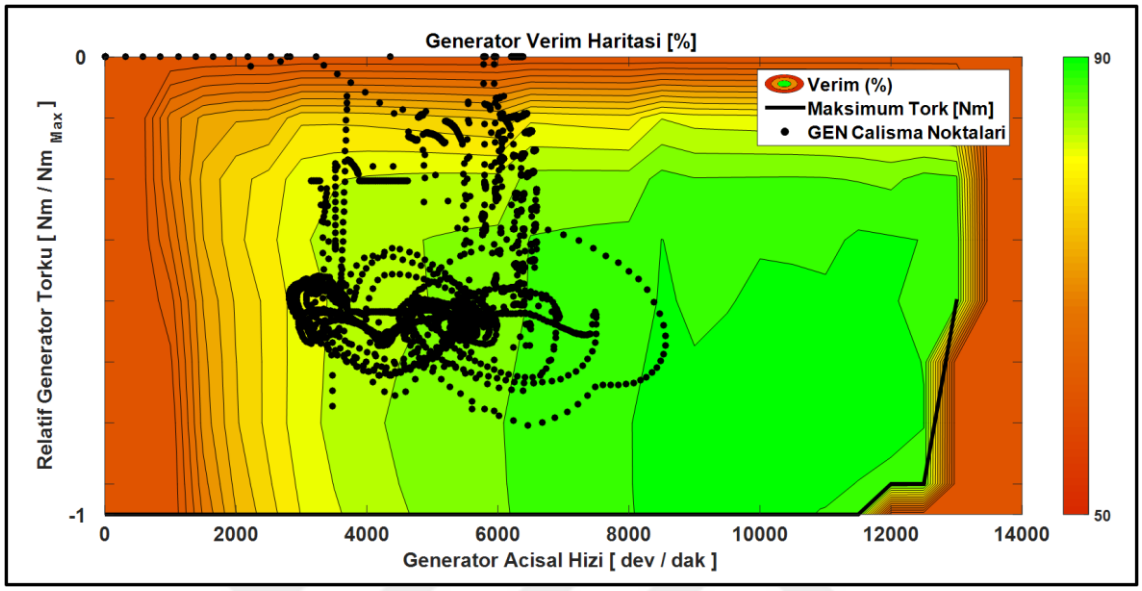


Şekil 4.37 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları



Şekil 4.38 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

Ayrıca generatör çalışma noktaları gözlemlendiğinde (Şekil 4.39) generatörün en verimli bölge (>%90) dışında çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu durum seri hibrit modda direkt olarak sistem verimini, dolaylı yoldan ise bataryayı şarj etmek için harcanan enerjiyi dolayısıyla İYM çalışma süresini uzatmaktadır.

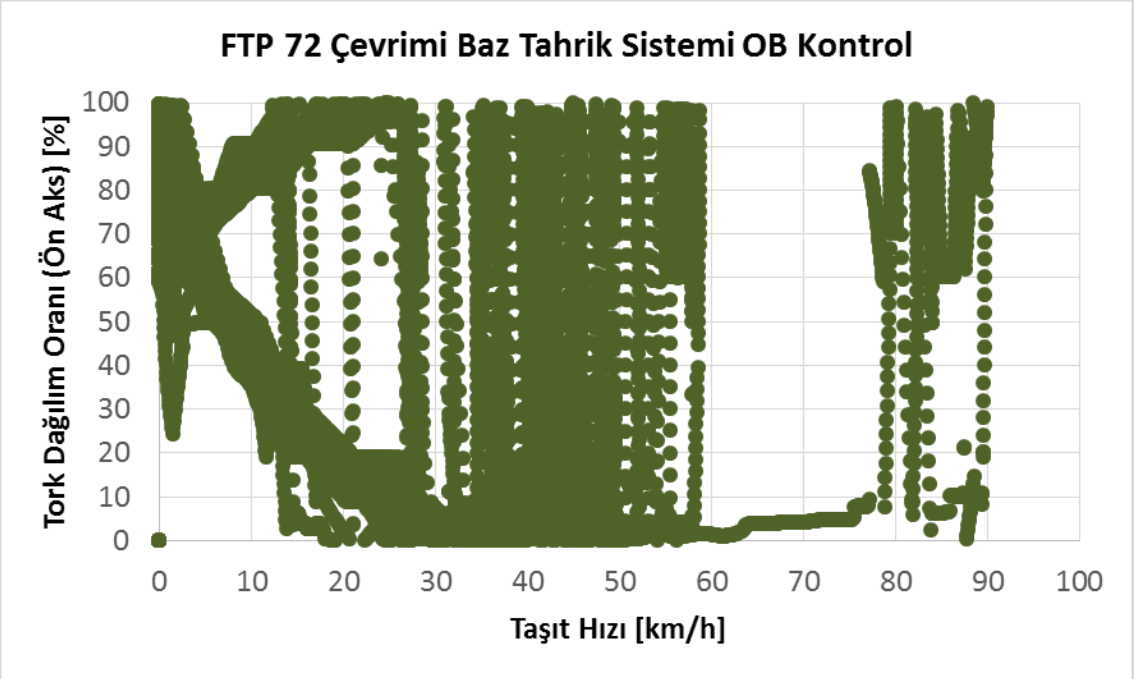


Şekil 4.39 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

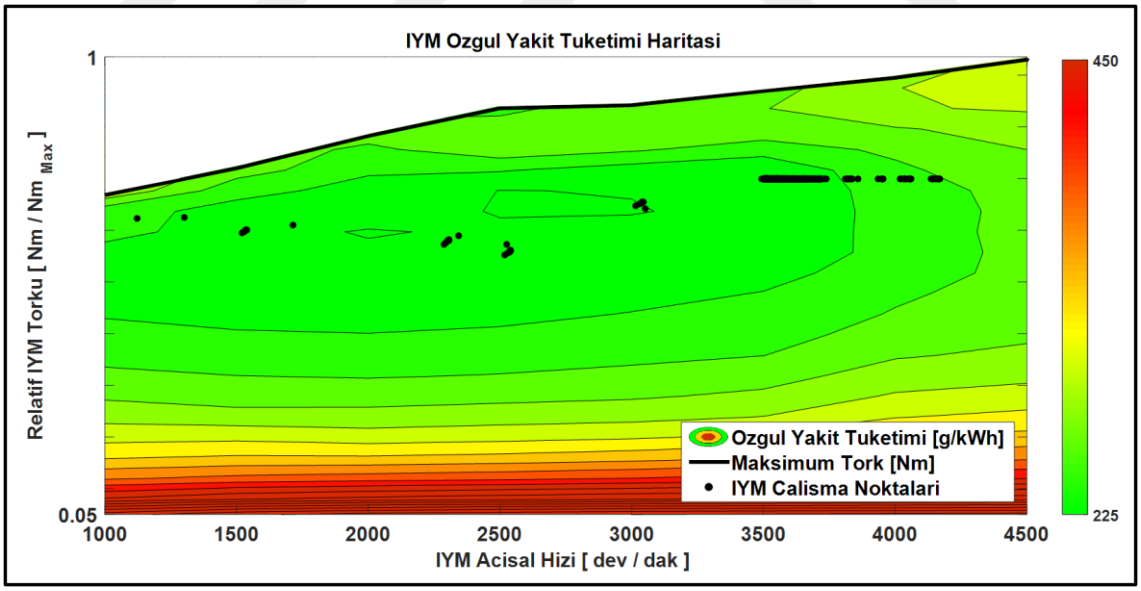
Aynı durum için optimizasyon bazlı kontrolde Şekil 4.41'de gösterilen İYM çalışma noktaları incelendiğinde, İYM'nin verimli bölgenin dışarısında ancak sabit bir bölgede çalıştığı gözlemlenmektedir. İYM çalışmasında sürekli seri hibrit modunda çalışan sistemde generatör verimi yakıt tüketimi açısından önem taşımaktadır. Şekil 4.42'de gösterilen çalışma noktaları incelendiğinde generatörün en verimli bölgede çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu sayade batarya şarjı ve teker tahriği sırasında toplam sistem verimi yüksek tutulmuş ve bataryayı şarj etmek için gereken İYM çalışma süresi kısaltılmıştır. İYM yakıt tüketimi açısından en verimli bölgede çalışmamasına rağmen az süre ile çalışması ve enerji iletiminde toplam sistem veriminin yüksek tutulması yakıt tüketimini azaltmış ve sonuç olarak kural bazlı kontrol stratejisine göre çevrim sonunda aynı SOC seviyesinde daha az yakıt tüketimi sağlanmıştır.

Şekil 4.40'ta gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde tüm hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı büyük çoğunlukla %0 - %100 arasında, orta hız ve yüksek hız bölgeleri arasında ise %0 - %10 arasında

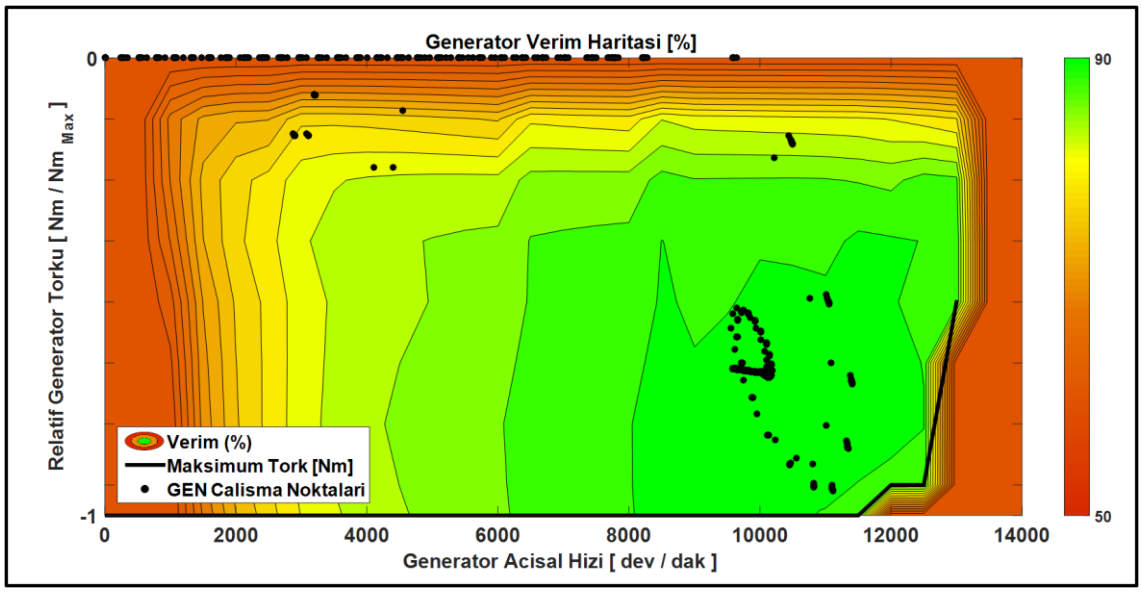
değişim göstermektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.40 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları

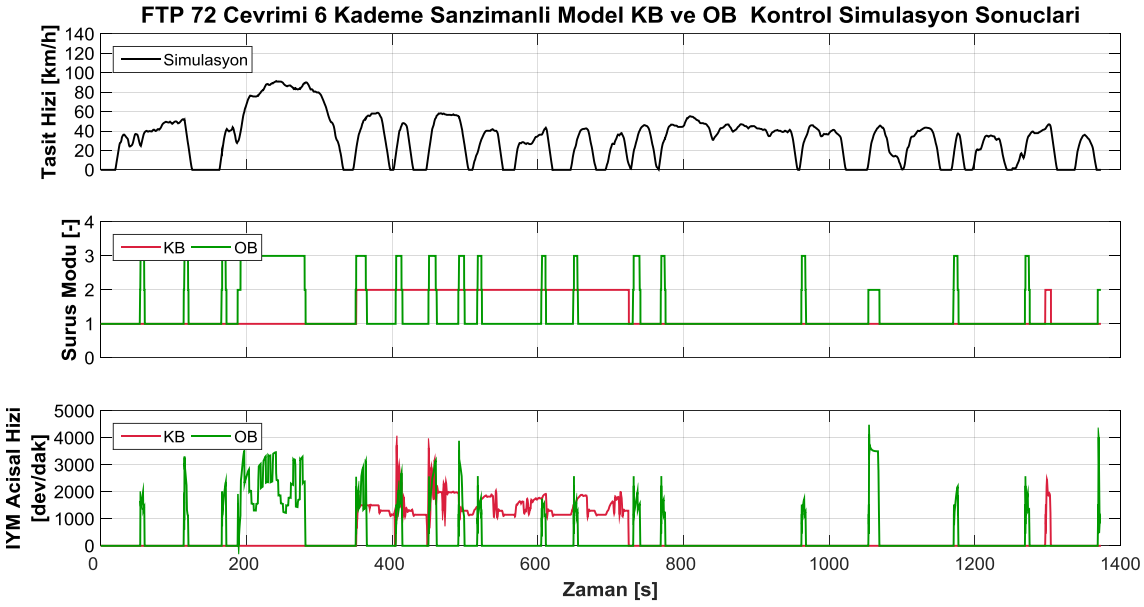


Şekil 4.41 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

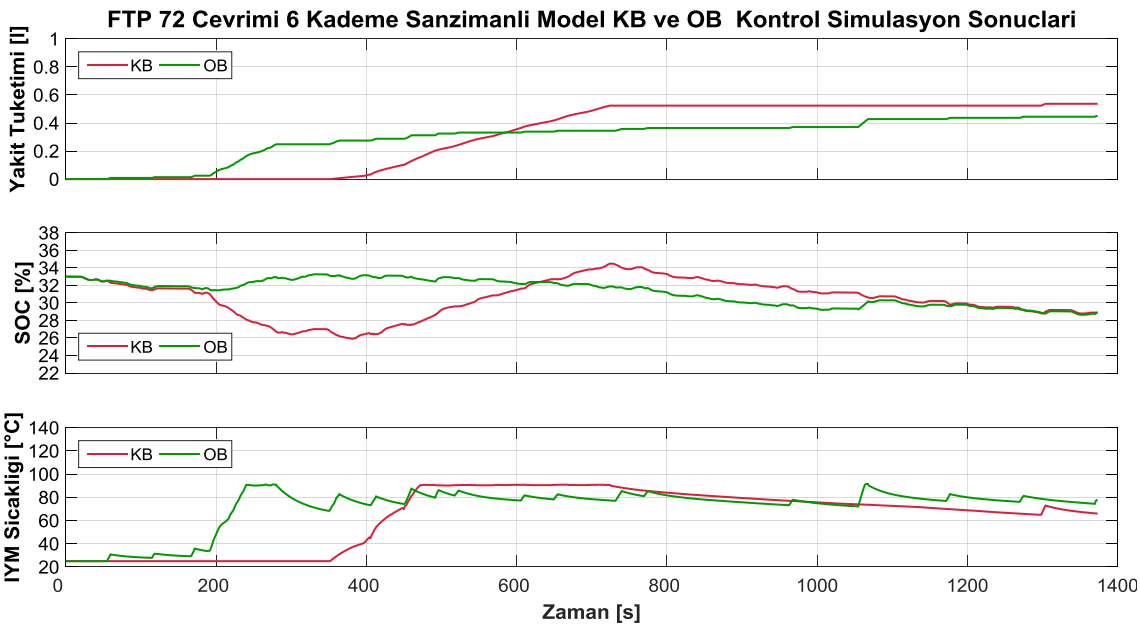


Şekil 4.42 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

Baz tahrik sisteminde diğer çevrimlerde olduğu gibi paralel hibrit modda İYM açısal hız kontrolünü sağlamak için şanzımanlı tahrik sistemi de FTP-72 çevriminde simüle edilmiştir. Şekil 4.43'te gösterilen sürüş modu incelendiğinde, kural bazlı kontrolde bu sefer yüksek hız bölgesinde sadece seri hibrit mod tercih edilmiş ve optimizasyon bazlı kontrolde ise çoğunlukla e-sürüş ve paralel mod kullanılmıştır.



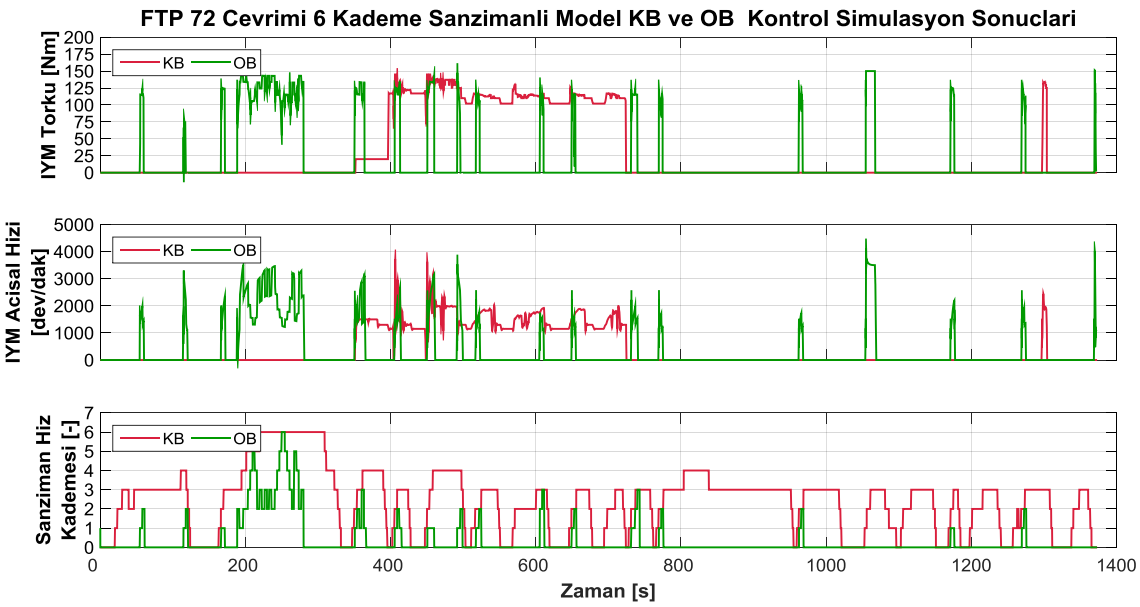
Şekil 4.43 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi sürüş modu ve İYM açısal hızı



Şekil 4.44 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi yakıt tüketimi, SOC ve İYM sıcaklığı

İYM açısal hızları incelendiğinde ise kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol sistemlerinin her ikisinde de İYM açısal hızları 1000 – 3500 dev/dak arasında değişmektedir. Şekil 4.44'te gösterilen SOC yörüngesi incelendiğinde kural bazlı kontrol stratejisi e-sürüş modunda bataryada depolananan elektrik enerjisini kullanrak SOC seviyesini düşürmüş ve devamında seri hibrit modunu aktif ederek SOC seviyesini başlangıç SOC seviyelerine kadar çıkartmıştır. Daha sonra bu depolanan enerjiyi tekrar e-sürüş modunda düşük hızlarda harcamıştır. Optimizasyon bazlı kontrolde ise soğuk şartta başlayan motoru ısıtmak amacıyla yüksek hız profiline geçişteki ivmelenmeden faydalanarak motoru termal olarak verimli alanda kadar ısıtmış ve bu sırada bataryayı şarj etmiştir. Sonrasında düşük hız bölgelerinde tekrar SOC seviyesini koruyarak paralel ve seri hibrit modlarda İYM ara ara çalıştırılmıştır.

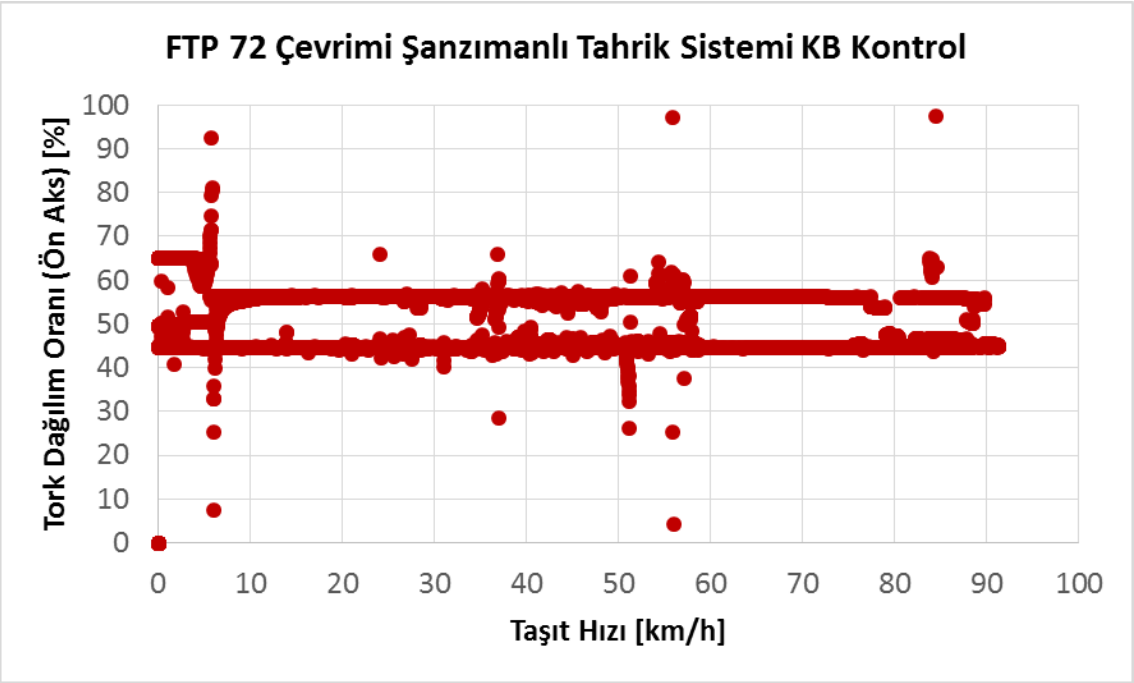
Şekil 4.45'te gösterilen İYM torku ve hız kademesi incelendiğinde, kural bazlı kontrolde, seri hibrit mod kullanılmasına karşın, taşıt hızına göre hız kademesini ayarlayan kontrol, tork değişimine neden olmuştur. Aynı şartlarda optimizasyon bazlı kontrolde ise İYM büyük çoğunlukla paralel hibrit modda çalıştırılmış ve hız kademesinin taşıt hızından bağımsız olarak değiştirilmesine rağmen İYM torkunun geniş aralıkta değiştiği gözlemlenmiştir.



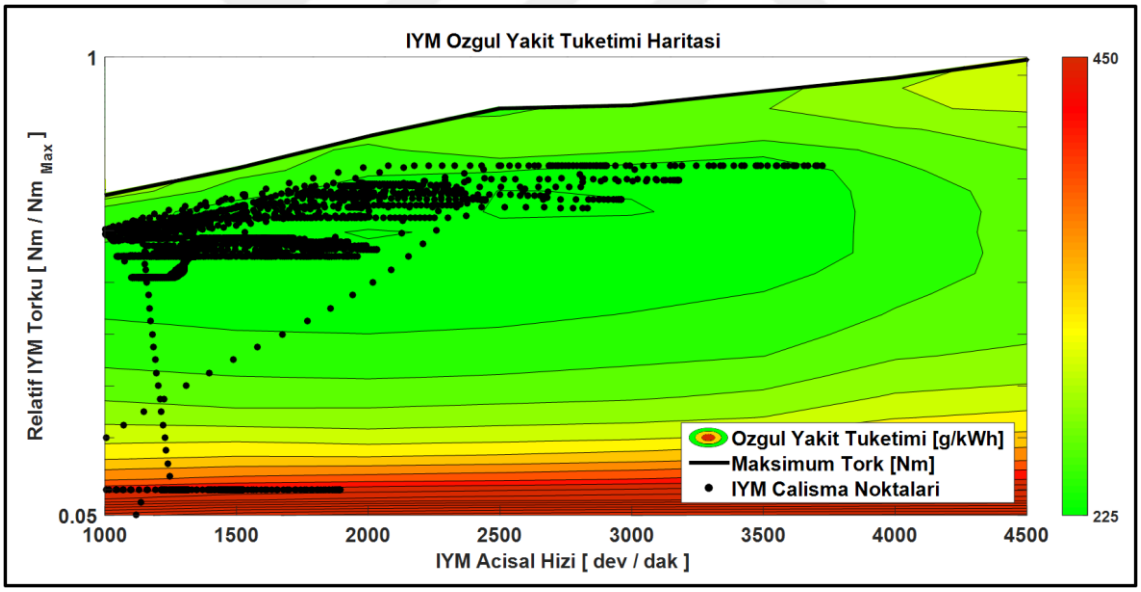
Şekil 4.45 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi şanzıman hız kademesi, İYM açısal hızı ve torku

Toplam yakıt tüketimi için Şekil 4.44 incelendiğinde kural bazlı kontrolde seri hibrit mod kullanılmasına rağmen, İYM'nin uzun süreli çalıştırılması yakıt tüketimini arttırmaktadır. Ayrıca Şekil 4.47'te gösterilen kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları incelendiğinde, İYM'nin en verimli bölgeler dışında hız kademesi değişimleri dolayısıyla yakıt tüketimi açısından daha az verimli bölgelerde de çalıştığı gözlemlenmiştir.

Şekil 4.46'da gösterilen kural bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranı incelendiğinde tüm hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı ağırlıklı olarak %45 - %57 civarında değişmektedir. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre ağırlıklı olarak sabit bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 4.46 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları

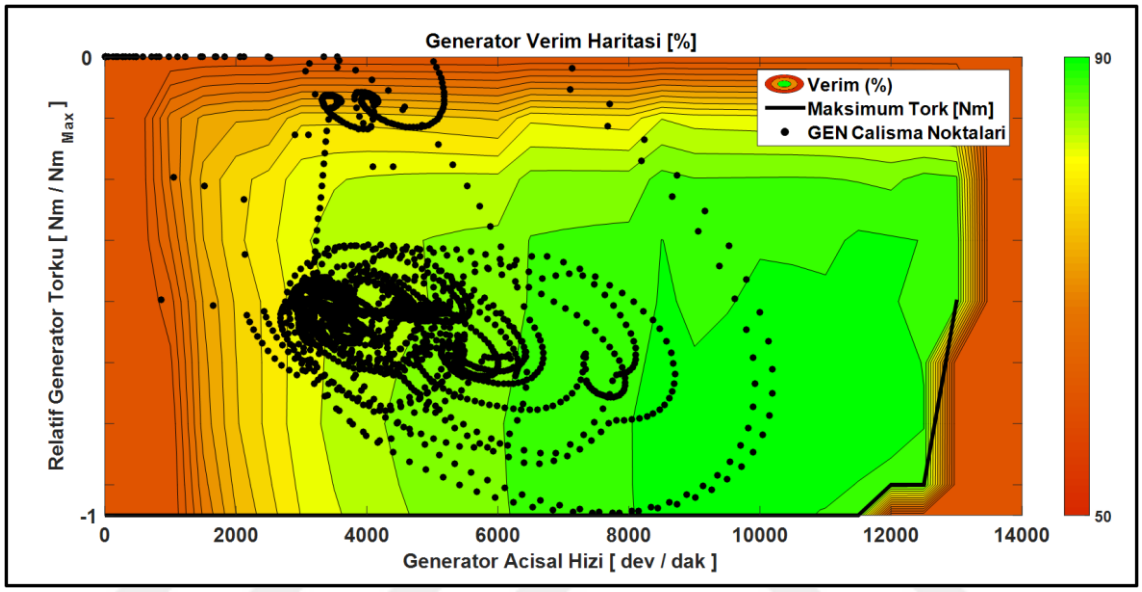


Şekil 4.47 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

Ayrıca Şekil 4.48'de gösterilen generatör çalışma noktaları incelendiğinde, generatörün çalışma süresi boyunca ağırlıklı olarak en verimli bölgenin (>%90) dışında çalıştığı görülmektedir. Bu durum yine seri hibrit operasyonunda toplam sistem verimini azaltmakta ve batarya şarjı için İYM'nin verimli bölgede çalışsa da

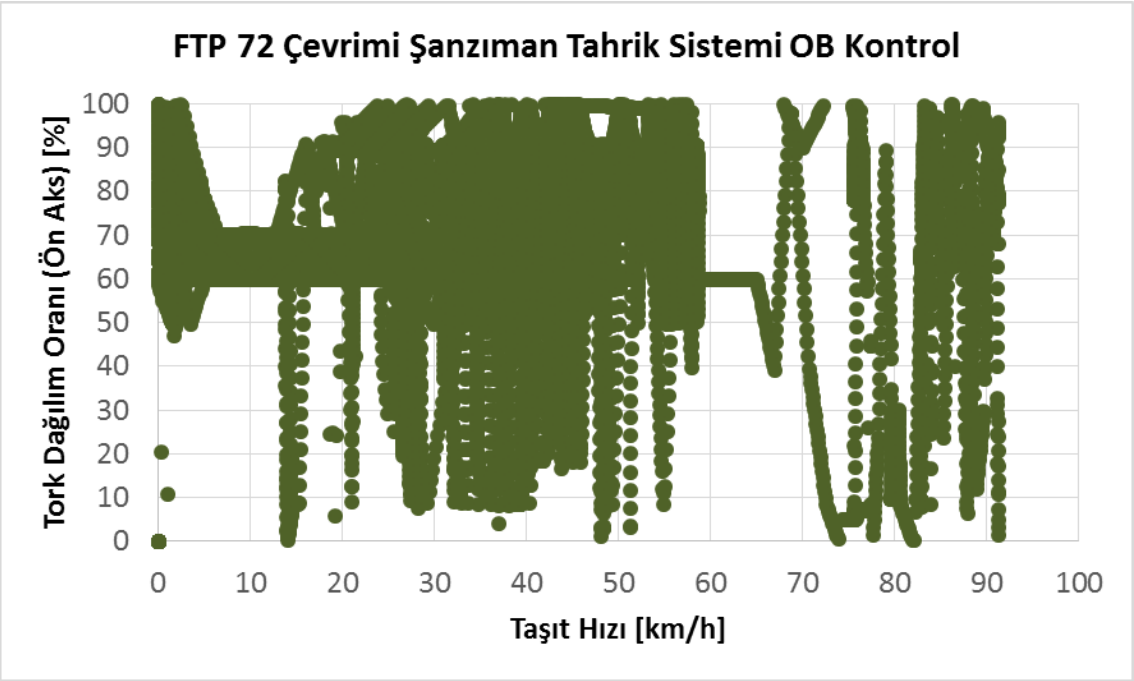
daha uzun süre çalışmasına neden olmaktadır. Bu durum, yakıt tüketiminin artışına neden olmaktadır.

Aynı durumda optimizasyon bazlı kontrol stratejisi incelendiğinde Şekil 4.47'de gösterildiği gibi İYM çalışma noktaları en verimli bölge ve dışında çalışmıştır. Paralel hibrit modun taşıt hızını takip etmesinden kaynaknan açısal hız ve tork değişimi İYM'nin farklı bölgelerde çalışmasına neden olmuştur.

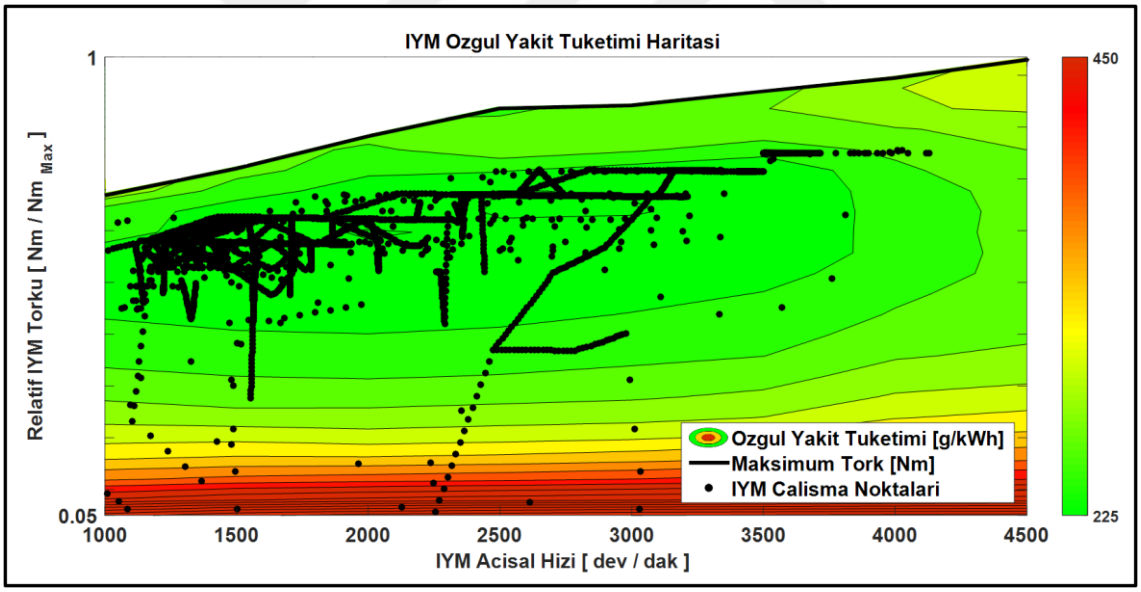


Şekil 4.48 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi kural bazlı kontrolde GEN çalışma noktaları

Şekil 4.49'da gösterilen optimizasyon bazlı kontrol için ön aks tork dağılım oranları incelendiğinde tüm hız bölgelerinde ön aks tork dağılım oranı ağırlıklı olarak %0 - %100 arasında dağılmaktadır. Tork dağılım oranları taşıt hızına göre dinamik bir karakteristik göstermektedir.



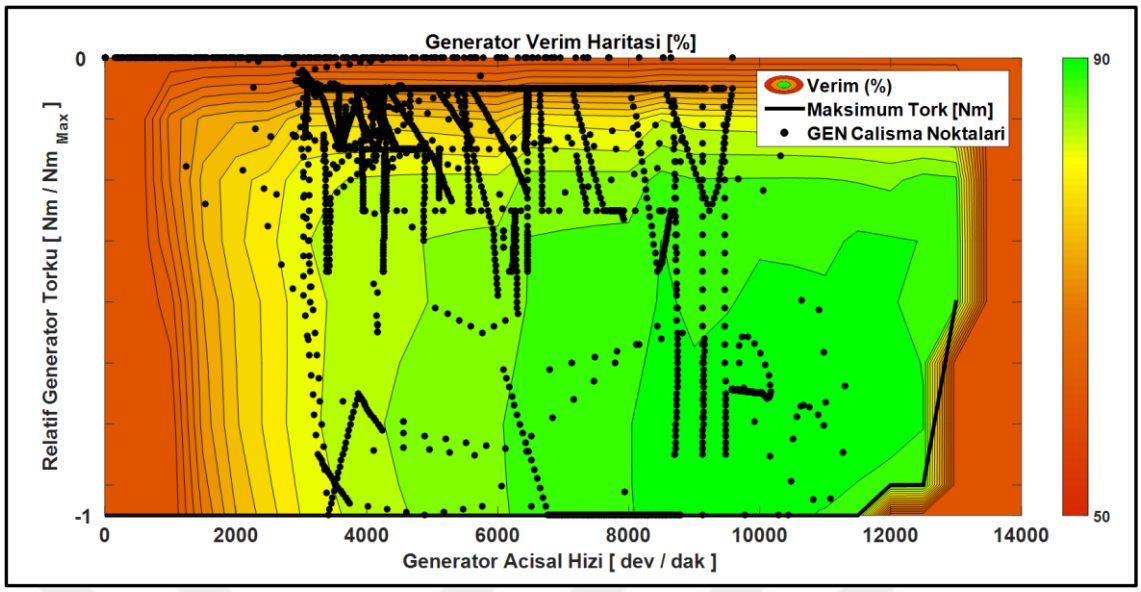
Şekil 4.49 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde ön aks tork dağılım oranları



Şekil 4.50 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

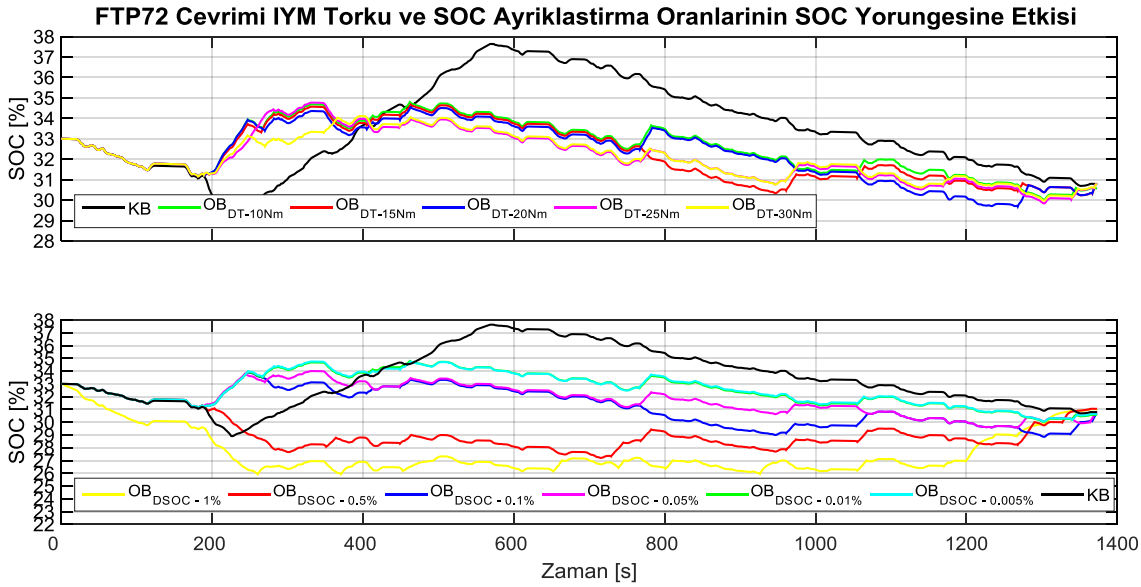
Ayrıca Şekil 4.51'de gösterilen optimizasyon bazlı kontrolde generatör çalışma noktaları incelendiğinde generatörün çoğunlukla, diğer çevrimlerde olduğu gibi, düşük tork ve düşük verim bölgelerinde çalıştığı gözlemlenmiş ve İYM'den elde edilen torkun büyük bir kısmının direkt olarak tahrik tekerlerine iletilerek enerji

çevirimi sırasında oluşan kayıpların azaltılmasının hedeflendiği görülmektedir.



Şekil 4.51 FTP-72 çevriminde şanzımanlı tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM çalışma noktaları

Yukarıda açıklandığı üzere dinamik programlama yöntemiyle yapılan enerji kontrolü optimizasyonunda kullanılan SOC durum ve İYM torku kontrol değişkeni FTP-72 test çevriminde farklı ayrıklaştırma oranları kullanılarak simüle edilmiştir.

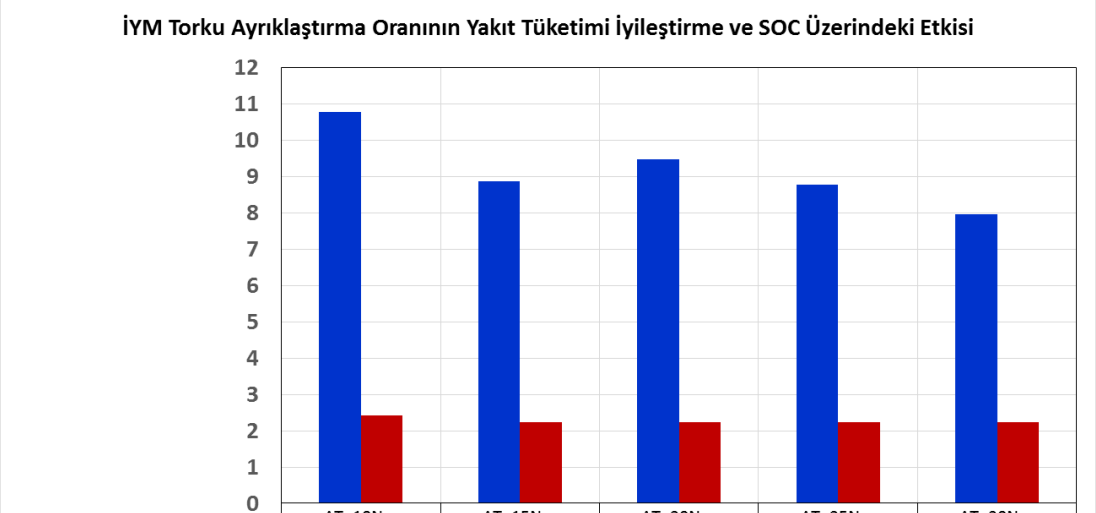


Şekil 4.52 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ve SOC ayrıklaştırma oranlarının SOC yörüngesine etkisi

SOC durum değişkeni 10 N·m ayrıklaştırılmış İYM torku aralığında 0,01%'den başlayarak %0,05, %0,1, %0,5, %1 için, İYM torku kontrol durum değişkeni ise %0,01 SOC ayrıklaştırma oranında 10 N·m'den başlayarak 15 N·m, 20 N·m, 25 N·m, 30 N·m aralığında simüle edilmiştir.

Şekil 4.52'de gösterilen ayrıklaştırma oranlarına göre SOC yörüngeleri incelendiğinde farklı İYM torku ayrıklaştırma oranlarında SOC yörüngeleri (üstteki grafik) değişmekle beraber genel olarak benzer karakteristikte yörüngeler izlemiştir.

Diğer taraftan farklı SOC ayrıklaştırma oranlarında SOC yörüngeleri (alttaki grafik) daha farklı yörüngeler tercih etmiştir. Her iki yörünge analizinde de son SOC durumları %1 SOC seviyesinde değişiklik göstermekdedir. SOC yörüngelerindeki değişimler yakıt tüketimini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan kontrol ve durum değişkenlerinin ayrıklaştırma oranlarının değişimi, toplam hesaplanacak durum sayılarını değiştirdiğinden optimizasyon sırasında hesaplama hızına önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. Şekil 4.53'te gösterilen grafikte bahsedilen parametreler üzerinde yapılan analizler paylaşılmıştır.

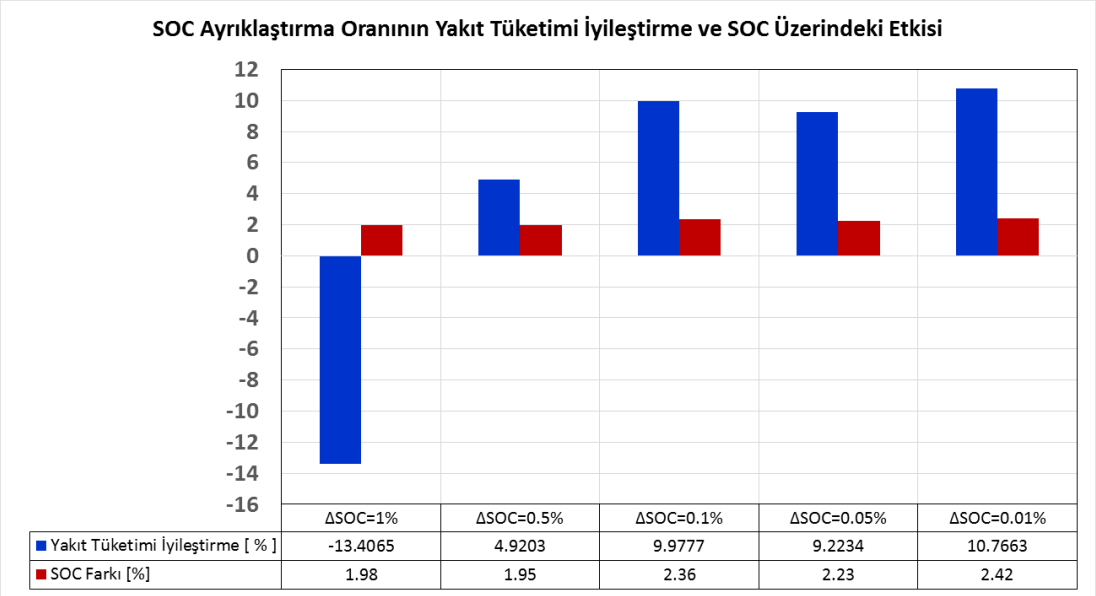


	ΔT=10Nm	ΔT=15Nm	ΔT=20Nm	ΔT=25Nm	ΔT=30Nm
Yakıt Tüketimi İyileştirme [%]	10.7663	8.8634	9.4634	8.7776	7.9719
SOC Farkı [%]	2.42	2.23	2.23	2.23	2.23

Şekil 4.53 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ayrıklaştırma oranının yakıt tüketimi ve son SOC üzerindeki etkisi

Şekil 4.53'te farklı İYM torkları ayrıklaştırma oranları için simülasyon sonucunda kural bazlı kontrolle yapılan simülasyonda elde edilen yakıt tüketimi ve son SOC

değerleri referans alınarak toplam yakıt tüketimindeki iyileşme ve son SOC seviyesindeki fark analiz edilmiştir. İYM torku ayrıklaştırma hassasiyeti azaldıkça (10 N·m'den 30 N·m'ye) toplam yakıt tüketimindeki iyileşme %10,76'dan, %9,97'ye kadar gerilemiştir. Son SOC seviyeleri arasındaki farka baktığımızda ise %2,32'lik bir fark olduğu ve önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür.

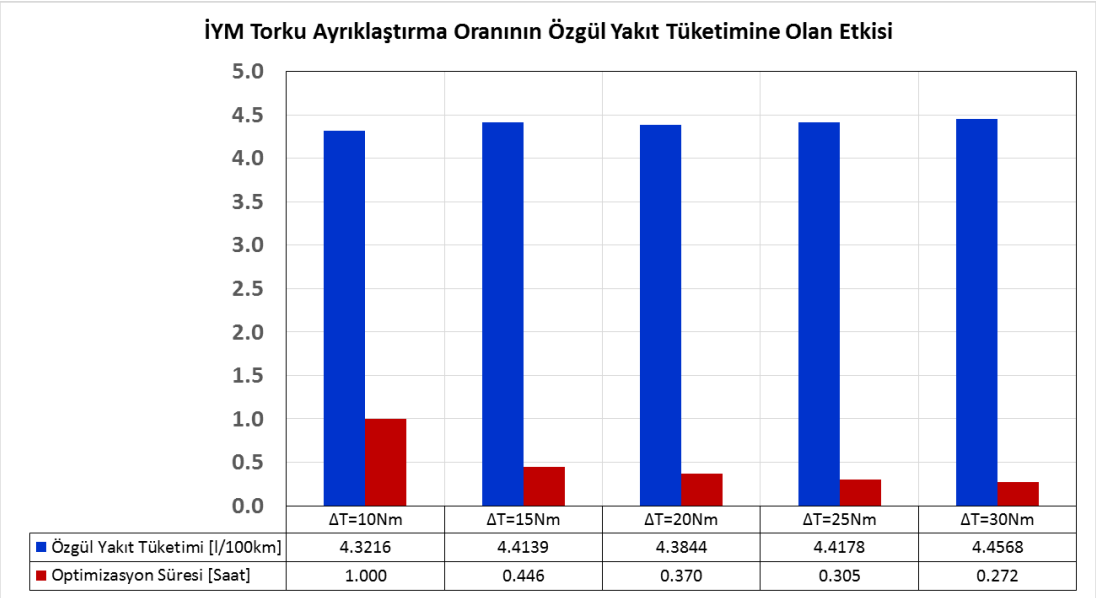


	ΔSOC=1%	ΔSOC=0.5%	ΔSOC=0.1%	ΔSOC=0.05%	ΔSOC=0.01%
Yakıt Tüketimi İyileştirme [%]	-13.4065	4.9203	9.9777	9.2234	10.7663
SOC Farkı [%]	1.98	1.95	2.36	2.23	2.42

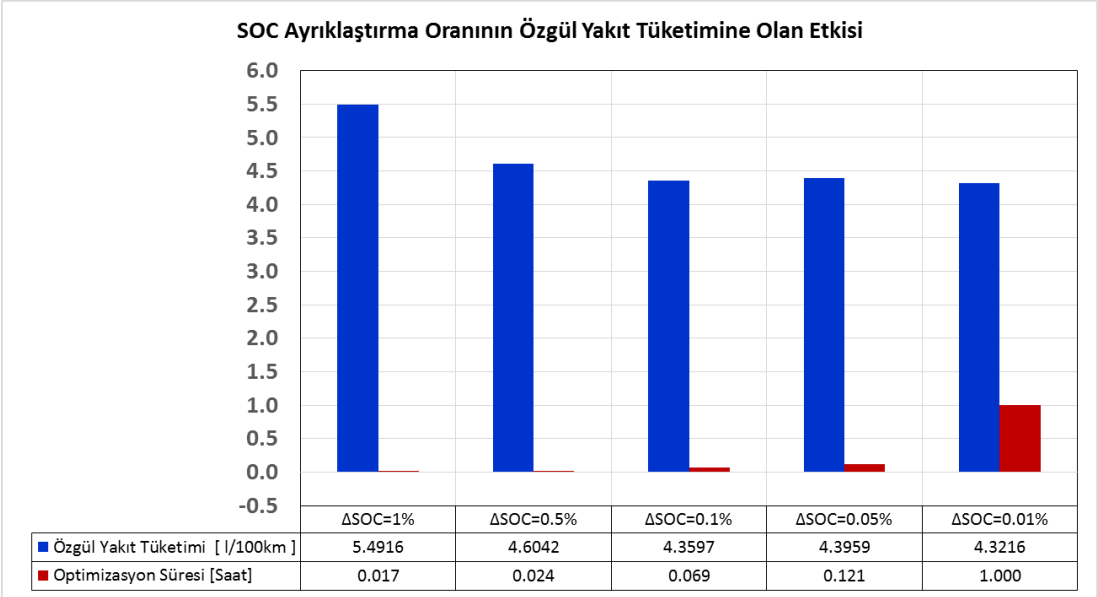
Şekil 4.54 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde SOC ayrıklaştırma oranının yakıt tüketimi ve son SOC üzerindeki etkisi

Şekil. 4.54'te ise SOC ayrıklaştırma hassasiyetinin artmasyla kural bazlı simülasyon sonuçlarına göre yakıt tüketimindeki iyileşme ve son SOC seviyesindeki fark analiz edilmiştir. SOC ayrıklaştırma hassasiyeti arttıkça (%1'den - %0,01'e) yakıt tüketimindeki iyileşme %-13,4'ten %10,76'ya kadar atmıştır. Son SOC seviyelerine bakıldığında ise %1,98'den %2,42'ye kadar artış göstermiş olup aradaki fark %0,5'nin altındadır.

Aynı şekilde özgül yakıt tüketimindeki iyileşme ve toplam hesaplama süresi için İYM torku ayrıklaştırma oranının etkisi Şekil 4.55'te ve SOC ayrıklaştırma oranının etkisi Şekil 4.56'da gösterilmiştir. İYM torku ayrıklaştırma hassasiyeti arttıkça özgül yakıt tüketimindeki iyileşme 4,4568 L/100km'den 4,3216 L/100km'ye azalmış, hesaplama hızı 0,272 saatten 1 saate artmıştır. SOC ayrıklaştırma hassasiyeti arttıkça özgül yakıt tüketimindeki iyileşme 5,4916 L/100km'den 4,3216 L/100km'ye azalmış, hesaplama hızı 0,017 saatten 1 saate artmıştır.



Şekil 4.55 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde İYM torku ayrıklaştırma oranının özgül yakıt tüketimi ve optimizasyon süresi üzerindeki etkisi



Şekil 4.56 FTP-72 çevriminde baz tahrik sistemi optimizasyon bazlı kontrolde SOC ayrıklaştırma oranının özgül yakıt tüketimi ve optimizasyon süresi üzerindeki etkisi

4.2 Sonuçlar ve Öneriler

Özet olarak tez çalışmasında kompleks hibrit tahrik sistemine sahip bir taşıtın baz tahrik sistemi ve 6 ileri hız kademeli şanzıman eklenmiş tahrik sistemi varyasyonu için enerji kontrol sistemi kural bazlı ve optimizasyon bazlı yaklaşımla modellenmiş, NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimlerinde simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon bazlı kontrolde, dinamik programlama metodu kullanılmış ve yakıt tüketiminde kural bazlı kontrol stratejisine göre yakıt tüketiminde iyileştirme hedeflenmiştir. Bunun yanında dinamik programlama sırasında kullanılan kontrol ve durum değişkenlerinden İYM torku kontrol değişkeni, SOC durum değişkeni, farklı ayrıklaştırma oranlarında FTP-72 test çevriminde simüle edilmiş ve sonuçlar yakıt tüketimi ve SOC durumu için incelenmiştir. Simülasyon testleri sırasında tüm tahrik mimarisi ve kontrol stratejisi varyasyonları için yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi SOC ilk ve son değerleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Özet olarak tez çalışmasında kompleks hibrit tahrik sistemine sahip bir taşıtın baz tahrik sistemi ve 6 ileri hız kademeli şanzıman eklenmiş tahrik sistemi varyasyonu için enerji kontrol sistemi kural bazlı ve optimizasyon bazlı yaklaşımla modellenmiş NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimlerinde simülasyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3 Simülasyon testleri yakıt tüketimi ve SOC sonuçları

Çevrim	**Tahrik Sistemi**	**Kontrol Sistemi**	**SOC İlk [%]**	**SOC Son [%]**	**Yakıt Tüketimi [L]**	**Özgül Yakıt Tüketimi [L/100km]**
NEDC	Baz	Kural Bazlı	33	30,03	0,4937	4,5227
		Optimizasyon Bazlı	33	30,01	0,4555	4,1712
	Şanzımanlı	Kural Bazlı	33	27,44	0,4313	3,9466
		Optimizasyon Bazlı	33	27,41	0,3455	3,166
WLTC	Baz	Kural Bazlı	33	33,38	1,4531	6,2333
		Optimizasyon Bazlı	33	33,13	1,3637	5,8931
	Şanzımanlı	Kural Bazlı	33	23,72	1,1846	5,0779
		Optimizasyon Bazlı	33	23,73	0,9885	4,2445
FTP-72	Baz	Kural Bazlı	33	30,79	0,5833	4,8399
		Optimizasyon Bazlı	33	30,58	0,5205	4,3216
	Şanzımanlı	Kural Bazlı	33	28,89	0,537	4,4508
		Optimizasyon Bazlı	33	28,88	0,4503	3,7423

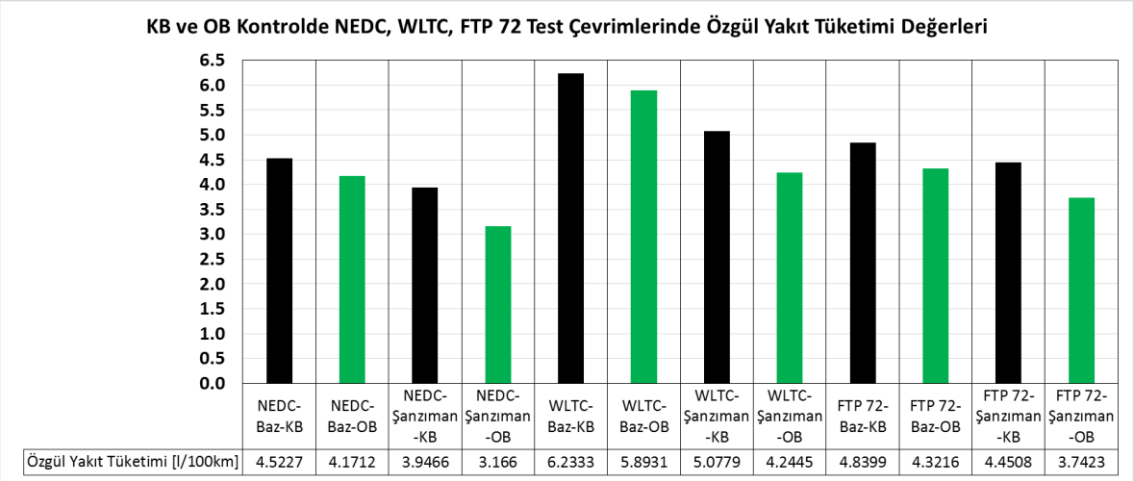
Tablo 4.3'te gösterildiği üzere çevrim sonunda elde edilen toplam yakıt tüketimleri kural bazlı kontrolde, baz tahrik sistemi ve şanzımanlı tahrik sisteminde ayrı değerlendirerek, optimizasyon bazlı kontrole göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer taraftan son SOC seviyelerindeki fark analiz edildiğinde optimizasyon bazlı stratejinin son SOC değerininin ortama %0,085 daha az olduğu görülmektedir ve ihmal edilebilir seviyede olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 4.4 Optimizasyon bazlı kontrolde özgül yakıt tüketimi ve son SOC sonuçlarının kural bazlı kontrole göre farkı

Çevrim	**Tahrik Sistemi**	**OB Kontrolde KB Kontrole Göre Son SOC'deki Fark [%]**	**OB Kontrolde KB Kontrole Göre Özgül Yakıt Tüketimindeki İyileşme [%]**
NEDC	Baz	-0,02	7,78
	Şanzımanlı	-0,03	19,78
WLTC	Baz	-0,25	5,46
	Şanzımanlı	-0,01	16,41
FTP-72	Baz	-0,21	10,71
	Şanzımanlı	-0,01	15,92

Tablo 4.4'te ise simülasyon testleri sonucunda elde edilen son SOC ve özgül yakıt tüketimi sonuçları, kural bazlı kontrol stratejisinden elde edilen sonuçlar referans alınarak optimizasyon bazlı kontrol sonuçları arasındaki fark değerlendirimiştir. son SOC durumu arasındaki fark %-0,01 ile %-0,25 arasında değişmekte ve yukarıda açıklandığı gibi ortalama %0,085 daha az olduğu hesaplanmıştır. Özgül yakıt tüketimindeki iyileşme ise, NEDC çevriminde kural bazlı kontrole göre baz tahrik sisteminde %7,78, şanzımanlı tahrik sisteminde %19,7 olarak, WLTC çevriminde kural bazlı kontrole göre baz tahrik sisteminde %5,46, şanzımanlı tahrik sisteminde %16,41 olarak, FTP-72 çevriminde kural bazlı kontrole göre baz tahrik sisteminde %10,71, şanzımanlı tahrik sisteminde %15,92 olarak hesaplanmıştır. Burada özgül yakıt tüketimlerindeki iyileştirme değerlendirildiğinde FTP-72

çevriminde baz tahrik sistemi için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen yüksek iyileştirme oranı soğuk motor şartından sıcak motor şartına geçişteki optimizasyonun etkisini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, şanzımana sahip modellemede gerçekleşen yüksek yakıt tüketimi iyileştirme oranları teorik bir yaklaşımla kurgulanmış olup, pratik uygulamada daha yüksek güç aktarma verim kayıpları ile daha düşük iyileştirme sonuçlarının elde edilme ihtimali bulunmaktadır.



Şekil 4.57 Kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrolde NEDC, WLTC, FTP-72 test çevrimlerinde özgül yakıt tüketimi değerleri

Şekil 4.57'de tüm simülasyon sonuçlarından elde edilen yakıt tüketimi sonuçları gösterilmiştir. Burada, özellikle şanzımanlı sistemin özgül yakıt tüketiminde kural bazlı veya optimizasyon bazlı kontrol uygulaması farketmeksizin, baz sisteme göre özgül yakıt tüketimi açısından avantajı açıkça görülmektedir. Özgül yakıt tüketimi değerleri incelendiğinde 3.1 L/100km ile 6.23 L/100km arasında değiştiği görülmekte ve SUV sınıfında bir taşıt için belirtilen çevrimlerde kabul edilebilir değer aralığındadır.

Tez çalışması boyunca izlenen adımlar ve elde edinilen tüm verilere dayanarak sonuçlar aşağıda özetlenmiştir,

1. Kompleks tahrik mimarisine sahip taşıt sistemi MATLAB Simulink ® programında modellenmiştir. Model, kontrol modeli ve fiziksel model olmak üzere iki bölüme ayrılmış kontrol bloğunda kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrol için iki ayrı alt modül geliştirilmiştir.

2. Enerji kontrol stratejisini optimize etmek için dinamik programlama yöntemi kullanılmış. Dinamik programlamada gerekli olan kontrol ve durum değişkenleri belirlenmiştir. Kontrol değişkenleri olarak, İYM motor açısal hızı, torku, bir sonraki sürüş modu ve tork dağılım oranı, durum değişkeni olarak ise batarya şarj durumu (SOC) ve anlık sürüş modu seçilmiştir. Sistemin toplam maliyeti ise yakıt tüketimi olarak formüle edilmiştir.
3. Taşıtın kullandığı tahrik sisteminin yanında taşıta 6 ileri hız kademeli şanzıman eklenerek ikinci bir tahrik sistemi varyasyonu oluşturulmuş, oluşturulan varyasyonla beraber dinamik programlamada şanzıman hız kademesi kontrol değişkeni olarak eklenmiştir.
4. Baz tahrik sistemine ve şanzımanlı tahrik sistemine sahip modeller MATLAB ® programında dinamik programlama kodlaması yapılmış ve optimizasyon bazlı kontrol stratejileri hesaplanmıştır.
5. Optimizasyon bazlı ve kural bazlı kontroller NEDC, WLTC, ve FTP çevrimlerinde simüle edilmiş sonuçlar yakıt tüketimi, SOC yörüngesi, ön arka aks tork dağılım oranı, hız kademesindeki değişim, İYM açısal hızı, torku ve sıcaklığı parametreleri için değerlendirilmiştir.
6. Baz tahrik sistemi için yapılan simülasyonlarda, kural bazlı kontrol stratejisinde sürüş modu olarak yüksek hızlı bölgelerde paralel hibrit modu kullanılmış, İYM açısal hızının taşıt hızına bağımlı olarak değişmesi sonucu, İYM yakıt tüketimi açısından verimli bölgelerin dışında çalıştırılmıştır. Seri hibrit modda çalıştığı durumlarda ise İYM yakıt tüketimi açısından tam verimli bölgede çalışmasına rağmen generatörün verimli bölge dışında çalışması toplam sistem verimini düşürerek batarya şarjı için daha uzun İYM çalışmasına neden olmuştur.
7. Baz tahrik sistemi için yapılan simülasyonlarda, optimizasyon bazlı kontrol stratejisinde sürüş modu olarak e-sürüş ve seri hibrit modu kullanılmış. Seri hibrit modda İYM yakıt tüketimi açısından en verimli bölgenin dışında çalışmasına rağmen generatör yüksek verimli bölgede çalışmış ve sistem verimi yükselmiştir. Toplamda NEDC, WLTC ve FTP-72 testlerinde özgül yakıt tüketiminde kural bazlı kontrole göre %7,78 ile %10,71 arasında iyileşme sağlanmıştır.

8. Şanzımanlı tahrik sistemi için simülasyonlarda, kural bazlı kontrol stratejisi, taşıt hızına göre değişen hız kademesi değişimini takip ederek yüksek hızlarda ve ani tork taleplerinde seri hibrit modu tercih etmiş, seri hibrit modda İYM'yi yakıt tüketimi açısından en verimli bölgelerde çalıştırmıştır. Ancak generatör, en verimli bölgenin dışında çalıştığından toplam sistem verimi azalmıştır.
9. Şanzımanlı tahrik sistemi için simülasyonlarda, optimizasyon bazlı kontrol stratejisi, büyük çaoğunlukla seri hibrit mod yerine paralel hibrit modu kullanmış, paralel hibrit modda, hız kademelerini değiştirerek İYM'yi yakıt tüketimi açısından verimli bölgelerde çalıştırmıştır. İYM'den elde edilen torkun büyük bir kısmını ön aksa doğrudan tahrik torku olarak ileterek enerji çevrimi sırasında meydana gelen çevrim kayıplarını (mekanik-elektrik-elektrik-mekanik) önlemiştir. Tahrik torkuyla beraber, İYM'yi en iyi yakıt tüketimi bölgesinde çalıştırmak için üretilen tork, generatörde elektrik enerjisine çevrilerek SOC'yi istenen seviyede korumak için kullanılmıştır. Toplamda NEDC, WLTC ve FTP-72 testlerinde özgül yakıt tüketiminde kural bazlı kontrole göre %15,92 ile %19,78 arasında iyileşme sağlanmıştır.
10. Kural bazlı ve optimizasyon bazlı kontrollerde akslar arasındaki tork dağılım oranınna bakıldığında, kural bazlı kontrolde ön aks dağılım oranı hıza bağlı olarak genellikle %45 - %57 arasında statik bir karakteristik göstermiştir. Optimizasyon bazlı kontrolde ise ön aks dağılım oranı hıza bağlı olarak genellikle %0 - %100 arasında dinamik bir karakteristik göstermiştir.
11. Dinamik programlama ile yapılan optimizasyonlarda, kullanılan değişkenlerin ayrıklaştırma hassasiyetinin optimizasyon sonuçlarına olan etkisi gözlemlenmiştir. İYM torku kontrol değişkeni ve SOC durum değişkeni farklı ayrıklaştırma hassasiyetlerinde FTP-72 test çevriminde baz tahrik sistemi için simüle edilmiştir. İYM torku için ayrıklaştırma hassasiyetinin artması sonucu kural bazlı simülasyon sonucu referans alınarak yakıt tüketiminde %7,97'den %10,76'ya iyileşme sağlandığı gözlemlenmiş. SOC için ayrıklaştırma hassasiyetinin artmasıyla yakıt tüketiminde %-13,40'tan %10,76'ya varan iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca her iki değişken için

ayrıklaştırma hassasiyetinin artmasıyla optimizasyon süresinde ciddi oranda artışlar gözlemlenmiştir.

Yukarda test çalışmasının adımları ve elde edilen sonuçalar özetlenmiştir. Özet olarak kural bazlı kontrol sisteminin limitleri, yeteneklerinin kısıtlılığı, dinamik programlama yoluyla optimizasyon bazlı kontrol strajesinde tespit edilebilmekte ve yakıt tüketiminde belirli çevrimler için kayda değer iyileşmeler sağlanabilmektedir. Ayrıca tahrik mimarisi seçiminde, dinamik programlama metodu kullanılarak belirli test çevrimleri için optimize edilen kontrol kullanılarak elde edilen sonuçlar analiz edilerek, tahrik mimarisinde kullanılan donanımların kapasiteleri tekrar değerlendirilebilir, yeni donanımlar eklenebilir veya kapasiteler değiştirilebilir. Kısaca yöntem en uygun tahrik sistemi için optimizasyon yapma imkanı tanımaktadır.

Dinamik programlama yönteminin en büyük dejavantajı olan araç üzerinde çevrimiçi olarak sisteme uygulanamaması, yöntemin sadece değerlendirme için kullanmakla sınırlamaktadır. Diğer taraftan çevrimiçi kullanılan kural bazlı kontrol stratejilerinin eksikliklerinin ve yeteneklerinin analizi optimizasyon bazlı kontrol yaklaşımı sayesinde en iyi sonuçlar için yapılabilmektedir.

Kaynakça

[1] «Uluslararası Enerji Ajansı,» Tarihçe, 18 Kasım 1974. [Çevrimiçi]. Available: https://www.iea.org/about/history/. [Erişildi: 26 Şubat 2019].

[2] «Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü,» Dünya Ham Petrol Üretimi, 30 Eylül 1961. [Çevrimiçi]. Available: https://data.oecd.org/energy/crude-oil-production.htm#indicator-chart. [Erişildi: 27 Şubat 2019].

[3] «Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü,» OECD Ülkeleri Ham Petrol İthalat Fiyatları, 30 Eylül 1961. [Çevrimiçi]. Available: https://data.oecd.org/energy/crude-oil-import-prices.htm. [Erişildi: 27 Şubat 2019].

[4] R. S ve J. K. Ball, Automotive Engineering Fundamentals, Pensilvanya, Pensilvanya: SAE Internatioal, 2004.

[5] G. Lechner ve H. Naunheimer, Automotive Transmissions Fundamentals, Selection, Design and Application, Berlin, Heidelberg: Springer, 1999.

[6] «Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği,» Dizel ve Benzin Yakıtının Spesifikasyonları, [Çevrimiçi]. Available: https://www.acea.be/news/article/differences-between-diesel-and-petrol. [Erişildi: 01 03 2019].

[7] A. J. Haagen-Smit, «Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog,» Industrial and Engineering Chemistry, cilt 44, no. 6, pp. 1342-1346, 1 Haziran 1952.

[8] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York: McGraw-Hill, 1988.

[9] S. A. ve D. H., «A Review of the History of Emission Legislation, Urban and National Transport Trends and Their Impact on Transport Emissions,» Transactions on the Built Environment, cilt XXIII, pp. 293-302, 1996.

[10] «Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı,» Tarihçe, [Çevrimiçi]. Available: https://www.epa.gov/history. [Erişildi: 27 Şubat 2019].

[11] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay ve A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2005.

[12] «Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı,» Sera Gazlarına Genel Bakış, [Çevrimiçi]. Available: https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[13] S. Chambliss, J. Miller, C. Façanha, R. Minjares ve K. Blumberg, «THE IMPACT OF STRINGENT FUEL AND VEHICLE STANDARDS ON PREMATURE MORTALITY AND EMISSIONS,» International Council on Clean Transportation, Washington DC, 2013.

[14] W. A. Majewski ve H. Jääskeläinen, «DieselNet,» Emisyonların Çevresel Etkileri, [Çevrimiçi]. Available: https://www.dieselnet.com/tech/env_effect.php#acid. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[15] «CO_2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION OVERVIEW,» Uluslar Arası Enerji Ajansı, 2018.

[16] «Diesel.net,» Avrupa Birliği Emisyon Standartları, [Çevrimiçi]. Available: https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[17] «EUR-Lex,» Avrupa Birliği Kanunları/Binek Araçlar İçin Emisyon Performans Standartları, [Çevrimiçi]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009R0443. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[18] «Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği,» Binek Araçlar İçin Euro Standartları, [Çevrimiçi]. Available: https://www.acea.be/industry-topics/tag/category/euro-standards. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[19] A. Fuhs, Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation, Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

[20] «Hybridcars,» ABD Kümülatif Plug-In Elektrikli Taşıt Şatış Rakamları (2010-2016), [Çevrimiçi]. Available: https://www.hybridcars.com/americans-buy-their-half-millionth-plug-in-car/us-cum-pev-sales-2010_aug-2016/. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[21] «Insideev,» Elektrikli Taşıt Motor Kontrolcüleri Temelleri, [Çevrimiçi]. Available: https://insideevs.com/ev-nerdgasm-basic-ev-motor-controllers-part-2/. [Erişildi: 28 Şubat 2019].

[22] H.-M. Fischer ve L. Dorn, «Voltage Casses for Electric Mobility,» ZVEI - German Electrical and Electronic Manufacturers' Association Centre of Excellence Electric Mobility, Frankfurt Am Main, 2013.

[23] A. Sciarretta ve L. Guzzella, «Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization,» Springer, Berlin, 2005.

[24] G. Pistoia, ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES POWER SOURCES, MODELS, SUSTAINABILITY, INFRASTRUCTURE AND THE MARKET, Oxford: Elsevier B.V., 2010.

[25] P. Mi, «Hybrid Electric Vehicles: Control, Design, and Applications,» Dearborn - Michigan.

[26] S. S. Williamson, «Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles,» Springer Science+Business Media, New York, 2013.

[27] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah ve E. Hossain, «A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development,» Energies , cilt 10, no. 8, p. 1247, 2017.

[28] U.S. OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, «U.S. OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY,» Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi, [Çevrimiçi]. Available: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-animation-text-version. [Erişildi: 3 Mart 2019].

[29] C. Mi, M. A. Masrur ve D. W. Gao, Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives, Chennai: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

[30] J. Erjavec, HYBRID, ELECTRIC & FUEL-CELL VEHICLES, New York: Delmar, Cengage Learning, 2013.

[31] S. Jain ve L. Kumar, «ScienceDirect,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hybrid-electric-vehicle. [Erişildi: 1 Mart 2019].

[32] E. G. Bakhoum, G. Duarte, P. Baptista, C. Liu ve W. Li, Hybrid Vehicles and Hybrid Electric Vehicles New Developments, Energy Management and Emerging Technologies, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2015.

[33] E. Silvas, T. Hofman, N. Murgovski, L. F. P. Etman ve M. Steinbuch, «Review of Optimization Strategies for System-Level Design in Hybrid Electric Vehicles,» IEEE Transactions on Vehicular Technology, cilt 66, no. 1, pp. 57-70, 2017.

[34] A. M. Ali ve D. Söffker, «Towards Optimal Power Management of Hybrid Electric Vehicles in Real-Time: A Review on Methods, Challenges, and State-Of-The-Art Solutions,» Energies, cilt 11, no. 3, pp. 476-500, 2018.

[35] L. Serrao, S. Onori ve G. Rizzoni, «A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles,» Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, cilt 133, no. 3, pp. 031012-1-9, 2011.

[36] P. Zhang, F. Yan ve C. Du, «A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt 48, pp. 88-104, 2015.

[37] A. P. a. H. O. Bansal, «A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle,» International Journal of Vehicular Technology, cilt 2014, 2014.

[38] D. F. Opila, X. Wang, R. McGee, J. A. Cook ve J. W. Grizzle, «Fundamental Structural Limitations of an Industrial Energy,» Ocak 2009. [Çevrimiçi]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228876432_Fundamental_Structural_Limitations_of_an_Industrial_Energy_Management_Controller_Architecture_for_Hybrid_Vehicles. [Erişildi: 2 Mart 2019].

[39] S. G. Wirasingha ve A. Emadi, «Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,» IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, cilt 60, no. 1, pp. 111-122, 2011.

[40] L. Serrao, A. Sciarretta, O. Grondin, A. Chasse, Y. Creff, D. Di Domenico, P. Pognant-Gros, C. Quérel ve L. Thibault, «Open Issues in Supervisory Control of Hybrid Electric Vehicles A Unified Approach Using Optimal Control Methods,» Oil & Gas Science and Technology, cilt 68, no. 1, pp. 23-33, 2013.

[41] R. E. Bellman ve S. E. Dreyfus, Applied Dynamic Programming, Princeton: Princeton University Press, 1962.

[42] R. D. Robinet III, D. G. Wilson, E. G. Richard ve H. J. E, Applied Dynamic Programming for Optimization of Dynamical Systems, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.

[43] O. Sundström ve L. Guzzella, «A Generic Dynamic Programming Matlab Function,» %1 içinde 18th IEEE International Conference on Control Applications, Saint Petersburg, 2009.

[44] W. F. Stoecker, Design of Thermal Systems, New York: McGraw-Hill, 1989.

[45] «Technician Training Guide New Outlander PHEV Overview,» Mitsubishi Motors Australia Limitted, Service Training Department, Australia.

[46] «MMC Workshop Manual,» [Çevrimiçi]. Available: http://mmc-manuals.ru/manuals/outlander_iii/online/Service_Manual_2013/2017/index_M1.htm. [Erişildi: 3 Mart 2019].

[47] «Mitsubishi motors,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.mitsubishi-motors.com/en/innovation/technology/library/. [Erişildi: 3 Mart 2019].

[48] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, 1992.

[49] D. Covaciu, I. Preda ve G. Ciolan, «Coast Down Test – Theoretical and Experimental Approach,» %1 içinde CONAT 2010 - International Automotive Congress, Brasov, 2010.

[50] P. Norrby, «Prediction of coast-down test results - A statistical study of environmental influences,» CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, 2012.

[51] Y. Li, «Optimization of PHEV Power Split Gear Ratio to Minimize Fuel Consumption and Operation Cost,» University of Windsor, Windsor, 2013.

[52] X. Wang, H. He, F. Sun ve J. Zhang, «Application Study on the Dynamic Programming Algorithm for Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles,» Energies, cilt 8, no. 4, pp. 3225-3244, 2015.

[53] O. Sundström, L. Guzzella ve P. Soltic, «Optimal Hybridization in Two Parallel Hybrid Electric Vehicles Using Dynamic Programming,»The International Federation of Automatic Control, Seoul, 2008.

[54] D. Pei ve M. J. Leamy, «Dynamic Programming-Informed Equivalent Cost Minimization Control Strategies for Hybrid- Electric Vehicles,» Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, cilt 135, no. 5, pp. 1013-1025, 2013.

[55] J. Liu ve H. Peng, «Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle,» IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, cilt 16, no. 6, pp. 1242-1251, 2008.

[56] R. Wegmanna, V. Dögea, J. Beckerb ve D. U. Sauerb, «Optimized operation of hybrid battery systems for electric vehicles using deterministic and stochastic dynamic programming,» Journal of Energy Storage, cilt 14, pp. 22-38, 2017.

[57] J. P. Rivera-Barrera, N. Muñoz-Galeano ve H. O. Sarmiento-Maldonado, «SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges,» MPDI Electronics, cilt 6, no. 4, pp. 102-135, 2017.

[58] M. F. M. Sabri, K. A. Danapalasingam ve R. M. F, «A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, cilt 53, p. 1433–1442, 2016.

[59].T. R. Montgomery, «Computationally Efficient Deterministic Dynamic Programming For Optimal Supervisory Power Management Of Power-Split Phevs,» The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2013.

[60].«Diesel.net,» ECOpoint Inc., [Çevrimiçi]. Available: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/index.php. [Erişildi: 15 08 2019].

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: info.gsrd@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Energy Management Optimization by Using Discrete Dynamic Programming for Plug-in Complex HEV

Ödüller

1. GSRD Excellent Paper Award