

**SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR BİNEK ARACIN
ENERJİ YÖNETİMİ KONTROL STRATEJİLERİ
UYGULANARAK YAKIT SARFIYATI
OPTİMİZASYONU**

EMRE DERELİ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Seri Hibrit Elektrikli Bir Binek Aracın Enerji Yönetimi Kontrol
Stratejileri Uygulanarak Yakıt Sarfiyatı Optimizasyonu**

Emre DERELİ
0000-0003-1760-5383

Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ
0000-0002-1045-6779
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERİ HİBRİT ELEKTRİKLİ BİR BİNEK ARACIN ENERJİ YÖNETİMİ KONTROL STRATEJİLERİ UYGULANARAK YAKIT SARFIYATI OPTİMİZASYONU

Emre DERELİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali SÜRME

Doğanın egzoz emisyonları ile kirletilmesi, enerji ihtiyacının artmasına karşın fosil kaynakların sınırlı olması ve gün geçtikçe bu kaynakların azalması günümüzün en önemli problemlerinden sadece birkaçıdır. Bu sebeplerden dolayı otomotiv sektörü alternatif tahrik sistemlerine yöneldiğinden elektrikli ve hibrit araç teknolojileri yeniden önem kazanmıştır. Hibrit ve elektrikli araçların en önemli çalışma alanlarından birisi ise sistemde barındırdığı güç kaynaklarının verimli bir şekilde kontrol edilmesi ve yakıt ekonomisinin artırılmasıdır.

Bu tez çalışmasında seri hibrit elektrikli bir binek aracın sahip olduğu içten yanmalı motor ve batarya enerjilerinin en verimli şekilde yönetilmesine dair kontrol stratejilerinin uygulanması ile içten yanmalı motora ait tork ve açısal hız parametrelerinin optimize edilerek en iyi yakıt sarfiyatına ulaşılması hedeflenmektedir. Buna yönelik Matlab Simulink ortamında bir seri hibrit elektrikli araç modellenmiş ve bu aracın sahip olması gereken kontrol stratejileri uygulanmıştır. Araç bataryasının hangi şarj durumu seviyesinde jeneratörün devreye girmesi gerektiği analiz edilmiştir. Matlab Simulink'te *kural bazlı optimizasyon* ve *dinamik programlama* yöntemleri ile içten yanmalı motorun tork ve açısal hız parametreleri optimize edilerek minimum yakıt sarfiyatı sağlanmıştır. Sonuç olarak aracın batarya şarj durumunun %60 seviyesinde iken bataryanın şarj koruma moduna geçmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. NEDC çevrimi için yakıt sarfiyatı, değiştirilen şarj durumu seviyesi ve dinamik programlama yöntemi ile %1,45 oranında azalırken USA City II çevriminde bu oran %1,78'i bulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hibrit elektrikli araçlar, güç ve enerji yönetimi, kontrol stratejileri, yakıt optimizasyonu, dinamik programlama.

2021, xii + 53 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FUEL CONSUMPTION OPTIMIZATION OF A SERIES HYBRID ELECTRIC PASSENGER CAR BY APPYLING ENERGY MANAGEMENT CONTROL STRATEGIES

Emre DERELİ

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ

Pollution of nature with exhaust emissions, limited fossil resources despite the increase in energy need and the decrease of these resources day by day are just a few of the most important problems of today. For these reasons, electric and hybrid vehicle technologies have gained importance again as the automotive industry turns to alternative drive systems. One of the most important working areas of hybrid and electric vehicles is to efficiently control the power sources in the system and to increase fuel economy.

In this thesis, it is aimed to achieve the best fuel consumption by optimizing the torque and angular velocity parameters of the internal combustion engine by applying control strategies for the most efficient management of the internal combustion engine and battery energies of a serial hybrid electric passenger vehicle. For this purpose, a series of hybrid electric vehicles were modeled in the Matlab Simulink environment and the control strategies that this vehicle should have were applied. At what level of charge of the vehicle battery, the generator should be activated has been analyzed. In Matlab Simulink, minimum fuel consumption is achieved by optimizing the torque and angular velocity parameters of the internal combustion engine with *rule-based optimization* and *dynamic programming* methods. As a result, it has been concluded that it is appropriate for the battery to switch to the charge protection mode when the battery charge state of the vehicle is at 60%. While fuel consumption for the NEDC cycle decreased by 1.45% with the changed state of charge and dynamic programming method, this rate reached 1.78% in the USA City II cycle.

Keywords: Hybrid electric vehicles, power and energy management, control strategies, fuel optimization, dynamic programming.

2021, xii + 53 pages.

TEŐEKKÖR

Tez alıőmamda bilgi ve deneyimiyle desteklerini esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Ali SÖRMEN'e teőekkÖrlerimi sunuyorum.

Ayrıca, hayatımın tümü veya bir bölümünde maddi ve manevi üzerimde emeği olan ailem, eőim, dostlarım, hocalarım ile beraber devletimize, milletimize ve bÖtÖn bunları bana bahőeden yÖce Allah'a őÖkranlarımı sunarım.

Emre DERELİ
.../.../...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Hibrit Elektrikli Araçlar	3
2.2. Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması	3
2.2.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar.....	5
2.2.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar	7
2.2.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi.....	10
3.1.1. Sürüş Çevrimi	11
3.1.2. Taşıt Dinamiği.....	13
3.1.3. Aeordinamik Direnç Kuvveti	14
3.1.4. Yuvarlanma Direnci	15
3.1.5. İvmelenme Direnci.....	15
3.1.6. Eğim Direnci	16
3.1.7. Dişli Kutusu	16
3.1.8. Elektrik Motoru.....	17
3.1.9. Batarya	19
3.1.10. İçten Yanmalı Motor, Yakıt Tankı ve Jeneratör	20
3.1.11. Kontrol Ünitesi.....	24
3.1.12. Model Girdileri.....	25

3.2. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar için Kontrol Stratejileri	27
3.2.1. Maksimum Şarj Durumu Kontrol Stratejisi	27
3.2.2. Termostat (Aç-Kapa) Kontrol Stratejisi.....	29
3.3. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar için Enerji Yönetimi Optimizasyonu	30
3.3.1. Kural Bazlı Optimizasyon.....	32
3.3.2. Dinamik Programlama	33
4. BULGULAR.....	38
4.1. Batarya SoC'nin Yakıt Sarfiyatına Etkisi.....	39
4.2. Kural Bazlı Optimizasyon Sonuçları	39
4.3. Dinamik Programlama Optimizasyon Sonuçları	46
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	48
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
F_t	tahrik kuvveti (N)
F_a	aerodinamik direnç kuvveti (N)
F_y	yuvarlanma direnci (N)
F_i	ivmelenme direnci (N)
F_e	eğim direnci (N)
T_t	tekerdeki tahrik momenti (Nm)
F_t	tekerdeki tahrik kuvveti (N)
r_t	teker yarıçapı (m)
ω_t	teker hızı (rad/s),
v	taşıt hızı (m/s)
ρ	havanın yoğunluğu (kg/m ³)
C_d	aerodinamik direnç katsayısı (-)
A_f	taşıtın ön yüzey alanı (m ²)
v_r	rüzgar hızı (km/h)
μ	yuvarlanma direnç katsayısı (-)
m	taşıt ağırlığı (kg)
g	yer çekimi ivmesi (m/s ²)
α	yolun eğim açısı (°)
a	taşıt ivmesi (m/s ²)
T_d	dişli şaftındaki tork (Nm)
T_t	tekerdeki tork (Nm)
η_d	dişli verimi (-)
i_d	dişli oranı (-)
ω_d	dişli şaftındaki hız (rad/s)
ω_t	teker hızı (rad/s)

η_d	dişli verimliliği (-)
P_{em}	elektrik motoru gücü (W)
ω_{em}	elektrik motoru hızı (rad/s)
T_{em}	elektrik motoru torku (Nm)
$\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})$	elektrik motoru tork ve hızına göre verimliliği
Q_{bat}	elektrik yükü (C)
t	zaman (s)
I_{bat}	batarya akımı (A)
P_{bat}	batarya gücü (W)
V_{bat}	batarya gerilimi (V)
V_{SoC}	SoC'a göre batarya gerilimi (V)
$R_{iç}$	batarya iç direnci (ohm)
SoC_{ilk}	batarya ilk SoC (-)
C_{bat}	batarya kapasitesi (Ah)
η_{bat}	batarya verimi (-)
P_{CE}	içten yanmalı motorun efektif gücü (kW)
η_e	içten yanmalı motorun efektif verimi (-)
\dot{m}_y	içten yanmalı motorun yakıt sarfiyatı (kg/s)
H_u	yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)
\dot{b}_e	özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh)
P_{CE}	içten yanmalı motorun efektif gücü (kW)
V_y	yakıt sarfiyatı (lt/100 km)
m_y	toplam yakıt sarfiyatı (kg)
ρ_y	yakıt yoğunluğu (g/cm ³)
x_t	toplam mesafe (m)
P_{EG}	jeneratör gücü (W)

T_{EG}	jeneratör torku (Nm)
ω_{EG}	jeneratör hızı (rad/s)
η_{EG}	jeneratör verimi (-)
T_{opt}	optimum tork (Nm)
ω_{opt}	optimum hız (rad/s)
i_r	redüktör dişli oranı (-)
k	hesaplama adımı
x_k	durum değişkeni
u_k	kontrol değişkeni
$F_k(x_k, u_k)$	durum ve kontrol değişkenlerine bağlı model fonksiyonu
N	zaman adımı
$g_N(x_N)$	son durumda gerçekleşen amaç fonksiyonu
SoC_{min}	minimum batarya şarj durumu (-)
SoC_k	anlık batarya şarj durumu (-)
SoC_{maks}	maksimum batarya şarj durumu (-)
$T_{ice,min}$	minimum İYM torku (Nm)
T_k	anlık İYM torku (Nm)
$T_{ice,maks}$	maksimum İYM torku (Nm)
$\omega_{ice,min}$	minimum İYM devri (rad/s)
ω_k	anlık İYM devri (rad/s)
$\omega_{ice,maks}$	maksimum İYM devri (rad/s)
ΔSoC	batarya şarj durumu ayırıklaştırma oranı (-)
N_{SoC}	batarya şarj durumu değer sayısı (-)
ΔT_{ice}	İYM torku ayırıklaştırma oranı (-)
$N_{T_{ice}}$	İYM torku değer sayısı (-)
$\Delta \omega_{ice}$	İYM devri ayırıklaştırma oranı (-)
$N_{\omega_{ice}}$	İYM devri değer sayısı (-)

Kısaltmalar Açıklama

DP	Dinamik Programlama
EA	Elektrikli Araçlar
ECE	Şehir İçi Çevrim
EM	Elektrik Motoru
EUDC	Şehir Dışı Çevrim
GENSET	Jenaratör Sistemi
HEA	Hibrit Elektrikli Araçlar
İYM	İçten Yanmalı Motor
KB	Kural Bazlı Optimizasyon
NEDC	New European Driving Cycle (Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi)
PHEA	Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar
SHEA	Seri Hibrit Elektrikli Araçlar
SoC	Batarya Şarj Durumu
SPHEA	Seri Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Seri hibrit elektrikli araç mimarisi	6
Şekil 2. 2. Paralel hibrit elektrikli araç mimarisi	7
Şekil 2. 3. Seri paralel hibrit elektrikli araç mimarisi	8
Şekil 3. 1. İleriye dönük taşıt modeli	9
Şekil 3. 2. Geriye dönük taşıt modeli.....	10
Şekil 3. 3. Menzil arttırıcı seri hibrit elektrikli araç simulink modeli.....	11
Şekil 3. 4. NEDC çevrimine ait hız zaman grafiği.....	12
Şekil 3. 5. Taşıta etki eden direnç kuvvetleri	13
Şekil 3. 6. Elektrik motoru güç-tork-hız grafiği.....	18
Şekil 3. 7. Örnek bir elektrik motoru verimlilik haritası.....	19
Şekil 3. 8. İçten yanmalı motor özgül yakıt sarfiyatı haritası	23
Şekil 3. 9. Maksimum SoC kontrol stratejisi	28
Şekil 3. 10. Termostat (aç-kapa) kontrol stratejisi	29
Şekil 3. 11. Şarj tüketme ve şarj koruma modları	30
Şekil 3. 12. Güç kontrol stratejileri sınıflandırılması.....	31
Şekil 3. 13. Seri hibrit elektrikli araç için uygulanan kontrol stratejilerine göre sistemin kurallarını belirten akış şeması.....	33
Şekil 3. 14. Dinamik programlama optimum yörünge maliyeti hesaplama yöntemi.....	34
Şekil 3. 15. Motor tork ve hızı için ayrıklaştırılmış kontrol uzayı.....	35
Şekil 4. 1. Batarya şarj ve deşarj işlemi için SoC-gerilim ilişkisi.....	38
Şekil 4. 2. Modelde koşturulan NEDC sürüş çevrimi.....	40
Şekil 4. 3. KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin İYM çalışma noktaları	40
Şekil 4. 4. KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin elektrik jeneratörü çalışma noktaları	41
Şekil 4. 5. KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin EM çalışma noktaları	42
Şekil 4. 6. KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin batarya verileri	43
Şekil 4. 7. Modelde koşturulan USA City II sürüş çevrimi	44

Şekil 4. 8. KB yöntemi ile USA City II çevrimi için koşturulan modelin EM çalışma noktaları.....	44
Şekil 4. 9. KB yöntemi ile USA City II çevrimi için koşturulan modelin batarya verileri	45
Şekil 4. 10. DP yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin İYM çalışma noktaları.....	46
Şekil 4. 11. DP yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin elektrik jeneratörü çalışma noktaları	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1. Hibrit elektrikli araçların hibritleşme oranına göre sınıflandırılması	4
Çizelge 3. 1. Sürüş çevrimlerine ait temel özellikler	12
Çizelge 3. 2. İYM yakıt sarfiyatının tork ve hız değerlerine göre tablo haline getirilmesi	21
Çizelge 3. 3. Modellerde kullanılan sabit değerler	25
Çizelge 3. 4. BMW i3 Range Extender elektrik motor verileri	26
Çizelge 3. 5. BMW i3 Range Extender batarya verileri	26
Çizelge 3. 6. BMW i3 Range Extender içten yanmalı motor verileri	26
Çizelge 3. 7. Kural bazlı optimizasyon ve dinamik programlama kıyaslaması	32
Çizelge 4. 1. Bataryanın farklı ilk SoC değerlerine göre oluşan yakıt sarfiyatları	39
Çizelge 5. 1. NEDC çevrimi yakıt sarfiyatı sonuçları.....	49
Çizelge 5. 2. USA City II çevrimi yakıt sarfiyatı sonuçları	50

1. GİRİŞ

Taşıtlar, tarih boyunca olduğu gibi günümüzün de en önemli ihtiyaçlarından olan ulaşım ve taşımacılıkta gelişen yeni teknolojileriyle beraber kullanılmaya devam etmektedir. Ancak günümüzde, daha uzun menzillere, daha kısa sürede ve daha ekonomik olarak ulaşma hedefi yeni arayışların doğmasına neden olmuştur. 19. yüzyıldan itibaren taşıt tahrik elemanı olarak kullanılan İçten Yanmalı Motorlar (İYM) yüksek enerji yoğunluğu avantajına sahip petrol türevlerini yakıt olarak kullanarak bu ihtiyaçları karşılamış olsa da petrol rezervlerinin azalması, çevre kirliliği, düşük verimlilik ve yüksek yakıt sarfiyatı gibi sebeplerden dolayı alternatif tahrik sistemlerine duyulan ihtiyaç artmıştır [5]. Tarih olarak İYM'den 60 yıl daha önce 1834 yılından beri kullanılan Elektrik Motoru (EM) ile tahrik edilen Elektrikli Araçlar (EA), yüksek enerji verimliliği, sıfır emisyon ve ideal tork karakteristiği avantajına sahipken; diğer yandan araç performansı, kısa menzil ve şarj süresi gibi temel dezavantajlar nedeniyle İYM'ye sahip konvansiyonel araçların gölgesinde kalmıştır [6]. İYM ve EM'nin birbirlerine göre üstünlüklerini bir araya getirip handikapları azaltmak için ise bu iki tahrik sistemine sahip Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA) teknolojisi geliştirilmiştir. Günümüz otomotiv sektöründe gelişme gösteren çalışma alanlarından birisi de hibrit ve elektrikli araçlar üzerine olmaktadır. Hibrit elektrikli araçların çalışma alanlarının içinde olan temel problemlerinden biri ise sistemde barındırdığı içten yanmalı motor ve elektrik motoru gibi güç sağlayıcıların en verimli bir şekilde uyumlu olarak çalışmasını sağlamaktır. Bu bağlamda geliştirilen kontrol stratejileri sayesinde; yakıt tüketiminin minimuma indirgenebileceği, elektrikli araçlarda yaşanan menzil sorununun jeneratör sayesinde ortadan kalkabileceği, elektrik motorunun öncelenmesi sayesinde araçtan kaynaklanan emisyonların minimuma indirgenebileceği, farklı kontrol stratejileri ile içten yanmalı motorun araç performansına ve yakıt ekonomisine en uygun olarak çalıştırılabileceği şeklindeki hipotezler ortaya çıkmıştır. Bu yönde yapılan çalışmalar genellikle aracın tahrik edilmesi için gerekli olan enerjinin hangi kaynaktan besleneceğinin yönetimi ile jeneratör sisteminin bataryayı en verimli şekilde şarj etmesi için optimum tork ve devirde çalıştırılması üzerine geliştirilmektedir. Bu çalışmada bahsedilen kontrol stratejilerinin uygulanarak aracın optimum enerji yönetimi ile minimum yakıt sarfiyatı sağlanması ve aynı zamanda batarya şarj durumunun maksimize edilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında amaç, seri hibrit bir binek aracın önceden belirlenmiş bir sürüş çevriminde bataryanın maksimum şarj durumunu, içten yanmalı motorun ise minimum yakıt sarfiyatını baz alan bir enerji yönetimi modellenmesi ve optimizasyonudur. Çalışmada seri hibrit elektrikli bir aracın Matlab Simulink'te nasıl modelleneceği, modelin farklı sürüş çevrimlerini tamamlaması için araç dinamiği, şanzıman, elektrik motoru, batarya, içten yanmalı motor, kontrol birimi, yakıt tankı gibi komponentlerinin uygun matematiksel denklemler kullanılarak nasıl modelleneceği, değişen şartlara göre hibrit elektrikli aracın enerji yönetimini nasıl sağladığı, jeneratör sisteminin ne zaman devreye girip ne zaman kapatılarak en uygun enerji yönetimin nasıl yapılacağı, içten yanmalı motorun nasıl optimize edilerek minimum yakıt sarfiyatını sağlayacağı, farklı kontrol stratejilerinin sistemi nasıl etkilediği gibi sorulara yanıt aranacaktır. Günümüzün ve geleceğin en önemli çalışma alanlarından birisi olan hibrit elektrikli araçlar konusunda teorik ve simülasyon uygulamalarının altyapısı oluşturularak enerji kazanımı noktasında gelişim kaydedilmesi hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Hibrit Elektrikli Araçlar

Hibrit kavramı teknik olarak iki farklı teknolojinin bir arada kullanılması manasına gelmektedir. Hibrit Elektrikli Araçlar ise, en az bir elektrik motora ve bir içten yanmalı motora sahip olan araçlardır. HEA'da kullanılan İYM genellikle benzinli motorlardır. Çünkü benzinli motorlar dizellerle kıyaslandığında daha düşük emisyon üretmeleri, yüksek hızlarda Atkinson çevrimi sayesinde daha ekonomik olmaları, elektrik motorunun düşük devirde dizelere benzer olarak yüksek tork sağlayan bir performansının olması, dizellere göre daha hafif olmaları ve düşük bakım maliyetleri gibi nedenlerden dolayı elektrikli motoruyla kullanım için çok daha uygundur.

Otomotiv endüstrisi, çevreyi koruyan, yakıt ekonomisi sağlayan, güvenli, insan sağlığı ve konforuna uygun yeni teknolojileri araştırmaya, geliştirmeye ve uygulamaya devam etmektedir. HEA teknolojisinde daha yaygın olarak yapılan çalışmalar olarak; elemanlarda sürtünmeleri ve ağırlığı azaltma, topoloji optimizasyonu gibi mekanik konuların yanı sıra, araç kontrolü ve enerji yönetimi, sıcaklık yönetimi, rejeneratif frenleme kontrolü, enerji depolama sistemleri gibi elektronik, kontrol ve otomasyona dayalı çalışmaların ön plana çıktığı görülmektedir [12].

2.2 Hibrit Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

Hibrit Elektrikli Araçlar, hibritleşme, elektrifikasyon oranına göre ve taşıtın enerji aktarımını sağlayan mimari yapılarına göre olmak üzere iki farklı kategoride değerlendirilir. Hibritleşme oranına göre HEA, temel olarak mikro hibrit, hafif hibrit ve tam hibrit olmak üzere üç ayrı sınıfa ayrılır [10]. Çizelge 2.1'de bu sınıflandırmanın farklı özelliklere göre kıyası yapılmıştır.

Çizelge 2.1 Hibrit elektrikli araçların hibritleşme oranına göre sınıflandırılması [10]

	Mikro Hibrit	Hafif Hibrit	Tam Hibrit
Rölanti Devri ve Aksesuar Gücü Paylaşımı	✓	✓	✓
Yalnız EM İle Araç Sürme	×	×	✓
Rejeneratif Frenleme	✓	✓	✓
Tahrik Gücü Paylaşımı	×	✓	✓

Mikro HEA’da start-stop sistemi sayesinde İYM rölanti halindeyken kapanıp açılmasını sağlayarak yakıt tasarrufu ve emisyonların azaltılmasını amaçlar. Bu yöntem bilhassa trafik yoğunluğu olan bölgelerde çok daha ciddi kazanım oluşturur. Mikro HEA’nın bir başka fonksiyonu ise İYM’ye aracın çalıştırılması esnasında ilk hareketi vermektir. Hibrit etki oranı %4’ten az olup sınırlı frenleme enerjisi geri kazanımına sahiptir [13].

Hafif HEA’da ise EM, İYM ile aynı şafta bağlı olup İYM’ye güç desteği veren bir mekanizma hükmündedir. Hibrit etki oranı %20’ye kadar ulaşabilmektedir. Ancak EM, aracı kendi başına tahrik edemez [13].

Tam HEA’da artık EM, sadece güç desteği amacıyla değil diğerlerinden farklı olarak aracı tek başına tahrik edebilir haldedir. EM, Mikro HEA’dan tam HEA’ya doğru büyür, dolayısıyla geri (rejeneratif) kazanım oranı ve yakıt tasarrufu daha yüksektir. Tam HEA’da aracı farklı iki motor tahrik edebileceği için ve de enerjinin en verimli şekilde kullanılabilmesi için güç ve enerji kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır [13].

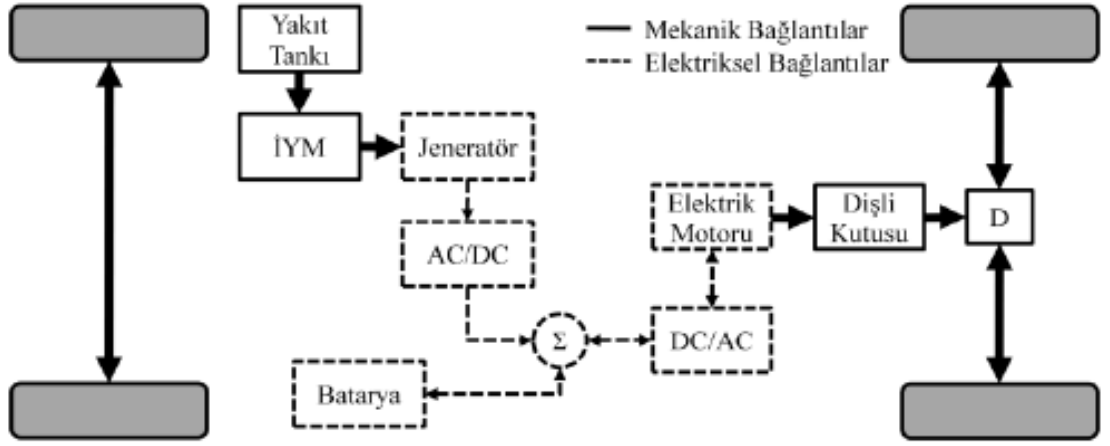
Hibrit Elektrikli Araçların bir başka sınıflandırma yöntemi ise mimarisine göre olan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırma yönteminde aracın güç aktarma organlarının enerjii transfer etme ve aracı tahrik etme yöntemleri farklılık göstermektedir. Buna göre Hibrit Elektrikli Araçlar, seri, paralel ve seri-paralel olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar

Çalışmada kullanılacak olan Seri Hibrit Elektrikli Araç (SHEA) mimarisinde taşıtı tahrik eden güç kaynağı elektrik motorudur. Bu bağlamda aslında bir elektrikli araç gibi hareket ederler. Ancak, SHEA’de EA’dan farklı olarak bataryayı şarj edebilen bir jeneratör sisteminin (GENSET) olmasıdır. Bir başka deyişle, SHEA’da bataryanın menzil sorununu azaltmak amacıyla yardımcı bir enerji kaynağı bulunur. GENSET’te bulunan İYM, aracın tekerlerini doğrudan tahrik etmediği için daima yakıt sarfiyatı açısından en optimum noktada çalışarak ekonomik kazanç sunar. Şekil 2.1’de SHEA’nın mimarisi şema olarak gösterilmiştir.

SHEA’nın avantajları şu şekilde özetlenebilir: [10]

- İYM ile tekerler arasında doğrudan bağlantı olmadığı için İYM’nin istenilen noktada çalışabilmesinden dolayı konvansiyonel araçlara göre daha az emisyon ve yakıt sarfiyatı sağlaması,
- Araç EM tarafından tahrik edildiği için EA gibi ideal tork karakteristiği sergileyebilmesi, buna bağlı olarak dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaması,
- Araç EM tarafından tahrik edildiği için özellikle şehir içi kullanımda yakıt tasarrufu sağlaması,
- Sessiz ve konforlu bir sürüş sağlaması,
- Paralel HEA’ya göre daha basit kontrol stratejisi ile çalışması.



Şekil 2.1. Seri hibrit elektrikli araç mimarisi [19]

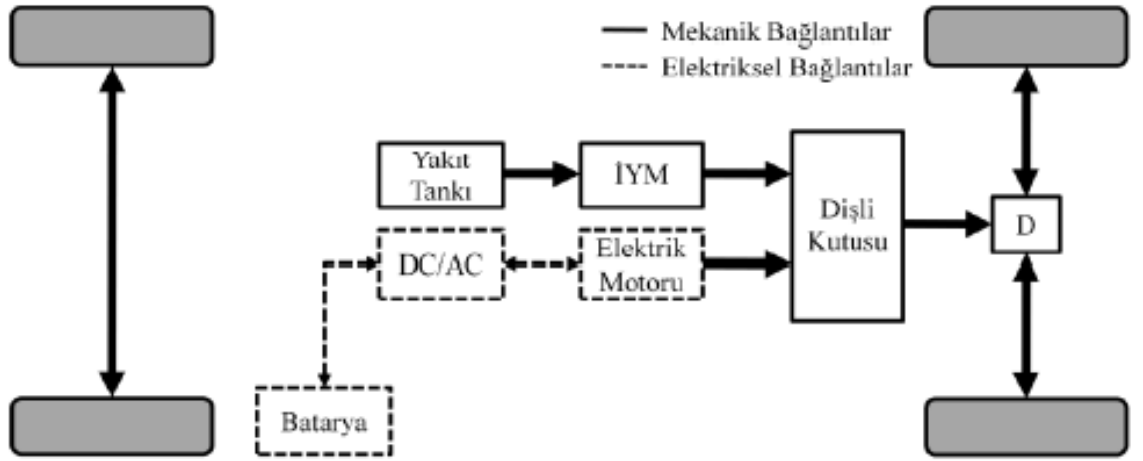
SHEA'nın çalışma modları ise aşağıda açıklanmıştır: [6]

- 1) Sadece Elektrik Modu: Aracı tahrik eden EM, sadece batarya tarafından gelen enerji ile çalışır. İYM kapalı durumdadır.
- 2) Sadece İYM modu: Aracı tahrik eden EM, sadece İYM tarafından gelen enerji ile çalışır. Bataryanın şarjı stabil durumdadır.
- 3) Hibrit mod: Aracı tahrik eden EM, batarya ve İYM tarafından ortak olarak gelen enerji ile çalışır.
- 4) İYM tahrik ve batarya şarj modu: Aracı tahrik eden EM, sadece İYM tarafından gelen enerji ile çalışır. Ancak İYM, aynı zamanda bataryayı şarj eder.
- 5) Rejeneratif frenleme modu: Araç frenleme veya yokuş aşağı kendini sürme esnasında EM vasıtası ile bataryayı şarj ederek sisteme enerji kazandırır. İYM kapalı durumdadır.
- 6) Batarya şarj modu: EM, sistemden enerji çekmez, İYM ise bataryayı şarj eder.
- 7) Hibrit batarya şarj modu: Rejeneratif frenleme modundaki durumlarda EM bataryayı şarj ederken bu kez İYM de bataryayı şarj eder.

Bu çalışma modları çalışmadaki modelde uygulandığı için ilerleyen bölümlerde kontrol stratejileri kısmında daha detaylı izah edilmiştir.

2.2.2. Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA), hem İYM hem de EM tarafından tahrik edilebilecek şekilde tasarlanmışlardır. Bundan dolayı sistem farklı şartlarda daha fazla modda çalışabileceği için sistemin kontrolü SHEA'ya göre daha karmaşıktır. İYM ve EM, mekanik olarak bağlanarak güç, tek bir şaftta birleştirilir. PHEA'nın genel mantığı EM'nin düşük hızlarda tork özelliğinden yararlanırken, aracın performansını artırmak için yüksek hızlarda İYM'den faydalanabilmektir. Bu şekilde araç sadece EM'nin performansına bağlı kalmayarak daha üstün performans sağlarken aynı zamanda EM'nin öncelenmesinden dolayı emisyonların azaltılması ve yakıt tarasarrufu sağlanmaktadır [6]. PHEA'nın mimari yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

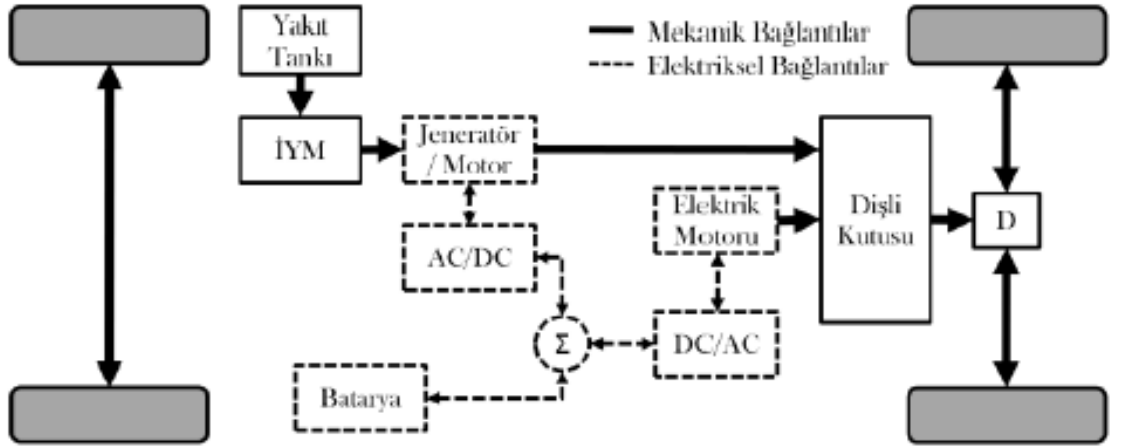


Şekil 2.2. Paralel hibrit elektrikli araç mimarisi [19]

2.2.3. Seri-Paralel Hibrit Elektrikli Araçlar

Seri-paralel hibrit elektrikli araçlar (SPHEA), SHEA ve PHEA'nın avantajlı yönlerinin bir araya getirilerek daha kompleks ancak daha verimli ve yakıt açısından ekonomik olan mimari yapıdır. SPHEA, hem seri hem paralel gibi çalışabilmesi için bünyesinde İYM ve EM bulundurduğu gibi PHEA'dan ekstra olarak bir jeneratör sistemi barındırmaktadır. Bundan dolayı SPHEA'nın kontrol algoritmaları da daha çok durum ve çeşit içerdiği için SHEA ve PHEA'ya göre daha karmaşıktır.

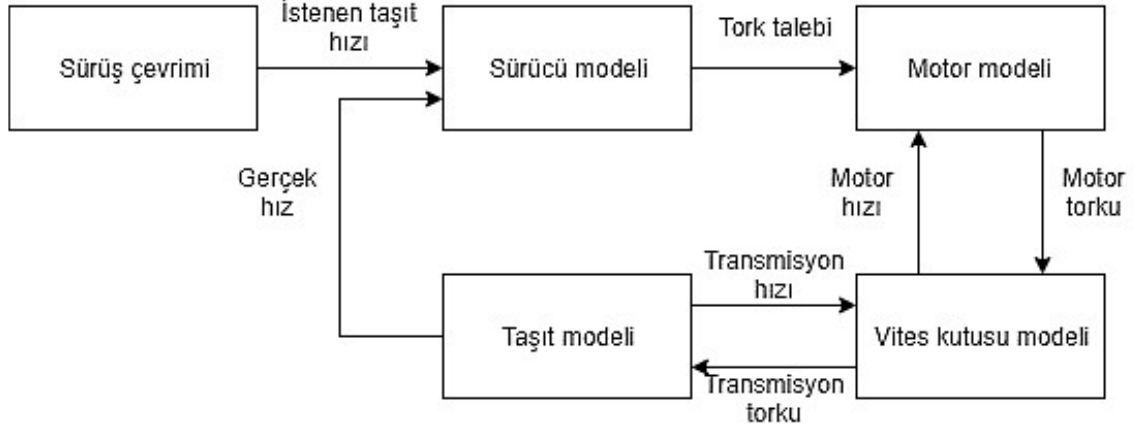
Seri-paralel hibrit elektrikli araçların mimari yapısı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Seri paralel hibrit elektrikli araç mimarisi [19]

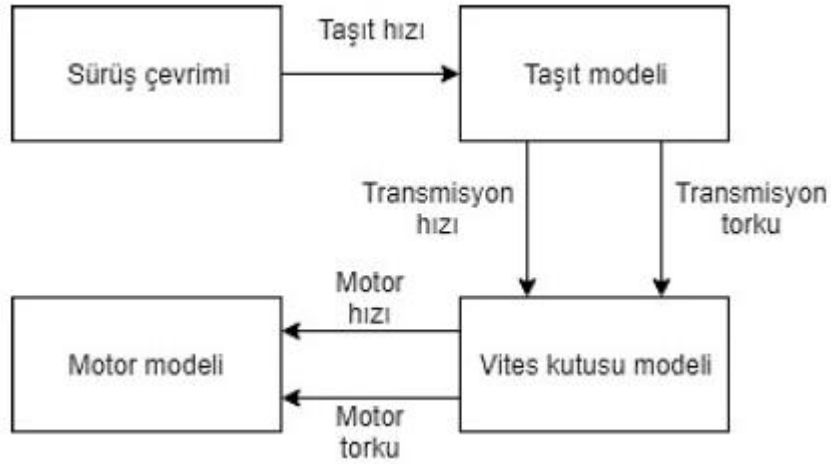
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan Seri Hibrit Elektrikli Araç, MATLAB Simulink ortamında QSS Toolbox [9] kullanılarak modellenmiştir. Model, BMW i3 Range Extender (REX, Menzil Arttırıcı) aracın verileri [2] baz alınarak hazırlanmıştır. Bir taşıtın simülasyon modellenmesinde ileriye dönük (forward) ve geriye dönük (backward) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Şekil 3.1’de gösterilen ileriye dönük taşıt modelinde bir sürücü bulunur ve sürüş çevriminde istenilen hız ile gerçek hız arasındaki farkı azaltması için sürücü gaz veya fren pedalına basarak sisteme komut verir. Referans olarak alınan hız değeri ile gerçek hız değeri arasındaki hata farkını asgariye indirmek için PI kontrolcüsü kullanılır [13].



Şekil 3.1. İleriye dönük taşıt modeli

Şekil 3.2’de gösterilen geriye dönük taşıt modelinde ise ileriye dönük taşıt modelinden farklı olarak bir sürücü modeli bulunmaz. Sürüş çevriminden alınan hız ve yol eğimi bilgileri taşıt modeline iletilir. Taşıt modelinde taşıt dinamiği hesapları yapılarak güç aktarma organlarına iletilecek olan hız ve tork değerleri üretilir. Buna benzer olarak oradan motorun çalışacağı hız ve tork değerlerine ulaşılır. Böylece motor, aracı sürüş çevrimi referansına göre sürmüştür olur. Motor modeli üzerinden motorun ve dolayısıyla aracın yakıt tüketimi ve emisyonlar hesaplanabilir.



Şekil 3.2. Geriye dönük taşıt modeli

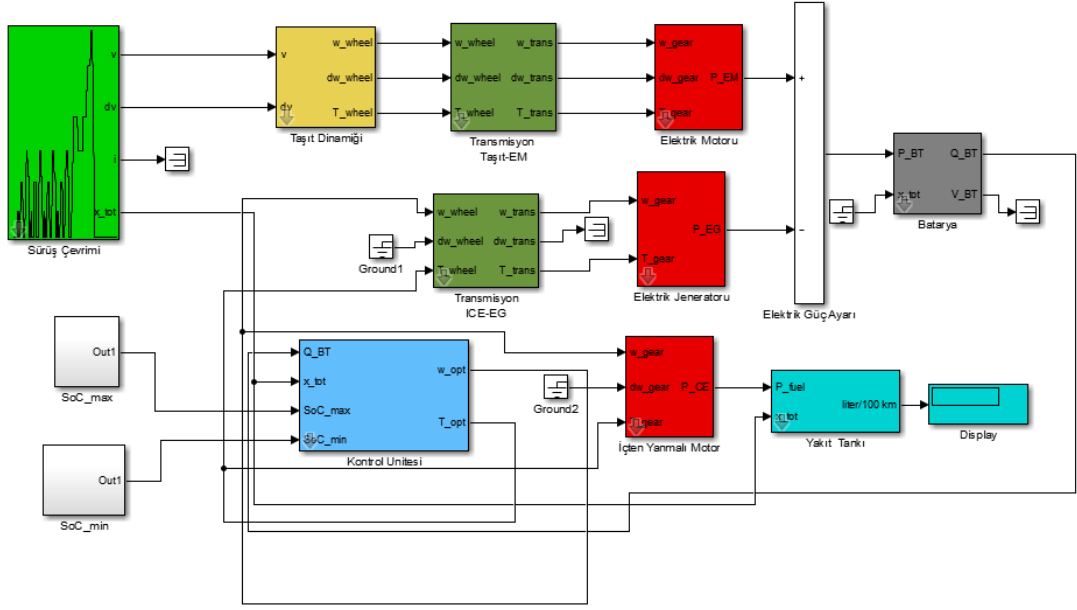
Bu çalışmada, geriye dönük taşıt modeli uygulanmıştır. Bir başka deyişle sürüş çevrimi referans değer olarak alınmış ve buna binaen aracı süren EM'nin çalışma devri ve tork değerleri hesaplatılmıştır. SHEA mantığı gereğiyle EM'ye enerji sevkıyatı yapan batarya ve GENSET modellenerek bu modellerin tork ve devir değerlerinin kontrolü sağlanmıştır. Tasarlanan SHEA modeli Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Modelde bulunan bileşenlerin nasıl tasarlandığı ise bu bölümün devamında detaylı olarak izah edilmiştir.

Sistemin modellenmesinde kullanılan yaklaşımlardan biri de Sanki Statik Yaklaşım (Quasistatic Approach)'dır. Bu yaklaşımda amaç dinamik sistemin bilinen neden sonuç ilişkisini tersine çevirmektir. Model, ayırık zamanlı olarak verilen kuvvetlerden hızları hesaplamak yerine, ivmeleri hesaplar ve gerekli kuvvetleri belirler.

3.1. Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi

Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilen SHEA modeli, Bölüm 2.2.1'de anlatılan SHEA prensipleri göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Geriye dönük taşıt modeli esasına göre ilk girdi olarak sürüş çevrimi verilirken, buradan taşıtın hızı, ivmesi ve toplam kat ettiği mesafe çıktıları alınmıştır. Bu bilgiler taşıt dinamiği bloğunda matematiksel olarak modellenerek taşıt tekerinin devri, ivmesi ve torku hesaplanmıştır. Transmisyon ve Elektrik Motoru bloklarında da benzeri işlem uygulanmış ve EM bloğunda aracı tahrik etmek için gerekli olan güç hesaplanmıştır. Kontrol Ünitesi vasıtasıyla Batarya Şarj

Durumu (SoC, State of Charge) denetlenerek GENSET'in çalışıp çalışmayacağı kontrol edilmiş ve duruma göre EM'nin ihtiyacı olan güç değeri batarya ve/veya GENSET tarafından karşılanmıştır. Yakıt Tankı blokunda ise İYM'nin yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

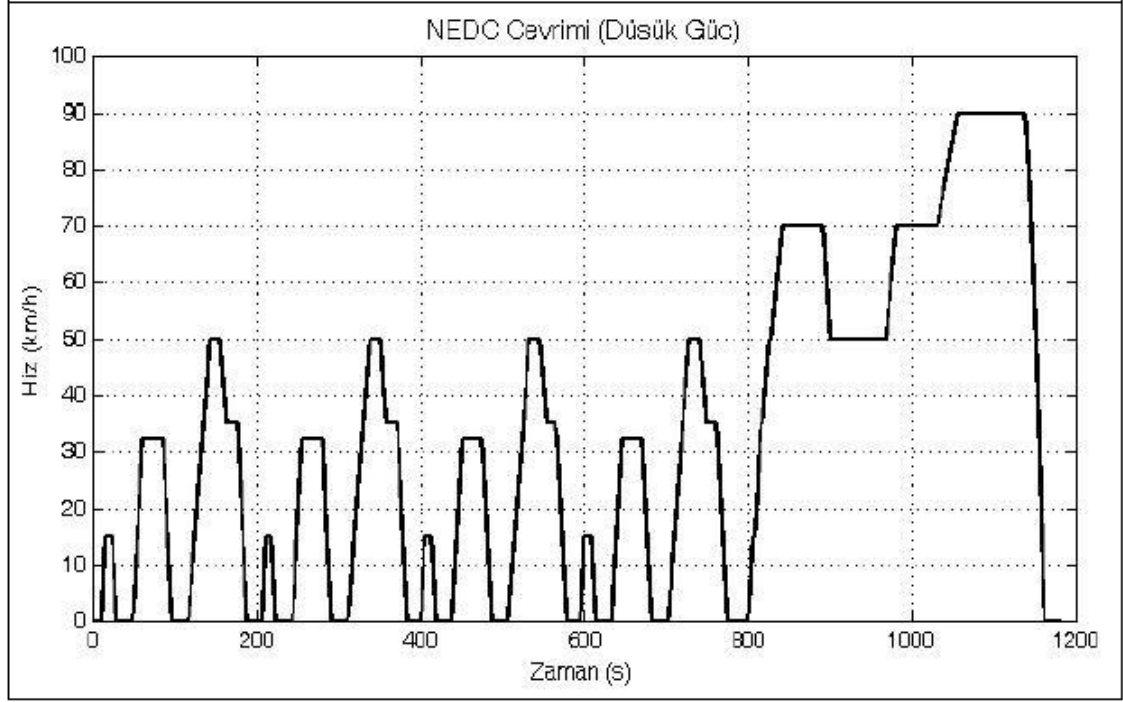


Şekil 3.3 Menzil arttırıcı seri hibrit elektrikli araç simulink modeli

3.1.1. Sürüş Çevrimi

Sürüş çevrimleri, taşıtların yakıt sarfiyatlarını ve buna bağlı olarak dışarıya atılan emisyonların hesaplanmasında kullanılan, şehir içi, şehirlerarası veya karma biçimde, en doğru ve iyi sonuçları ortaya koymak için hazırlanan hız-zaman grafikleridir [14]. Şehir içi sürüş çevrimlerinden en yaygın olarak kullanılan ABD'de USA City II, Avrupa'da ise Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) olduğu için bu çalışmada bu çevrimler kullanılmıştır.

Şekil 3.4'te gösterilen NEDC çevrimi, 0-780 saniye aralığında ECE ismi verilen, dur-kalk trafiğini temsil eden şehir içi çevriminin art arda 4 defa tekrar edilmesinden ve 780-1189 saniye aralığında ise yüksek hız profilini temsil eden EUDC ismiyle adlandırılan şehirlerarası çevrimden oluşan, özellikle düşük güç isteyen araçlar için kullanılan bir çevrimdir.



Şekil 3.4 NEDC çevrimine ait hız zaman grafiği [5]

Çizelge 3.1’de farklı çevrimlere ait toplam mesafe, süre ve ortalama hız değerleri gösterilmiştir. Bu çevrimlerden NEDC, teorik olarak oluşturulan sürüş çevrimine örnek teşkil ederken, FTP-75 ise gerçek sürüş çevrimine örnek teşkil etmektedir [21].

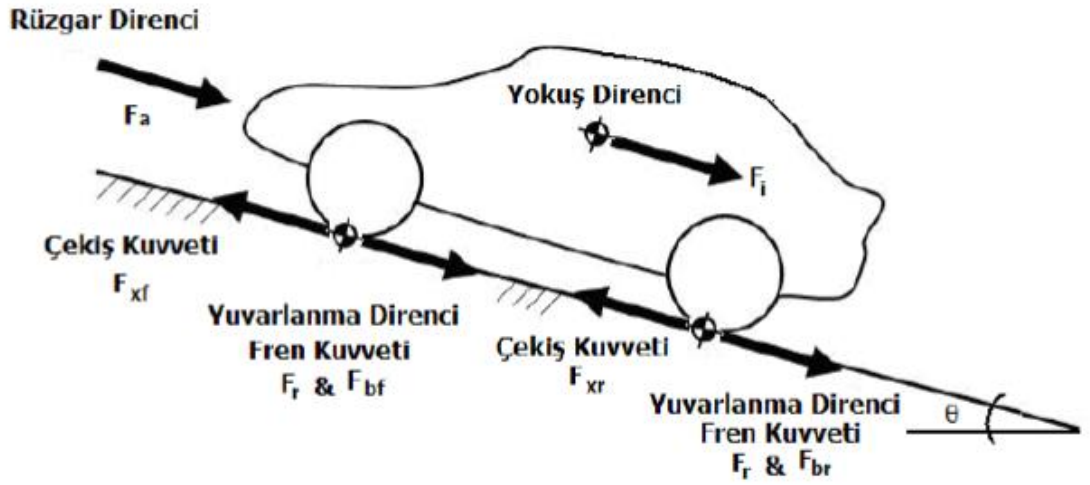
Çizelge 3.1 Sürüş çevrimlerine ait temel özellikler [14]

Sürüş Çevrimi	Toplam Mesafe (m)	Süre (s)	Ortalama Hız (km/h)
NEDC (Yeni Avr. S. Ç.)	11023	1189	33,6
US06	12800	596	77,9
FTP-75	17750	1874	34,1
10-15 MOD	4150	660	22,7
ABR02	19200	1600	43,21
İstanbul	8600	1003	30,09

Çalışmada kullanılan modelde sürüş çevrimine ait hız, zaman ve dişli oranı değerleri girdi olarak verilmiştir. Modelde hızın türevi alınarak aracın ivmesi, integrali alınarak ise kat edilen mesafe hesaplatılmıştır.

3.1.2. Taşıt Dinamiği

Taşıtın hareket doğrultusunda hareket edebilmesi için yenmesi gereken birtakım direnç kuvvetleri vardır. Bunlar, aerodinamik, yuvarlanma, ivmelenme ve eğim dirençleri olarak sınıflandırılabilir. Bu dirençlerin oluşturduğu kuvvetler Şekil 3.5'te temsili olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada aracın tahrik kuvveti hesaplandığı için sadece hareket yönündeki kuvvetler modellenmiştir.



Şekil 3.5 Taşıta etki eden direnç kuvvetleri

Genel olarak taşıt hareket denklemi Eşitlik 3.1'de izah edilmiştir.

$$F_t = F_a + F_y + F_i + F_e \quad (3.1)$$

Burada,

F_t : tahrik kuvveti (N),

F_a : aerodinamik direnç kuvveti (N),

F_y : yuvarlanma direnci (N),

F_i : ivmelenme direnci (N),

F_e : eğim direnci (N)

şeklinde ifade edilmektedir.

Hesaplanan tahrik kuvveti, o andaki dirençleri yenmek ve aracı harekete geçirmek için gereken toplam kuvvettir. Buna göre Eşitlik 3.2’de belirtildiği şekilde taşıtın tekerinde oluşan tahrik momenti hesaplanabilir.

$$T_t = F_t * r_t \quad (3.2)$$

Burada,

T_t : tekerdeki tahrik momenti (Nm),

F_t : tekerdeki tahrik kuvveti (N),

r_t : teker yarıçapı (m)

şeklinde ifade edilmektedir. Taşıt modelinin çıktılarından birisi buradan hesaplanan tahrik momentidir.

Taşıt modelinde hesaplanan bir başka değer ise tekerin hızıdır. Bu değer hesaplanışı sürüş çevriminden alınan hız değerinin teker yarıçapına bölümü ile hesaplanır ki bu işlem Eşitlik 3.3’te gösterilmiştir.

$$\omega_t = v / r_t \quad (3.3)$$

Burada,

ω_t : teker hızı (rad/s),

v : taşıt hızı (m/s),

r_t : teker yarıçapı (m)

şeklinde ifade edilmektedir.

Eşitlik 3.1’de ifade edilen direnç kuvvetlerinin matematiksel modellenmesi şu şekilde yapılmıştır:

3.1.3. Aerodinamik Direnç Kuvveti

Aerodinamik direnç kuvveti rüzgarın yönüne göre araca etki eden düşük ve yüksek basınç nedeniyle oluşan bir kuvvettir. Eşitlik 3.4’te bu direnç kuvveti izah edilmiştir.

$$F_a = 0,5 * \rho * C_d * A_f * \left(\frac{v \pm v_r}{3,6} \right)^2 \quad (3.4)$$

Burada,

ρ : havanın yoğunluğu (kg/m³),

C_d : aerodinamik direnç katsayısı (-),

A_f : taşıtın ön yüzey alanı (m²)

v : taşıt hızı (km/h),

v_r : rüzgar hızı (km/h)

şeklinde ifade edilmektedir. Eğer rüzgar ile taşıtın hareket yönü aynı ise taşıt hızı ile rüzgar hızı arasındaki işaret pozitif, aksi halde negatif olarak alınır.

3.1.4. Yuvarlanma Direnci

Yuvarlanma direnci, tekerlerde yoldaki sürtünme nedeniyle oluşan direnç kuvvetidir. Eşitlik 3.5'te bu direnç kuvveti izah edilmiştir.

$$F_y = \mu * m * g * \cos(\alpha) \quad (3.5)$$

Burada,

μ : yuvarlanma direnç katsayısı (-),

m : taşıt ağırlığı (kg),

g : yer çekimi ivmesi (m/s²),

α : yolun eğim açısı (°)

şeklinde ifade edilmektedir.

3.1.5. İvmelenme Direnci

İvmelenme direnci taşıtın harekete geçmesi veya hızını artırması için yenmesi gereken dirençtir. Bu direncin oluşturduğu kuvvet atalet kuvveti olarak bilinir. Atalet kuvveti, hem doğrusal yöndeki kütlelerin yanı sıra dönme hareketi yapan tekerlek, dişliler, şaftlar gibi elemanların ataletinden oluşur. Bilhassa aracın ilk hareketi ve frenleme esnasında ivmelenme direncinin etkisi büyümektedir. Eşitlik 3.6'da bu direnç kuvveti izah edilmiştir.

$$F_i = m * a \quad (3.6)$$

Burada

m : taşıt ağırlığı (kg),

a : taşıt ivmesi (m/s²)

şeklinde ifade edilmektedir.

3.1.6. Eğim Direnci

Eğim direnci, taşıtın yol eğimine bağlı olarak taşıtın ağırlığından kaynaklanan direnç kuvvetidir. Eşitlik 3.7’de bu direnç kuvveti izah edilmiştir.

$$F_e = m * g * \sin(\alpha) \quad (3.7)$$

Burada,

m : taşıt ağırlığı (kg),

g : yer çekimi ivmesi (m/s^2),

α : yolun eğim açısı ($^\circ$)

şeklinde ifade edilmektedir.

Standart sürüş çevrimlerinde genellikle yol eğimsiz olduğu için bu kuvvetin etkisi olmayacaktır. Bu çalışmadaki taşıt modelinde de $\alpha=0^\circ$ olduğundan bu kuvvet sıfır olarak hesaplanmaktadır.

3.1.7. Dişli Kutusu

SHEA’lar EM ile tahrik edildiği için oldukça ideal bir tork performansına sahiptirler. Bundan dolayı şanzımana ihtiyaç duymazlar. Ancak, bu çalışmada EM ile tekerlere güç ileten aksın arasında hız düşürücü (redüktör) adı verilen ve tek kademesi bulunan bir dişli sistemi kullanılmıştır. Bu dişli sistemi, tasarıma göre diferansiyel ile bağlantılı olabilmektedir. Dişli modelinde tork aktarım hesabı Eşitlik 3.8’de ifade edilmiştir.

$$T_d = \frac{T_t}{i_d * \eta_d} \quad (3.8)$$

Burada,

T_d : dişli şaftındaki tork (Nm)

T_t : tekerdeki tork (Nm),

η_d : dişli verimi (-),

i_d : dişli oranı (-)

şeklinde ifade edilmektedir.

Aynı şekilde, teker hızı girdi alınarak dişli şaftının hızı Eşitlik 3.9’daki hesaplanabilir.

$$\omega_d = \omega_t * i_d \quad (3.9)$$

Burada,

ω_d : dişli şaftındaki hız (rad/s),

ω_t : teker hızı (rad/s),

i_d : dişli oranı (-)

şeklinde ifade edilmektedir.

3.1.8. Elektrik Motoru

Geriye dönük modellemeye dişliden çıkan tork ve hız, EM'nin giriş tork ve hız değeridir. Ancak bu kez çıktı olarak EM gücü hesaplanır. Bir başka deyişle aracın sürüş çevrimindeki hızında aracın sürülebilmesi için EM'nin çıkış şaftındaki tork ve hız değeri hesaplanır ve bu değerler ile EM'nin o anda hangi güçte çalışması gerektiği bulunur. EM, batarya ve/veya jeneratörden bu gücü alıp aracı tahrik edebileceği gibi tekerden gelen rejeneratif frenleme kuvvetini bir jeneratör görevi görerek bataryayı şarj etmek amaçlı kullanabilir. Bundan dolayı EM gücü, Eşitlik 3.10'da sürücü modunda, Eşitlik 3.11'de ise jeneratör modunda olarak hesaplanır.

$$P_{em} = \frac{\omega_{em} * T_{em}}{\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})} \quad (3.10)$$

Burada,

P_{em} : elektrik motoru gücü (W),

ω_{em} : elektrik motoru hızı (rad/s),

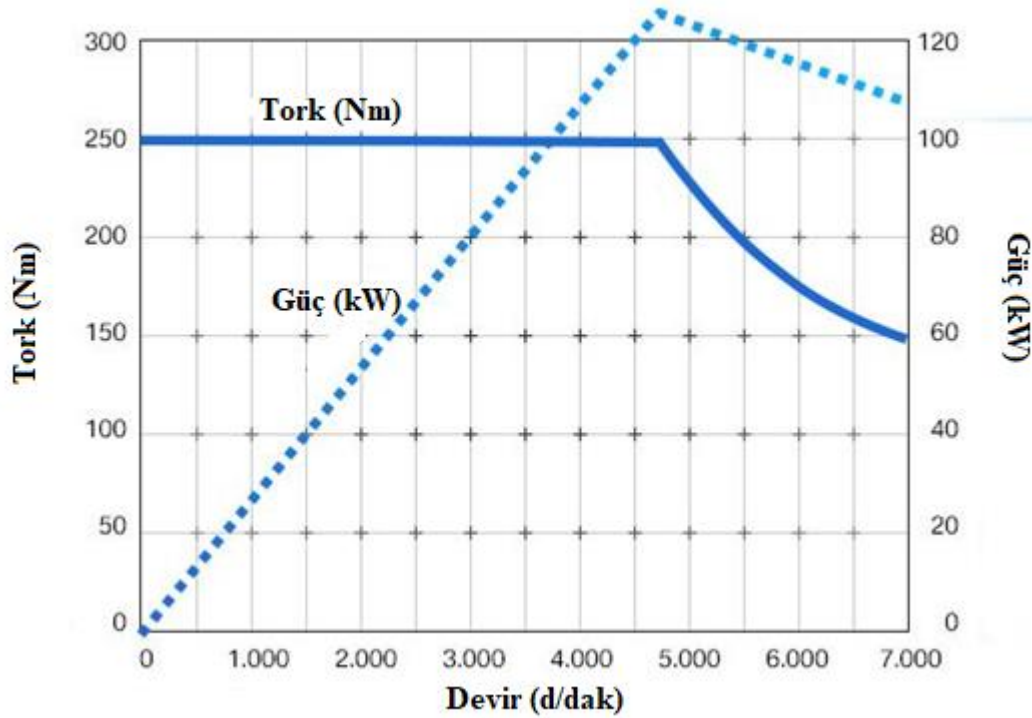
T_{em} : elektrik motoru torku (Nm),

$\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})$: elektrik motoru tork ve hızına göre verimliliği

şeklinde ifade edilmektedir. Burada girdi olarak alınan tork ve hız değerleri, dişli modelinde çıktı olarak alınan tork ve hız değerleridir. EM, hız ve tork değerleri pozitifken ($\omega_{em} > 0, T_{em} > 0$) bu modda çalışır ve güç bu formülle hesaplanır. Modelde, tork ve hıza göre değişen EM verimliliği döngü tablosu (look-up table) adı verilen birimle tanımlanmıştır.

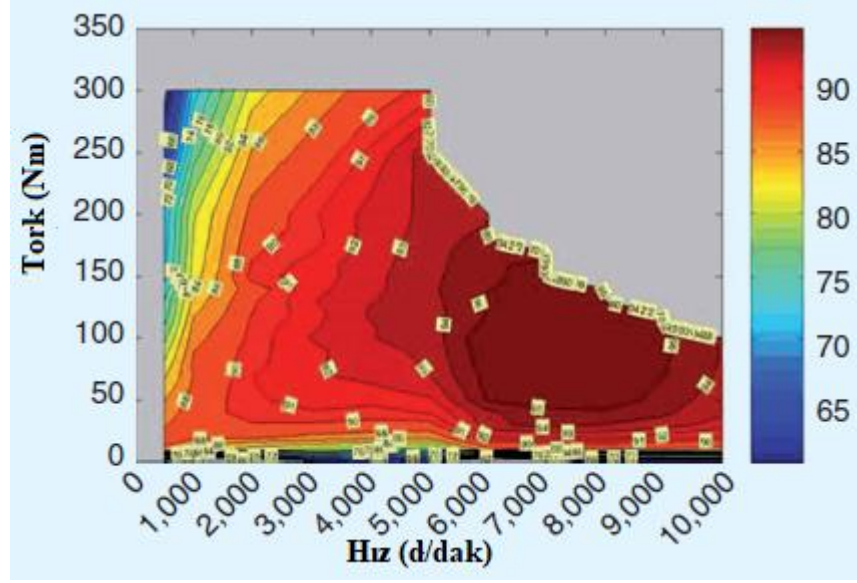
$$P_{em} = \omega_{em} * T_{em} * \eta_{em}(\omega_{em}, T_{em}) \quad (3.11)$$

Eğer EM giriş hızı pozitif ancak giriş torku negatif ise ($\omega_{em} > 0, T_{em} < 0$) güç Eşitlik 3.11’de gösterildiği şekilde hesaplanır. Ayrıca modelde, Şekil 3.6’da gösterilen maksimum hız ve tork değerleri tanımlı olup bu değerlerin aşılması engellenmiştir. Şekil 3.6’dan anlaşıldığı üzere EM’nin dolayısıyla aracın ulaşabildiği maksimum tork 250 Nm, maksimum güç ise 125 kW’dır.



Şekil 3.6 Elektrik motoru güç-tork-hız grafiği [3]

Bir EM’ye ait tork ve hız bazında verimlilik haritası ise Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Örnek bir elektrik motoru verimlilik haritası

3.1.9. Batarya

Hibrit ve Elektrikli Araçların en önemli birimlerinden birisi olan bataryalar, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan, sürüş durumuna göre enerjiyi şarj veya deşarj eden sistemdir. Bu çalışmanın da asıl amacı olan yakıt sarfiyatının en aza indirgenmesinde başrol batarya SoC'un maksimum seviyede tutulmasıdır. Bu sebeple yakıt optimizasyonlarında amaç fonksiyonları genellikle ya minimum yakıt sarfiyatı ya da maksimum SoC olarak ifade edilir.

Bataryanın modellenmesinde girdi olarak bataryadan istenen güç değeri ve toplam alınan mesafe verilirken, çıktı olarak ise batarya şarj durumu alınır. Bunun yanı sıra bataryaya ait voltaj ve akım değerleri de okunabilir.

Batarya modelindeki temel matematiksel ifadeler [5] şu şekildedir:

$$I_{bat} = \frac{Q_{bat}}{t} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \quad (3.12)$$

$$V_{bat} = V_{SoC} + I_{bat} * R_{iç} \quad (3.13)$$

$$SoC = SoC_{ilk} + \Delta SoC \quad (3.14)$$

$$\Delta SoC = \frac{\int_{t_0}^{t_1} I_{bat}}{C_{bat} * 3600} \quad (3.15)$$

$$\eta_{bat} = \frac{V_{SoC} * |I_{bat}| - I_{bat}^2 * R_{iç}}{V_{SoC} * |I_{bat}|} \quad (3.16)$$

Burada,

Q_{bat} : elektrik yükü (C),

t : zaman (s),

I_{bat} : batarya akımı (A),

P_{bat} : batarya gücü (W),

V_{bat} : batarya gerilimi (V),

V_{SoC} : SoC'a göre batarya gerilimi (V),

$R_{iç}$: batarya iç direnci (ohm),

SoC_{ilk} : batarya ilk SoC (-),

C_{bat} : batarya kapasitesi (Ah),

η_{bat} : batarya verimi (-)

şeklinde ifade edilmektedir. SHEA modelinde kontrol edilecek parametre olan SoC hesabı Eşitlik 3.14 ve 3.15'te izah edilmiştir. Buna göre, SoC'ü belirleyen değişken parametre ise akımdır. Akımın hesabı ise Eşitlik 3.12'de gösterildiği üzere talep edilen güce bağlıdır.

3.1.10. İçten Yanmalı Motor, Yakıt Tankı ve Jeneratör

İçten yanmalı motor ve jeneratör sistemi arasında bir de dişli sistemi bulunur. Bu sistemin amacı taşıtın elektrikli araç gibi çalıştığı belli bir SoC seviyesinde devreye girerek bataryayı şarj etmektir ve/veya aracın sürüş ihtiyacına göre tahrik gücüne katkıda bulunmaktır. Ancak, bu sistem teker aksına doğrudan bağlı bulunmadığı için İYM arzu edilen tork ve hız devirlerinde çalıştırılarak jeneratör aksından çıkacak olan güce karar verilebilir. Bu gücün ne olması gerektiği, sistemin hacmi, maliyeti, şarj kapasitesi gibi farklı parametreler göz önünde bulundurularak tasarımcının karar vermesi gereken bir

durumdur. Eğer İYM gücü yüksek olursa, kapladığı hacim ve yakıt sarfiyatı artar; buna karşın bataryayı şarj etme hızı artmış olur. Diğer yandan gücün çok az olması batarya şarj performansı düşüreceği için aracın güç ihtiyaçlarını karşılayamama riski taşır. Kısacası, İYM ve jeneratör sisteminin hangi güçte çalışacağı, ne kadar yakıt sarfiyatına sebep olacağı, bataryanın hangi SoC seviyesinde devreye gireceği ve hangi seviyeye kadar şarj edeceği konuları optimizasyon probleminin temelini oluşturur. Bu konuyla alakalı detaylı bilgiler kontrol stratejileri kısmında açıklanmıştır. İYM'nin tork ve hız değerlerinin hangi noktada çalışacağı kontrol ünitesinde belirlenen kriterlere göre hesaplanmıştır. İYM'den alınan tork ve hıza göre ise jeneratör sistemi çalışacaktır.

İYM'nin modellenmesinde baz alınan temel unsur yakıt sarfiyatı haritasıdır. EM'de olduğu gibi İYM'de de tork ve hız limitleri modelde belirtilmiş ve bu limitlerin aşılması engellenmiştir. Bu limitler içinde her tork ve hız değerleri için İYM'nin yakıt sarfiyatı döngü tablosu olarak işlenmiştir. İşlenen verilerin örnek gösterimi Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu çizelgede V_{CE} (kg/s) şeklinde ifade edilen fonksiyon yakıt sarfiyatı birimidir.

Çizelge 3.2 İYM yakıt sarfiyatınının tork ve hız değerlerine göre tablo haline getirilmesi

$V_{CE}(\omega_{\min}, T_{\min})$	$V_{CE}(\omega_{\min}, T_{\max})$
.....	
.....	
.....	
$V_{CE}(\omega_{\max}, T_{\min})$	$V_{CE}(\omega_{\max}, T_{\max})$

Modelde İYM'nin girdileri, kontrol ünitesinin çıktıları olan optimum tork ve hız değerleridir. İYM'nin çalışacağı tork ve hız, modelin içinde bulunan yakıt sarfiyatı haritasına girdi olarak verilir. Çizelge 3.2'de temsil edilen bu tabloda tork ve hıza göre yakıt sarfiyatı belirlenir ve sistemden çıktı olarak alınır. Yakıt sarfiyatı çıktısı (V_{CE}) İYM

modelinde aşağıdaki matematiksel modellerden geçerek İYM'nin gücü belirlenir ve modelden çıktı olarak alınır.

$$P_{CE} = \eta_e * \dot{m}_y * H_u \quad (3.17)$$

Burada,

P_{CE} : içten yanmalı motorun efektif gücü (kW),

η_e : içten yanmalı motorun efektif verimi (-),

\dot{m}_y : içten yanmalı motorun yakıt sarfiyatı (kg/s),

H_u : yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)

şeklinde ifade edilmektedir. Burada hesaplanan efektif gücü çıktısı, sistemde yakıt tankı modeline girdi olarak verilir.

Yakıt tankı olarak modellenen birimde İYM'nin efektif gücünün oluşturduğu özgül yakıt sarfiyatı hesaplanmaktadır. Bu işlem Eşitlik 3.18'de ifade edilmiştir.

$$\dot{b}_e = \frac{3600 * \dot{m}_y}{P_{CE}} \quad (3.18)$$

Burada,

\dot{b}_e : Özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh),

P_{CE} : içten yanmalı motorun efektif gücü (kW),

\dot{m}_y : içten yanmalı motorun yakıt sarfiyatı (kg/s)

şeklinde ifade edilmektedir. Yakıt sarfiyatının (\dot{m}_y) integrali alınarak toplam yakıt sarfiyatı kg cinsinden hesaplanmıştır. Toplam yakıt sarfiyatı üzerinden aşağıdaki işlemler uygulanarak taşıtın 100 km için kaç litre yakıt tükettiği hesaplanmıştır.

$$V_y = \frac{m_y * 10^5}{\rho_y * x_t} \quad (3.19)$$

Burada,

V_y : yakıt sarfiyatı (lt/100 km),

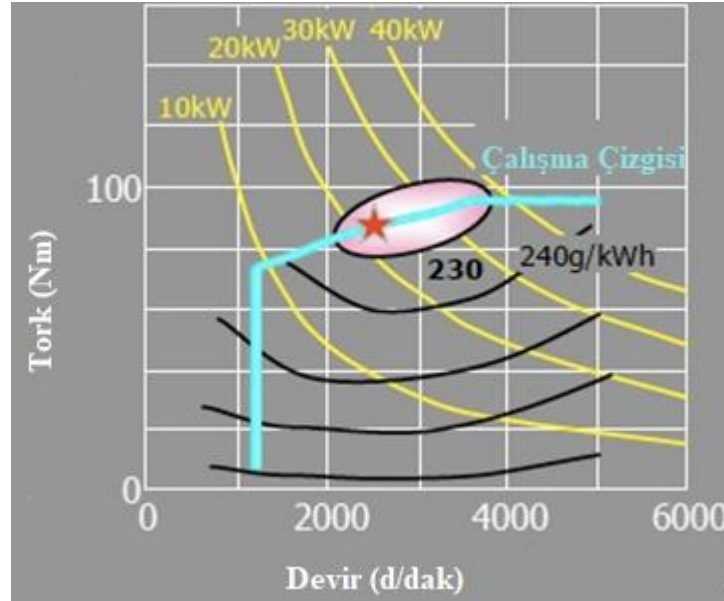
m_y : toplam yakıt sarfiyatı (kg),

ρ_y : yakıt yoğunluğu (g/cm³),

x_t : toplam mesafe (m)

şeklinde ifade edilmektedir.

Özgül yakıt sarfiyatının hesaplanmasının önemi Şekil 3.8’de Toyota Prius aracına ait olan motorun tork ve devrine bağlı olarak gösterilen yakıt sarfiyatı haritasında daha iyi anlaşılmaktadır. Şekil 3.8’de siyah çizgiler özgül yakıt sarfiyatını, sarı çizgiler ise motorun sabit güç eğrilerini ve son olarak mavi renkli olarak gösterilen çizgi ise bu motorun farklı güç, tork ve devirlerde çalışabileceği en iyi noktaları göstermektedir. Daire içine alınan alan özgül yakıt sarfiyatı açısından motorun optimum çalışma alanını gösterirken yıldız ile işaretlenen nokta ise minimum yakıt sarfiyatına sahip olduğu noktadır.



Şekil 3.8 İçten yanmalı motor özgül yakıt sarfiyatı haritası [1]

Bu çalışmada İYM’nin Şekil 3.8’de yıldız ile gösterilen optimum çalışma noktası, bir başka deyişle minimum yakıt sarfiyatına sahip olan tork ve devir değerlerinin optimizasyon yöntemleri ile bulunarak yakıt optimizasyonu yapılması hedeflenmiştir.

Kontrol ünitesinden çıktı olarak alınan optimum tork ve devir değerleri İYM’nin yanı sıra hız düşürücüye girdi olarak verilmiştir. Dişli kutusuna benzer mantıkla tork ve devir değerleri dişli oranına göre hesaplanarak EM ile aynı mantıkta çalışan jeneratöre

iletilmiştir. Jeneratör, EM ile aynı verimlilik haritasını kullanarak modellenmiş ve buna göre GENSET'ten çıkan nihai tork ve devire göre jeneratör gücü hesaplanmıştır. Hız kesici ve jeneratör teorisi şu matematiksel işlemlerle ifade edilir:

$$P_{EG} = \eta_{EG} * T_{EG} * \omega_{EG} \quad (3.20)$$

$$T_{EG} = \frac{T_{opt}}{i_r} \quad (3.21)$$

$$\omega_{EG} = i_r * \omega_{opt} \quad (3.22)$$

Burada,

P_{EG} : jeneratör gücü (W),

T_{EG} : jeneratör torku (Nm),

ω_{EG} : jeneratör hızı (rad/s),

η_{EG} : jeneratör verimi (-),

T_{opt} : optimum tork (Nm),

ω_{opt} : optimum hız (rad/s),

i_r : redüktör dişli oranı (-)

şeklinde ifade edilmektedir.

3.1.11. Kontrol Ünitesi

Kontrol ünitesi, SHEA modelinin Bölüm 3.2'de açıklanan kontrol stratejilerini gerçekleştirmek üzere oluşturulan dolayısıyla sistemin yakıt optimizasyonu sağlayan ve Bölüm 3.3'te açıklanan optimizasyon yöntemlerinin bir kısmının uygulanabildiği birimdir. Modelin girdileri olan SoC bilgisi bataryadan, toplam mesafe sürüş çevriminden alınmaktadır. Minimum ve maksimum SoC değerleri ise modelin limitleri olarak tanımlanır. Modelin içinde tanımlanan bir Matlab fonksiyonu ve Matlab Simulink Optimizasyon Yöntemi (Response Optimization) ile kontrol stratejilerinin mantığı uygulanarak İYM'nin optimum tork ve devri bulunmuştur. Sistemin çıktısı olarak optimize edilmiş tork ve devir değerleri İYM modeline entegre edilmiştir.

3.1.12. Model Girdileri

Tasarlanan SHEA modelinde sürüş çevrimi girdi olarak verilen ilk bilgidir. Sürüş çevriminden hız ve zaman bilgisi ile beraber ivme ve alınan yol mesafesi bilgileri sistemde kullanılmıştır. Bunun haricinde Bölüm 3.1’de matematiksel olarak ifade edilen eşitliklerde kullanılan sabit veriler ve araca ait olan temel bilgiler Çizelge 3.3’te izah edilmiştir.

Çizelge 3.3 Modellerde kullanılan sabit değerler

Parametre	Değer
Taşıt kütlesi (kg)	1365
Taşıtın ön yüzey alanı (m ²)	2,38
Teker çapı (m)	0,7
Yer çekimi ivmesi (m/s ²)	9,81
Havanın yoğunluğu (kg/m ³)	1,18
Aerodinamik direnç katsayısı (-)	0,3
Yuvarlanma direnç katsayısı (-)	0,008
Yolun eğim açısı (°)	0
Dişli verimi (-)	0,98
Dişli oranı (-)	3,5
Batarya ilk SoC (-)	0,60
Batarya kapasitesi (Ah)	94
Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)	42700
Yakıt yoğunluğu (g/cm ³)	0,745
Redüktör dişli oranı (GENSET) (-)	0,75

Bu çalışmada BMW i3 Range Extender modeli baz alınmıştır. Araçta kullanılan EM verileri Çizelge 3.4’te, batarya verileri Çizelge 3.5’te ve İYM verileri Çizelge 3.6’da ifade edilmiştir.

Çizelge 3.4 BMW i3 Range Extender elektrik motor verileri

Özellik	Değer
Maksimum güç (kW)	125
Maksimum tork (N.m)	250
Maksimum geri kazanım (kW)	50

Çizelge 3.5 BMW i3 Range Extender batarya verileri

Özellik	Değer
Gerilim (V)	353
Enerji kapasitesi (kW.h) (gross/net)	33,2/27,2
Depolama teknolojisi (-)	Lityum-ion

Çizelge 3.6 BMW i3 Range Extender içten yanmalı motor verileri

Özellik	Değer
Konfigürasyon/Silindir sayısı/Silindir başına düşen valf sayısı (-)	sıra tip/ 2 / 4
Hacim (cm ³)	647
Strok/Bor (mm / mm)	66 / 79
Maksimum güç / devir (kW / rpm)	28 / 5000
Maksimum tork / devir (Nm / rpm)	56 / 4500
Sıkıştırma oranı (-)	10,6

Bu çalışmada kullanılan SHEA modelinin bir benzeri L. Guzzella ve A. Sciarreta tarafından [7] bir seri hibrit elektrikli otobüs modelinde kurulmuştur. Farklı optimal kontrol teorilerinin ele alındığı çalışmada modelin doğrulanması yapılmıştır. SHEA felsefesi ile hazırlanan diğer çalışmalarda da benzer modeller kurulmuş, farklı kontrol stratejileri ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak araçtaki yakıt sarfiyatının gelişimi raporlanmıştır. [8] [15][4][11]

3.2. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar için Kontrol Stratejileri

Kontrol stratejileri hibrit araçlarda hangi elemanın ne zaman çalışması gerektiği ile alakalı birtakım kuralları barındıran ve aracın kontrol biriminde bulunan algoritmadır. Seri hibrit elektrikli araçlarda temel olarak *maksimum SoC kontrol stratejisi* ve *termostat kontrol stratejisi* olmak üzere iki farklı strateji uygulanmaktadır. Bu kontrol stratejileri çalışmadaki SHEA modelinde kontrol ünitesindeki programın algoritmasını teşkil eder.

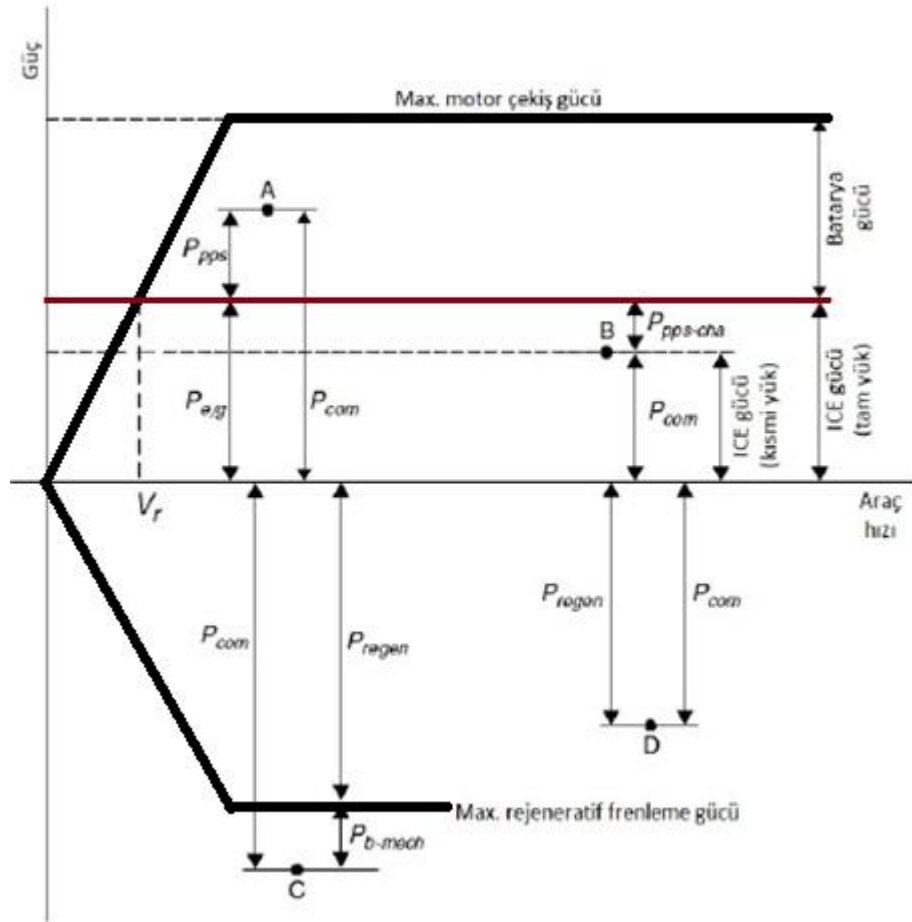
3.2.1. Maksimum Şarj Durumu Kontrol Stratejisi

Maksimum SoC kontrol stratejisinde öncelikli amaç, motor gücünün sınırları içerisinde aracı sürmektir. Aracı tahrik eden sürücünün yani SHEA'da EM'nin enerji talebini batarya veya GENSET karşılamaktadır. Kontrol stratejisi, değişen durumlara göre gücün hangi birimden ve ne miktarda olacağına karar verir. Maksimum SoC kontrol stratejisinde temel faktör ise SoC değerini olabilecek en yüksek seviyede tutabilmektir. Bu sayede aracın performansı açısından genişlik sağlanmış olur. Şekil 3.9'da SHEA için maksimum SoC kontrol stratejisi şablonu verilmiştir. Buna göre güç ekseninde maksimum limit, aracı süren EM'nin gücüdür. Bu aynı zamanda maksimum geri kazanımlı (rejeneratif) frenleme gücü limitini belirler. Diğer bir limit ise İYM'nin tam yükte ve sabit olarak alınan gücüdür. SHEA'da İYM'nin optimum noktada sabit güçte çalışması beklenir. Bu limitler içinde araç, A, B, C ve D noktalarında çalışabilir.

- A noktasında, aracın talep ettiği tahrik gücü İYM'nin gücünden fazladır. Bu durumda talep edilen güç, İYM'nin gücüne ek olarak bataryadan sağlanır.
- B noktasında ise aracın talep ettiği tahrik gücü İYM'nin optimum noktada ürettiği güçten azdır. Bu durumda ise batarya SoC kontrol edilir. Eğer, SoC belirlenen limitin altında ise İYM optimum noktada çalışır ve aradaki fark ile batarya şarj edilir. Ancak, SoC en yüksek seviyede ise bu kez İYM kısmi yükte çalışmaya zorlanır. Bu durumun oluşturduğu sorun termostat kontrol stratejisi ile giderilmiştir.
- C noktasında araç frenleme bölgesinde demektir. Ancak bu durumda aracı frenlemek için gerekli frenleme gücü EM'nin maksimum geri kazanımlı frenleme gücünden fazla olduğu için frenleme gücünün eksik kısmı mekanik fren ile

karşılır. Mekanik frenleme gücü, hibrit araçların geri kazanım avantajından faydalanamayan, fren sisteminin ömrünü azaltan ve ısı yoluyla dışarıya gönderilen bir kayıptır.

- D noktasında ise frenleme gücü EM'nin maksimum geri kazanımlı frenleme gücünden daha az olduğu için bu güç nispetince bataryaya enerji kazandırılmış olur. Bir başka deyişle bu noktada C noktası gibi EM jeneratör görevinde çalışır.



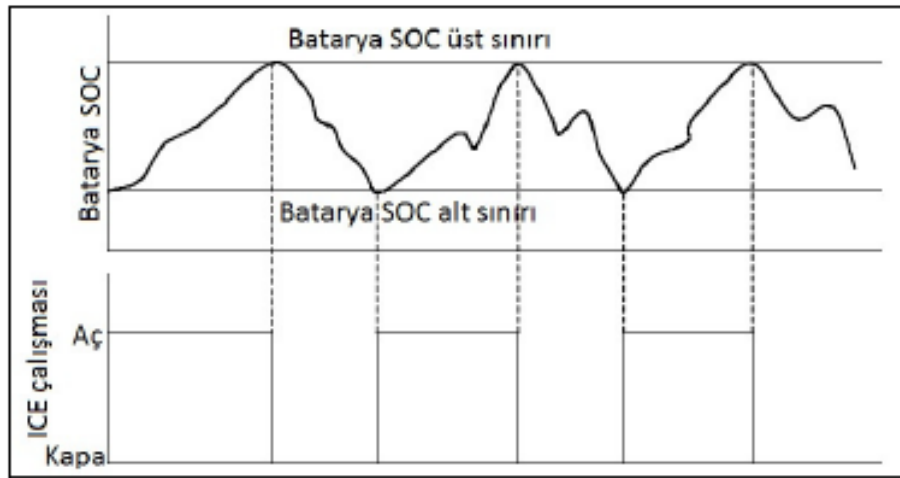
- A — Hibrit çekiş modu
 P_{com} — İstenen güç
 P_{pps} — bataryaların gücü
 $P_{e,g}$ — ICE nin gücü
- B — Yalnızca ICE çekiş modu ya da batarya dolun modu
 $P_{pps-cha}$ — Batarya dolun gücü
- C — Hibrit frenleme modu
 P_{regen} — Rejeneratif frenleme gücü
 P_{b-mech} — Mekanik frenleme gücü
- D — Rejeneratif frenleme modu

Şekil 3.9 Maksimum SoC kontrol stratejisi

Bu kontrol stratejisinde İYM'nin çalışması öncelenmiştir. Bundan dolayı tek başına maksimum SoC kontrol stratejisi yeterince verimli olmayacaktır. Dolayısıyla termostat kontrol stratejisine ihtiyaç duyulmuştur ve iki kontrol stratejisi entegre edilmiştir.

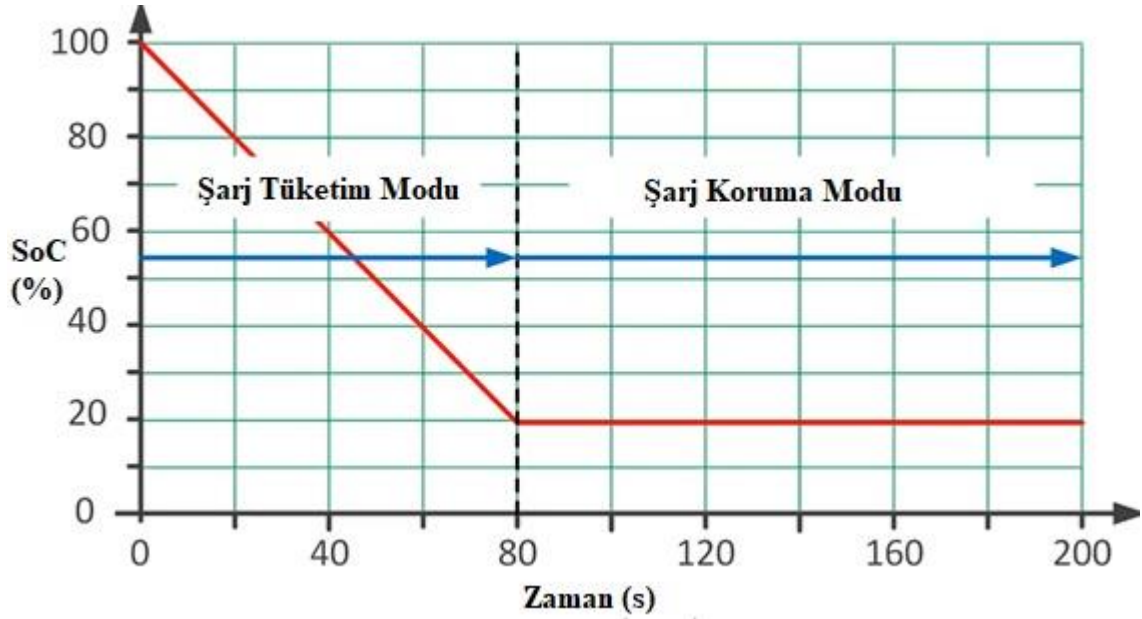
3.2.2. Termostat (Aç-Kapa) Kontrol Stratejisi

Termostat kontrol stratejisi, maksimum SoC kontrol stratejisinde İYM'nin sürekli çalışması ile oluşan handikapları engellemek adına ortaya çıkmıştır. SoC, maksimize edilirken aynı anda sistemin yakıt sarfıyatı ve emisyonlar göz önünde bulundurularak daha verimli çalışması arzu edilir. Bundan dolayı Şekil 3.9'daki çalışma noktalarında aynı zamanda batarya SoC'ı kontrol ederek belli seviyenin üstüne ulaşması veya üstünde bulunması durumunda İYM'nin kapanması yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Örneğin, araç Şekil 3.9'da B noktasında seyrederken belirlenen SoC limitinin üstünde olması durumunda tüm gücün bataryadan sağlanması ve İYM'nin kapalı olması sistemi daha verimli kılar. Çünkü elektrik enerjisi petrol türevinden daha ucuz ve çevre kirliliği açısından tercih sebebidir. Ayrıca, SoC maksimize edildiğinde İYM'nin çalışması çalışma noktası ile İYM gücü arasındaki fark kadar gücün israf olmasına veya İYM'nin optimum noktadan başka bir noktada çalışmasına zorlamış olacaktır. Kısaca, bu kontrol stratejisi ile beraber aracın güç talebi batarya öncelikli olacak ancak aynı anda SoC kontrol edilerek belli seviyenin altına düşmesi ile İYM devreye girecektir. İYM bu sayede her zaman optimum noktada çalışabilmektedir. Bu durum Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Termostat (aç-kapa) kontrol stratejisi [5]

İYM'nin açık veya kapalı olması batarya SoC değerine bağlı olduğu için limitlerin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Şekil 3.11'de örnek bir SHEA bataryasının şarj tüketme (charge depletion) ve şarj koruma (charge sustaining) modlarının görünümü verilmiştir. Şarj koruma moduna geçilen SoC değeri termostat kontrol stratejisinin minimum SoC seviyesidir. Bu seviye eğer çok yüksek seçilirse İYM çok sık devreye girecek, dolayısıyla hibrit aracın amacı olan elektrikli araç gibi çalışma modu süresi azalmış olacaktır. Diğer yandan bu seviyenin çok düşük tutulması, aracın yüksek güçlerde çalışması durumunda şarjının hızlı bir şekilde tükenmesi sorununu yaratacaktır. Bataryadan yüksek güç çekilmesi halinde oluşan batarya güç kayıpları da artmaktadır. Dolayısıyla İYM çalışma aralığı ideal olarak seçilmelidir.



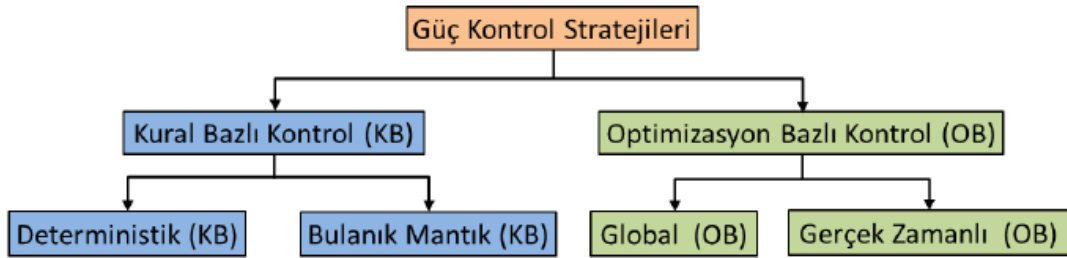
Şekil 3.11 Şarj tüketme ve şarj koruma modları

3.3. Seri Hibrit Elektrikli Araçlar için Enerji Yönetimi Optimizasyonu

Hibrit ve elektrikli araçlarda en önemli ve temel sorunlardan birisi enerji yönetimidir. HEA'nın genel amacı EM ve İYM'nin olumlu yönlerini karma hale getirerek konvansiyonel araçlara göre daha verimli bir sistem oluşturmak olduğu için EM ve İYM'nin çalışma periyotları da en doğru şekilde karar verilmelidir. Bunun yanı sıra alt elemanların optimum verilerle çalışarak yakıt tasarrufu sağlaması en önemli çalışma

alanları arasındadır. HEA optimizasyon yöntemleri temel olarak üç gruba ayrılır: yapısal optimizasyon, parametrik optimizasyon ve optimal kontrol [7].

Yapısal optimizasyon, bir başka deyişle **topoloji optimizasyonunda** amaç HEA bileşenlerinin en iyi şekilde yerleştirilmesidir. Her bir topoloji seçimi, elemanın boyutlandırmasını ve kontrol değişkenlerini belirler. **Parametrik optimizasyon**, elemanlara ait parametrelerin bir başka deyişle verilerin en iyi şekilde seçilmesini ifade eder. Her bir elemanın boyutu sınır şartlarını belirler. **Optimal kontrol** ise denetleyici (supervisory) kontrol algoritmalarının en iyi şekilde bulunmasını ifade eder. Optimal kontrolde amaç, çeşitli sınır şartları altında taşıtın talep ettiği gücü ve sürdürülebilirliği sağlamak kaydıyla en az yakıt sarfiyatını sağlamak için en uygun sürüş hattının seçilmesidir. Bu çalışmada bileşen parametreleri sabit alınarak optimal kontrol çalışması yapılmıştır. Şekil 3.12’de optimal kontrol stratejileri gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Güç kontrol stratejileri sınıflandırılması

HEA optimizasyon yöntemleri çok farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle HEA için yapılan iki farklı optimizasyon yönteminin sonuçları kıyaslanmaktadır. Örneğin, lokal optimizasyon ile global optimizasyon, deterministik optimizasyon ile stokastik optimizasyon veya gradyan bazlı optimizasyon ile türev bazlı optimizasyon yöntem çiftlerinin karşılaştırılması gibi çok çeşitli optimizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin alt kümeleri olarak da çok sayıda teknik kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemlerden birisi **kural bazlı optimizasyon** (KB) diğeri ise **dinamik programlama** (DP) yöntemidir. Kural bazlı optimizasyon ve dinamik programlama kıyaslaması Çizelge 3.7’de gösterilmiştir [12].

Çizelge 3.7 Kural bazlı optimizasyon ve dinamik programlama kıyaslaması (Hofman ve Steinbuch, 2007)

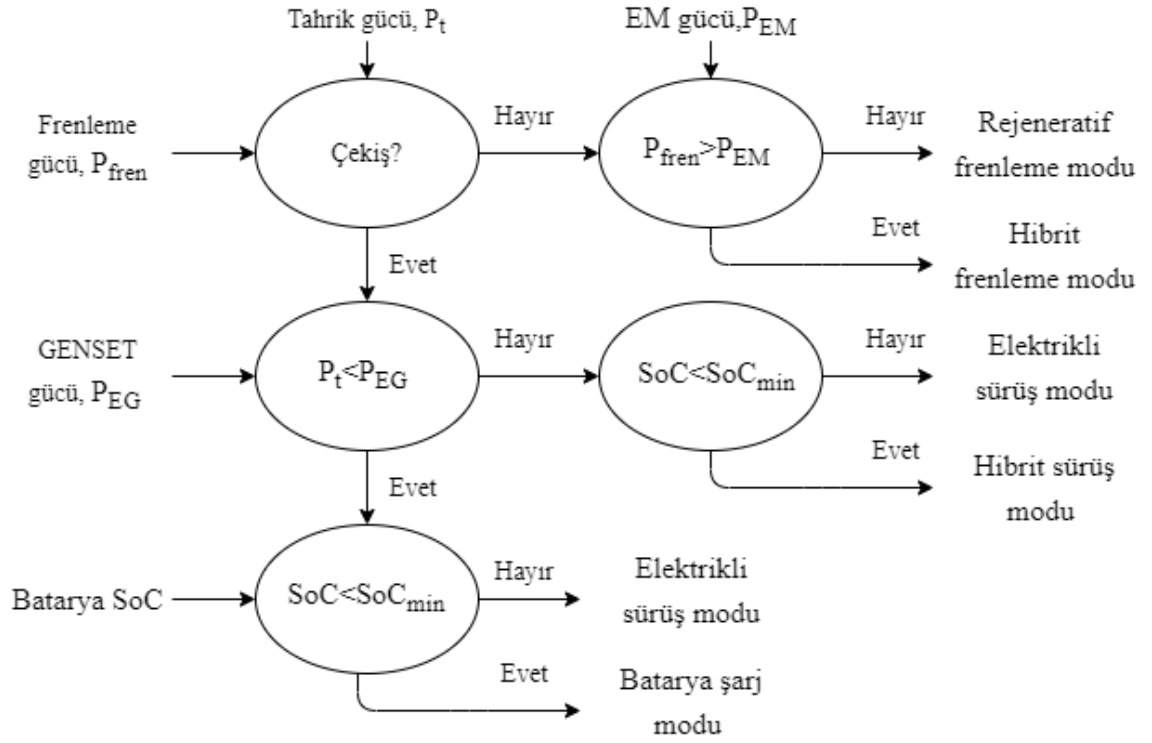
Kural bazlı optimizasyon	Dinamik programlama
Kısmi optimal (-)	Tümcel (global) optimal (+)
Parametreler ayarlanır (tuning) (-)	Görünüşe göre yapılandırılmamış sonuç (-)
Basit ve hızlı hesaplama süresi (+)	Uzun hesaplama süresi (-)
Çevrimiçi veya çevrimdışı stratejiler uygulanabilir (+)	Sadece çevrimdışı stratejiler uygulanabilir (-)
Sisteme bağlı özgü kurallar uygulanır (-)	Doğrusal olmayan sınır şartları uygulanabilir (+)

Çizelge 3.7’de (-) simgesi olanlar olumsuz, (+) simgesi olanlar ise olumlu yönleri ifade etmektedir.

3.3.1. Kural Bazlı Optimizasyon

Kural bazlı kontrol sistemlerinde, kontrol üniteleri birtakım mantıksal değerlendirme algoritmaları, matematiksel modellemeler, sabitler, tablolar ve üç boyutlu haritalar içermektedirler. Çalışma modunu göz önüne alarak çalışan yazılımlar, tahrik hattındaki güç akışını gerçek zamanlı yönetmek için kullanılır.

Bölüm 3.1’de izah edilen matematiksel modellerden gelen sürüş çevrimi hızı, batarya şarj durumu, İYM açık kapalı modu gibi bilgilerin analiz edilerek İYM ve bataryanın çalışması ve/veya tork dağılımını kural bazlı kontrol stratejisi ile çalışan kontrol ünitesi yapmaktadır. Maksimum SoC kontrol stratejisi ve termostat kontrol stratejileri kural bazlı kontrol ile temin edilmektedir.



Şekil 3.13 Seri hibrit elektrikli araç için uygulanan kontrol stratejilerine göre sistemin kurallarını belirten akış şeması

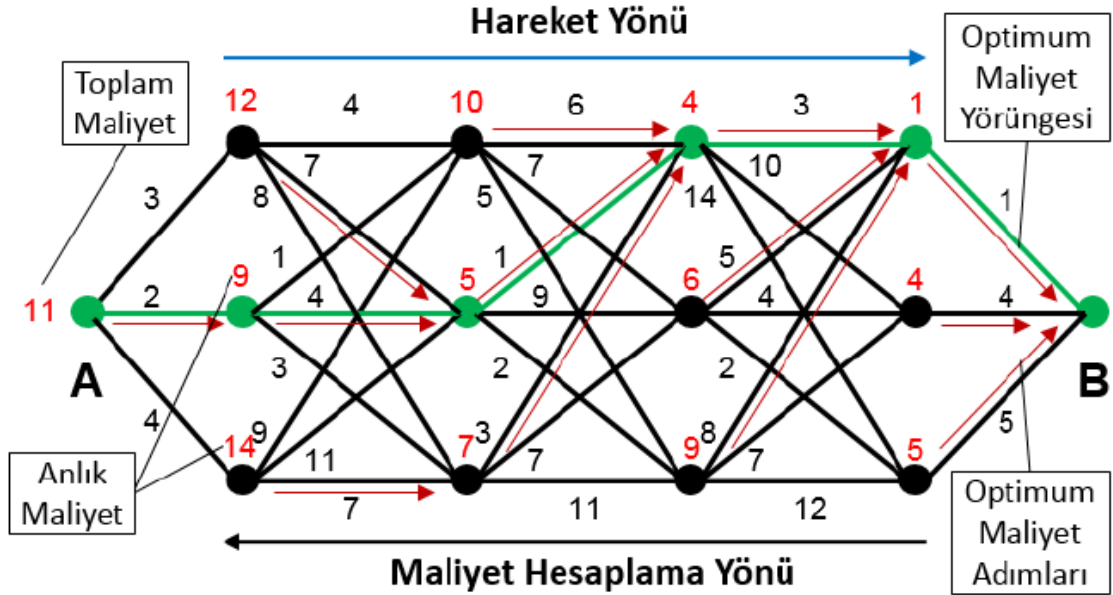
Şekil 3.13'te daha önce ifade edilen maksimum SoC kontrol stratejisi ve termostat kontrol stratejisinin birleşimi sonucunda oluşan, aracın tahrik gücü, fren gücü, EM gücü, GENSET gücü ve batarya SoC bilgilerine göre alınan kararları belirten ve kural bazlı optimizasyonun arkasındaki mantığı açıklayan akış şeması gösterilmiştir.

3.3.2. Dinamik Programlama

Dinamik programlama, hem lineer hem lineer olmayan optimizasyon problemlerini basitleştirerek alt problem haline getiren ve çözüm sunan nümerik bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, optimizasyon problemi içinde tanımlanan kontrol ve durum değişkenleri ile sınır şartları değerlendirilerek en ucuz maliyeti hesaplayan bir yörünge çizmektedir. DP, Bellman'ın optimalite ilkesine dayalı olarak, başlangıç şartlarına bağlı olmaksızın olası ihtimaller içinde en uygun kararı olarak optimal yolu izlemektedir [16].

Dinamik programlamanın maliyet hesaplama mantığı Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Örnekteki amaç fonksiyonu A noktasından B noktasına ulaşmaktır. A noktası hareket

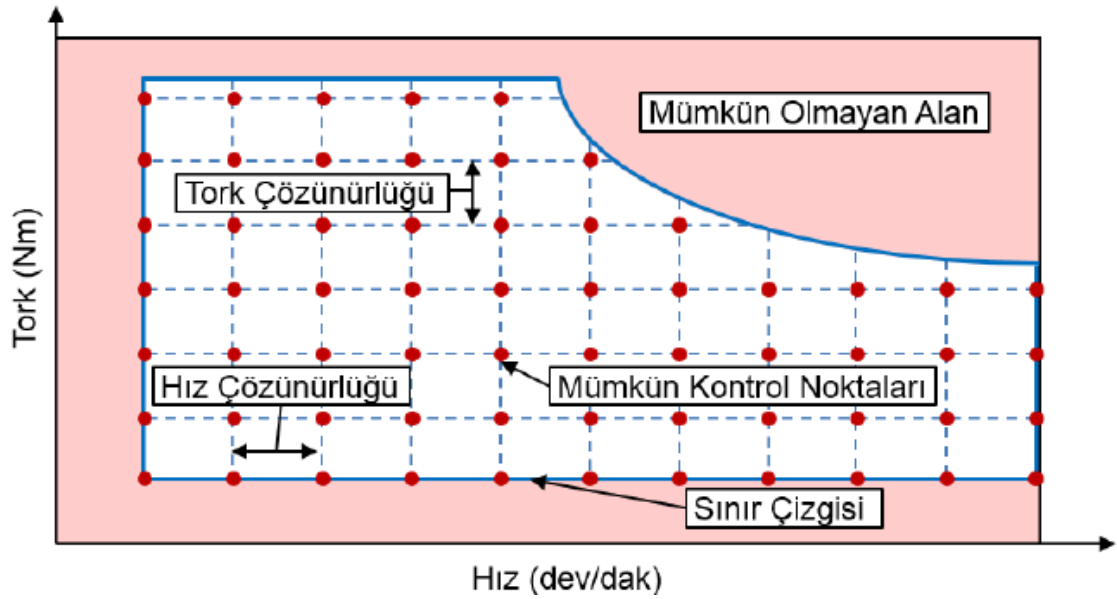
açısından başlangıç noktasıdır, ancak maliyet hesabı B noktasından A noktasına gidecek şekilde hesaplanmaktadır. Yeşil renk ile gösterilen yörünge her bir adımdaki en ucuz maliyeti seçerek A noktasından B noktasına ulaşmanın optimum yolunu temsil etmektedir. Örnek olarak gösterilen maliyet rakamları toplandığında A'dan B'ye ulaşmanın minimum maliyeti 11 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.14 Dinamik programlama optimum yörünge maliyeti hesaplama yöntemi [19]

Dinamik programlamada lineer olmayan dinamik bir sistem için sınırlandırmaları belirleyen ceza fonksiyonları kullanılmaktadır. DP, tüm varyasyonlardan içinden optimum maliyet yörüngesini hesaplayan nümerik bir yöntemdir. Bundan dolayı DP, problemi devamlı zaman durumu yerine ayrıklaştırılmış zaman durumunda çalışmaya ihtiyaç duymaktadır. Bu yöntemle DP, problemi de alt parçalara bölerek basitleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu uygulama problemin tanımında geçen kontrol ve durum değişkenleri için de geçerlidir. Kontrol ve durum değişkenlerinin ayrıklaştırılması ile oluşturulan noktalar “yörünge noktaları” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.15'te örnek bir motor için tork ve devir haritasında hazırlanmış ayrıklaştırılmış kontrol uzayı gösterilmiştir. Burada, yörünge noktaları kırmızı renkte gösterilmiştir. Mavi renkle gösterilen sınır çizgilerinin dışında kalan ve turuncu renkle görünen alan ise mümkün olmayan alandır. Yörünge noktalarının sıklığı, tork ve hız çözünürlüğünü yani durum değişkenlerinin çözünürlüğünü belirlemektedir. Doğal olarak yörünge noktalarının sayısının artması,

durum değişkenlerinin çözünlüklerinin artmasına, bu durum ise yapılan hesaplamaların süresinin artmasına sebep olmaktadır. Diğer yandan çözünlüğün artması bulunan sonucun da daha doğru olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla çözünlüğü belirlemek optimallik için önemli bir parametredir. Farklı kontrol stratejilerinin ve optimizasyon yöntemlerinin farklı çözünlükte ve farklı yaklaşımlar kullanmasından dolayı sonucun doğruluğu ile işlem hızı arasında ters oran olduğunu söylemek mümkündür. Bir başka deyişle hassasiyet ve doğruluk arasında tercih yapma durumu söz konusudur.



Şekil 3.15 Motor tork ve hızı için ayrılaştırılmış kontrol uzayı [19]

Dinamik programlamanın tanımında optimum yörünge bulunması için öncelikle bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Ardından belirlenen amaç fonksiyonuna etki eden durum ve kontrol değişkenleri ifade edilir. Son olarak ise durum ve kontrol değişkenlerinin sınır şartları belirlenerek DP'nin hangi limitlerde tarama yapacağı kararlaştırılmış olur.

Durum ve kontrol değişkenleri ayrık zamanlı dinamik sistemde gösterimi Eşitlik 3.23'te verilmiştir.

$$x_{k+1} = F_k(x_k, u_k) \quad (3.23)$$

Burada,

k : hesaplama adımı,

x_k : durum değişkeni,

u_k : kontrol değişkeni,

$F_k(x_k, u_k)$: durum ve kontrol değişkenlerine bağlı model fonksiyonu,

şeklinde ifade edilmektedir [17].

Durum ve kontrol değişkenlerine bağlı olarak amaç fonksiyonunun temsil edilmesi Eşitlik 3.24'te gösterilmiştir:

$$J = g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k) \quad (3.24)$$

Burada,

N : zaman adımı,

$g_N(x_N)$: son durumda gerçekleşen amaç fonksiyonu,

$\sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k)$: k=0'dan N-1'e zaman içerisindeki toplam amaç fonksiyonu,

şeklinde ifade edilmektedir [17].

Buna binaen bu çalışmada yapılan DP yönteminde amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$J = \min \sum_{k=0}^{N-1} m_y(x_k, u_k) \quad (3.25)$$

Burada,

m_y : İYM yakıt sarfiyatı fonksiyonunu

temsil etmektedir. Bir başka deyişle amaç, toplamda minimum yakıt sarfiyatını elde etmektir. Burada x_k olarak temsil edilen durum değişkenleri bu çalışmada batarya SoC ve araç hızı (v) şeklindedir. u_k olarak temsil edilen kontrol değişkenleri ise İYM torku (T_{ice}) ve İYM devri (ω_{ice}) şeklinde ifade edilebilir.

Amaç fonksiyonlarının kısıtlayan limitler ise şu şekildedir:

$$SoC_{\min} \leq SoC_k \leq SoC_{maks} \quad (3.26)$$

$$T_{ice,\min} \leq T_k \leq T_{ice,maks} \quad (3.27)$$

$$\omega_{ice,\min} \leq \omega_k \leq \omega_{ice,maks} \quad (3.28)$$

Burada,

SoC_{\min} : minimum batarya şarj durumu (-),
 SoC_k : anlık batarya şarj durumu (-),
 SoC_{maks} : maksimum batarya şarj durumu (-),
 $T_{ice,\min}$: minimum İYM torku (Nm),
 T_k : anlık İYM torku (Nm),
 $T_{ice,maks}$: maksimum İYM torku (Nm),
 $\omega_{ice,\min}$: minimum İYM devri (rad/s),
 ω_k : anlık İYM devri (rad/s),
 $\omega_{ice,maks}$: maksimum İYM devri (rad/s)

şeklinde ifade edilebilir.

Yapılan hesaplamaların zamanını ve doğruluk oranını etkileyen ayırıklaştırma oranları ise şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\Delta SoC = \frac{SoC_{\min} - SoC_{maks}}{N_{SoC}} \quad (3.29)$$

$$\Delta T_{ice} = \frac{T_{ice,\min} - T_{ice,maks}}{N_{T_{ice}}} \quad (3.30)$$

$$\Delta \omega_{ice} = \frac{\omega_{ice,\min} - \omega_{ice,maks}}{N_{\omega_{ice}}} \quad (3.31)$$

Burada,

ΔSoC : batarya şarj durumu ayırıklaştırma oranı (-),
 N_{SoC} : batarya şarj durumu değer sayısı (-),
 ΔT_{ice} : İYM torku ayırıklaştırma oranı (-),
 $N_{T_{ice}}$: İYM torku değer sayısı (-),
 $\Delta \omega_{ice}$: İYM devri ayırıklaştırma oranı (-),
 $N_{\omega_{ice}}$: İYM devri değer sayısı (-),

şeklinde ifade edilebilir.

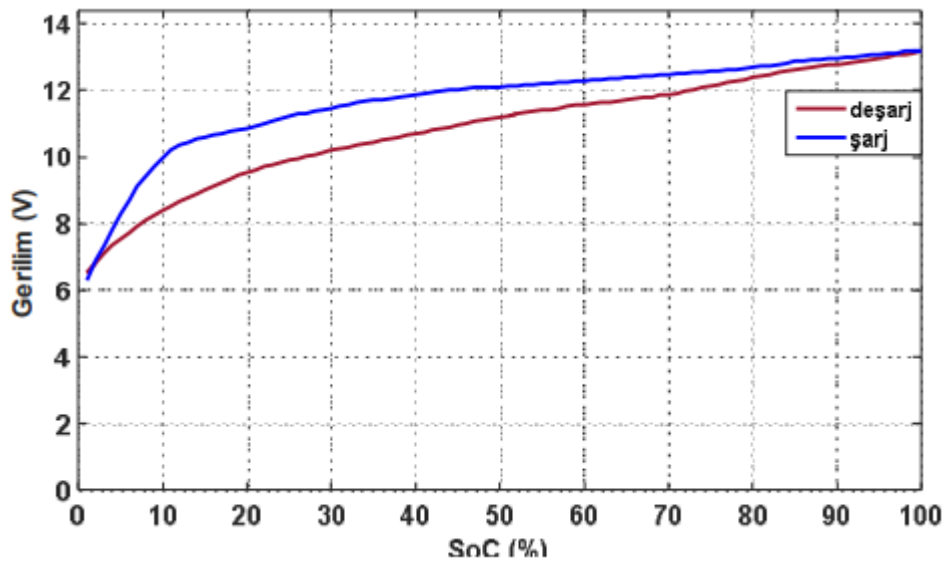
Bu çalışmada elde edilen optimizasyon sonuçları, girdileri ile beraber 4. bölümde ifade edilmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde SHEA modeline ait yakıt sarfiyatı optimizasyonu sonuçları açıklanmıştır. Öncelikle modelin başlangıçtaki SoC değerine göre yakıt sarfiyatları incelenerek model için uygun SoC limitleri belirlenmiştir. Ardından, belirlenen SoC limitlerine göre SHEA kontrol stratejilerini içermek koşulu ile yapılan kural bazlı optimizasyon ve dinamik programlama sonuçları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunun güvenilirliğini artırmak amacıyla aynı çalışma iki farklı sürüş çevrimi için yapılmıştır.

4.1. Batarya SoC'nin Yakıt Sarfiyatına Etkisi

Bölüm 3.1.5'te matematiksel olarak izah edilen batarya modelinde görüldüğü üzere batarya SoC'si bataryadan çekilen akıma, akım ise birim zamanda geçen elektrik yüküne bağlıdır. Coulomb cinsinden ifade edilen elektrik yükü bataryanın şarj veya deşarj olması konusunda bilgi vermektedir. Coulomb sayma metodu ile batarya SoC'sini belirlemeye yönelik yapılan bir çalışmada Şekil 4.1'de gösterildiği üzere bataryanın şarj ve deşarj olma durumunda farklı davranışları belirtilmiştir. Dikkat çekici diğer husus ise şarj olma eğrisinin yaklaşık olarak %40'a kadar logaritmik, %40'tan sonra ise lineer davranış göstermesidir. Dolayısıyla bataryanın örneğin %20'den %30'a kadar şarj olması için gereken enerji, %50'den %60'a kadar şarj olması için gereken enerjiden yüksektir [18].



Şekil 4.1 Batarya şarj ve deşarj işlemi için SoC-gerilim ilişkisi [18]

Şekil 4.1’den anlaşıldığı üzere SHEA modelinde bataryanın başlangıç için alınan SoC değerlerinin farklı olması halinde yakıt sarfiyatının nasıl sonuçlandığı gözlemlemek adına model %40, %50 ve %60 SoC değerleri ile koşturulmuş ve Çizelge 4.1’de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Bataryanın farklı ilk SoC değerlerine göre oluşan yakıt sarfiyatları

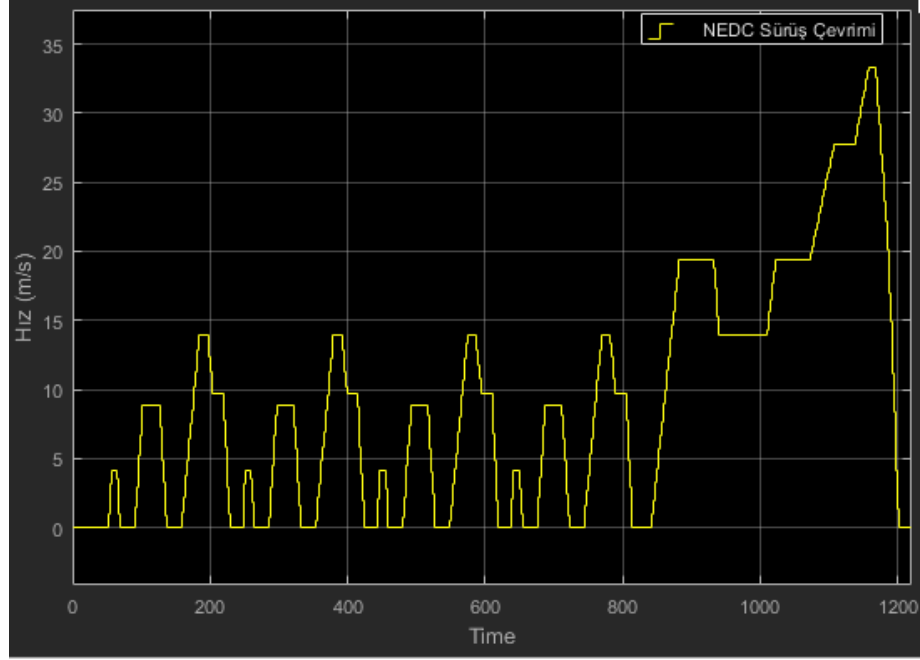
Batarya ilk SoC değeri (%)	Yakıt sarfiyatı (lt/100 km)
40	1,857
50	1,846
60	1,840

Model, eşit parametreler baz alınarak koşturulduğu halde yakıt sarfiyatı değerlerinde Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi önemli ölçüde farklı sonuçlar bulunmaktadır. Modelin %40 ile başlatılması jeneratör sisteminin %38’e düştüğü anda devreye girmesi demektir. Bu durum %58’de devreye girdiği SoC’nin %60 ile başlatıldığı duruma göre %0,91 oranında daha fazla yakıt sarfiyatına sebep olmaktadır. Diğer değerlerle kıyaslandığında minimum yakıt sarfiyatının SoC’nin %60 olduğu durumda oluştuğu görülmektedir. Ancak, SoC limiti ne kadar yüksek seçilirse SHEA’nın elektrikli sürüş modundan daha erken çıkarak jeneratör sisteminin o kadar erken devreye girmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla SoC limitinin çok yüksek seçilmesi Bölüm 3.2.2’de ayrıntılı ifade edildiği üzere SHEA’nın elektrikli araç olarak kullanım süresini kısaltmış olacaktır. Bu durum da göz önüne alınarak en uygun SoC limiti yakıt sarfiyatı açısından %60 olarak belirlenmiş ve aşağıdaki optimizasyon çalışmaları bu limit üzerinden yapılmıştır.

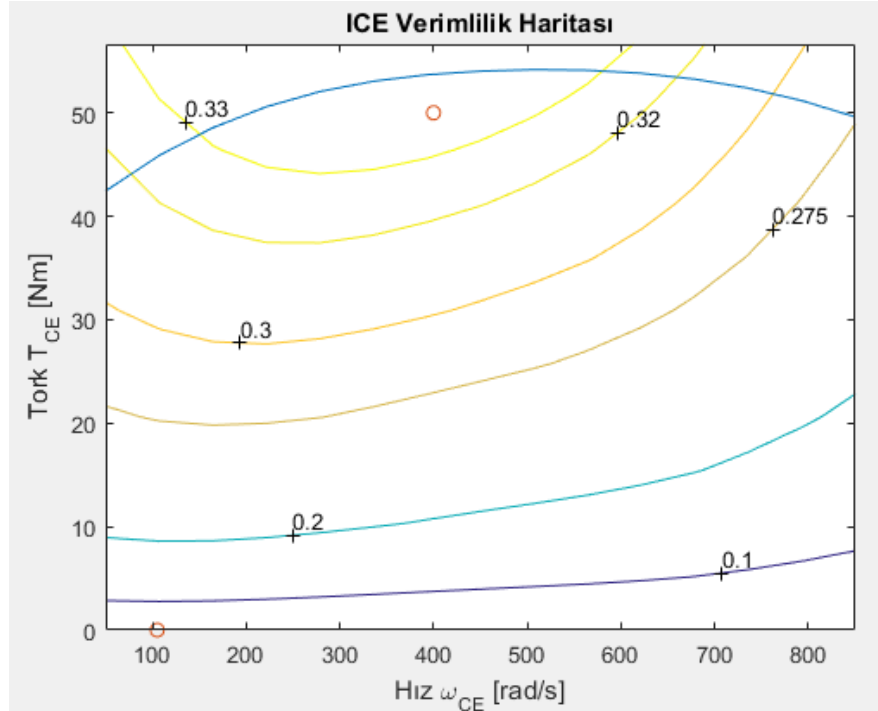
4.2. Kural Bazlı Optimizasyon Sonuçları

Bölüm 3.3.1’de açıklanan KB optimizasyon çalışması NEDC ve USA City II çevrimleri için koşturularak sonuçları hesaplatılmıştır. Modele tanımlanan NEDC çevrimi Şekil 4.2’de görüldüğü üzere tamamlanmıştır. Şekil 4.3’te İYM’nin daha önce belirlenen 20 kW gücü için optimum yakıt sarfiyatı bölgesi içerisinde seçilen çalışma noktası verilmiştir. İYM’ye bağlı olarak çalışan elektrik jeneratörüne ait verimlilik haritası ise Şekil 4.4’te verilmiştir. Çalışmanın amacına uygun olarak her iki motorun veriminin

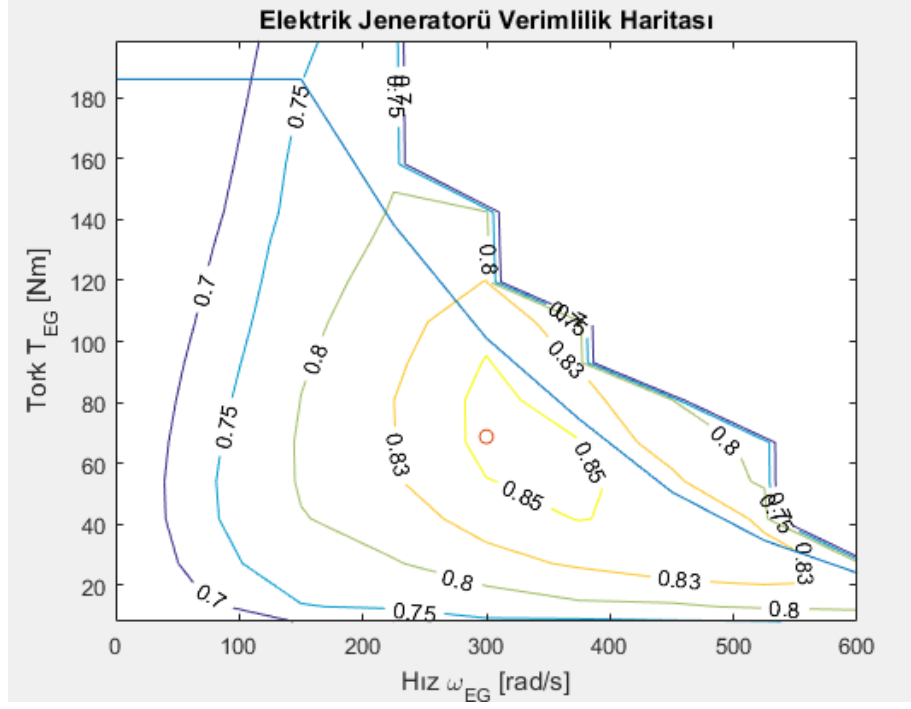
maksimum olduğu bölgede çalıştığı görülmektedir. İYM ve jeneratörden oluşan GENSET'in çalışma noktaları KB optimizasyonda her iki sürüş çevrimi için eşit tutulmuştur.



Şekil 4.2 Modelde koşturulan NEDC sürüş çevrimi

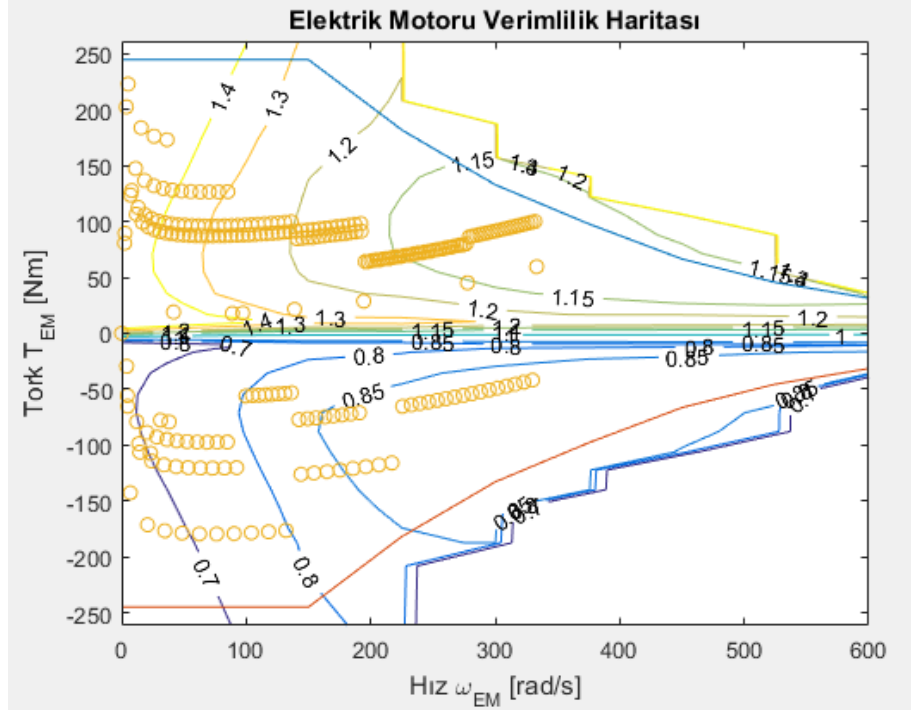


Şekil 4.3 KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin İYM çalışma noktaları



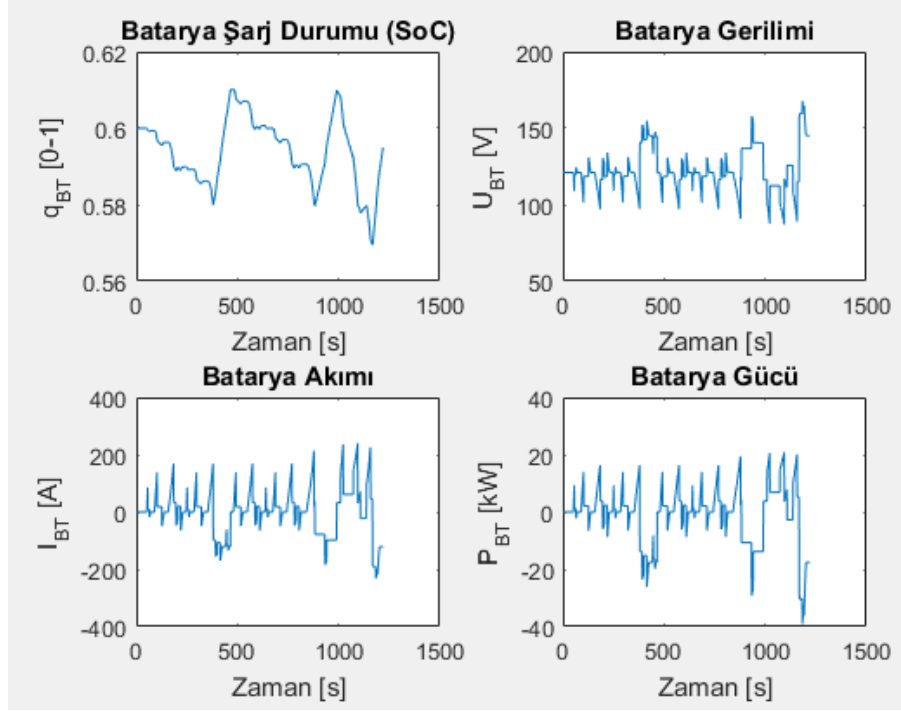
Şekil 4.4 KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin elektrik jeneratörü çalışma noktaları

NEDC sürüş çevriminin sonucunda aracı süren EM, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere tüm çalışma noktalarında aracı tahrik edebilmiştir. Aracın hızı arttıkça EM veriminin arttığı görülmektedir. Ancak bu durum sürüş çevrimi ile ilişkili olup bu çalışmada EM veriminin artırılması hedeflenmemiştir. Şekil 4.5'ten çıkarılan bir başka sonuç ise aracın geri kazanımlı frenlemeden faydalandığıdır. Torkun eksi olduğu çalışma noktalarında araç geri kazanımlı frenleme modunda çalışmakta ve EM bataryayı şarj etmektedir. Geri kazanımlı frenlemeden kazanılan enerji sürüş çevrimine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.5 KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşuturulan modelin EM çalışma noktaları

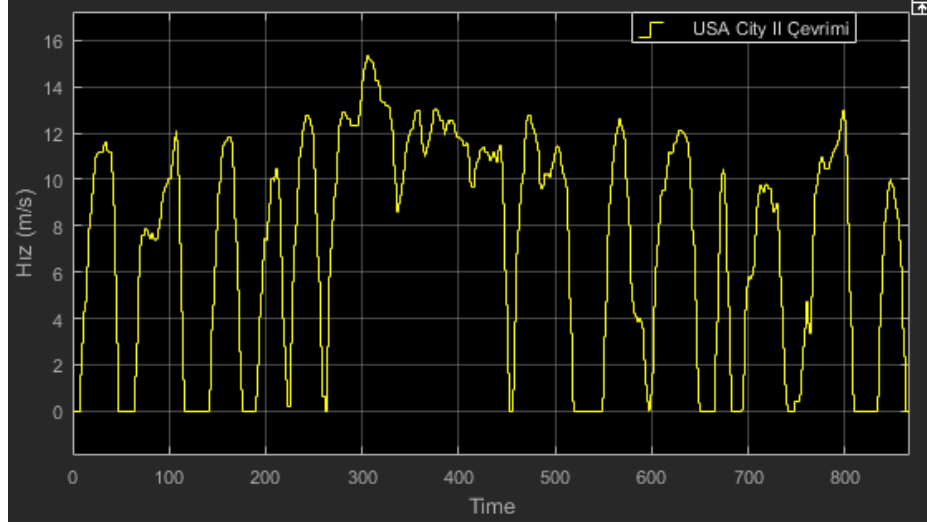
NEDC çevriminin sonucunda oluşan bataryaya ait veriler Şekil 4.6’da gösterilmiştir. KB optimizasyonda maksimum SoC ve termostat kontrol stratejileri uygulanmıştır. “Batarya Şarj Durumu” grafiğinde görüldüğü üzere batarya %58 seviyesine geldiği anda GENSET devreye girmektedir. Böylece batarya şarj tüketim (charge depletion) modundan şarj koruma (charge sustaining) moduna geçmiştir. Sürüş çevrimine bağlı olarak değişim gösteren SoC grafiği yaklaşık olarak başladığı nokta olan %60 seviyesinde çevrimi tamamlamıştır. Ayrıca, şekilden bataryaya ait gerilim, akım ve güç değerlerinin zamana göre değişimi okunmaktadır. Batarya gücünün eksi olduğu durumlar geri kazanımlı frenleme modlarını ifade etmektedir. Eşitlik 3.12’de ifade edildiği gibi akım ve gerilim ters orantılı olduğu için akımın arttığı zaman dilimlerinde gerilimin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.6 KB yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin batarya verileri

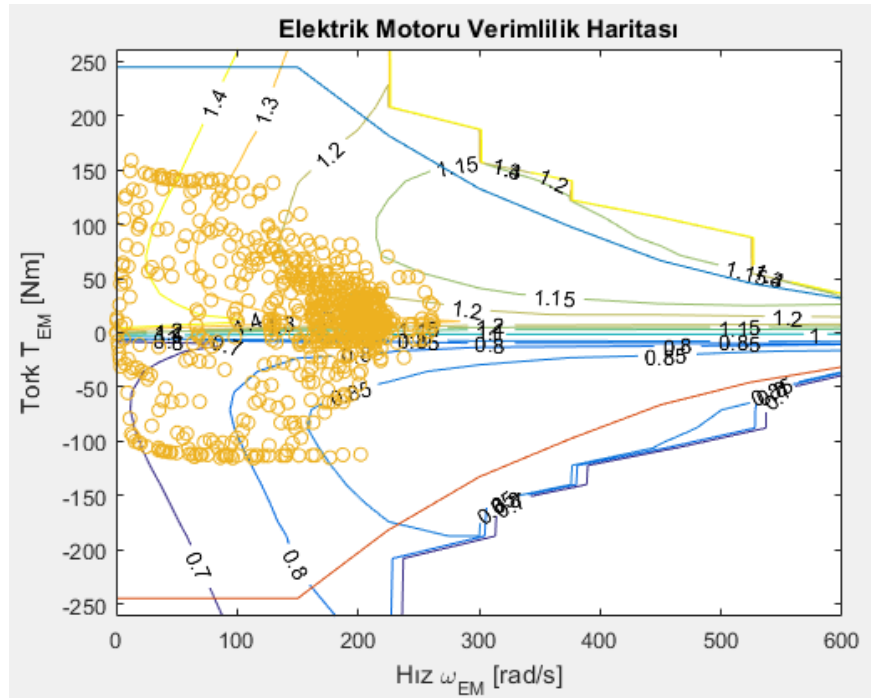
NEDC çevrimi için koşturulan menzil arttırıcı SHEA modelinin yakıt sarfiyatı 1,840 lt/100 km olarak bulunmuştur. Toplam yakıt sarfiyatı ise 149,9 g olarak hesaplanmıştır. Dinamik programlama ile yapılacak olan yakıt sarfiyatı optimizasyonunun güvenilirliğini artırmak adına SHEA'nın daha avantajlı olduğu şehir içi çevrim olan USA City II sürüş çevriminde de KB optimizasyon yöntemiyle model koşturulmuştur.

USA City II sürüş çevriminin modelde koşturulmuş görüntüsü Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu çevrim bir şehir içi sürüş çevrimi olduğu için aracın sürekli dur-kalk yaptığı görülmektedir. Bu durum geri kazanımlı frenleme modunun da daha sık olması anlamına gelecektir.



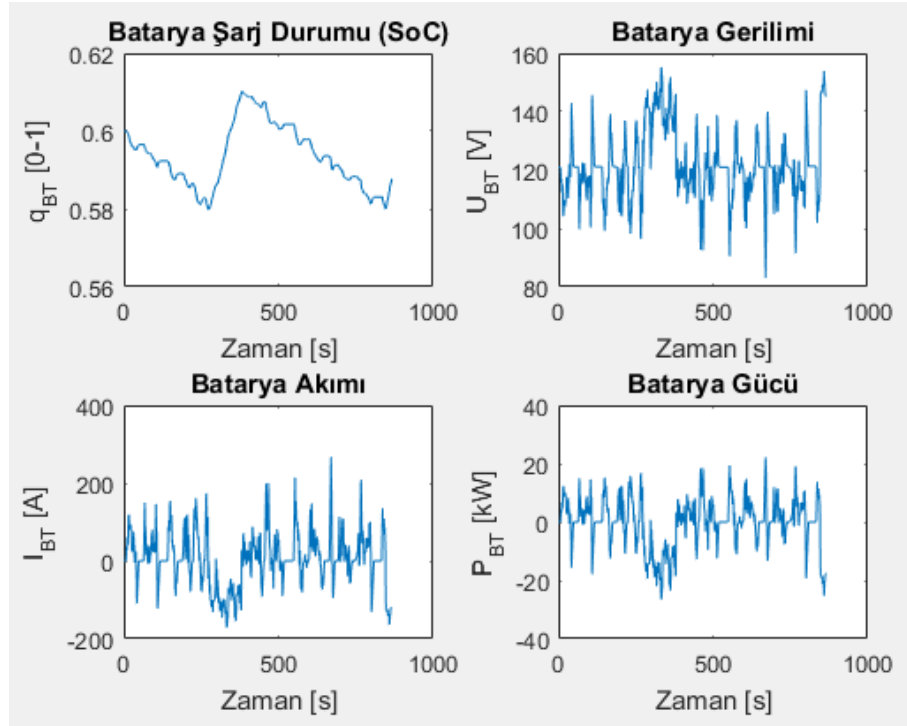
Şekil 4.7 Modelde koşturulan USA City II sürüş çevrimi

USA City II sürüş çevriminde EM'nin çalıştığı noktalar Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Sürüş çevriminden de tahmin edildiği üzere çalışma noktalarının daha çok düşük devirlerde ve düşük tork aralığında olduğu görülmektedir. NEDC çevrimiyle kıyaslandığında çalışma noktalarının daha iç içe olduğu ve geri kazanımlı frenlemeden daha fazla faydalandığı söylenebilir.



Şekil 4.8 KB yöntemi ile USA City II çevrimi için koşturulan modelin EM çalışma noktaları

Modelin şehir içi çevrim için koşturulan durumdaki batarya bilgileri Şekil 4.9’da verilmiştir. NEDC çevrimiyle kıyaslandığında en dikkat çekici nokta akım, gerilim ve güç değerlerinin sık ve keskin değişimleridir. Bataryadan ani olarak yüksek akım çekmenin batarya sağlığını olumsuz etkileyeceği söylenebilir [18]. Ancak, bu çalışmada batarya sağlığından ziyade batarya şarj durumu ile ilgilenilmiştir. SoC’ye bakıldığında yaklaşık olarak %59 gibi bir değerde çevrimi tamamladığı görülmektedir.



Şekil 4.9 KB yöntemi ile USA City II çevrimi için koşturulan modelin batarya verileri

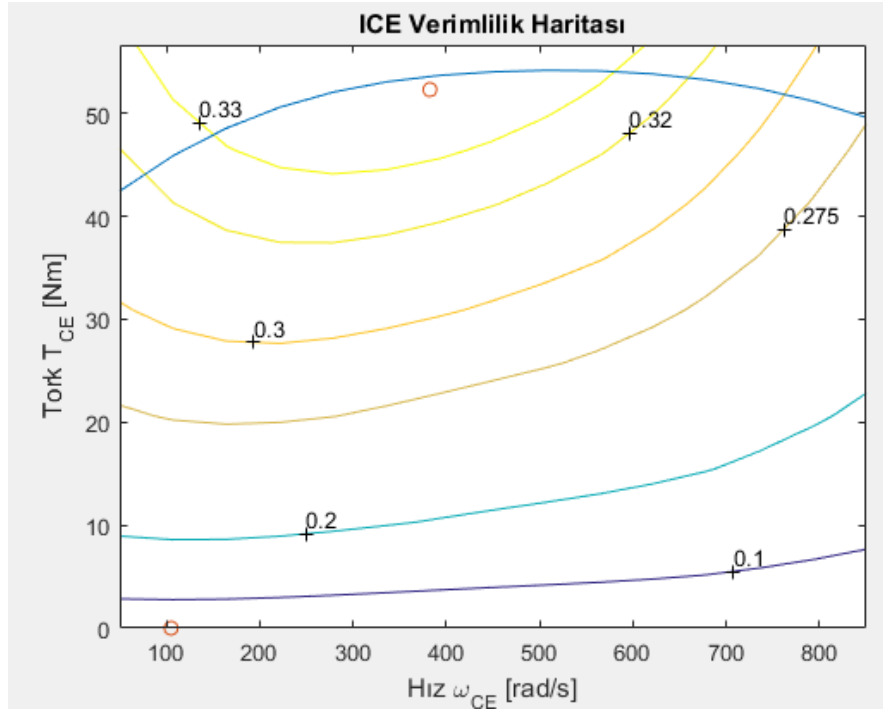
Şehir içi çevrimde yakıt sarfiyatı 1.280 lt/100 km olarak ölçülmüştür. Toplam yakıt sarfiyatı ise 59,25 g olmuştur.

Her iki çevrim Bölüm 4.3’te DP yöntemiyle koşturulmuş ve iki yöntemin sonuçları kıyaslanmıştır. Böylece hem KB ve DP yöntemleri hem de iki farklı sürüş çevriminin sonuçları 5. Bölüm’de tartışılacaktır.

4.3. Dinamik Programlama Optimizasyon Sonuçları

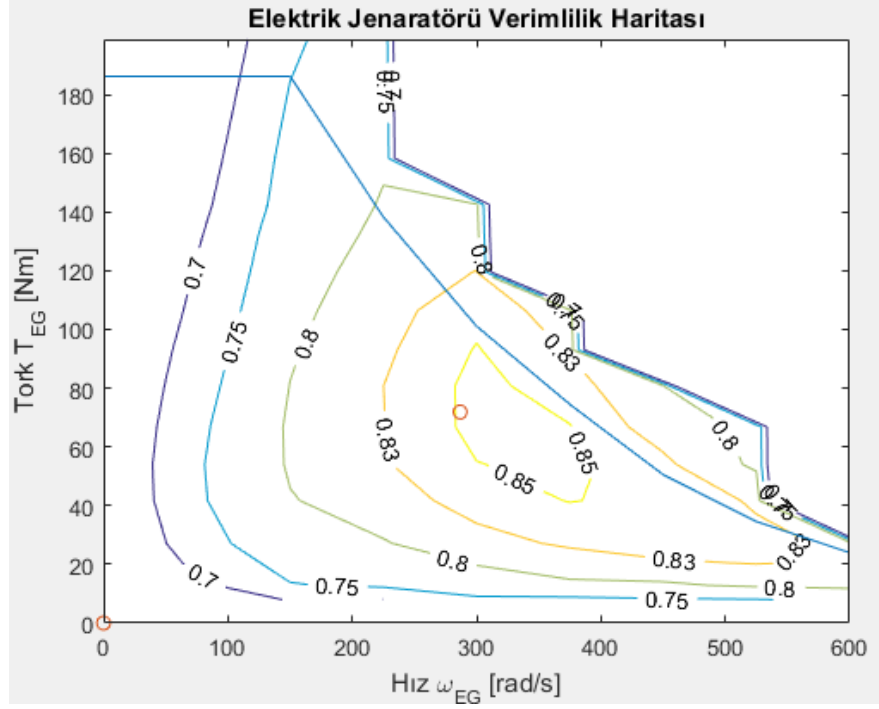
Bu bölümde KB optimizasyon yönteminde koşturulan NEDC ve USA City II çevrimlerinin Bölüm 3.3.2’de izah edilen DP yöntemiyle çalıştırılan modelin yeni tork ve devir değerleri ile beraber yakıt sarfiyatının sonuçları ifade edilecektir.

NEDC sürüş çevriminde DP sonucu olarak İYM’nin 20 kW sabit güç eğrisi için optimum çalışma noktaları $w=377,72$ rad/s, $T=52,95$ Nm olarak bulunmuştur. İYM’ye ait verim haritası çalışma noktasıyla beraber Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 DP yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin İYM çalışma noktaları

İYM’ye bağlı olarak çalışan jeneratörün çalışma noktası ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Burada önemli bir nokta şudur: İYM’nin veya jeneratörün tek başına en verimli çalışma noktaları değil, bu iki elemanın birlikte en verimli çalıştığı noktalar bulunmuştur. Yani, İYM daha verimli bir noktada çalışabilir ancak jeneratör verimi ile düşünüldüğünde GENSET verimi o noktada maksimum olmayacaktır.



Şekil 4.11 DP yöntemi ile NEDC çevrimi için koşturulan modelin elektrik jeneratörü çalışma noktaları

NEDC çevrimi için bulunan yeni tork ve devirlerde koşulan modelin sonucunda yakıt sarfiyatı 1,830 lt/100 km olmuştur. Aracın toplam yakıt sarfiyatı ise 148,9 g olarak bulunmuştur.

DP ile yapılan optimizasyon çalışmasını doğrulamak adına model USA City II çevriminde koşturulmuştur. Yine burada GENSET veriminin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. USA City II çevriminde aracın yakıt sarfiyatı 1,265 lt/100 km, toplam yakıt sarfiyatı ise 58,56 g olarak bulunmuştur. Bulunan sonuçların değerlendirilmesi 5. Bölüm’de yapılmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada seri hibrit elektrikli bir binek aracın enerji yönetimi stratejileri uygulanarak modellenmesi ve yakıt sarfiyatının optimizasyonu yapılmıştır. Araç, Matlab Simulink ortamında tasarlanarak SHEA'ya ait kontrol stratejileri uygulanmıştır. Böylece, SHEA yoldan istenen tahrik gücünü sağlarken aynı zamanda batarya şarj durumunu maksimumda tutmak için aracın çalıştığı noktalara göre İYM devreye girecek ve araç, batarya şarj durumuna göre elektrikli araç modu, hibrit araç modu, geri kazanımlı frenleme modu veya sadece batarya şarj modunda çalışacaktır.

Modelde, GENSET'in devreye gireceği batarya SoC seviyesinin belirlenmesi için batarya SoC'unun %40, %50, %60 ve %70 değerlerinde şarj koruma moduna geçmesi halinde araçta oluşan yakıt tüketimi hesaplatılmıştır. Alınan sonuçlara göre batarya SoC'unun %40 ile başlatılması durumunda yakıt tüketimi 1,857 lt/100 km olurken, %50 için 1,846 lt/100 km, %60 için 1,840 lt/100 km ve %70 için 1,846 lt/100 km olmuştur. Böylece, batarya SoC'unun %40 yerine %60 seçilmesi ile %0,91 oranında yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Bu durumun oluşma sebebi ise bataryanın SoC'unu belirleyen elektrik yükünün aynı oranda bataryayı şarj etmek için farklı yüzde seviyelerinde farklı enerji gerektirmesinden kaynaklanmasındır. Bataryanın şarj akımı düşük seviyelerde daha yüksek olurken SoC seviyesi yükseldikçe logaritmik olarak azalmaktadır. Dolayısıyla batarya SoC'u %40 iken %41 seviyesine getirmek için gereken enerji, %60 iken %61 seviyesine getirmek için gereken enerjiden fazla olmaktadır. Ancak, SoC seviyesinin yükseltilmesi GENSET'in dolayısıyla da İYM'nin daha erken çalışması anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle aracın %60 seviyesinden %40'a kadar batarya enerjisinden faydalanmak yerine %60 seviyesinde jeneratör sistemi devreye girerek batarya şarj durumunu koruma moduna geçmiş olacak ve bu durumda araç fosil yakıt sarf etmiş olacaktır. Bu çalışmada İYM'nin yakıt sarfiyatının düşürülmesi hedeflendiği için modelin %60 SoC değeri ile koşturulması kararlaştırılmıştır. Ancak, aradaki batarya enerjisi farkı ile İYM'nin yakıt sarfiyatı farkı arasında ilişki kurulduğunda belli bir mesafeye kadar %40 ile çalıştırmak, belli bir mesafeden sonra ise %60 ile çalıştırmak daha doğru tercih olacaktır.

Menzil arttırıcı görevi gören GENSET'in belirli güç altında en iyi tork ve devir değerleri KB ve DP yöntemleri ile hesaplanarak optimize edilmiştir. Model, NEDC ve USA City II çevrimleri için koşturulmuş ve yakıt sarfiyatı değerleri NEDC çevrimi için Çizelge 5.1'de, USA City II çevrimi için ise Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi sonuçlanmıştır.

Çizelge 5.1 NEDC çevrimi yakıt sarfiyatı sonuçları

	Batarya SoC Başlangıcı (%)	Yakıt tüketimi (lt/100 km)	İlk değere göre değişim miktarı (%)	Toplam yakıt sarfiyatı (g)	İlk değere göre değişim miktarı (%)
KB	40	1,857	-	151,3	-
	60	1,840	-0,91	149,9	-0,92
DP	60	1,830	-1,45	148,9	-1,58

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere modelin NEDC çevrimi için KB yöntemi sonucunda %60 SoC seviyesi için yakıt tüketimi 1,840 lt/100 km iken bu değer DP yöntemi ile İYM'nin tork ve devirinin optimize edilmesi ile 1,830 lt/100 km'e düşmüştür. Böylece, %60 SoC için İYM'nin 20 kW güç çıkışı ile SoC seviyesi eşit tutulduğu halde yakıt sarfiyatında %0,92'lik kazanç sağlanmıştır. Bu değer SoC başlangıç değerinin %40 olduğu durumla kıyaslandığında kazanç %1,45'e çıkmaktadır. Kümülatif olarak düşünüldüğünde toplam yakıt sarfiyatı %60 SoC için 149,9 gram olurken DP yöntemi ile bu değer 148,9 grama düşmüştür. Bu açıdan bakıldığında yakıt tasarrufu %0,66 oranında olmaktadır. DP sonucunda elde edilen toplam yakıt sarfiyatı, %40 SoC başlangıç değeri ile koşturulan KB yöntemle kıyaslandığında ise kazancın %1,58'e çıktığı görülmektedir.

Çizelge 5.2 USA City II çevrimi yakıt sarfiyatı sonuçları

	Batarya SoC Başlangıcı (%)	Yakıt tüketimi (lt/100 km)	İlk değere göre değişim miktarı (%)	Toplam yakıt sarfiyatı (g)	İlk değere göre değişim miktarı (%)
KB	40	1,288	-	59,62	-
	60	1,280	-0,62	59,25	-0,62
DP	60	1,265	-1,78	58,56	-1,77

KB ile DP yöntemlerini kıyaslamak adına model, SHEA'nın daha avantajlı olduğu şehir içi çevrimi olan USA City II sürüş çevriminde de koşturulmuştur. Çizelge 5.2'de görüldüğü üzere aracın KB yöntemiyle %60 SoC başlangıç değeri için yakıt sarfiyatı 1,280 lt/100 km olurken toplam yakıt sarfiyatı ise 59,25 gram olmuştur. DP yöntemi ile yakıt sarfiyatı 1,265 lt/100 km'a toplam yakıt sarfiyatı ise 58,56 grama düşmüştür. İki yöntem arasında oluşan yakıt tasarrufu ise yakıt sarfiyatı için %1,17 olurken toplam yakıt sarfiyatına bakıldığında bu oran benzer şekilde %1,16 olmuştur. DP yöntemiyle elde edilen sonuçlar KB yöntemiyle %40 SoC başlangıç değeri için elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında kazanç yakıt sarfiyatı için %1,78 olurken toplam yakıt sarfiyatı için ise %1,77 olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, her iki çevrimin sonucuna bakıldığında DP yöntemiyle optimize edilen İYM tork ve devir değerleri sayesinde aracın yakıt sarfiyatında azalma meydana gelmiştir. SHEA'nın prensipleri gereği İYM her zaman sabit noktada çalıştığı için bu yakıt tasarrufu araç ekonomisi açısından önemli bir kazanımdır. Bu çalışmaya gelecekte farklı kontrol stratejileri geliştirilerek aracın daha verimli çalışması ile başta batarya ve dişli kutusu olmak üzere araca ait elemanların sabit oranlarının optimizasyonu çalışmaları eklenebilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2017.** İçten yanmalı motor yakıt sarfiyatı haritası. <http://hybridassistant.blogspot.com/2017/11/> (Erişim Tarihi: 11 Kasım 2020)
- Anonim, 2020a.** BMW i3 Range Extender modeline ait veriler. <https://www.bmw.com.tr/tr/all-models/bmw-i/i3/2020/bmw-i3-teknik-veriler.html> (Erişim Tarihi: 14 Kasım 2020)
- Anonim, 2020b.** Elektrik motoru tork ve güç grafiği. <https://firstworldmotoring.com/2015/10/14/bmw-i3-engine-performance/> (Erişim Tarihi: 18 Kasım 2020)
- Brahma, A., Guezennec, Y., Rizzoni, G. 2000.** Optimal Energy Management in Series Hybrid Electric Vehicles. *Proc. American Contr. Conf.*, 1(6): 60–64.
- Bulgu, A. E. 2010.** Tekerlek Motorlu Seri Hibrit Elektrikli Araçlar İçin Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol Ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., Emadi, A. 2005.** Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. : CRC Press
- Guzzella, L., Sciarreta A. 2005.** Vehicle Propulsion Systems. Springer, Zürich, Switzerland, 246 pp.
- Jeong, J., Lee, W., Kim, N., Stutenberg, K. 2017.** Control Analysis and Model Validation for BMW i3 Range Extender. *SAE Technical Paper*, 2017-01-1152, doi:10.4271/2017-01-1152.
- Khalid, M. 2020.** QSS Toolbox (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73483-qss-toolbox>), MATLAB Central File Exchange. (Erişim Tarihi: 09 Kasım 2020)
- Kocakulak, T. 2017.** HCCI Menzil Arttırıcı Motor Kullanılan Seri Hibrit Aracın Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Konev, A., Lezhnev, L., Kolmanovsky, I. 2008.** Control Strategy Optimization for a Series Hybrid Vehicle. *SAE SP*, 2006-01-0663.
- Mi, C., Masrur, M. A., Gao, D. W. 2011.** Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives. John Wiley & Sons, Ltd, Sussex, USA, 10 pp.
- Onori, S., Serrao, L., Rizzoni, G. 2016.** Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies. Springer, London, UK, 3 pp.

Öztürk, H. A. 2010. İstanbul Şehir Çevriminin Abd Ve Avrupa Test Çevrimleri İle Emisyon Faktörleri Ve Yakıt Tüketimi Açısından Deneysel Olarak Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul.

Ripaccioli, G., Bernardini, D., Di Cairano, S., Bemporad, A., Kolmanovsky, I.V. 2010. A Stochastic Model Predictive Control Approach for Series Hybrid Electric Vehicle Power Management. *2010 American Control Conference*, June 30-July 02, 2010 Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA. 5844-5849.

Robinet, R. D. III, Wilson, D. G., Richard, E. G. 2005. Applied Dynamic Programming for Optimization of Dynamical Systems, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, USA.

Sundström, O., Guzzella, L. 2009. A Generic Dynamic Programming Matlab Function, *18th IEEE International Conference on Control Applications*, July 8-10, 2009, Saint Petersburg, Russia, 1625-1630.

Tezde, E. İ., Okumuş, H. İ. 2018. Batarya Modelleri ve Şarj Durumu (SoC) Belirleme, *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1): 21-25.

Timuçin, B. 2016. Hibrit Elektrikli Otobüste (Phileas) Sürücü Sistemlerinin Modellenmesi Ve Güç Aktarma Organlarının Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Vatan, O. 2011. Modelling And Simulation of Longitudinal Dynamics of Electric Vehicles, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul.

Wipke, K. B., Cuddy, M. R. 2014. Using an Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) to Guide Hybrid Vehicle Propulsion System Development, UNT Digital Library, August 1, 1996 Golden, Colorado, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre Dereli

Doğum Yeri ve Tarihi : Yalova / 04.03.1996

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Düzce Akçakoca Anadolu Öğretmen Lisesi

Lisans : FMV Işık Üniversitesi, Mühendislik Fak., Otomotiv Müh.

(Tam Burslu, İngilizce)

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Uludağ Üniversitesi (Ağustos 2019-)

İletişim (e-posta) : emredereli@uludag.edu.tr